İLERİ MALZEMELER VE MODERN ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

GÜNCEL DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR
HASAN KÖTEN











BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

İleri Malzemeler ve Modern Üretim Teknolojileri Güncel Değerlendirmeler

Editör: HASAN KOTEN

ISBN: 978-625-5474-94-0

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İleri Malzemeler ve Modern Üretim Teknolojileri Güncel Değerlendirmeler

Önsöz

Bilim ve teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler, ileri malzemelerin tasarımı, geliştirilmesi ve modern üretim teknolojilerinin uygulanması süreçlerinde önemli dönüşümleri beraberinde getirmiştir. Endüstri 4.0, dijital üretim sistemleri, eklemeli imalat, sürdürülebilir üretim yaklaşımları ve yüksek performanslı mühendislik malzemeleri gibi alanlarda elde edilen ilerlemeler, akademik araştırmalar ile endüstriyel uygulamalar arasındaki etkileşimi her geçen gün daha da güçlendirmektedir. Bu kapsamda hazırlanan İleri Malzemeler ve Modern Üretim Teknolojileri: Güncel Gelişmeler adlı eser, malzeme bilimi ve üretim teknolojileri alanında yürütülen güncel araştırmaları bir araya getirerek araştırmacılar, akademisyenler, lisansüstü öğrenciler ve sektör profesyonelleri için kapsamlı bir başvuru kaynağı oluşturmayı amaçlamaktadır. Kitapta; ileri mühendislik malzemeleri, nanomalzemeler, kompozit sistemler, karakterizasyon yöntemleri, yüzey mühendisliği uygulamaları, eklemeli imalat teknolojileri, akıllı üretim sistemleri, sürdürülebilir üretim yaklaşımları ve yenilikçi üretim süreçlerine ilişkin güncel bilimsel çalışmalar yer almaktadır. Alanında uzman araştırmacılar tarafından hazırlanan bölümler, mevcut bilgi birikimini değerlendirmekle birlikte gelecekte gerçekleştirilecek araştırmalara ve teknolojik gelişmelere ışık tutmayı hedeflemektedir. Bilimsel bilginin paylaşılmasına, disiplinler arası iş birliklerinin geliştirilmesine ve yenilikçi araştırmaların desteklenmesine katkı sağlaması amacıyla hazırlanan bu eserin, ilgili alanda çalışan tüm araştırmacılar ve uygulayıcılar için yararlı bir kaynak olacağına inanıyoruz. Kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm bölüm yazarlarına, bilimsel değerlendirme sürecinde katkı sunan hakemlere ve yayın aşamasında destek veren tüm paydaşlara teşekkür eder, bu çalışmanın ileri malzemeler ve modern üretim teknolojileri alanındaki bilimsel gelişmelere katkı sağlamasını ve yeni araştırmalara ilham vermesini temenni ederiz.

Prof. Dr. Hasan KÖTEN
Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

ÇELİKLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN LAZER ERGİTME YÖNTEMLERİ İLE ALAŞIMLANDIRILMASI VE GELİŞTİRİLMESİ 1

İHSAN KIRIK, ANIL İMAK, MUSA KILIÇ

ALÇI ESASLI KOMPOZİT LEVHALAR: ÜRETİM YÖNTEMLERİ, MALZEME ÖZELLİKLERİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE KARBON AYAK İZİ PERSPEKTİFİNDEN GELECEK ÖNGÖRÜLERİ 29

GONCA DÜZKALE SÖZBİR

HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİNDE GELİŞMİŞ SERAMİK MATRİS KOMPOZİTLER VE INCONEL SÜPER ALAŞIMLAR 46

HASAN KOTEN

AŞINMAYA DİRENÇLİ DEMİR ESASLI ALAŞIM TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU 130

HASAN İSMAİL YAVUZ, SERKAN OKTAY, ONUR MURATAL, FUNDA GÜL KOC, EGEMEN AVCU, RIDVAN YAMANOĞLU

DEMİR ESASLI ALAŞIMLAR VE SERT KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ: ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR VE PAZAR ANALİZİ 148

HASAN İSMAİL YAVUZ, FUNDA GÜL KOC, RIDVAN YAMANOĞLU

ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR DÖNÜŞÜMÜ: KAĞIT FABRİKASI ATIKSU ÇAMURLARININ YAPI MALZEMELERİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ 168

ÜMMÜHAN BİRSEN KUZKAYA, TAMER SÖZBİR, CENGİZ AYHAN ZIBA, GONCA DÜZKALE SÖZBİR

MANUFACTURING TECHNOLOGIES, MATERIAL SELECTION, PROCESS CHARACTERISTICS, AND AUTOMOTIVE APPLICATIONS OF

İÇİNDEKİLER

FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES 184
ERCAN ŞİMŞİR

BÖLÜM 1

ÇELİKLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN LAZER ERGİTME YÖNTEMLERİ İLE ALAŞIMLANDIRILMASI VE GELİŞTİRİLMESİ

İHSAN KIRIK[1]

ANIL İMAK[2]

MUSA KILIÇ [3]

Özet

Çelikler, yüksek mukavemet, tokluk, işlenebilirlik, kaynaklanabilirlik ve ekonomik üretim olanakları nedeniyle mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan metalik malzemeler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, birçok makine ve konstrüksiyon elemanının servis ömrünü belirleyen temel hasar mekanizmaları malzemenin hacminden ziyade yüzeyinde meydana gelmektedir. Aşınma, korozyon, erozyon, yüzey yorulması ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon gibi hasarlar, özellikle yüzeyin çevre ve karşı malzeme ile doğrudan etkileşim içerisinde olduğu uygulamalarda önemli performans kayıplarına yol açmaktadır. (Buytoz & Ulutan, 2006) Bu nedenle çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, malzemenin tamamının kimyasal bileşiminin değiştirilmesine göre daha ekonomik ve işlevsel bir yaklaşım sunmaktadır. Yüzey mühendisliği kapsamında uygulanan ergitme, yüzey sertleştirme, alaşımlama ve kaplama işlemleri ile yalnızca yüzey bölgesinin kimyasal bileşimi ve mikroyapısı değiştirilebilmektedir. Özellikle lazer teknolojileri; yüksek enerji yoğunluğu, hassas bölgesel işlem, düşük deformasyon, yüksek ısıtma ve soğutma hızları yanında otomasyona uygunluk gibi özellikleri nedeniyle çeliklerin yüzey modifikasyonunda önemli bir yere sahiptir (Benyounis & Olabi, 2008; Steen & Mazumder, 2010). Bu bölümde çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde

kullanılan yüzey ergitme ve alaşımlama yöntemlerinin temel prensipleri ele alınmış; lazer yüzey ergitme, lazer yüzey sertleştirme, lazer yüzey alaşımlama ve lazer kaplama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bunun yanında işlem parametrelerinin mikroyapı, sertlik, aşınma ve korozyon davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve yöntemlerin endüstriyel uygulamaları tartışılmıştır. Ayrıca, söz konusu tekniklerin uygulanmasına ilişkin kapsamlı bir literatür incelemesi sunulmakta ve girdi parametreleri ile çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Ayrıca literatür incelemesi, kaynak bağlantısı özelliklerine göre sınıflandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelikler, yüzey ergitme, lazer yüzey işlemi, yüzey alaşımlama, lazer kaplama, yüzey sertleştirme, aşınma, korozyon, mikroyapı.

1. Giriş

Çeliklerin mühendislik uygulamalarındaki kullanım alanlarının genişlemesi, farklı çalışma koşullarında daha yüksek servis ömrü ve güvenilirlik gereksinimini beraberinde getirmiştir. Özellikle dişliler, miller, kalıplar, kesici takımlar, rulman elemanları, pompa parçaları, valfler ve madencilik ekipmanları gibi parçalar çalışma sırasında sürtünme, darbe, basınç, korozif ortam ve yüksek sıcaklık gibi etkiler altında kalmaktadır. Bu koşullar altında oluşan hasarın önemli bir bölümü yüzeyde başlamakta ve daha sonra malzemenin iç kısımlarına doğru ilerlemektedir. Bu nedenle malzemenin yalnızca çekme dayanımı veya darbe tokluğu gibi hacimsel özelliklerinin yüksek olması, servis performansını garanti etmemektedir. Yüzey sertliği, mikroyapı, kimyasal bileşim, pürüzlülük ve artık gerilmeler de parçanın kullanım ömrü üzerinde belirleyici olmaktadır(Totten, 2006).

Yüzey mühendisliği yaklaşımında amaç, malzemenin tamamını değiştirmeden yalnızca yüzey bölgesinin belirli özelliklerini geliştirmektir. Böylece yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip bir yüzey tabakası ile tokluk ve yük taşıma kapasitesi yüksek bir çekirdek bölgesi aynı parçada birleştirilebilmektedir(Kırık, 2015). Lazer teknolojisinin gelişmesiyle birlikte yüzey mühendisliğinde lazer yüzey sertleştirme, lazer yüzey ergitme, lazer alaşımlama ve lazer kaplama gibi yöntemler yaygınlaşmıştır. Lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğu, enerjinin küçük bir bölgeye kontrollü biçimde aktarılmasına olanak verir. Bunun sonucunda hızlı ısıtma ve soğuma gerçekleşmekte ve geleneksel işlemlerle elde edilmesi güç olan mikroyapılar oluşturulabilmektedir(Steen & Mazumder, 2010). Lazer dönüşüm sertleştirmesinde çelik yüzeyi östenitik bölgeye hızlı şekilde ısıtılır ve lazer kaynağı uzaklaştırıldığında yüzey, ana malzemeye doğru gerçekleşen ısı iletimi sayesinde kendiliğinden soğur. Uygun çeliklerde bu işlem sonucunda martenzitik yapı meydana gelir ve yüzey sertliği ile aşınma direnci artırılır (Babu & Marimuthu, 2019).

Çelik altlıkların korozyon direncinin artırılmasına yönelik yüzey modifikasyonu çalışmalarında, lazer kaplama yöntemiyle fonksiyonel alaşım katmanlarının üretilmesi son yıllarda öne çıkan stratejilerden biridir. Literatürde yapılan bir çalışmada (Deng, 2026), düşük karbonlu Q235 çelik altlıklar üzerinde lazer kaplama yöntemiyle Ni-Cu koruyucu kaplamalar hazırlanmış ve süreç parametrelerinin (lazer gücü ve tarama hızı) mikroyapısal evrim, mikrosertlik ve elektrokimyasal performans üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron prob mikroanalizi (EPMA) ile gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları; kaplamaların temel olarak bakırca zengin ve bakırca fakir bölgeler barındıran, yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı Ni-Cu katı çözeltilerinden meydana geldiğini göstermiştir.

2. Yüzey Mühendisliği ve Çeliklerde Yüzey Özellikleri

Yüzey mühendisliği; malzemenin yüzeyinin kimyasal, fiziksel, mekanik veya mikroyapısal özelliklerini değiştirerek servis performansını artırmayı amaçlayan işlemlerin genel adıdır.

Çelik yüzeylerinde geliştirilmesi hedeflenen başlıca özellikler:

- Yüksek Yüzey Sertliği,
- Aşınma Direnci,
- Korozyon Direnci,
- Yorulma Dayanımı,
- Erozyon Direnci,
- Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Direnci,
- Düşük Sürtünme Davranışı,
- Uygun Yüzey Pürüzlülüğü,
- Kontrollü Artık Gerilme Dağılımıdır.

Yüzey işlemlerinde önemli noktalardan biri, yüzey özellikleri ile çekirdek özellikleri arasında optimum dengenin sağlanmasıdır. Çok sert bir yüzey tabakasının gevrek olması, servis sırasında çatlak oluşumuna ve tabakanın kopmasına neden olabilir. Buna karşılık düşük sertlikte bir yüzey, özellikle abrazif veya yapışmalı aşınmanın hâkim olduğu koşullarda yeterli servis ömrü sağlayamayabilir. Dolayısıyla yüzey modifikasyonunun başarısı yalnızca mikrosertlik değeriyle değil; mikroyapı, faz dağılımı, yüzey bütünlüğü, artık gerilme ve tribolojik davranış birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir.

3. Çelik Yüzeylerinin Geliştirilmesinde Kullanılan Yöntemler

Çelik yüzeylerinin geliştirilmesinde kullanılan yöntemler genel olarak dört grupta değerlendirilebilir:

1. Termal yüzey işlemleri,
2. Termokimyasal yüzey işlemleri,
3. Yüzey kaplama işlemleri,
4. Yüzey ergitme ve alaşımlama işlemleri.

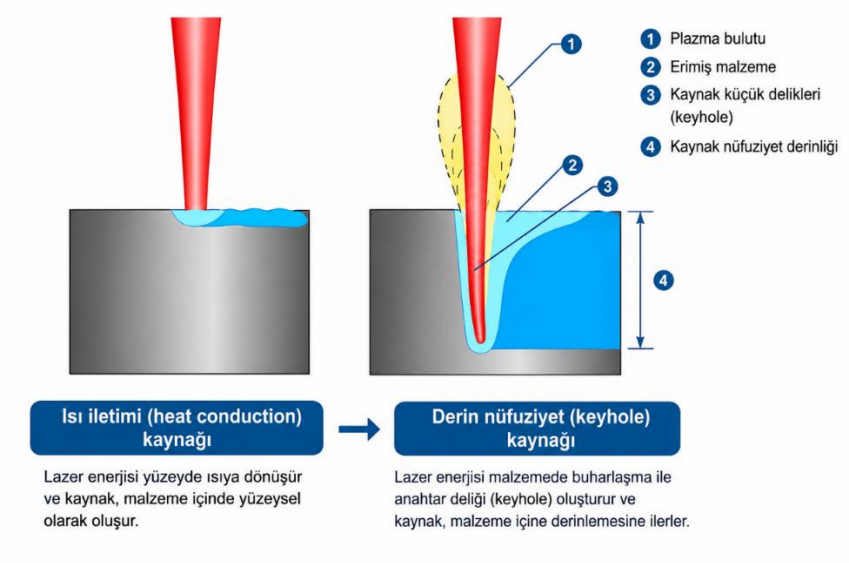
Geleneksel termokimyasal işlemlerde karbon, azot veya bor gibi elementlerin yüzeye difüzyonu sağlanarak sert yüzey tabakaları oluşturulmaktadır. Karbürleme, nitrürleme ve borlama bu grubun önemli örnekleridir. Modern yüzey mühendisliğinde ise lazer, plazma ve elektron ışını gibi yüksek enerji kaynakları kullanılarak daha lokal ve kontrollü işlemler gerçekleştirilmektedir. Lazer yüzey işlemleri; lazer sertleştirme, lazer ergitme, lazer alaşımlama ve lazer kaplama gibi farklı mekanizmalara ayrılmaktadır. Bu işlemlerin temel farkı yüzeyin kimyasal bileşiminin ve ergime durumunun değiştirilme derecesidir(Toyserkani vd., 2005).

4. Yüzey Ergitme

Yüzey ergitme işleminde malzemenin yalnızca yüzey bölgesi ergime sıcaklığının üzerine çıkarılır ve daha sonra hızlı biçimde yeniden katılaştırılır. İşlem sırasında yüzeyin kimyasal bileşimi esas olarak korunurken, katılaşma koşullarının değiştirilmesiyle farklı bir mikroyapı elde edilebilir. Yüzey ergitme sırasında yüksek soğuma hızları meydana geldiği için ince taneli ve denge dışı mikroyapılar oluşabilir. Bu durum sertlik ve aşınma davranışında iyileşme sağlayabilir. Lazer yüzey ergitme, seçici ve kontrollü bir işlem olmasından dolayı özellikle hassas parçaların yüzey özelliklerinin değiştirilmesinde avantajlıdır. Lazerle ergitmede yüzeyde küçük bir

ergiyik havuz oluşturulur ve lazer ışınının ilerlemesiyle bu havuz hızlı şekilde katılaşır. Lazer yüzey ergitme işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Lazer yüzey ergitme işleminin şematik gösterimi (Šustr, 2019)



5. Lazer Yüzey Sertleştirme

Lazer yüzey sertleştirme, çeliklerin yüzey sertliğini ve aşınma direncini artırmak amacıyla kullanılan önemli bir termal yüzey işlemidir. İşlem sırasında lazer ışını yüzeyin östenitleme sıcaklığına ulaşmasını sağlayacak şekilde enerji verir. Lazer ışınının

uzaklaştırılmasının ardından yüzeydeki ısı ana malzemeye doğru iletilir ve hızlı soğuma meydana gelir. Uygun karbon içeriğine sahip çeliklerde östenit martenzite dönüşerek sert bir yüzey tabakası oluşturur(Babu and Marimuthu, 2019). Bu yöntemde dışarıdan su veya yağ gibi bir soğutucu kullanılması çoğu durumda gerekli değildir. Bu nedenle işlem "kendiliğinden soğuma" veya *self-quenching* prensibiyle açıklanmaktadır.

Lazer sertleştirmenin başlıca avantajları:

- Düşük Deformasyon,
- Lokal İşlem İmkânı,
- Yüksek İşlem Hassasiyeti,
- Otomasyona Uygunluk,
- Kısa İşlem Süresi,
- Düşük Isıdan Etkilenen Bölge,
- Yüzeyde Minimum Boyutsal Değişimdir.

Çalışmalar, lazer yüzey sertleştirmenin çeliklerde sertlik, aşınma direnci ve bazı durumlarda yorulma davranışını geliştirebildiğini göstermektedir(Babu & Marimuthu, 2019; Senthil Kumar vd., 2023).

6. Lazer Yüzey Alaşımlama

Lazer yüzey alaşımlama, yüzey bölgesinin kimyasal bileşiminin değiştirilmesini amaçlayan bir yöntemdir. Bu işlemde yüzeye farklı bir alaşım elementi veya alaşım sistemi ilave edilir ve lazer enerjisi yardımıyla ana malzeme ile alaşım malzemesi birlikte ergitilir. Yüzeye ilave edilen malzeme toz, tel veya önceden yerleştirilmiş ince bir tabaka biçiminde olabilir. Lazer enerjisinin etkisiyle

yüzeyde bir ergiyik havuz meydana gelir ve alaşım elementleri bu havuz içerisinde ana malzeme ile karışır.

Lazer alaşımlama ile:

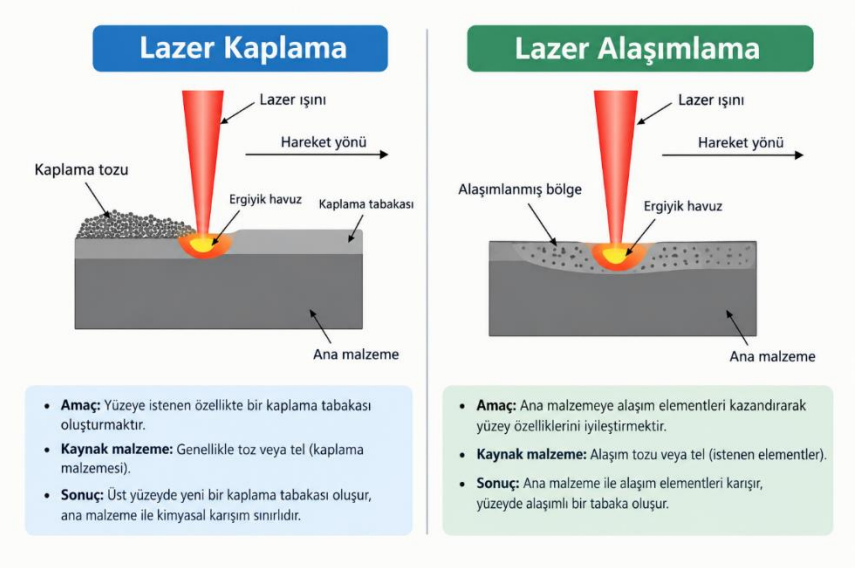
- Yüzey Sertliği Artırılabilir,
- Aşınma Direnci Geliştirilebilir,
- Korozyon Direnci Artırılabilir,
- Yüksek Sıcaklık Dayanımı Geliştirilebilir,
- Belirli Yüzeylerde Fonksiyonel Özellikler Oluşturulabilir.

Fatoba vd. (2018), lazer alaşımlama işleminde lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızının yüzeyin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu bildirmiştir. Ayrıca gözenek, çatlak ve mikrosegregasyon gibi kusurların yüzey tabakasının performansını olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir.

7. Lazer Kaplama ve Lazer Alaşımlama Arasındaki Fark

Lazer alaşımlama ile lazer kaplama kavramlarının birbirinden ayrılması önemlidir(Şekil 2). Lazer alaşımlamada yüzeye verilen malzeme, ana malzemenin yüzey bölgesiyle belirli ölçüde karışarak yeni bir alaşım tabakası oluşturur. Bu nedenle kaplama tabakasının kimyasal bileşimi ana malzemenin seyrelme miktarından etkilenir.

Şekil 2. Lazer kaplama ve lazer alaşımlama arasındaki fark (Steen, 2010)



Lazer kaplamada ise amaç, çoğunlukla yüzeye farklı kimyasal bileşime sahip bir malzeme tabakası oluşturarak ana malzeme ile güçlü metalurjik bağ elde etmektir. Düşük seyrelme oranı, kaplama malzemesinin özelliklerinin daha iyi korunmasını sağlar. Lazer kaplama teknolojisi; aşınmış parçaların onarılması, yeni parçaların yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve yüksek performanslı yüzeylerin oluşturulması için kullanılmaktadır(Zhu vd., 2021). Lazer esaslı yüzey işlemlerinin karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Lazer esaslı yüzey işlemlerinin karşılaştırılması

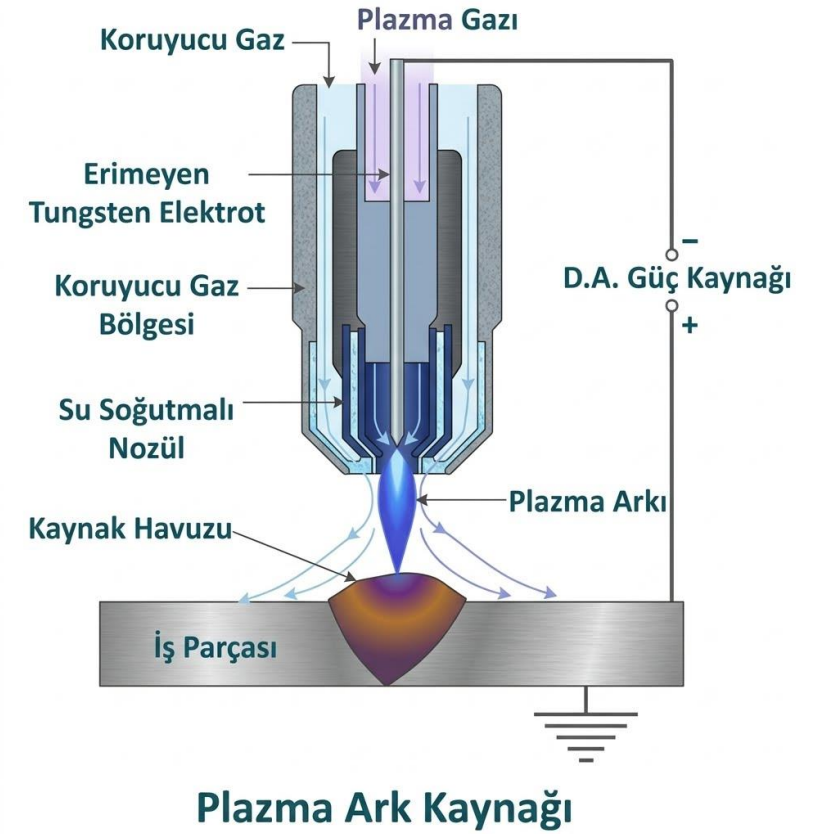
Yöntem	**Temel mekanizma**	**Kimyasal bileşim**	**Başlıca amaç**
Lazer sertleştirme	Faz dönüşümü	Büyük ölçüde değişmez	Sertlik ve aşınma direnci

Lazer ergitme	Ergitme–hızlı katılaşma	Büyük ölçüde korunur	Mikroyapı ve yüzey bütünlüğü
Lazer alaşımlama	Alaşım elementi ile ergitme	Değişir	Sertlik, aşınma, korozyon
Lazer kaplama	İlave malzeme ile tabaka oluşturma	Kaplama esaslı	Aşınma, korozyon, onarım

8. Plazma Arkı ile Yüzey Alaşımlama

Plazma arkı, yüksek sıcaklıkta iyonize gaz ortamı oluşturarak yüzeyin ergitilmesini sağlayan enerji kaynaklarından biridir. Plazma Transferli Ark (PTA) yöntemi, özellikle yüzey sertleştirme ve sert dolgu uygulamalarında kullanılmaktadır. PTA yönteminde yüzeye beslenen toz malzeme ark tarafından ergitilir ve ana malzeme ile metalurjik olarak birleşir(Şekil 3). Lazer yöntemine göre daha yüksek ısı girdisi ve daha geniş işlem alanı sağlayabilmesi, yöntemin belirli uygulamalarda avantajlı olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek ısı girdisi nedeniyle termal deformasyon ve ısıdan etkilenen bölge lazer yöntemlerine göre daha belirgin olabilir. AISI 304 gibi paslanmaz çeliklerde lazer, plazma ve ark esaslı kalın kaplama yöntemleri yüzey sertliği, aşınma ve korozyon özelliklerini geliştirmek amacıyla karşılaştırmalı olarak kullanılmaktadır(Kumar & Das, 2023).

Şekil 3. Plazma arkı ile yüzey alaşımlama(Ding, 2015)



9. TIG ile Yüzey Alaşımlama

TIG (*Tungsten Inert Gas*) işlemi, tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan arkın ısısından yararlanır. Yüzeyin ergitilmesi ve gerektiğinde ilave alaşım malzemesinin kullanılmasıyla modifiye edilmiş bir yüzey tabakası oluşturulabilir. TIG yönteminin en önemli avantajlarından biri ekipman ve proses teknolojisinin yaygın olmasıdır. Buna karşın lazer işlemlerine kıyasla daha yüksek ısı girdisi meydana gelebilir. Bu nedenle TIG yüzey alaşımlama özellikle büyük ve nispeten karmaşık olmayan yüzeylerde ekonomik bir seçenek olabilirken, küçük ve hassas bölgelerde lazer teknolojileri daha avantajlı olabilmektedir(Buytoz vd., 2005).

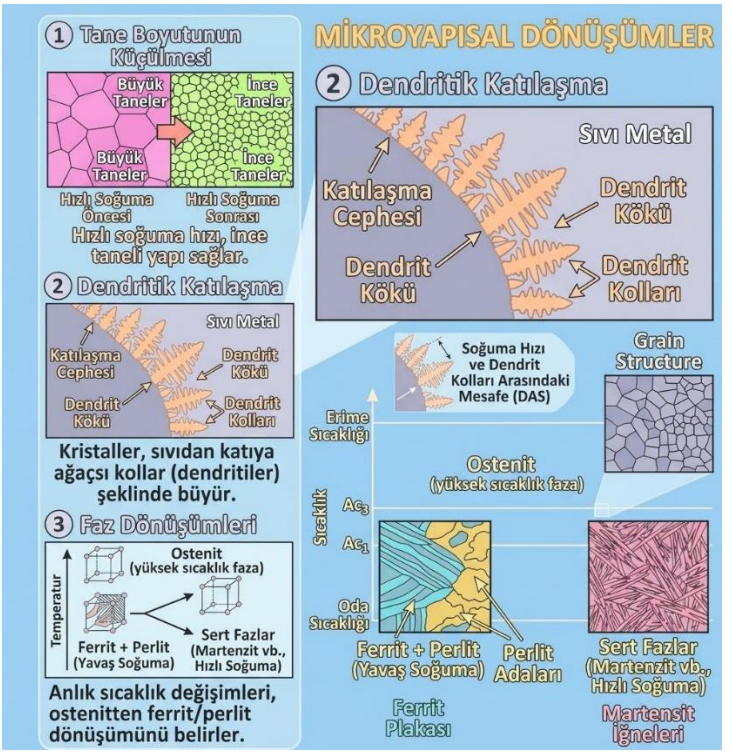
10. Mikroyapısal Değişimler

Yüzey ergitme ve alaşımlama işlemlerinin malzemenin özellikleri üzerindeki etkisinin temelinde mikroyapı değişimleri bulunmaktadır.

Yüksek ısıtma ve soğuma hızları:

- Tane Boyutunun Küçülmesine,
- Dendritik Katılaşmaya,
- Faz Dönüşümlerine,
- Alaşım Elementlerinin Yeniden Dağılımına,
- Metastabil Fazların oluşmasına neden olabilir. Bu değişimler görsel olarak Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 4. Yüzey alaşımlama sonrasında tipik mikroyapı bölgeleri



Lazer kaplama çalışmalarında proses parametreleri ile ergiyik havuzun geometrisi ve katılaşma yapısı arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Lazer gücü arttıkça seyrelme oranı ve ergiyik havuz boyutunun artabildiği, aşırı enerji girdisinin ise tane irileşmesi ve bazı durumlarda aşınma direncinin düşmesine neden olabildiği rapor edilmiştir(Han vd., 2022).

11. İşlem Parametreleri

Yüzey ergitme ve alaşımlama işlemlerinin sonucunu belirleyen temel proses parametreleri şunlardır:

- Lazer Gücü,
- Tarama Hızı,

- Lazer Işını Çapı,
- Enerji Yoğunluğu,
- Toz Besleme Hızı,
- Alaşım Malzemesinin Tane Boyutu,
- Koruyucu Gaz Debisi,
- Bindirme Oranı,
- Yüzey Hazırlığı,
- Ön Isıtma Sıcaklığı.

Lazer kaplama çalışmalarında proses parametrelerinin mikroyapı, seyrelme, kaplama geometrisi ve mekanik özellikler üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu bildirilmektedir(Zhu vd., 2021; Han vd., 2022). Temel işlem parametrelerinin yüzey özelliklerine etkisi Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Temel işlem parametrelerinin yüzey özelliklerine etkisi

Parametre	**Artışının genel etkisi**	**Olası risk**
Lazer gücü	Ergitme derinliği artabilir	Aşırı seyrelme, iri tane
Tarama hızı	Isı girdisi azalır	Yetersiz ergime
Toz besleme hızı	Kaplama kalınlığı artabilir	Ergitme yetersizliği
Bindirme oranı	Yüzey sürekliliği artabilir	Termal birikim
Ön ısıtma	Termal gradyan azalabilir	İşlem süresi artışı
Işın çapı	İşlem genişliği artabilir	Enerji yoğunluğu azalması

12. Yüzey Sertliği

Yüzey sertliği, çeliklerin aşınma davranışının değerlendirilmesinde kullanılan temel parametrelerden biridir. Lazer yüzey sertleştirmede sertlik artışının temel nedeni martenzitik dönüşüm olabilir. Lazer alaşımlamada ise sertlik artışı yalnızca faz dönüşümünden değil, aynı zamanda karbür, borür, nitrür veya intermetalik fazların

oluşumundan da kaynaklanabilir. Örneğin Fe–Cr, Ni esaslı veya Co esaslı alaşımların lazer kaplama yöntemiyle çelik yüzeylere uygulanması sonucunda yüksek sertlik sağlayan mikroyapılar elde edilebilmektedir(Han vd., 2022; Zhang vd., 2024). Sertleştirmede sertlik artışının temel nedeni martenzitik dönüşüm olabilir. Lazer alaşımlamada ise sertlik artışı yalnızca faz dönüşümünden değil, aynı zamanda karbür, borür, nitrür veya intermetalik faz yüzeyde bulunan bazı çökeltilerin çözünmesi veya hızlı soğuma nedeniyle yeniden çökelmelerinin engellenmesi, özellikle paslanmaz çeliklerde lokal korozyon direncini artırabilmektedir. Lazer kaplama üzerine yapılan güncel çalışmalar, aşınma direncinin yalnızca sertlikle değil; kaplama mikroyapısı, güçlendirici fazların boyutu ve dağılımı, porozite, çatlak yoğunluğu ve altlık–kaplama ara yüzeyinin kalitesiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir(Ouyang vd., 2025).

13. Aşınma Davranışı

Çelik yüzeylerinin servis performansını sınırlayan en önemli mekanizmalardan biri aşınmadır.

Başlıca aşınma mekanizmaları(Şekil 5):

- Abrazif Aşınma,
- Adhesif Aşınma,
- Erozyon,
- Yorulma Aşınması,
- Oksidatif Aşınmadır.

Şekil 5. Başlıca aşınma mekanizmaları



14. Korozyon Direnci

Çeliklerde korozyon davranışı yüzeyin kimyasal bileşimi ve mikroyapısıyla yakından ilişkilidir. Lazer yüzey işlemleri sırasında yüzeyde bulunan bazı çökeltilerin çözünmesi veya hızlı soğuma nedeniyle yeniden çökelmelerinin engellenmesi, özellikle paslanmaz çeliklerde lokal korozyon direncini artırabilmektedir. Ancak lazer işlemi sonrasında kimyasal veya mikroyapısal heterojenlikler meydana gelirse korozyon performansı olumsuz etkilenebilir(Vilar., 2012). Lazer kaplama yöntemiyle çelik yüzeylere Cr, Ni, Co veya Fe esaslı alaşımlar uygulanarak korozyona dayanıklı yüzeyler oluşturulabilmektedir. 42CrMo çeliği üzerine

yapılan çalışmalar da lazer kaplama ve diğer yüzey modifikasyon yöntemlerinin aşınma ve korozyon direncini geliştirmek için kullanılabileceğini göstermektedir(Zhang vd., 2024).

15. Artık Gerilmeler ve Çatlak Oluşumu

Lazer işlemlerinin en önemli avantajlarından biri düşük toplam ısı girdisi olmakla birlikte, yüzeyde çok yüksek sıcaklık gradyanları meydana gelebilir. Bu durum artık gerilmelerin oluşmasına yol açabilir.

Artık gerilmeler;

- Lazer Gücü,
- Tarama Hızı,
- Ön Isıtma,
- Malzeme Özellikleri,
- Kaplama Kalınlığı,
- Soğuma Hızı gibi değişkenlerden etkilenmektedir.

Kaplama tabakasında oluşan çekme yönlü artık gerilmeler çatlak oluşumunu kolaylaştırabilir. Özellikle yüksek sertlikte ve gevrek fazlar içeren kaplamalarda bu durum daha kritik hâle gelmektedir. Bu nedenle yüksek performanslı yüzey tabakalarının tasarımında yalnızca sertlik ve aşınma direnci değil, çatlak hassasiyeti ve artık gerilme dağılımı da dikkate alınmalıdır(Zhu vd., 2021; Duan vd., 2026).

16. Çeliklerde Yüzey Modifikasyonu

Çelikler, yüksek toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri nedeniyle mühendisliğin omurgasını oluşturur. Ancak endüstriyel çalışma şartlarında dişliler, miller, kalıplar ve rulmanlar gibi parçalar

doğrudan yüzey temaslarına, sürtünmelere, korozif ortamlara ve yüksek sıcaklıklara maruz kalır. Tüm çelik parçayı pahalı alaşımlardan (örneğin tamamen titanyum veya yüksek nikel alaşımları) üretmek hem maliyetlidir hem de parçanın ihtiyaç duyduğu iç tokluğu (darbe direncini) azaltabilir. Yüzey modifikasyonu, çeliğin iç kısımdaki (çekirdekteki) sünek yapıyı aynen korurken, sadece dış yüzeyini (birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadar) ekstrem şartlara dayanıklı hale getirme sanatıdır. Zhang vd. (2024), 42CrMo çeliğinin yüzey modifikasyonuna ilişkin kapsamlı çalışmalarında termal püskürtme, kaplama, sert dolgu, lazer kaplama, nitrürleme ve lazer yüzey işlemlerini değerlendirmiştir. Çalışmada özellikle lazer kaplamada Fe, Ni ve Co esaslı sistemler ile kompozit ve yüksek entropili alaşımların kullanımı ele alınmıştır. Bu nedenle 42CrMo çeliği, yüzey ergitme ve alaşımlama yöntemlerinin etkilerini açıklamak için uygun bir model malzeme olarak değerlendirilebilir.

17. Yüksek Entropili Alaşımlarla Yüzey Alaşımlama

Son yıllarda yüzey mühendisliğinde yüksek entropili alaşımlar (HEA) dikkat çekmektedir. Bu alaşımlar birden fazla ana element içerir ve uygun bileşimlerde yüksek sertlik, aşınma direnci, termal kararlılık ve korozyon direnci sağlayabilir. Lazer kaplama ile yüksek entropili alaşım yüzeylerinin oluşturulması, çeliklerin yüzey performansının geliştirilmesinde yeni bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Literatürde lazer kaplama–yüksek entropili alaşım sistemlerinin aşınma, erozyon ve korozyon davranışı üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır(Kumar & Das , 2024; Zhang vd., 2024). Bununla birlikte yüksek entropili alaşımların yüksek sertliği her zaman üstün tokluk anlamına gelmemektedir. Bu nedenle kaplama tasarımında sertlik–tokluk dengesinin sağlanması önemlidir.

18. Aşırı Yüksek Hızlı Lazer Kaplama

Geleneksel lazer kaplamaya ek olarak son yıllarda Extreme High-Speed Laser Cladding (EHLA) teknolojisi geliştirilmiştir. EHLA yönteminde çok yüksek tarama hızları ve düşük ısı girdileri kullanılarak daha ince kaplamalar oluşturulabilmektedir. Yüksek soğuma hızları mikroyapının incelmesine ve element dağılımının daha homojen olmasına katkıda bulunabilir. Ancak yüksek hız ve enerji yoğunluğu, kaplamada gözenek ve çatlak gibi kusurların oluşmasına da neden olabileceğinden proses parametrelerinin optimizasyonu kritik önem taşımaktadır(Duan vd., 2026).

19. Endüstriyel Uygulamalar

Çeliklerin yüzey ergitme ve alaşımlama yöntemleri birçok endüstride uygulanmaktadır.

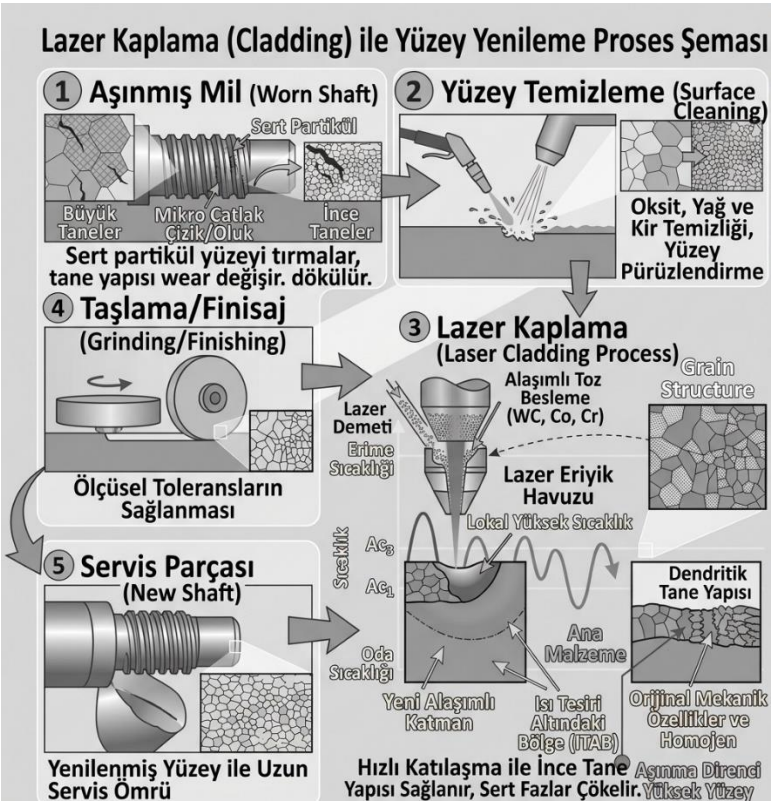
Başlıca uygulama alanları(Şekil 6):

- Otomotiv Parçaları,
- Dişliler,
- Miller,
- Krank Milleri,
- Kesici Takımlar,
- Sıcak İş Kalıpları,
- Soğuk İş Kalıpları,
- Pompa Parçaları,
- Valfler,
- Petrol ve Gaz Ekipmanları,

- Madencilik Makineleri,
- Enerji Santrali Bileşenleri,
- Havacılık Parçalarıdır.

Lazer kaplama özellikle aşınmış parçaların onarılması açısından da önemlidir. Böylece parçanın tamamen değiştirilmesi yerine yalnızca hasarlı yüzey bölgesi yeniden oluşturulabilmektedir. Bu yaklaşım malzeme tüketimini ve üretim maliyetlerini azaltabilmektedir(Zhu vd., 2021).

Şekil 6. Lazer kaplamalarının endüstriyel uygulama şeması


Lazer Kaplama (Cladding) ile Yüzey Yenileme Proses Şeması
1 Aşınmış Mil (Worn Shaft)
Sert Partikül
Büyük Taneler
Mikro Catlak Çizik/Oluk
İnce Taneler
Sert partikül yüzeyi tırmalar, tane yapısı wear değişir. dökülür.
2 Yüzey Temizleme (Surface Cleaning)
Oksit, Yağ ve Kir Temizliği, Yüzey Pürüzlendirme
3 Lazer Kaplama
(Laser Cladding Process)
Alaşımlı Toz Besleme (WC, Co, Cr)
Lazer Demeti
Erime Sıcaklığı
Grain Structure
Lazer Eriyik Havuzu
Lokal Yüksek Sıcaklık
Sıcaklık
Ac3
Ac1
Oda Sıcaklığı
Ana Malzeme
Dendritik Tane Yapısı
Yeni Alaşımlı Katman
Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)
Orjinal Mekanik Özellikler ve Homojen
Hızlı Katılaşma ile İnce Tane Yapısı Sağlanır, Sert Fazlar Çökelir.
Aşınma Direnci Yüksek Yüzey
4 Taşlama/Finisaj
(Grinding/Finishing)
Ölçüsel Toleransların Sağlanması
5 Servis Parçası
(New Shaft)
Yenilenmiş Yüzey ile Uzun Servis Ömrü

20. Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Tablo 3. Çelik yüzeylerinin geliştirilmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

Yöntem	Isı girdisi	İşlem hassasiyeti	Deformasyon	Alaşım ekleme	Tipik kullanım
Lazer sertleştirme	Düşük–orta	Çok yüksek	Çok düşük	Hayır	Sertleştirme
Lazer ergitme	Orta	Çok yüksek	Düşük	Genellikle hayır	Mikroyapı iyileştirme
Lazer alaşımlama	Orta–yüksek	Çok yüksek	Düşük	Evet	Aşınma/korozyon
Lazer kaplama	Orta	Çok yüksek	Düşük	Evet	Kaplama/onarım
PTA	Yüksek	Orta	Orta	Evet	Sert dolgu
TIG	Yüksek	Orta	Orta–yüksek	Evet	Geniş yüzeyler
Termokimyasal işlem	Düşük–orta	Orta	Düşük	Difüzyon	Nitrürleme/karbürleme

21. Yüzey İşlemlerinde Optimizasyon

Yüzey modifikasyonunun başarısı için deneysel tasarım ve optimizasyon yöntemlerinin kullanılması giderek daha önemli hâle gelmektedir.

Geleneksel yaklaşımda lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızı tek tek değiştirilerek optimum koşullar belirlenmeye çalışılmaktadır. Ancak bu yöntem, parametreler arasındaki etkileşimleri yeterince açıklamayabilir.

Bu nedenle:

- Taguchi Yöntemi,

- Yanıt Yüzeyi Yöntemi,
- Genetik Algoritmalar,
- Yapay Sinir Ağları,
- Makine Öğrenmesi,
- Sayısal Isı Transferi Modelleri gibi yöntemler kullanılabilir.

Güncel lazer kaplama çalışmalarında proses modelleme, çevrim içi izleme ve proses kontrolünün kaplama kalitesinin geliştirilmesinde önemli araştırma alanları olduğu belirtilmektedir(Zhu vd., 2021).

22. Gelecekteki Araştırma Alanları

1. Yapay zekâ destekli proses optimizasyonu,
2. Gerçek zamanlı ergiyik havuz izleme,
3. Yüksek entropili alaşımların geliştirilmesi,
4. Nano-kompozit yüzey tabakalarının oluşturulması,
5. EHLA teknolojisinin yaygınlaştırılması,
6. Düşük enerji tüketimli yüzey işlemleri,
7. Çoklu enerji kaynaklarının hibrit kullanımı,
8. Artık gerilme kontrolü,
9. Sayısal ikiz ve proses simülasyonu,
10. Onarım amaçlı lazer kaplamanın yaygınlaştırılması.

Özellikle EHLA ve yeni nesil lazer kaplama teknolojilerinde proses optimizasyonu, kaplama kalınlığının kontrolü, kusurların azaltılması ve üretim hızının artırılması güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır (Duan vd., 2026; Ouyang vd., 2025).

Sonuç

Çeliklerin yüzey özelliklerinin ergitme ve alaşımlama yöntemleriyle geliştirilmesi, malzeme performansının artırılmasında etkili bir yüzey mühendisliği yaklaşımıdır. Bu yöntemler sayesinde çeliğin çekirdek bölgesinin mekanik özellikleri büyük ölçüde korunurken yüzey bölgesinde yüksek sertlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı sağlanabilmektedir.

Lazer teknolojileri, yüksek enerji yoğunluğu, hassas işlem kontrolü, düşük deformasyon ve lokal uygulama imkânları nedeniyle yüzey mühendisliğinde önemli avantajlar sunmaktadır. Lazer yüzey sertleştirmede temel mekanizma hızlı östenitleme ve kendiliğinden soğuma sonucunda martenzitik dönüşüm iken, lazer yüzey alaşımlama ve kaplamada yüzeye farklı kimyasal bileşimde malzemelerin kazandırılması temel mekanizmayı oluşturmaktadır.

İşlem parametrelerinin doğru seçilmemesi durumunda aşırı seyrelme, gözenek, çatlak, segregasyon ve artık gerilme gibi kusurlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle yüzey işlem teknolojilerinin geliştirilmesinde yalnızca yüzey sertliği değil; mikroyapı, faz dağılımı, ara yüzey bütünlüğü, artık gerilmeler, aşınma ve korozyon davranışlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, yüzey mühendisliği yalnızca mevcut malzemenin özelliklerini iyileştiren bir işlem grubu değil, aynı zamanda malzeme–proses–mikroyapı–özellik ilişkisini birlikte ele alan bütünleşik bir tasarım yaklaşımıdır. Gelecekte yapay zekâ, gerçek zamanlı proses kontrolü, yüksek entropili alaşımlar ve yüksek hızlı lazer kaplama teknolojilerinin gelişmesiyle çelik yüzeylerinin daha hassas, ekonomik ve sürdürülebilir biçimde geliştirilmesi mümkün olacaktır.

Kaynaklar

Babu, P.D & Marimuthu, P. (2019), "Status of laser transformation hardening of steel and its alloys: a review". *Emerging Materials Research*, Vol. 8 No. 2 pp. 188–205, doi: https://doi.org/10.1680/jemmr.16.00145

Benyounis, K. Y., & Olabi, A. G. (2008). Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches-A reference guide. *Advances in Engineering Software, 39*(6), 483–496.

Buytoz, S., and Ulutan, M. (2006). In situ synthesis of SiC reinforced MMC surface on AISI 304 stainless steel by TIG surface alloying. Surface and Coatings Technology, 200(12-13):3698-3704.

Deng, Z., Ma, K., Yuan, Y., et al., (2026). Microstructural and property evolution of Ni-Cu coating fabricated on low carbon steel Q235 via laser cladding, Surface & Coatings Technology , https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133997

Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. Int J Adv Manuf Technol. 2015;81:465–81. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3.

Duan, B., Zhao, H., Lin, N. *et al.* Process optimization of extreme high-speed laser cladding: materials, parameters, external field assistance, and future trends. *Surf. Sci. Technol.* 4, 27 (2026). https://doi.org/10.1007/s44251-026-00134-8.

Fatoba, O. S., Akinlabi, S. A., & Akinlabi, E. T. (2018). Laser metal deposition influence on the mechanical properties of steels and stainless steel composites: A review. *Materials Today: Proceedings, 5*(9), 18603–18620. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.205

Han, T., Zhou, K., Chen, Z., & Gao, Y. (2022). Research Progress on Laser Cladding Alloying and Composite Processing of Steel Materials. *Metals*, *12*(12), 2055. https://doi.org/10.3390/met12122055

Kirik, I. (2015). Effect of temperature on microstructure and mechanical behavior of diffusion bonded Armor 500 and AISI 1040 steels. Materials Testing, 57(4):296-300.

Kumar, R., & Das, A. K. (2024). A comprehensive review of AISI 304 steel based on different thick coating process. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.080

Ouyang, C., Deng, R., Wei, R., Li, H., Wang, R., & Zhao, C. (2025). Methods and techniques for enhancing wear resistance of laser cladding coatings: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes, 152*, 1123–1149. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.08.060

R. Vilar, (2012) Laser surface modification of steel and cast iron for corrosion resistance, Editor(s): Chi Tat Kwok, In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Laser Surface Modification of Alloys for Corrosion and Erosion Resistance, Woodhead Publishing, 2012, Pages 3-40, https://doi.org/10.1533/9780857095831.1.3.

Senthil Kumar, P., Jegadheesan, C., Somasundaram, P., Praveen Kumar, S., Vivek Anand, A., Singh, A. P., & Jeyaprakash, N. (2023). State of art: Review on laser surface hardening of alloy metals. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.259

Soner Buytoz, Mustafa Ulutan, & M. Mustafa Yildirim, Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings, Applied

Surface Science, Volume 252, Issue 5, 2005, Pages 1313-1323, https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.088

Steen, W., Mazumder, J. (2010). Laser Surface Treatment. In: Laser Material Processing. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5_7

Šustr, Michal. Laserový paprsek ve strojírenství. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 31 s. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

Totten, George. E. 1st Edition. (2006). *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/NOF0849384523

Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S.F. (2004). Laser Cladding (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420039177

Zhang, Z., Wang, D., Liu, G., Qian, Y., Xu, Y., & Xiang, D. (2024). Surface modification of 42CrMo steels: A review from wear and corrosion resistance. *Coatings, 14*(3), 337. https://doi.org/10.3390/coatings14030337

Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., Yang, Z., Xu, P., & Liu, Z. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology, 138*, 106915. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915

Yazar Bilgisi ve Dipnot 1:

İhsan KIRIK

• Prof. Dr.

• Bingöl Üniversitesi

• Makine Bölümü

• ORCID: (0000-0002-8361-319X)

Dipnot 2:

Anıl İMAK

• Doç. Dr.

• Bingöl Üniversitesi

• Makine Bölümü

• ORCID: (0000-0001-6091-1584)

Dipnot 3:

Musa KILIÇ

• Doç. Dr.

• Batman Üniversitesi

• Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü

• ORCID: (000-0001-5808-6917)

BÖLÜM 2

ALÇI ESASLI KOMPOZİT LEVHALAR: ÜRETİM YÖNTEMLERİ, MALZEME ÖZELLİKLERİ, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE KARBON AYAK İZİ PERSPEKTİFİNDEN GELECEK ÖNGÖRÜLERİ

Gonca DÜZKALE SÖZBİR[1]

Giriş

Alçı levhalar, hafiflik, kolay uygulanabilirlik ve yangın performansı gibi özellikleri nedeniyle yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, alçı matrisinin kırılgan yapısı, sınırlı çekme ve eğilme dayanımı ile neme duyarlılığı, performansının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Alçı kompozit levhalar, modern yapı sektöründe hafiflikleri, uygulama kolaylıkları ve sundukları pasif yangın koruması sayesinde temel ayırıcı ve tamamlayıcı elemanlar arasında yer almaktadır. Duvar ve tavan kaplamalarında kullanılan geleneksel kâğıt kaplı levhaların yanı sıra, kullanım koşullarına göre cam veya doğal liflerle güçlendirilmiş, neme, yangına ya da sese karşı performansı artırılmış özel levha türleri de bulunmaktadır (Dedesko & Siegel, 2015; Esan, 2024). Üretimde genellikle kalsine alçı, su ve çeşitli katkılarla karıştırılarak bir karışım hazırlanmakta, bu karışım yüzey kâğıtlarının arasına serilerek, priz aldıktan sonra istenen ölçülerde kesilmekte ve kurutulmaktadır (Kneifel & ark., 2018). Bu çeşitlilik, levhaların konut ve ticari yapılarda bölme duvarı, tavan ve yüzey kaplaması gibi farklı işlevlerde kullanılmasını sağlarken, uygun ürünün seçimi ve doğru uygulama koşullarının önemini de artırmaktadır. Özellikle sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, alçı bazlı sistemlere entegre edilen faz değiştiren malzemeler veya tarımsal lif takviyeleri, malzemenin termal ve mekanik performansını optimize ederek yapısal verimliliğe katkı sağlamaktadır (Otunla & ark., 2026). Bununla birlikte, cam elyafı ile güçlendirilmiş alçı paneller gibi yapısal yenilikler, levhaların geleneksel alçı malzemenin kırılganlık ve düşük yük taşıma kapasitesi gibi kısıtlamalarını aşarak modüler inşaat teknolojilerinde taşıyıcı eleman olarak kullanılabilmesine olanak tanımaktadır (Ramesh & Anbarasan, 2025; Tichi & Khatiri, 2024). Günümüzde bu paneller, saha içi kuru montaj avantajları sayesinde, şantiyede işçilik sürelerini kısaltırken, kaza risklerini azaltması ve diğer yapı bileşenleriyle entegre çalışabilmesi nedeniyle modern mimaride vazgeçilmez bir yer edinmektedir (Arabaci & Pekmezci, 2021). Çalışma kapsamında bu kompozit sistemlerin mekanik davranışları, çevresel koşullara gösterdikleri direnç ve güncel endüstriyel üretim tekniklerini detaylı biçimde analiz edilerek, farklı elyaf takviyelerinin matris üzerindeki aderans etkileri ve yapısal bütünlük üzerindeki rolü tartışılmaktadır (Ammayappan & ark., 2024).

[1]Doç. Dr, KSÜ, Onikişubat Meslek Yüksekokulu, goncaduzkale@gmail.com, 0000-0002-0728-841X
[1]Doç. Dr, KSÜ, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği a.d, goncaduzkale@gmail.com, 0000-0002-0728-841X

Alçı Levhaların Tanımı

Alçı, mineral içeriği olarak başlıca kalsiyum sülfat dihidrattan oluşanmaktadır (Preturlan & ark., 2020). Alçının yapı malzemesi olarak işlevselliği, kalsinasyon–hidratasyon döngüsü adı verilen tersinir bir kimyasal dönüşüme dayanmaktadır (Fernandes & ark., 2021). Kalsinasyon sırasında kalsiyum sülfat dihidrat, kristalizasyon suyunun dörtte üçünü kaybederek kalsiyum sülfat hemihidrata dönüşmekte ve bu ara ürüne alçı tozu denilmektedir. Bu dönüşüm, literatürde tipik olarak 120–130 °C civarında gerçekleştirilen kalsinasyon işlemiyle başlamaktadır (Adrien & ark., 2016). Alçının kalsinasyon sıcaklığının düşüklüğü, onu diğer bağlayıcılardan ayıran temel bir üretim avantajıdır. Kirecin kalsinasyonu 800 °C'yi gerektirirken alçının kalsinasyonu çok daha düşük bir sıcaklıkta tamamlanmaktadır (Dantec, 2016).

Hidratasyon aşaması, hemihidratın su içinde çözünmesi ve dihidratın çökelmesiyle ilerlemektedir. Bu reaksiyonun itici gücü, hemihidratın su içindeki çözünürlüğünün dihidrata göre daha yüksek olmasıdır (Adrien & ark., 2016). "Alçı" sözcüğü hem kalsiyum sülfat hemihidratı hem de sonunda kalsiyum sülfat dihidrattan oluşan priz almış malzemeyi ifade etmekte, hammadde ise alçı, işlenmiş ve hidrate edilmiş toz ise alçı hamuru olarak adlandırılmaktadır (Adrien & ark., 2016; Ngah & ark., 2020). Alçı, düşük maliyeti, düşük toksisitesi, düşük gömülü enerjisi ve aynı zamanda hafifliği, ses soğurma ve yangın dayanımı nedeniyle kuru duvar uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Adrien & ark., 2016).

Alçı Levhaların Sınıflandırılması

Standartlara Dayalı Sınıflandırma

Alçı levhanın sınıflandırılması, ürünü tanımlayan, özellik beyanını ve uygunluk test yöntemlerini bir arada düzenleyen standartlar üzerinden yürütülmektedir. Türkiye'de, TS EN 520 ve Avrupa'da EN 520+A1 kapsamında tanımlanan levha tipleri ve her tipin ayırt edici özellikleri standartlaşmıştır.

EN 520 + A1, sekiz alçı levha tipini tanımlar ve her tipi ayırt edici işlevsel özelliği üzerinden adlandırılarak Tablo 1.de gösterilmektedir (Zobal & ark., 2017).

Tablo 1. Alçı levhalara ilişkin TS EN standartları ve kapsamları

Tip	Standardın verdiği ayırt edici özellik
A	Alçı plaster levha (temel/genel tip)
H	Su emme oranı azaltılmış plaster levha
E	Alçı kaplama (sheathing) levhası
F	Yüksek sıcaklıkta geliştirilmiş çekirdek bağlantısı olan alçı plaster levha
P	Plaster levha
D	Kontrollü yoğunluklu alçı plaster levha
R	Geliştirilmiş mukavemetli alçı plaster levha
I	Geliştirilmiş yüzey sertlikli alçı plaster levha

Amerika'da sınıflandırma, kullanım yerine ve uygulama işlevine göre ayrıştırılmış ürün standartları üzerinden kurulmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Alçı levhalara ilişkin ASTM standartları ve kapsamları

ASTM Standardı	Kapsam ve teknik açıklama	Kaynak
ASTM C36/C36M	Duvar, tavan ve bölme sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanan alçı duvar levhalarının özelliklerini kapsar.	ASTM (2004)
ASTM C79/C79M	Binalarda kaplama (sheathing) amacıyla kullanılan, suya dirençli çekirdeğe sahip alçı levhaları kapsar.	ASTM (2004)
ASTM C1396/C1396M	Alçı levhalara ilişkin genel teknik gereklilikleri tanımlar. Tip X levhalar, geliştirilmiş yangına dayanım performansıyla ilişkilidir.	Shipp & ark. (2011)
ASTM C1597M	Alçı duvar levhalarının sert metrik boyutlandırmasına ilişkin standardı ifade eder.	ASTM (2004)
ASTM C1795	Yüksek sıcaklıklara maruz kalan alçı levha ve panellerin termo-fiziksel tepkilerinin belirlenmesine yönelik deney yöntemini kapsar.	ASTM (2024)

Bağlayıcı Türüne Göre Sınıflandırma

Tablo 3'de gösterilen bağlayıcı türüne göre sınıflandırmada, mineral bağlayıcılı kompozitlerin literatürdeki en yaygın sınıflandırması, bağlayıcının kimyasal yapısına dayanmakta ve üç ana sınıfda tanımlanmaktadır. Bunlar: çimentolu kompozitler, alçı bağlayıcılı kompozitler ve manyezyum çimentolu kompozitlerdir (Gong, 2021; Şahin & Şimşek, 2021). Alçı bağlayıcılı levhalar, hafiflik, işlenebilirlik, akustik yalıtım ve yangın direncinde üstün olup, neme karşı hassasiyet nedeniyle kullanımı genellikle iç mekânla sınırlıdır (Gong, 2021; Şahin & Şimşek, 2021). Çimento bağlayıcılı levhalar, yüksek dayanıklılık ve su direnci sağlamakta, ancak daha yüksek ağırlık ve işleme zorluğu oluşturmaktadır (Gong, 2021). Manyezyum bağlayıcılı levhalar, çivi tutma kapasitesi güçlüdür ancak higroskopik doğası nedeniyle yüksek nemde korozyon riski taşımaktadır (Aiken & ark., 2020; Gravit & ark., 2017)

Tablo 3. Bağlayıcı türüne göre sınıflandırma

Levha tipi	Yoğunluk (kg/m^3)	Bağlayıcı/ahşap oranı	MOR (N/mm^2)	IB (N/mm^2)
Çimento bağlayıcılı yongalevha	1000–1350	2.9	6.0–15	0.4–0.6
Çimento bağlayıcılı liflevha	1000–1350	10	12–20	0.8
Alçı bağlayıcılı yongalevha	1000–1200	4.0	6.0–9.0	0.3–0.6
Alçı bağlayıcılı liflevha	900–1000	5.0–6.0	4.0–7.0	0.3–0.5
Manyezyum bağlayıcılı yongalevha	900–1250	1.5	7.0–14	0.4–0.6
Manyezyum bağlayıcılı liflevha	700–1100	5.0	8.0–10	—

Takviye Malzemesi Türüne Göre Sınıflandırma

Lif takviyeli alçı kompozitleri, alçının kırılgan yapısını ve düşük çekme mukavemetini gidermeye yönelik katkı stratejileriyle tanımlanmaktadır. Lif takviyeli ve partikül katkılı kompozitler şı şekilde sıralanır:

Cam Lifi: Hacimce %2–7 oranında lif katkısı mukavemet ve kırılma tokluğunu artırır. GFRG panelleri, taşıyıcı eleman olarak dahi kullanılabilmektedir (Ali, 1972; Wu & Dare, 2004).

- Doğal Lifler: Kavak lifi, jüt, kenevir ve keten, biyo-esaslı sürdürülebilir alternatifler olarak öne çıkmaktadır. %10 kavak lifi içeriği eğilme mukavemetini %10, basınç mukavemetini %19 artırmaktadır (Ye & ark., 2024).
- Sentetik Lifler: Polipropilen, PVA ve karbon lifleri yüksek çekme mukavemeti ve tokluk sağlar, özellikle PVA lifleri çatlak direncinde kritik rol oynamaktadır (Otunla & ark., 2026).
- Partikül Katkıları: Perlit, genleşmiş kil, diatomit ve dolomit gibi katkılar yoğunluğu düşürerek ısı yalıtımını iyileştirir; örneğin perlit esaslı levhalar A sınıfı yangın direnci sunmaktadır (Davraz & ark., 2025; Ji & ark., 2015).

Alçı Kompozit Levhaların Üretim Teknolojisi

Alçı kompozit levha üretim teknolojisi, hammadde hazırlamadan nihai ürün paketlemesine uzanan çok aşamalı bir süreçler zinciridir. Bu zincir üç ana başlıkta toplanabilir: (1) bağlayıcının (alçıtaşının) ısıl işlemle kalsinasyonu, (2) bağlayıcı–su–katkı karışımının hazırlanması ve şekillendirilmesi, (3) prizlenmiş levhanın kurutulması, kesilmesi ve bitirilmesi işlemleridir. Literatürde bu aşamalar ya tek bir sürekli hat üzerinde (karton kaplı alçı levha), ya yarı-kuru presleme esaslı bir hat üzerinde (alçı yonga/ lif levha), ya da kalıp esaslı döküm teknolojileriyle (prefabrik panel) gerçekleştirilmektedir (Mehlhorn & Thole, 1990; Ramesh & Anbarasan, 2025; Rumo, 2023).

Karışım Hazırlama, Su/Alçı Oranı ve Özelliklere Etkisi

Şekillendirme aşamasında kalsine ya da kısmen dehidrate edilmiş alçı, bir karıştırıcıya beslenerek su ve diğer bileşenlerle birleştirilir ve akıcı bir hamur elde edilmektedir (Kneifel & ark., 2018). Prosesin enerji bilançosu açısından kritik nokta, karışımda kullanılan su miktarıdır. Uygun akıcılık için gereken su, stokiyometrik hidratasyon suyundan belirgin biçimde fazladır ve bu fazla suyun kurutma aşamasında uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle, sıva karışımında kullanılan su miktarının azaltılması, kurutma işlemi için gereken enerji tüketiminin düşürülmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, levhanın yoğunluğunu sabit tutmak amacıyla karışıma eklenen köpük miktarı artırılabilir. Sıva karışımının su ihtiyacı büyük ölçüde malzemenin tane boyutu dağılımına bağlıdır. Karıştırma sırasında iri tanelerin daha küçük parçalara ayrılması, karışımın su ihtiyacını etkileyebilir. Ayrıca tanelerin şekli ve yüzey özellikleri de gerekli su miktarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Luckevich & Kuntze, 1984).

Katkı maddeleri, karışımın akış özelliklerini ve sertleşme sürecini doğrudan etkiler. Su azaltıcı katkıların köpük oluşturucu maddeler, priz hızlandırıcılar ve diğer alçı katkılarıyla uygun oranlarda kullanılması, ürün kalitesinin artırılmasının yanı sıra enerji tüketiminin azaltılmasına, üretim verimliliğinin artırılmasına ve maliyetlerin düşürülmesine de katkı sağlamaktadır (Sun & ark., 2011). Tipik bir alçı levhanın bileşimi kütlece yaklaşık %85 alçı, %10 karton, %3 katkı ve %2 nişasta olarak raporlanmıştır (Kneifel & ark., 2018; Lippiatt, 2007). Kullanılan katkı yelpazesi nişasta, perlit/vermikülit, cam elyafı, dağıtıcı, priz geciktirici, potasyum sülfat, dekstroz, kaolin,

borik asit, köpürtücü, hızlandırıcı, amonyum sülfat ve kenar macunu gibi bileşenleri kapsamaktadır (Kneifel & ark., 2018). Hafif kompozitlerde ise su miktarı, alçı veya birincil atıl bağlayıcı, köpürtücü katkı ve mikro lif oranının optimize edilmesiyle hem basınç dayanımı hem de ısı iletkenlik katsayısının arttırılması hedeflenir ve bu iki hedef birbiriyle karşıt yönde çalışmaktadır (Sekavová & ark., 2023). Köpüklü alçı üretiminde dihidrat alçı tüketimi, polimerleşen bileşen ve köpürtücü çözelti miktarı, 7 günlük dayanımı belirleyen değişkenler olarak tanımlanmaktadır (Bessonov & ark., 2025).

Sertleşmiş hamurun mikroyapısı hidratasyon sırasında şekillenmekte ve su/alçı oranı tarafından belirlenmektedir. Bu oran hem hidratasyon süreçlerini başlatmakta hem de alçı hamurunun işlenebilirliğini güvence altına almaktadır. Yükselen su içeriği alçı kristalleri arasındaki bağı zayıflatmakta, boşluk oranlarını artırmakta ve malzeme dayanımını düşürmektedir (Esan, 2024). Alçı hamurlarındaki su fazlasının, kristaller arasında serbest su bulunması nedeniyle mekanik özelliklerde azalmaya yol açtığı ayrıca vurgulanmaktadır (Braga & Freitas, 2024). Bu nedenle parçacık boyut dağılımı, parçacık çapı ve homojenlik katsayısı, hamurun işlenebilirliğini korumak için gereken su ihtiyacını etkilemektedir (Esan, 2024).

Gözeneklilik ve dayanım ilişkisi deneysel olarak da belgelenmiştir. Yüksek yoğunluklu alçı, düşük yoğunluklu malzemeden belirgin biçimde daha güçlüdür. Düşük yoğunluklu alçı %1 nem emerken yüksek yoğunluklu alçının nem emmesi %0,2 düzeyinde kalmıştır (Ngah & ark., 2020). Genel olarak alçı kompozitlerinde yoğunluk ve gözenekliliğin mekanik ve termal özellikleri anlamlı biçimde etkilediği, katkı ve takviyelerle yapılan modifikasyonların malzeme performansını iyileştirme, ağırlığı azaltma ve yalıtım özelliklerini geliştirme olanakları sunduğu değerlendirilmektedir (Esan, 2024).

Alçıya yapılan katkıların porozite üzerindeki etkisi, katkının türüne göre hem artış hem azalış yönünde olabilir. Silis dumanının alçı hamuruna eklenmesi, poroziteyi normal alçıya kıyasla %5 azaltmaktadır. Buna karşılık diatomit, poroziteyi istenen düzeyde ve belirgin biçimde artırmakta, alçı kompozitlerinde %35,9 ile %47,8 aralığında değerler elde edilmektedir. %20 oranında diatomit eklenmesi, liflerin varlığından etkilenmeksizin poroziteyi %32,4 yükseltmektedir. Doğal caroa lifleriyle takviyeli alçı levhalarda, lif kütle içeriğinin %3'e çıkarılması poroziteyi %52'ye yükseltmiş, genleştirilmiş perlit ilavesi ise alçı kompozitlerinin porozitesini %59,2'den %69,4'e çıkarmaktadır. Katkıların etkisi her zaman tek yönlü olmamakta, termoregülasyon amaçlı mikrokapsül eklenmesi alçı kompozitinin porozitesini %0,47'den %0,48'e yükseltirken, izostatik grafit dolgu kullanımı poroziteyi %37,2'den %34,1'e düşürmekte ve başlangıçtaki varsayımların aksine bir sonuç vermektedir (Esan, 2024).

Şekillendirme ve Kurutma

Sürekli hatta alçı hamuru, hareketli bir alt karton şeridi üzerine yayılırmakta, üzerine bir başka karton tabakası sarılarak karışım iki karton arasında kapalı bir "zarf" hâline getirilmektedir (Kneifel & ark., 2018; Quintana & ark., 2018). Hamur daha sonra, çekirdeği istenen kalınlığa sıkıştıran makaralar sisteminden geçirilmektedir (Quintana & ark., 2018). Hat boyunca ilerlerken karton kenarları arka kartonun üzerine katlanarak farklı kenar tipleri oluşturulur ve levha belirli uzunluklarda kesilir (Kneifel & ark., 2018). Karışım birkaç dakika içinde sertleşmeye başlar ve kesime hazır hâle gelmektedir (Quintana & ark., 2018). Son aşamada levhalar, kalan nemi uzaklaştırmak üzere etüvden geçirilmektedir (Kneifel & ark., 2018; Quintana & ark., 2018).

Prizlenme davranışı, üretim hattının hızıyla uyumlu olmak zorundadır. Genel olarak Paris alçısının priz süresi yaklaşık 5–15 dakika, sıva alçısının ise yaklaşık 20–30 dakika arasındadır. Su/toz oranı, sıcaklık ve katkılar bu süreyi değiştirmektedir (Esan, 2024).

Alternatif Üretim Teknolojileri: Yarı-Kuru Proses ve Kalıp Esaslı Üretim

Karton yüzeyli sürekli hat dışında, özellikle yonga ve lif takviyeli alçı levhalarda yarı-kuru presleme teknolojisi kullanılmaktadır. Yarı-kuru proseste odun lifi takviye malzemesi, sanayi kaynaklı baca gazı desülfürizasyonu alçısından kalsine edilmiş kalsiyum sülfat hemihidrat ise inorganik bağlayıcı olarak kullanılarak çevre dostu alçı lif levha üretilebilir. Proses, hem doğal alçıtaşı talebini hem de çevre kirliliğini azaltmaktadır (Tang & ark., 2013). Yarı-kuru prosele kurulacak bir alçı yonga levha tesisi, ısı üretimi, bağlayıcı kalsinasyonu ve levha üretimi olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Mehlhorn & Thole, 1990). Karışım hazırlığında katkı türü ve oranı kritik önemdedir. Kompozitde, geciktirici miktarı statik eğilme dayanımı, iç bağlanma dayanımı ve vida tutma kabiliyetini belirgin biçimde etkilerken, odun/alçı oranı su emme sonrası kalınlık şişmesini etkilemektedir (Tang & ark., 2013).

Deneysel ölçekte üretilen alçı yonga levhalarda karışım, ıslak kalıplarda şekillendirilip 20–24 °C sıcaklıkta, 1,5–2 MPa basınç altında 5 dakika preslenmekte, levhalar presleme sonrası metal plakalar arasında tutularak kurutulmakta ve 23 °C sıcaklıkta, %65 bağıl nemde üç hafta koşullandırılmaktadır. Odun lifi–alçı sistemlerinde kayda değer bir üretim sorunu, kuruma sırasında numunenin orta bölümünde oluşan bombelenmedir. Bu deformasyonun metal plakalar arasında kurutma ile önlenebilmektedir (Yalçın, 2022).

Prefabrik panel teknolojisinde ise, alçı tozu/su ve uygun katkılarla karıştırılarak hamur hâline getirilmekte, hamur istenen panel ölçülerini ve yüzey kalitesini verecek kalıplara dökülürmekte, prizlenme sonrası numuneler ortam koşullarında ya da hızlı kür için buharlı kür koşullarında kürlenmekte, kalıptan çıkarılan paneller nem içeriğini düşürmek için kurutma odalarına alınmaktadır. Bu yöntemin başlıca avantajı, yüksek boyutsal hassasiyet ve yüzey düzgünlüğü sağlayarak montaj sonrası düzeltme ihtiyacını azaltmasıdır. Modern fabrikalar dozajlama, karıştırma ve döküm işlevlerinde otomasyona yönelmektedir. Ağırlığı azaltmak ve ısı yalıtımını artırmak amacıyla hafif agrega veya köpürtücü katkılar da karışıma eklenebilmektedir. Cam elyaf takviyeli alçı paneller, takviye düzenine bağlı olarak taşıyıcı duvar veya bölme duvar işlevi görecek şekilde fabrikada üretilebilmektedir (Ramesh & Anbarasan, 2025).

Alçı–Takviye Malzemesi Etkileşimi ve Bağlanma Mekanizması

Alçı, düşük enerji tüketimi ve çevresel sürdürülebilirliği sayesinde "yeşil bağlayıcı" olarak öne çıksa da, kırılgan yapısını güçlendirmek amacıyla çeşitli lifli takviye malzemeleriyle birleştirilmesi yapısal performansın artırılması için kritik bir strateji sunmaktadır (Carvalho & ark., 2008).

Bu tür kompozit yapılar, takviye elemanlarının alçı matrisi ile kurduğu güçlü arayüzey etkileşimi sayesinde kırılgan bir malzemeden sünek bir davranış biçimine dönüşerek yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır (Esan, 2024; Ngah & ark., 2020; Otunla & ark., 2026). Alçı matrisi ile lifler arasındaki bu mekanik kenetlenme, hidratasyon sürecinde kristal büyümesinin takviye yüzeylerine tutunmasını sağlayarak çatlak ilerlemesinin önüne geçilmesini mümkün kılmaktadır (Foti & ark., 2019; Mutuk & ark., 2023). Bununla birlikte, matris içerisine eklenen parçacıkların ve liflerin boyutları, alçı kristallerinin birbirine kenetlenme biçimini ve kompozitin toplam gözenekliliğini doğrudan etkileyerek nihai mekanik özelliklerini şekillendirmektedir (Nindiyasari & ark., 2015). Özellikle doğal liflerin kullanımında, özüt maddelerinin alçı matrisinin hidratasyon süreci üzerindeki geciktirici etkisi, kalsiyum sülfat dihidrat kristallerinin hekzagonal form ve boyut değişimlerine neden olarak ara yüzey bağlanma kalitesini doğrudan belirlemektedir. Bu arayüzeydeki yüksek adezyon, lif yüzeylerinin alçı

tarafından pürüzlendirilmesiyle bağ dayanımının artırılmasına olanak tanmakta ve böylece kompozitin kırılma tokluğu iyileştirmektedir (Fantilli & ark., 2021). Bu nedenle arayüzey bağını yalnızca en yüksek adezyonu sağlayacak biçimde tasarlamak yerine, lif kopmasından önce kontrollü sıyrılmaya izin veren bir bağ dayanımı hedeflenmeli, böylece çatlak enerjisi tüketilirken kompozitin gevrek kırılması önlenebilir (Foti & ark., 2019). Bu etkileşim sürecinde lifler, alçı ağının içerisinde sürekliliği sağlayan bir faz görevi görerek (Kharrati & ark., 2023), uygulanan mekanik yüklerin matris içinde daha dengeli dağılmasını sağlamakta ve böylece malzemenin genel dayanıklılığını optimize etmektedir (Abir & ark., 2023). Ayrıca, plastik atıklardan elde edilen polimerik liflerin matris içerisindeki homojen dağılımı, kompozitin çekme ve eğilme direnci gibi mekanik karakteristiklerini iyileştirerek geri dönüştürülebilir malzeme kullanımını teşvik etmektedir (García & Suárez-Guerra, 2025). Ayrıca, matris ve takviye fazı arasındaki kimyasal uyumluluğun yönetilmesi, liflerin çevresel koşullara karşı korunmasını sağlayarak kompozit malzemenin uzun süreli yapısal bütünlüğünü temin etmektedir (Karadirek & Taşdemır, 2023; Laloğlu & Atik, 2025). Arayüzeyde gelişen bu mekanik etkileşimler, liflerin yüzey aktivasyonu ve hidrofilik karakterlerinin alçı kristalleşmesiyle uyumlu hale getirilmesiyle optimize edilebilmektedir (Esan, 2024). Selüloz esaslı liflerin suyu emip kristalleşme sırasında yeniden sağlayabilmesi, lif yüzeyinde heterojen çekirdeklenmeyi destekleyerek alçı kristallerinin arayüzde oluşumuna katkıda bulunabilmektedir (Nindiyasari & ark., 2015). Alkali, silan veya asetilasyon gibi yüzey işlemleri liflerin alçıyla uyumunu ve bağlanmasını artırabilir, ancak nem alımının sınırlandırılması da kompozitin uzun dönem dayanıklılığını korumak açısından önem taşımaktadır (Esan, 2024; Otunla & ark., 2026).

Lignoselülozik Katkılı Alçı Levhalar

Lignoselülozik katkıların öne çıkmasının ikinci nedeni, sentetik takviyelere kıyasla maliyet ve çevre dengesidir. Cam, karbon veya poliamid gibi sentetik lifler mekanik dayanım ve tokluğu artırsa da yüksek maliyet ve belirgin çevresel etki taşımaktadır (Agossou & Amziane, 2023). Sentetik lif takviyeli alçı kompozitleri daha pahalıdır ve doğal lif muadillerinin aksine biyobozunur değildir (Esan, 2024). Üçüncü neden ise atık boyutudur. Küresel tarımsal faaliyetler yılda yaklaşık 140 milyar metrik ton atık üretmekte, açık alanda yakma ve depolama hava, toprak ve su kirliliğine yol açmaktadır. Buğday sapı gibi artıkların alçı kompozitlere katılması hem sünekliği ve eğilme performansını iyileştiren hem de atık yönetimini çözen çift amaçlı bir strateji sunmaktadır (Ahmad & ark., 2026).

Levhalarda Kullanımın Sağladığı Avantajlar

Kırılganlığın Giderilmesi, Tokluk Ve Süneklik Kazanımı

Lifler alçı matrisine üç mekanizmayla müdahale etmektedir. Bunlar: (1) gerilmenin matris içinde eşit dağılmasını sağlayarak yerel gerilme yığılmalarını ve dolayısıyla çatlak/kırılma olasılığını azaltmaktadırlar, (2) çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyen bariyer işlevi görür, çatlağı dolambaçlı bir yola saptırarak durdurur ve böylece çekme ile eğilme dayanımını belirgin biçimde yükseltirler, (iii) gerilme altında deforme olup kırılarak enerjiyi soğurur, ani göçmeyi önleyerek tokluğu ve dayanıklılığı artırırlar (Esan, 2024).

Bu mekanizmanın ölçülebilir karşılığı keten lifli levhalarda net biçimde görülmektedir. Takviyeli alçı, kademeli ve kontrollü bir göçme sergileyerek sünek davranışa geçmekte ve tokluğu artmaktadır. Yapılan bir çalışmada, %3 oranında 36 mm uzunluğunda keten lifi katkısı en iyi mekanik performansı vermiş, süneklik faktörü 81'e ulaşmış ve eğilme dayanımında %438 artış

elde edilmiştir (Agossou & Amziane, 2023). Benzer şekilde, tarımsal lifler darbe dayanımını ve tokluğu belirgin biçimde iyileştirmekte, lif takviyeli sistemler çatlak sapması, lif sıyrılması ve kademeli göçme mekanizmaları sayesinde enerji soğurma kapasitesini artırmaktadır (Otunla & ark., 2026). Jüt gibi dokuma takviyelerde ise lifin katkısı dayanım artışından çok göçme davranışını değiştirmeye yöneliktir. Takviye, alçının ani/kırılgan göçmesini önleyerek çatlak yayılımını geciktirmektedir (Ngah & ark., 2020).

Basınç Ve Eğilme Dayanımında Artış

Literatür, lif katkısının alçının basınç dayanımını artırdığını tutarlı biçimde göstermektedir. Talaş–alçı kompozitlerinde, köpük önleyici katkı ile su içeriği %35 azaltılmış ve basınç dayanımı 2,21 MPa'dan 13,25 MPa'ya yükselmiştir. Tekstil atığı takviyesi basınç dayanımını 8 MPa'dan 13 MPa'ya, hurma lifi katkısı ise 6,8 MPa'dan 13 MPa'ya çıkararak alçının kırılgan karakterini daha esnek bir davranışa dönüştürmüştür. Eğilme tarafında da benzer iyileşmeler raporlanmaktadır. Tekstil atığı lifleri eğilme dayanımını 3,63 MPa'dan 3,78 MPa'ya çıkarmış, köpük önleyici ile işlenen talaş–alçı kompozitlerinde 4,43 MPa'dan 4,59 MPa'ya yükselmiş, selüloz hamuru lifleri ise saf alçıya kıyasla 13 MPa'lık bir eğilme performansı artışı sağlamıştır. Seramik ve beton molozu takviyesi eğilme dayanımını 2,65 MPa'dan 3,45 MPa'ya, PVC katkısı 4,77 MPa'dan 5,11 MPa'ya yükseltmiştir. Doğal lif veya katkı ile takviye edilen alçı kompozitleri, saf alçıya kıyasla iyileştirilmiş basınç ve eğilme dayanımı sergilemektedir (Esan, 2024).

Hafiflik Ve Yoğunluk Azalması

Lif içeriği arttıkça mekanik dayanımda tutarlı bir iyileşme gözlenirken kompozitin yoğunluğu düşmektedir. Yoğunluk azalması, en küçük tanelerde %16 ile %47 arasında değişmekte, %10 silika kompozit katkısı ile yoğunluk 1150 kg/m³'ten 1030 kg/m³'e gerilemekte, %5'e kadar odun partikülü katkısıyla 1100 kg/m³ seviyesine ulaşılmaktadır (Esan, 2024). Hafiflik, yapısal olmayan bir estetik tercih değil doğrudan bir kullanım avantajıdır. Daha hafif malzemelerin taşınması ve montajı kolaylaşmakta, nakliye maliyetleri düşmekte, yapı elemanları üzerindeki yük azalmakta ve tasarım esnekliği artmaktadır (Otunla & ark., 2026).

Isı Yalıtımı

Bitkisel liflerin mikro gözenekli yapısı ve düşük ısı iletkenliği, kompozitin ısı iletkenlik katsayısını düşürmektedir. %3 keten lifi katkısı ısı iletkenliğini 0,256 W/m.K'den 0,174 W/m.K'ye indirmiş, bu, ısı transfer indeksinde %50 azalma ve ısı yalıtımında %47 iyileşme anlamına gelmektedir (Agossou & Amziane, 2023). Tarımsal lifler doğal gözenekli yapıları sayesinde ısı transferini sınırlayarak verimli bir yalıtım elemanı gibi davranmakta, bu da onları enerji verimli yapılar için uygun kılmaktadır (Otunla & ark., 2026). Alçı kompozitlerin orta düzeydeki ısı yalıtımı, takviye malzemeleriyle daha da güçlendirilebilmektedir (Esan, 2024).

Akustik Performans

Lifli ağ yapısı, duvar ve tavan uygulamaları için elverişli ses yutma davranışı sağlamaktadır (Otunla & ark., 2026). Ölçülen değerler uygulamaya göre değişmektedir. Hindistan cevizi lifi içeriği arttıkça ses yutma katsayısı 5500 Hz'de 0,35'e ulaşmış; %10 talaş ve %20 ahşap yongası içeren kompozit, referans alçı levhaya kıyasla 2000 Hz'de %20 iyileşme ile 0,531 değerini vermiş, mantar–alçı kompozitleri yüksek frekanslarda 0,2–0,3 aralığında ses yutma katsayısı sergilemiştir. Ahşap ve kauçuk atığı ile üretilen blokta 1 kHz'de 0,72, 2–4 kHz aralığında 0,43 katsayı elde

edilmiştir. Ahşap lifinin alçı yerine 30:70 oranında kullanıldığı harçlarda ise ses iletim kaybı saf alçıdaki 15 dB'ye karşılık 18 dB olarak ölçülmüştür (Esan, 2024).

Yangın, Nem Düzenleme Ve İç Ortam Sağlığı

Alçı levhanın tercih edilme gerekçeleri arasında düşük yoğunluk, yangın direnci, ısı ve ses yalıtımı, mahal içi higrometri düzenlemesi ve düşük üretim maliyeti yer almaktadır. (Agossou & Amziane, 2023). Doğal lifler alçıya girdiğinde yangın direncini ve yalıtımı güçlendirmekte, biyobozunurluk ve düşük gömülü enerji ile çevresel etkiyi azaltmaktadır. Nem davranışında ise katkı türü belirleyici olmaktadır. Ayrıca doğal lifli alçı kompozitleri, ayırma aşamasında oluşan tehlikeli tozu en aza indirmesiyle sağlık açısından avantaj sunmaktadır (Esan, 2024).

Çevresel Ve Ekonomik Avantajlar

Biyo-esaslı katkılar, alçı kompozitlerin düşük gömülü enerji, geri dönüştürülebilirlik ve yenilenebilir malzemelerle uyumluluk gibi sürdürülebilirlik üstünlüklerini güçlendirmektedir (Esan, 2024) Tarımsal lifler eğilme dayanımını, tokluğu, ısı yalıtımını ve akustik performansı iyileştirirken yoğunluğu ve gömülü karbonu düşürmektedir. Bu lifler yenilenebilir ve çoğu zaman başka sektörlerin yan ürünü ya da atığı olduğundan sentetik malzemelere bağımlılığı azaltmakta, bertaraf edilecek kaynakları kullanarak yapı malzemelerinin karbon ayak izini düşürmektedir (Otunla & ark., 2026). Doğal alçı üretiminin karbon salımı ton başına yaklaşık 140 kg CO_2 olarak raporlanmakta, alçının hızlı priz, düşük yoğunluk, yangın direnci ile ısı ve ses yalıtımı gibi özellikleri onu tuğla ve beton bloğa karşı avantajlı kılmaktadır (Ahmad & ark., 2026). Alçının %100'e kadar geri dönüştürülebilir olması bu tabloyu tamamlamaktadır (Sekavová & ark., 2023). Yeşil bina sertifikasyon programları da biyo-esaslı malzeme kullanımını ödüllendirerek bu avantajı piyasa değerine dönüştürmektedir (Esan, 2024).

Lignoselülozik Katkılı Alçı Levhalarda Sürdürülebilirlik Yaklaşımı

Lignoselülozik alçı levhalarda sürdürülebilirlik yaklaşımı, yenilenebilir ve atık kaynaklı hammaddelerin değerlendirilmesi, üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin azaltılması ve malzemelerin yaşam döngüsü boyunca kaynak verimliliğinin artırılması temelinde şekillenmektedir. İnşaat sektörünün yüksek hammadde tüketimi ve sera gazı emisyonlarındaki önemli payı, geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak lignoselülozik katkılı kompozitlerin geliştirilmesini önemli hâle getirmektedir (Arehart & ark., 2021; Rumo, 2023). Tarımsal ve ormancılık faaliyetlerinden elde edilen saman, talaş, keten, kenevir ve selüloz gibi lignoselülozik kaynakların alçı matrisine dâhil edilmesi, atıkların katma değerli yapı ürünlerine dönüştürülmesine, doğal kaynak tüketiminin azaltılmasına ve sentetik takviye malzemelerine olan bağımlılığın sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır (Tang & ark., 2013; Esan, 2024). Ayrıca doğal liflerin düşük üretim enerjisi ve biyojenik karbon depolama potansiyeli, bu levhaların karbon ayak izinin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmalarında, lif türü ve katkı oranına bağlı olarak karbon emisyonlarında ve çevresel etkilerde belirgin azalmalar raporlanmıştır. Örneğin, keten lifi katkılı alçı levhalarda %3 lif oranıyla karbon ayak izinin %29 azaltılabildiği bildirilmiştir (Agossou ve Amziane, 2023). Bununla birlikte, çevresel kazanımların doğru değerlendirilebilmesi için hammadde temini, lif hazırlama ve yüzey işlemleri, üretim enerjisi, nakliye ve kullanım ömrü gibi tüm aşamaların birlikte ele alınması gerekmektedir.

Lignoselülozik alçı levhaların sürdürülebilirlik performansını belirleyen bir diğer unsur, biyojenik karbon depolama kapasitesi ve döngüsel ekonomi ilkelerine uyumudur. Doğal lifler,

bitkilerin büyüme sürecinde atmosferden aldıkları karbonu yapı malzemesinin kullanım ömrü boyunca bünyelerinde tutabilir; ancak bu faydanın büyüklüğü, biyojenik karbon içeriği, hizmet ömrü ve yaşam sonundaki işlem senaryolarına bağlıdır (Oever & ark., 2024). Alçı levhaların geri dönüştürülmesi de doğal kaynak tüketiminin ve üretim kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması bakımından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Geri dönüştürülmüş alçının ham alçı yerine kullanılmasıyla çevresel etkilerde %40–58 oranında azalma sağlanabildiği belirtilmektedir (Otunla & ark., 2026). Bununla birlikte, alçı çekirdeği ile karton kaplama arasındaki ilişkinin ayrıştırmayı zorlaştırması ve lignoselülozik liflerin geri dönüşüm akışına ek karmaşıklık getirmesi, malzemenin yaşam sonu yönetiminde dikkate alınması gereken sorunlardır (Rumo, 2023). Bu nedenle seçici söküm, bileşenlerin kolay ayrılmasını sağlayan tasarım, geri dönüştürülmüş alçı için kalite kriterlerinin oluşturulması ve yeniden kullanım olanaklarının geliştirilmesi, sürdürülebilir üretim yaklaşımının temel unsurlarıdır. Ayrıca LEED ve BREEAM gibi yeşil bina sertifikasyon sistemleri, sürdürülebilir malzeme kullanımının yapı sektöründe yaygınlaşmasını destekleyebilmektedir (Esan, 2024; Przybek, 2025). Bununla birlikte, biyojenik karbon depolama veya geri dönüştürülmüş hammadde kullanımı tek başına çevresel üstünlük için yeterli değildir, üretim süreçleri, taşıma mesafeleri ve yaşam sonu senaryoları da bütünleşik LCA kapsamında değerlendirilmelidir.

Lignoselülozik alçı levhaların çevresel avantajlarına karşın, uzun dönem dayanıklılık, nem duyarlılığı, mekanik performans ve geri dönüştürülebilirlik arasındaki ödünleşimler, sürdürülebilirlik yaklaşımının temel sınırlılıklarını oluşturmaktadır. Doğal liflerin hidrofilik yapısı, nem emilimine, liflerin şişmesine, lif–matris arayüzünde mikro çatlakların oluşmasına ve zamanla mekanik özelliklerin azalmasına neden olabilmektedir (Esan, 2024). Kimyasal veya biyolojik yüzey işlemleri, alkalizasyon ve uygun bağlayıcı sistemlerin kullanılması bu olumsuzlukları azaltabilse de işlem süreçlerinin enerji, kimyasal tüketimi ve maliyet üzerindeki etkileri ayrıca değerlendirilmelidir (Trociński & ark., 2024; Otunla & ark., 2026). Benzer biçimde, lif katkısının artması her zaman daha yüksek sürdürülebilirlik anlamına gelmemekte, optimum katkı oranının belirlenmesinde eğilme ve basınç dayanımı, nem ve yangın performansı, ısıl özellikler, üretilebilirlik ve hizmet ömrü birlikte dikkate alınmalıdır. Bu doğrultuda lignoselülozik alçı levhaların sürdürülebilirliği, yalnızca yenilenebilir hammadde kullanımına dayanan bir malzeme seçimi olarak değil, teknik performans ile çevresel etkilerin birlikte optimize edildiği bütüncül bir tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilmelidir. Gelecekteki araştırmalarda lif–matris uyumunun ve uzun dönem dayanıklılığın iyileştirilmesi, geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerinin tasarım aşamasından itibaren planlanması ve farklı üretim ile yaşam sonu senaryolarını kapsayan karşılaştırılabilir LCA çalışmalarının yaygınlaştırılması önem taşımaktadır (Arehart & ark., 2021; Lu & ark., 2024; Otunla & ark., 2026).

Lignoselülozik Katkılı Alçı Levhalarda Karbon Emisyonu

Lignoselülozik katkıların levhanın karbon emisyonu üzerindeki etkisi, tek yönlü bir azaltma mekanizması olarak değil, birbirini dengeleyen dört ayrı akışın bileşkesi olarak okunmalıdır. Bunlar: (1) alçıtaşının kalsinasyonundan kaynaklanan emisyonların lif katkısıyla seyreltilmesi, (2) lifin bünyesinde depolanan biyojenik karbonun yarattığı kompanzasyon, (3) lifin kendi üretim ve işleme zincirinden gelen emisyon yükü ve (4) nakliye ile yaşam sonu aşamalarındaki emisyon kaymaları. Bu nedenle literatürde bildirilen azalma oranları, sistem sınırına ve seçilen hesaplama yöntemine göre büyük ölçüde değişmektedir. Etki mekanizmaları şu şekilde sıralanmıştır;

- Kalsinasyon yükünün seyreltilmesi; Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları, alçı ürünlerinin çevresel sıcak noktalarını tutarlı biçimde hammadde temini ve kalsinasyon olarak tanımlamakta, kalsinasyon, ısıl enerji talebi nedeniyle sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Levhanın karbon yükü bu nedenle doğrudan içerdiği stuko miktarına bağlıdır. Çalışmalarında 1 kg alçı levha için küresel ısınma potansiyeli 2,14 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmış, bu değerdeki payı 0,811 kg stuko ile 2,521 MJ endüstriyel ısı üretmektedir (Quintana & ark., 2018). Bir ton alçı levha üretimi ise atmosfere yaklaşık 355 kg CO_2 salmaktadır. Lif katkısı, levha hacminin bir bölümünü alçı yerine bitkisel lifle doldurduğu için kalsine edilmesi gereken stuko miktarını ve dolayısıyla bu sıcak noktadaki emisyonu azaltır (Agossou & Amziane, 2023). Bu mekanizmanın genel çerçevesi, alçının kendisinin görece düşük karbonlu bir bağlayıcı olmasıyla birlikte değerlendirilmelidir. Alçı kalsinasyonu, çimento veya kirece kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için yakıt tüketimini ve CO_2 emisyonlarını düşürmekte (Aybar & ark., 2023), alçı bağlayıcılar düşük ısıl işlem sıcaklıkları ve kapalı döngü geri dönüştürülebilirliği sayesinde diğer inorganik bağlayıcılara göre daha çevre dostu kabul edilmektedir (Esan, 2024). LCA'nın "enerji yoğun prosesler" vurgusu da malzeme bileşimi azaltımı için kritik bir kaldıraç noktası hâline getirmektedir (Otunla & ark., 2026).
- Biyojenik karbon depolama ve kompanzasyon; Lignoselülozik katkının ayırt edici etkisi burada bulunmaktadır. Bitkisel lifler büyüme sırasında atmosferden CO_2 alıp bünyesinde karbon olarak bağlar ve bu karbon, ürün yapı içinde kaldığı sürece depolanmış kalmaktadır. Keten lifli alçı levhalarda bu etki doğrudan ölçülmüştür: %3 lif katkısı karbon ayak izinde %29 azalma sağlarken, %10 lif katkısında ayak izi neredeyse sıfıra inmektedir. Ancak burada kavramsal bir ayrım kritiktir. Bitkisel lif ekleyerek CO_2 azaltmayı bir kompanzasyon olarak tanımlamakta ve bunun levha üretiminde salınan CO_2 miktarını azaltmadığını, yalnızca bitki kullanımını teşvik ederek atmosferdeki CO_2 miktarını düşürdüğünü açıkça belirtmektedir (Agossou & Amziane, 2023). Biyojenik karbon katkısının yöntemsel hesabı, biyobazlı malzemenin kütlesi, biyojenik karbon içeriği, CO_2/karbon moleküler kütle oranı, hizmet ömrüne bağlı GWP fayda faktörü ve net biyojenik depolama oranının çarpımıyla yapılmaktadır. Kuru lignoselüloz liflerin (pamuk, keten, kenevir) biyojenik karbon içeriği yaklaşık 430 g C/kg, kuru ahşabın yaklaşık 500 g/kg, genleşmiş mantarın ise 685 g/kg düzeyindedir. Standartların çoğu 100 yıllık zaman dilimini benimsemekte, net depolama oranı ise yeni üretilmiş biyobazlı malzemelerde 1'den, yeniden kullanılmış/geri dönüştürülmüş malzemelerde 0'a kadar değişmektedir (Oever & ark., 2024). Bu fayda standart LCA hesaplamalarına ek olduğu için çift sayım riski taşımamakta, ancak standart LCA standartlarında ve bina çevresel performans araçlarında hâlen kredilendirilmemektedir (Oever & ark., 2024).
- Lifin kendi emisyon yükü ve sentetik takviyelerle karşılaştırma. Katkının karbon bilançosu, lifin üretim zincirine bağlıdır ve burada doğal lifler belirgin avantaj sağlamaktadır. Bir metrik ton karbon elyafı üretimi yaklaşık 300 GJ enerji gerektirirken, eşdeğer miktarda kenevir lifi yalnızca 5 GJ ile üretilebilmektedir. Karbon elyafı üretimi ton başına yaklaşık 29.500 kg, cam elyafı üretimi ise 1.700–2.500 kg CO_2 salmaktadır. Buna karşılık kenevir, keten, jüt ve kenaf liflerinin karbon dioksit emisyonları sırasıyla 410, 350, 550 ve 420 kg/ton düzeyindedir (Chen & ark., 2024). Sentetik lif üretiminin bu yüksek emisyon profili, doğal lif takviyeli alçı kompozitlerin geliştirilmesinin temel gerekçelerinden biri olarak gösterilmektedir. Doğal lif veya biyo-esaslı bağlayıcı

kullanımının, fosil kaynaklı malzemelere bağımlılığı azaltarak kompozitin çevresel profilini güçlendirdiği belirtilmektedir (Esan, 2024).

Nakliye ve yaşam sonu kaynaklı kaymalar. Katkı türü ne olursa olsun, karbon bilançosu lojistik ve bertaraf aşamalarından güçlü biçimde etkilenmektedir. Alçı levha üretiminde emisyonların yaklaşık %50,7'si imalattan, %9,3'ü karton üretiminden, kalan %49,3'ü ise 2.178 km'lik tedarik mesafesinden kaynaklanan nakliyeden gelmektedir (Monteiro Braz & ark., 2026). Karşılaştırmalı çalışmalar, geri dönüştürülmüş alçının ham alçıya üstünlük sağlamasının ancak nakliye mesafeleri asgaride tutulduğunda gerçekleştiğini, baca gazı desülfürizasyonu kaynaklı alçının ise madencilik etkilerini azaltırken, yükü fosil yakıtlı enerji üretimine kaydırdığını göstermektedir (Otunla & ark., 2026). Yaşam sonu tarafında ise biyobazlı malzemelerin karbon ayak izi avantajı, yakma veya düzenli depolama yoluyla atmosfere geri salındığında bir yük kaymasına dönüşebilmektedir (Lu & ark., 2024).

Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Alçı levhalar ve alçı esaslı kompozit levhalar, hafiflik, kolay uygulanabilirlik, yangın performansı ve yapı sektöründeki geniş kullanım alanları sayesinde modern yapı sistemlerinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, alçı matrisinin kırılgan yapısı, sınırlı çekme ve eğilme dayanımı ile neme karşı duyarlılığı, bu malzemelerin performansının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, uygun takviye malzemelerinin ve üretim parametrelerinin seçilmesiyle alçı esaslı levhaların mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir. Özellikle cam lifleri, doğal lifler ve lignoselülozik katkılar, çatlak ilerlemesinin sınırlandırılması, eğilme dayanımının ve kırılma tokluğunun artırılması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak elde edilen performans, yalnızca takviye türüne değil; lif miktarına, lif geometrisine, lif–matris ara yüzeyindeki bağlanmaya, su/alçı oranına, gözenekliliğe ve üretim koşullarına da bağlıdır.

Gelecek araştırmalarda, tarımsal ve odunsu atıklardan elde edilen doğal liflerin alçı kompozit levhalarda kullanımına öncelik verilmesi, hem kaynak verimliliği hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Bu tür katkılar, uygun şekilde tasarlanıp üretildiklerinde atıkların katma değerli yapı malzemelerine dönüştürülmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, doğal liflerin nem alma eğilimi, boyutsal kararlılığı ve alçı matrisiyle uyumu, uzun dönem performans bakımından dikkatle değerlendirilmelidir. Bu nedenle liflerin yüzey işlemleri, hidrofobik uygulamalar ve farklı bağlayıcı veya katkı sistemleriyle uyumluluğu üzerine yapılacak çalışmalar, kompozit levhaların dayanıklılığını artırabilecek önemli araştırma alanlarıdır.

Bir diğer önemli araştırma yönü, alçı levhaların yalnızca mekanik özellikleri üzerinden değil, ısıl, akustik, yangın ve nem performansları birlikte değerlendirilerek geliştirilmesidir. Takviye malzemelerinin levhanın yoğunluğu, ısı iletkenliği, ses yutumu ve yangın davranışı üzerindeki etkileri sistematik biçimde incelenmelidir. Bir özelliğin iyileştirilmesinin diğer özelliklerde olumsuz değişimlere yol açabileceği göz önünde bulundurularak, çok ölçütlü performans değerlendirmeleri yapılmalıdır. Bu yaklaşım, belirli bir kullanım amacına yönelik optimum lif türü, katkı oranı ve üretim koşullarının belirlenmesini kolaylaştıracaktır.

Gelecekteki çalışmaların bir diğer odağı, laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçların endüstriyel üretim koşullarında doğrulanması olmalıdır. Üretim sırasında karışımın işlenebilirliği, liflerin homojen dağılımı, priz süresi, kalıplama koşulları, levha kalınlığı ve üretim tekrarlanabilirliği gibi parametreler değerlendirilmelidir. Ayrıca, kısa süreli mekanik deneylerin yanı sıra nem döngüleri, sıcaklık değişimleri, yaşlandırma ve tekrarlı yükleme gibi koşulları içeren

uzun dönem dayanıklılık testlerine ihtiyaç vardır. Bu testler, geliştirilen kompozit levhaların gerçek yapı koşullarındaki davranışının ve kullanım ömrünün daha güvenilir biçimde belirlenmesini sağlayacaktır.

Sürdürülebilirlik açısından ise alçı levhaların ve alternatif alçı kompozitlerin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkilerinin karşılaştırılması gerekmektedir. Hammadde temini, liflerin hazırlanması, üretim için gereken enerji, taşıma, kullanım ömrü, bakım ve kullanım ömrü sonundaki yönetim süreçleri birlikte ele alınmalıdır. Doğal lif içeriğinin artırılması tek başına daha düşük çevresel etkiyi garanti etmediğinden, biyojenik karbon depolama, kaynak tüketimi, geri dönüştürülebilirlik ve atık yönetimi gibi göstergelerin yaşam döngüsü değerlendirmesiyle incelenmesi önemlidir. Ayrıca, alçı esaslı levhaların kullanım ömrü sonunda ayrıştırılması ve geri dönüştürülmesi, döngüsel ekonomi yaklaşımının yapı malzemelerine uygulanması bakımından temel araştırma konularındandır.

Sonuç olarak, alçı levhaların gelecekteki gelişimi, geleneksel alçı levhaların performansının iyileştirilmesi ile doğal lifler ve geri kazanılmış kaynaklar içeren alçı kompozit levhaların geliştirilmesini birlikte kapsayan bütüncül bir yaklaşıma dayanmaktadır. Doğal liflerle takviye, uygun üretim teknikleri ve çevresel performans değerlendirmeleri, daha hafif, dayanıklı ve kaynak verimli yapı elemanlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu potansiyelin uygulamaya aktarılabilmesi için mekanik performans, nem dayanımı, yangın güvenliği, uzun dönem dayanıklılık, üretim maliyeti ve geri dönüştürülebilirlik arasında dengeli bir tasarım yaklaşımı benimsenmelidir. Gelecek araştırmaların bu alanları birlikte ele alması, alçı esaslı levhaların sürdürülebilir yapı sistemlerindeki kullanım olanaklarını genişletebilir.

KAYNAKÇA

Abir, N., Siddique, A. B., Begum, H. A., Gafur, M. A., Khan, A. N., & Mahmud, M. A. (2023). Effect of fibre loading on mechanical properties of jute fibre bundle reinforced gypsum composites. Heliyon, 9(7), Article e18147. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18147

Adrien, J., Meille, S., Tadier, S., Maire, É., & Sasaki, L. (2016). In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting. Cement and Concrete Research, 82, 107–116. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.011

Agossou, O. G., & Amziane, S. (2023). Analysis of mechanical and thermal performance and environmental impact of flax-fiber-reinforced gypsum boards. Buildings, 13(12), Article 3098. https://doi.org/10.3390/buildings13123098

Ahmad, H., Ejaz, M. F., Riaz, M. R., Shahzad, S., El Kadri, S., & Kmeid, M. G. (2026). Machine learning-based prediction of compressive and flexural strength of wheat straw reinforced sustainable gypsum composites. Scientific Reports, 16, Article 15087. https://doi.org/10.1038/s41598-026-45024-z

Aiken, T. A., Russell, M., McPolin, D., & Bagnall, L. (2020). Magnesium oxychloride boards: Understanding a novel building material. Materials and Structures, 53, Article 118. https://doi.org/10.1617/s11527-020-01547-z

Ali, M. A. (1972). Study of brittle fibre-brittle matrix composite system with particular reference to glass fibre reinforced gypsum [Master's thesis, University of Surrey]. University of Surrey Open Research

Ammayappan, S., Marimuthu Pandurangan, M., & Ramanathan, T. (2024). Behaviour of glass and sisal incorporated gypsum based composite panels under axial compression—Experimental and numerical study. Materials Research Express, 11(4), Article 045201. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad3524

Arabacı, E., & Pekmezci, B. Y. (2021). Evaluation of physical and mechanical properties of nonstructural composite panels used in buildings. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36(3), 1347–1360. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.769811

Arehart, J. H., Hart, J., Pomponi, F., & D'Amico, B. (2021). Carbon sequestration and storage in the built environment. Sustainable Production and Consumption, 27, 1047–1063. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.028

ASTM International. (2024). Standard test methods for high-temperature characterization of gypsum boards and panels (ASTM C1795-17(2024)). https://doi.org/10.1520/C1795-17R24

Aybar, R.M., Porras-Amores, C., Moreno Fernández, E., & Pérez Raposo, Á. (2023). Physical-mechanical properties of new recycled materials with additions of padel-tennis ball waste. Journal of Cleaner Production, 413, Article 137392. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137392

Bessonov, I. V., Zhukov, A. D., Bobrova, E. Y., Gorbunova, E. A., & Govryakov, I. S. (2025). Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods. Nanotechnologies in Construction, 17(2), 109–118. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118

Braga, G. S., & Freitas, J. C. de O. (2024). Gypsum slurries to apply in oil well: An insight into thickening time. Research, Society and Development, 13(3), e7413345299. https://doi.org/10.33448/rsd-v13i3.45299

Carvalho, M. A., Calil Júnior, C., Savastano Junior, H., Tubino, R., & Carvalho, M. T. (2008). Microstructure and mechanical properties of gypsum composites reinforced with recycled cellulose pulp. Materials Research, 11(4), 391–397. https://doi.org/10.1590/S1516-14392008000400002

Chen, L., Zhang, Y., Chen, Z., Dong, Y., Jiang, Y., Hua, J., Liu, Y., Osman, A. I., Farghali, M., Huang, L., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2024). Biomaterials technology and policies in the building sector: A review. Environmental Chemistry Letters, 22, 715–750. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01689-w

Dantec, T. (2016). Gypsum external renders of Paris: History and fabrication. In J. W. P. Campbell, N. Bill, M. Driver, M. Heaton, Y. Pan, M. Tutton, C. Wall, & D. Yeomans (Eds.), Further studies in the history of construction: Proceedings of the Third Conference of the Construction History Society (pp. 59–72). Construction History Society.

Davraz, M., Koru, M., & Işıldar, N. (2025). Design of perlite based thermal insulation plate and determination of its physical, mechanical and thermal properties. International Journal of Thermophysics, 46, Article 31. https://doi.org/10.1007/s10765-025-03503-x

Dedesko, S., & Siegel, J. A. (2015). Moisture parameters and fungal communities associated with gypsum drywall in buildings. Microbiome, 3, Article 71. https://doi.org/10.1186/s40168-015-0137-y

Esan, M. T. (2024). Review of gypsum reinforced composites as building materials. Discover Civil Engineering, 1, 5. https://doi.org/10.1007/s44290-024-00005-x

Fantilli, A. P., Jóźwiak-Niedźwiedzka, D., & Denis, P. (2021). Bio-fibres as a reinforcement of gypsum composites. Materials, 14(17), Article 4830. https://doi.org/10.3390/ma14174830

Fernandes, G., Abhyankar, V., & O'Dell, J. M. (2021). Calcium sulfate as a scaffold for bone tissue engineering: A descriptive review. Journal of Dentistry, Oral Disorders & Therapy, 9(1), 1–22. https://doi.org/10.15226/jdodt.2021.001124

Foti, D., Adamopoulos, S., Voulgaridou, E., Voulgaridis, E., Passialis, C., Amiandamhen, S. O., & Daniel, G. (2019). Microstructure and compressive strength of gypsum-bonded composites with papers, paperboards and Tetra Pak recycled materials. Journal of Wood Science, 65, 42. https://doi.org/10.1186/s10086-019-1821-5

García, J. L., & Suárez-Guerra, F. (2025). Estudio de la adherencia fibra-matriz entre la matriz de yeso y fibras poliméricas procedentes de procesos de reciclado. Revista Española de Mecánica de la Fractura, (10), 65–69.

Gong, M. (2021). Wood and engineered wood products: Stress and deformation. In M. Gong (Ed.), Engineered wood products for construction. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.101199

Gravit, M., Nedryshkin, O., & Zhuravlev, A. (2017). Negative use of finishing materials on Sorel's cement. MATEC Web of Conferences, 106, Article 03029. https://doi.org/10.1051/matecconf/201710603029

Ji, R., He, Y., Zhang, Z. T., Liu, L. L., & Wang, X. D. (2015). The effect of expanded perlite on the performance of the lightweight wall materials. Applied Mechanics and Materials, 723, 464–467. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.723.464

Karadirek, G., & Taşdemir, M. (2024). Ticari NAFILean polipropilen/haşhaş (Papaver somniferum) sapı polimer kompozitinin mekanik ve morfolojik özelliklerine MAPP'nin etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 12(1), 17–24. https://doi.org/10.29109/gujsc.1367803

Kharrati, K., Salhi, M., Hidouri, A., & Abdeljabar, R. (2023). Effect of luffa sponge fibre mats embedded in the plaster matrix. Acta Mechanica et Automatica, 17(4), 523–532. https://doi.org/10.2478/ama-2023-0061

Kneifel, J. D., Greig, A. L., Lavappa, P. D., & Polidoro, B. J. (2018). Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) Online 2.0 technical manual (NIST Technical Note 2032). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2032

Laloğlu, S., & Atik, C. (2025). Kompozit takviye malzemesi olarak kenevir lifi işlenmesine genel bir bakış. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 27(2), 347–363. https://doi.org/10.24011/barofd.1593369

Lippiatt, B. C. (2007). BEES 4.0: Building for environmental and economic sustainability—Technical manual and user guide (NIST Interagency/Internal Report 7423). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7423

Luckevich, L. M., & Kuntze, R. A. (1984). The relationship between water demand and particle size distribution of stucco. In R. A. Kuntze (Ed.), The chemistry and technology of gypsum (ASTM Special Technical Publication No. 861, pp. 84–96). ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP30273S

Lu, Z., Hauschild, M., Ottosen, L. M., Ambaye, T. G., Zerbino, P., Aloini, D., & Lima, A. T. (2024). Climate mitigation potential of biobased insulation materials: A comprehensive review and categorization. Journal of Cleaner Production, 470, Article 143356. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143356

Mehlhorn, L., & Thole, V. (1990). A process design of gypsum particleboard. Wood Industry, 4(2), 13–19.

Monteiro Braz, N., Moraes, G. H., & da Rocha Duailibe Monteiro, A. (2026). Comparative life cycle assessment of construction materials for drywall application: Plastic waste and natural

fiber composite versus conventional gypsum board. Advanced Materials & Sustainable Manufacturing, 3(2), Article 10010. https://doi.org/10.70322/amsm.2026.10010

Mutuk, T., Arpacıoğlu, K., Alişır, S., & Demir, G. (2023). Thermal and mechanical evaluation of natural fibers reinforced gypsum plaster composite. Journal of Metals, Materials and Minerals, 33(1), 116–123. https://doi.org/10.55713/jmmm.v33i1.1669

Ngah, S.A., Dams, B., Ansell, M. P., Stewart, J., Hempstead, R., & Ball, R. J. (2020). Structural performance of fibrous plaster. Part 1: Physical and mechanical properties of hessian and glass fibre reinforced gypsum composites. Construction and Building Materials, 259, 120396. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120396

Nindiyasari, F., Griesshaber, E., Zimmermann, T., Manian, A. P., Randow, C., Zehbe, R., Fernandez-Diaz, L., Ziegler, A., Fleck, C., & Schmahl, W. W. (2016). Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite. Journal of Composite Materials, 50(5), 657–672. https://doi.org/10.1177/0021998315580826

Oever, M., Vural Gursel, I., Weterings, H., de Munck, E., van der Burgh, F., Verspeek, S., & Drissen, J. (2024). Bio-based building products in the Dutch Environmental Database (NMD). Part 1: Proposal for crediting biogenic carbon storage (Report No. 2545). Wageningen Food & Biobased Research. https://doi.org/10.18174/647711

Otunla, R. A., Adeleke, A. A., Olosho, A. I., Ogedengbe, T. S., Ikubanni, P. P., Rasheed, H. A., & Bamgbade, A. A. (2026). Gypsum in the 21st century: Multifaceted applications and emerging opportunities. Journal of Engineering and Applied Science, 73, Article 57. https://doi.org/10.1186/s44147-026-00905-y

Preturlan, J. G. D., Vieille, L., Quiligotti, S., & Favergeon, L. (2020). Kinetics and mechanism of the dehydration of calcium sulfate dihydrate: A comprehensive approach for studying the dehydration of ionic hydrates under controlled temperature and water vapor pressure. The Journal of Physical Chemistry C, 124(48), 26352–26367. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c09041

Przybek, A. (2025). The role of natural fibers in the building industry—The perspective of sustainable development. Materials, 18(16), Article 3803. https://doi.org/10.3390/ma18163803

Quintana, A., Alba, J., del Rey, R., & Guillén-Guillamón, I. (2018). Comparative life cycle assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. Journal of Cleaner Production, 185, 408–420. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.042

Ramesh, V., & Anbarasan, M. I. (2025). Structural feasibility of glass fiber reinforced gypsum (GFRG) panels: A review on load-bearing capacity, fire resistance, and durability. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 6, Article 24. https://doi.org/10.1186/s43065-025-00142-2

Rumo, D. (2023). Forgotten dust: Following plasterboard for non-destructive circular economies. Frontiers in Sustainability, 4, Article 994452. https://doi.org/10.3389/frsus.2023.994452

Sekavová, H., Prošek, Z., & Tesárek, P. (2023). Dependence of mechanical and thermal properties on the composition of lightweight gypsum composites. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 40, 88–92. https://doi.org/10.14311/APP.2023.40.0088

Shipp, P. H., Yu, Q., Hall, J. R., Mitchell, M. R., & Gann, R. G. (2011). Bench tests for characterizing the thermophysical properties of Type X special fire resistant gypsum board

exposed to fire. Journal of Testing and Evaluation, 39(6), 1023–1029. https://doi.org/10.1520/JTE103914

Sun, J., Cong, X.-H., Liu, H.-B., & Sun, L. (2011). Experimental study of the effect of water reducer on the plaster board production in low energy-consumed way. Advanced Materials Research, 250–253, 969–973. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.969

Şahin, H. T., & Şimşek, Y. (2021). Mineral-bonded wood composites: An alternative building materials. In Engineered wood products for construction. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.98988

Tang, C. F., Cai, C. W., Xu, B., & Liu, Y. L. (2013). Study on the application of desulfurization gypsum for the gypsum fiber board production. Applied Mechanics and Materials, 357–360, 646–650. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.646

Tichi, A. H., & Khatiri, A. (2024). Characterization of an eco-friendly gypsum composite board using agricultural fibers (rice straw). BioResources, 19(3), 6724–6746. https://doi.org/10.15376/biores.19.3.6724-6746

Trociński, A., Wieruszewski, M., Bartkowiak, M., Dziurka, D., & Mirski, R. (2024). The influence of hemp fibers (Cannabis sativa L.) on the mechanical properties of fiber–gypsum boards reinforcing the gypsum matrix. Polymers, 16(18), Article 2644. https://doi.org/10.3390/polym16182644

Yalçın, Ö. Ü. (2022). Evaluation of various properties of gypsum particleboards reinforced with olivine mineral. Turkish Journal of Forestry, 23(4), 305–312. https://doi.org/10.18182/tjf.1142148

Ye, Y., Huang, Q., & Li, X. (2024). Effect of fiber loading on mechanical and flame-retardant properties of poplar-fiber-reinforced gypsum composites. Molecules, 29(11), 2674. https://doi.org/10.3390/molecules29112674

Wu, Y.-F., & Dare, M. P. (2004). Axial and shear behavior of glass fiber reinforced gypsum wall panels: Tests. Journal of Composites for Construction, 8(6), 569–578. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:6(569

Zobal, O., Jára, R., & Hataj, M. (2017). Methodology for measuring the shear stress of plasterboards. Acta Polytechnica CTU Proceedings, 13, 157–161. https://doi.org/10.14311/APP.2017.13.0157

BÖLÜM 3

HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİNDE GELİŞMİŞ SERAMİK MATRİS KOMPOZİTLER VE INCONEL SÜPER ALAŞIMLAR

Hasan Köten*, Ehsan Kianfar, Behnaz Chaharbashi, Mahdiyeh Nosratabadi

*Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Özet

Gelişmiş seramik matris kompozitler ve Inconel süper alaşımları, parçaların aşırı ısıya, yüksek basınca ve sert kimyasal ortamlara dayanması gereken havacılık uygulamalarında kullanılan iki malzeme türüdür. Bu bölüm, 2010'dan 2026'ya kadar olan önemli değişikliklere ayrıntılı bir bakış yaparak, malzemelerin nasıl üretildiğinin ve yapılarının aşınma, güvenlik ve uygulama alanlarıyla nasıl ilişkili olduğunu göstermektedir. Seramik matris kompozitler için, liflerin matrisle nasıl bağlantı kurduğunu, malzemenin nasıl yoğunlaştığını, ısı ve kimyasallardan korunmak için nasıl kaplandığını ve çatlama, oksidasyon ve mekanik gerilmenin birbirini nasıl etkilediğini açıklamaktadır. Bölüm, havacılık uygulamalarında motorların içinde hareket etmeyen parçaların, motorlarda dönen parçaların, roketlerde kullanılan bileşenlerin ve çok yüksek sıcaklıklara karşı koruma sağlayan malzemelerin nasıl kullanıldığını incelemektedir. Ayrıca, laboratuvarlarda bulunanları, gerçek parçalar üzerinde test edilenleri ve sahada gerçekten kullanılanları açıkça ayırmaktadır. Malzeme yapısına dayalı modelleme, X-ışını görüntüleme, ses tabanlı testler ve malzeme özelliklerini analiz etmek için makine öğrenimi kullanımı gibi yeni tekniklerin kullanım açısından ne kadar güvenilir ve sağlam oldukları kontrol ediliyor. İlerlemek için, malzemelerin tutarlı bir şekilde üretilebilmesi, kaplamaların bunlara düzgün bir şekilde yapışması, malzemelerin

ısıya, basınca ve kimyasallara aynı anda maruz kaldığında dayanıklı olması ve yüzeylerinin kolayca incelenebilmesi önemlidir. Doğru malzemeyi seçmek çok önemli bir karardır, çünkü ısı yönetimini, bulunacağı ortamı, üretim şeklini ve bakımını etkiler. Gelecekteki ilerleme, daha iyi malzemelerin her seferinde aynı şekilde üretilen, uzun süre dayanıklı kalan ve havacılıkta kullanımı uygun fiyatlı parçalara dönüştürülmesine bağlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Seramik matris kompozitler; SiC/SiC; Inconel süper alaşımları; havacılık mühendisliği; eklemeli imalat; çevresel bariyer kaplamaları; yüksek sıcaklık dayanıklılığı; yorulma; tahribatsız muayene; bileşen kalifikasyonu.

1. Giriş

Uzay araçlarında kullanılan itme sistemleri, yüksek ısıya ve zorlu çevre koşullarına dayanabilen ve mekanik strese karşı koyabilen malzemelere dayanır. Motorun daha iyi çalışması için, kullanılan malzemelerin çok yüksek sıcaklıklarda bile güçlü ve etkili kalması gerekir. Aynı zamanda, bu malzemelerin hafif, uzun ömürlü, kolay üretilebilir ve güvenilir olması gerekir. Bu gereksinimler birbiriyle bağlantılıdır: Yüksek sıcaklıklara dayanabilen bir malzeme, hasara karşı direnç göstermiyorsa, farklı ortamlara uyum sağlayamıyorsa veya tutarlı bir şekilde üretildiğinde iyi kaliteyi koruyamıyorsa, bir parça için iyi sonuç vermeyebilir. Bu, özellikle itme sistemlerinde önemlidir çünkü doğru malzemenin seçimi, sistemin dayanabileceği maksimum ısıyı ve destekleyici yapıların nasıl inşa edildiğini etkiler. Seramik matris kompozitler (CMC'ler), çok yüksek sıcaklıklarda hasara karşı koruma sağlamak için seramik tabanları, güçlü lifleri ve aralarındaki özel katmanları birleştirir. Süper alaşımlar, özel kimyasal bileşimlerinden ve dikkatlice kontrol edilen iç yapılarından güç ve aşınmaya karşı direnç kazanırlar. Bu malzemeler arasında doğru bir karşılaştırma, sadece güçlerine veya dayanabilecekleri en yüksek sıcaklığa bakmaktan daha fazlasını içermelidir. Bir parçanın ne kadar iyi çalıştığı, malzemenin sürekli strese,

tekrarlanan sıcaklık değişimlerine, kusurlara, yüzey durumuna ve belirli ortamlarda bulunmaya nasıl dayandığına bağlıdır. Örneğin, eklemeli imalat yoluyla üretilen Inconel 718 üzerinde yapılan araştırmalar, ısıl işlem ve tasarım sorunlarının yorulma performansını nasıl etkilediğini incelemiştir. Kaplamalı SiC bazlı sistemler üzerinde yapılan çalışmalar, temel malzemenin özelliklerinin kaplama içindeki oksidasyonun nasıl meydana geldiğini etkileyebileceğini bulmuştur. Bu sonuçlar, malzemeyi, nasıl yapıldığını, koruyucu katmanları ve kullanıldığı koşulları birlikte ele almanın parçalar hakkında düşünmenin yararlı bir yolu olduğunu göstermektedir [4, 5]. Seramik matris kompozitlerinin (CMC'ler) havacılık uygulamalarında kullanılmasına olan ilgi, seramiklerin ısıya dayanıklı özelliklerini, çatlakların kontrolsüz yayılmasını engelleyen bir yapıyla birleştirme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Bu, güçlü CMC parçaları oluşturmak için çok önemlidir çünkü hasarın içeride nasıl oluştuğu, malzemenin ne kadar ağırlık taşıyabileceği kadar önemli olabilir [3]. Bu alanda önemli bir ilerleme, Bale ve arkadaşları tarafından, malzemeler 1750°C'ye kadar çok yüksek sıcaklıklarda stres altındayken hasarın nasıl değiştiğini gözlemlemek için senkrotron X-ışını mikrotomografisi kullanılarak elde edildi. Çalışmaları, aşırı koşullar altında iç çatlakların üç boyutlu görüntülerini sağlayarak, hasarı incelemek ve arıza modellerini geliştirmek için yeni bir deneysel yöntem oluşturdu. Ölçtükleri sıcaklık, bir havacılık parçasının güvenli bir şekilde çalışabileceği gerçek sıcaklıkla aynı değildir [3]. Malzemenin çevreden korunması da CMC'lerin oluşturulmasında önemli bir unsurdur. Bu dönemin başlarındaki araştırmalar, kaplamaların nasıl tasarlanacağına odaklanarak bunu zaten ele almıştı. Bu erken dönem araştırmaları, seramik kompozitlerin yapımında her zaman hem malzemenin mukavemetinin hem de çevresel koşullarla başa çıkma yeteneğinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir [6]. Yeni çalışmalar, koruyucu bir kaplamanın, üzerinde kullanıldığı malzemeyi hesaba katmadan tek başına doğru şekilde değerlendirilemeyeceğini açıklamaktadır.

Ardrey ve ark. [5], çeşitli SiC malzemeleri üzerindeki çevresel bariyer kaplamalarını incelemiş ve bu kaplamaların, malzemeler oksidasyona maruz kaldığında nasıl performans gösterdiğini, kaplanmış CMC örnekleriyle karşılaştırarak kontrol etmiştir . Kaplanmış CMC'ler, çalışmada kullanılan saf SiC örneklerine kıyasla daha hızlı bir şekilde oksit tabakası oluşturmuştur. Bu bulgu, basit, tek malzemeli test örneklerinin, kaplamaların gerçek kompozit malzemeler üzerindeki davranışını doğru bir şekilde göstermeyebileceğini ortaya koymaktadır [5]. Bu çalışmalar, CMC teknolojisindeki ilerlemenin, iç hasarın nasıl geliştiği ve kaplama ile temel malzemenin kimyasal olarak nasıl tepki verdiğiyle etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle, bu bölüm, takviye tasarımını, malzemenin yapım sürecini, katmanların birlikte nasıl çalıştığını ve çevresel faktörlere karşı korunma yollarını, malzemenin tasarımının önemli parçaları olarak incelemektedir. CMC'ler ve Inconel süper alaşımları, güçlendirme ve hasara karşı dayanıklılıkları bakımından farklılık gösterse de, ortak bir değerlendirme çerçevesi kullanılarak incelenmelidir. CMC'ler için performanslarını etkileyen temel faktörler arasında takviye malzemesinin yapısı, matrisin durumu, farklı fazlar arasındaki katmanlar, iç kusurlar ve yüzeylerine uygulanan koruyucu katmanlar yer almaktadır. Katmanlı üretim yoluyla üretilen Inconel'de ise önemli özellikler arasında katılaşma sırasında oluşan mikro yapı, mevcut kusurların türleri ve miktarları, uygulanan ısıl işlem ve yüzeyin durumu bulunmaktadır. Her iki alandan yapılan araştırmalar, bu malzemelerin ne kadar iyi çalıştığının, üretim süreçleri sırasında oluşturulan veya değiştirilen özelliklere büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir [3–5,7,8]. Bunu adım adım inceliyoruz: önce nasıl işlendiğine, sonra küçük yapısına, sonra nasıl hasar gördüğüne ve son olarak ne kadar iyi performans gösterdiğine bakıyoruz. Bir malzemenin işlenmesi, başlangıç durumunu etkiler. Hasar, bu mikro yapısal özelliklerin çevreleriyle etkileşime girmesiyle oluşur. Sonuç olarak, bileşenin ne kadar iyi çalıştığı, kullanım sırasında zamanla biriken tüm hasarlardan kaynaklanır. Yüksek ısıda yapılan

hızlı bir test, malzemenin zaman içinde ne kadar dayanabileceğini kontrol etmekle aynı şeyi söylemez. Sadece bir malzeme parçası üzerinde bir kaplamayı test etmek, aynı sonuçların ek takviye parçalarına sahip bir kompozit malzeme için de geçerli olacağı anlamına gelmez. Bu bölüm, özellikle havacılık sektöründe kullanılan seramik matris kompozitleri (CMC'ler) ve bazı Inconel süper alaşımları üzerinde durularak, 2010 yılı ile Eylül 2026 arasında meydana gelen gelişmeleri ve iyileştirmeleri incelemektedir. Kullanılan malzemelerin daha yüksek kalitesine, ürünlerin yeni üretim yöntemlerine, yapı içindeki malzemelerin nasıl yönetildiğine, onları korumak için özel katmanların kullanımına, fiziksel stres altında ne kadar iyi çalıştıklarına ve zorlu hava ve ortamlara karşı dayanıklılıklarına bakılır. Araştırmacılar, deneylerin gerçekleştiği kesin durumları ve ortamları dikkate alarak farklı çalışmaların sonuçlarını inceler. Bu sonuçlar, kullanılan malzemeyi, nasıl üretildiğini, koruyucu kaplamaları ve kullanıldığı koşulları birlikte ele alan bir düşünme biçimini destekler [4, 5]. Uzay sanayinde seramik matris kompozitlerinin (CMC) kullanımına olan ilgi, seramiklerin ısıya dayanıklı özelliklerini, çatlakların kontrolsüz yayılmasını engelleyen bir yapıyla birleştirme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Uzun liflere sahip malzemelerde, liflerin ve çevreleyen malzemenin birlikte çalışma şekli, malzeme gerildiğinde veya itildiğinde hasarın nasıl başladığı açısından çok önemlidir. Malzemeyi tek bir katı seramik olarak görmek yerine, çatlakların nasıl başladığını ve karmaşık bir yapıda birbirlerini nasıl etkilediğini anlamanız gerekir.

2. Malzeme Mimarileri ve Mikro Yapısal Temeller

Seramik matris kompozitlerin ve Inconel süper alaşımlarının performansı, farklı ölçek seviyelerinde var olan yapısal özelliklerden etkilenir. Seramik matris kompozitlerde bu yapılar, tek tek lifleri, lifler ile çevreleyen matris malzemesi arasında oluşan katmanları, matrisin kendisini, mevcut gözenekleri ve lif demetlerinin nasıl organize edildiğini içerir. Inconel alaşımları için yapı,

katı çözelti matrisinden, malzemeyi daha güçlü hale getirmeye yardımcı olan küçük parçacıklardan, taneler arasındaki sınırlardan, belirli elementlerin yoğunlaştığı alanlardan ve üretim sürecinde oluşabilecek kusurlardan oluşur. Bu yapısal unsurları anlamak gerçekten önemlidir çünkü benzer kimyasal bileşime sahip malzemelerin, üretildikten ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra mekanik özelliklerinde neden farklı davrandığını açıklarlar.

2.1. Havacılık ve Uzay Seramik Matris Kompozitlerinin Sınıflandırılması

Sürekli lifli seramik matris kompozit (CMC), seramik bir tabanı, içine dokunmuş liflerle birleştiren bir malzeme türüdür. Bu lifler, ağırlığı taşımaya ve çatlakların malzeme boyunca nasıl yayılacağını kontrol etmeye yardımcı olmak için dikkatlice konumlandırılmıştır. Bu kompozitleri adlandırırken, genellikle kullanılan lif türüyle başlayan ve ardından malzemenin ana gövdesini oluşturan seramik türüyle devam eden standart bir format vardır. Örneğin, "SiC/SiC", hem liflerin hem de matrisin silisyum karbürden yapıldığı anlamına gelir. Buna karşılık, "C/SiC", liflerin karbondan yapıldığı, ancak matrisin hala silisyum karbür olduğu bir kompoziti ifade eder. Bu isimler ana parçalara hızlı bir genel bakış sunsa da, malzeme hakkındaki tüm ayrıntıları tam olarak yansıtmaz. Bir CMC'yi gerçekten anlamak ve doğru bir şekilde tanımlamak için, temel bileşenlerden daha fazlasını göz önünde bulundurmanız gerekir. Elyafın mukavemeti ve tutarlılığı, elyaflar ve matris arasındaki katmanın (ara faz olarak bilinir) kimyasal bileşimi, elyafların nasıl düzenlendiği, matrisin nasıl yapıldığı ve üretim sürecinden sonra kalabilecek hava cepleri veya boşlukların miktarı gibi faktörlerin hepsi önemlidir. Havacılık ve uzay endüstrisinde sıklıkla kullanılan üç ana CMC türü vardır: SiC/SiC, C/SiC ve oksit/oksit kompozitler. Bu malzemelerin her birini benzersiz kılan şey sadece kimyasal bileşimleri değil, aynı zamanda iç yapılarının stresi yönetmek, hasarı gidermek ve havacılık ve uzay uygulamalarında bulunan zorlu koşullara dayanmak için nasıl birlikte çalıştığıdır.

2.1.1. Silisyum karbür lif takviyeli silisyum karbür kompozitler

SiC/SiC kompozitleri, güçlendirme bileşeni olarak silisyum karbür (SiC) lifleri ve bu lifleri bir arada tutan matris olarak SiC bazlı bir malzeme kullanılarak üretilir. Bu matris, kompozit üzerinde etkili olan kuvvetlerin dağıtılmasına yardımcı olur ve ayrıca nihai parçanın genel şeklini de belirler. Tipik olarak, lifler ve matris arasında dikkatlice tasarlanmış, ara faz olarak bilinen özel bir katman bulunur. Bu ara faz çok önemlidir çünkü matristeki çatlakların nasıl davrandığını kontrol eder. Matriste bir çatlak oluşursa, ara faz onu farklı bir yöne yönlendirerek lifler boyunca yayılmasını önleyebilir. Bu yönlendirme, matris çatladığında bile liflerin işlevlerini yerine getirme yeteneğini korumaya yardımcı olur. Bor nitrür içeren ara fazlar üzerine yapılan araştırmalar, bu katmanların kalınlığının ve yapısının değiştirilmesinin kompozitin genel davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir [9, 10]. Ek olarak, matrisin kendisi, kompoziti oluşturmak için kullanılan yönteme bağlı olarak değişebilir. Örneğin, eriyik infiltrasyonu gibi bazı teknikler SiC ile birlikte bir miktar silikon bırakabilirken, diğer yöntemler farklı gözenek desenlerine ve matris bileşimine yol açabilir. Üç boyutlu dokunmuş bir SiC/SiC kompozitinin ayrıntılı bir incelemesi, matrisin hem SiC hem de silikon gibi birden fazla faz türünden oluşabileceğini ortaya koymuştur [11]. Bu nedenle, "SiC/SiC" terimi, matrisin tamamen homojen ve katı olduğu anlamına gelmemelidir [11].

2.1.2. Karbon fiber takviyeli silisyum karbür kompozitler

C/SiC kompozitleri, takviye malzemesi olarak karbon liflerinin silisyum karbürden (SiC) yapılmış bir matrisle karıştırılmasıyla oluşturulur. Bu kompozitlerin geliştirilmesi, takviyenin yapısının dikkatli bir şekilde planlanmasını ve malzemenin çevresel hasardan korunması için adımlar atılmasını gerektirir. Örneğin, Giriş bölümünde tartışılan bir çalışma, C/SiC kompozitlerini kuru hava ve neme zararlı maruziyetten korumanın yollarını araştırmıştır [6]. Bu kompozitlerin mekanik performansı, liflerin matrisle nasıl etkileşim kurduğundan da etkilenir. Lifler ve matris

arasında çoklu katmanlara sahip kimyasal buharla infiltre edilmiş C/SiC kompozitleri üzerine yapılan araştırmalar, lif grupları ve tek tek lifler arasında gözeneklerin oluşma şeklinin takviyenin yapısına bağlı olduğunu ortaya koymuştur . Bu ilişki çok önemlidir çünkü yapı, malzemenin mekanik stresi ne kadar iyi kaldırabileceğini ve matrisin lifler arasındaki boşluklara nasıl aktığını etkiler. Bu nedenle, tekstil yapısının tasarımının değiştirilmesi, liflerin düzenlenme yönünden daha fazlasını etkiler [12].

2.1.3. Oksit lif takviyeli oksit kompozitler

Oksit veya oksit kompozit malzemeler genellikle alümina bazlı liflerin bir oksit matrisle birleştirilmesinden oluşur. Bu kompozitlerin geliştirilmesinde kritik bir yaklaşım, gözenekli bir matrisin kasıtlı olarak oluşturulmasıdır. Bu gözeneklilik, çatlakların nasıl oluştuğunu ve yayıldığını yönetmede önemli bir rol oynar; bu durum, benzer sonuçlara ulaşmak için lifler üzerinde daha zayıf bir kaplamaya bağlı olan oksit olmayan kompozitlerden farklıdır. Bu durumda, matristeki gözeneklilik, üretim sürecinin istenmeyen bir yan ürünü olmaktan ziyade, hasar gördüğünde dayanıklılığını artırmak amacıyla malzemenin tasarımının kasıtlı bir özelliğidir. Farhandi ve araştırma grubu, gözenekli bir alümina matrisle eşleştirilmiş Nextel 610 lifleri kullanarak bu yöntemi araştırdı. Çalışmaları, malzemenin nasıl ısıtılıp şekillendirildiğini ifade eden sinterleme sürecinin ince ayarlanmasının, kompozitin çekme dayanımını gerçekten artırabileceğini gösterdi. Dahası, bu ayarlama, gözenekliliği daha yüksek bir seviyede tutmaya yardımcı olurken, sinterleme aşamasında çatlak oluşma olasılığını da azaltır. Bu, maksimum yoğunluğa ulaşmanın oksit seramik matris kompozitleri için her zaman en iyi strateji olmadığını göstermektedir. Bunun yerine, en iyi tasarım, matrisin gücü, liflere sağlanan koruma ve malzemenin hasarla başa çıkma ve hasardan kurtulma kapasitesi arasında dikkatli bir denge gerektirir [13].

2.2. Lifler, Matrisler, Ara Fazlar ve Takviye Yapıları

2.2.1. Fazlar Arası Kontrollü Yük Aktarımı ve Hasar Giderimi

Ara faz, bir lif ile onu çevreleyen matris arasında bulunan belirli, sınırlı bir malzeme bölgesidir. Öte yandan, arayüz, iki farklı malzemenin veya bileşenin buluştuğu gerçek çizgi veya yüzeydir. Bu iki terim arasındaki farkı anlamak çok önemlidir çünkü tasarlanmış bir ara faz, birden fazla katman içerebilir ve bu da birden fazla arayüz oluşturur. Takviyeli seramiklerde, ara fazın tasarımı, yükün matristen life ne kadar iyi aktarıldığı ve ara fazın, ayrılma ve kayma gibi süreçler yoluyla yerel alandaki gerilimi ne kadar etkili bir şekilde azaltabileceği arasında hassas bir denge gerektirir. [10] referansında belirtildiği gibi, Qiu ve ekibi, PyC/BN ara fazlarına sahip SiC/SiC kompozitlerinde bu dengeyi göstermiştir. Araştırmaları, pirolitik karbon tabakasının kalınlığının 0,10'dan 0,30 mikrometreye çıkarılmasının başlangıçta malzemenin performansını iyileştirdiğini, ancak belirli bir noktadan sonra eğilme mukavemeti ve kırılma tokluğunun düşmeye başladığını ortaya koymuştur. Araştırmacılar bu beklenmedik davranışı, ara fazın sunduğu gerilim giderme ile yük transferinin verimliliği arasındaki bir çatışmanın sonucu olarak açıkladılar. Bu keşif önemli bir noktayı gösteriyor: ara fazın kalınlığını artırmak her zaman kompozit malzeme için daha iyi genel performansa yol açmaz [10]. Dahası, ara fazı iyileştirirken, malzemenin gerçek kullanımında karşılaşacağı koşulları dikkate almak önemlidir. 2026'dan bir çalışma, BN/SiC çift katmanlı ara fazları inceledi ve SiC katmanının kalınlığındaki değişikliklerin yüksek sıcaklık ve oksidatif ortamlarda çekme özelliklerini nasıl etkilediğine baktı [14]. Bu yöntem, bu koşullara maruz kalma sırasında ara fazın tasarımını değerlendirerek, kompozitin mekanik performansını ara fazın dayanması gereken özel koşullara bağlar ve düzgün çalışmasını sağlar [14].

2.2.2. Matris gözenekliliği ve işlem kaynaklı heterojenlik

Gözeneklilik, bulunduğu yer, şekli ve parçaların nasıl bağlandığı nedeniyle kompozitlerin davranışını etkiler. Tek bir gözeneklilik değeri, lif grupları içindeki küçük gözenekler ile gruplar

arasındaki daha büyük boşluklar veya üretim sürecinde oluşan çatlaklar arasındaki farkı söyleyemez. Bu özellikler, yerel yükleme ve matrisin nasıl oluştuğu söz konusu olduğunda farklı şekillerde çalışabilir. Bu nedenle, yoğunluk testiyle birlikte mikro yapısal analiz yapmak önemlidir. Daha önce bahsedilen C/SiC çalışması, gözeneklerin farklı yapılarda nasıl düzenlendiğini belirlemek için X-ışını bilgisayarlı mikrotomografi kullandı [12]. Bu ölçümler, yalnızca kütle yoğunluğuna bakarak elde edemeyeceğiniz bilgiler sağlar [12]. Gözenekliliğin anlaşılması yine de belirli malzeme sistemine bağlı olmalıdır. Gözenekli matrisli oksit kompozitlerde, bazı gözeneklilikler kasıtlı olarak dahil edilir. Farhandi ve ark. [13] tarafından yapılan çalışmada, iki aşamalı bir sinterleme işlemi kullanılarak, 230 ± 27 MPa çekme dayanımına sahip mini kompozitler üretilmiştir. Bu, geleneksel sinterleme yöntemiyle elde edilen 133 ± 8 MPa'dan daha yüksektir. Bu değerler, genel tasarım sınırları için değil, test edilen belirli mini kompozitler içindir, ancak malzemenin mümkün olduğunca yoğun hale getirilmesine odaklanmak yerine, büzülme hasarının ve matrisin nasıl geliştiğinin yönetilmesinden daha iyi performans elde edilebileceğini göstermektedir [13].

2.2.3. Donatı mimarisi ve yönlü tepki

Elyaf mimarisi, yükü taşıyan ana parçaların uzayda nasıl düzenlendiğini belirler. Bir kompoziti iki boyutlu veya üç boyutlu olarak tanımlamak, yapısını anlamanın sadece başlangıcıdır. Malzemeye bakarken, liflerin nasıl düzenlendiğini, birbirlerini nasıl kestiğini, farklı alanlardaki eğriyi ve daha fazla matris içeren kısımların nerede bulunduğunu da dikkate almanız gerekir. Görüntüler kullanılarak üç boyutlu dokunmuş SiC/SiC üzerine yapılan çalışmalar, gerçek mezoyapıyı deneylerde ölçülen termomekanik davranışla ilişkilendirmiştir [11]. Bu yöntem, tüm dokunmuş kompozitleri aynı tür malzeme olarak ele almak yerine, her mimari yapı türüne özgü modellerin

kullanılmasına olanak tanır. Ayrıca, yerel yapısal özelliklerin numune düzeyinde gözlemlenen etkin tepkiyle ilişkilendirilmesine yardımcı olur [11] .

2.3. Havacılık ve Uzay Sektöründe Kullanılan Inconel Kaliteleri

Bu bölümde ele alınan Inconel alaşımlarının hepsi aynı şekilde güçlenmez. Etkileri, bileşimlerine ve dondurma, şekillendirme ve ısıtma işlemleri sırasında oluşan yapıya bağlıdır. Inconel 718 ve 625 özellikle karşılaştırma için kullanışlıdır, Inconel 939 ise γ′ fazları ile güçlü bir şekilde güçlendirilmiş bir kalitenin işleme ihtiyaçlarını göstermektedir.

2.3.1. Inconel 718

Inconel 718, nikel açısından zengin gama matrisi ve diğer ikincil fazlardan oluşan ana bir yapıya sahiptir ve bu ikincil fazların miktarı, malzemenin nasıl işlendiğine bağlıdır. Ana sertleştirici parçacıklar gama çift prime ve gama prime'dır ve karbürlerle birlikte delta fazı da bulunabilir. Bu nedenle, alaşımı anlamak, sadece belirtilen kimyasal bileşimini bilmekten daha fazlasını gerektirir. Ferreri ve ark. [15], farklı şekillerde işlenmiş Inconel 718'deki γ, γ′, γ″, δ ve MC karbürlerinin miktarlarını ölçmek için nötron kırınımı kullanan bir yöntem geliştirdi. Çalışmaları, farklı üretim yöntemlerine bakarken faz popülasyonlarını doğrudan ölçmenin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Sadece bir ısıl işlem etiketi olması, iki numunenin aynı miktarda veya aynı dağılımda güçlendirici malzemeye sahip olduğu anlamına gelmez [15]. Katmanlı olarak üretilen malzemelerde, katılaşma kaynaklı segregasyon başka bir karmaşıklık katmanı getirir. Inconel 718'in çözelti işlemi ve ardından yaşlandırma ile nasıl işlendiğine dair yapılan çalışmalar, reaktif olmayan, niyobyum açısından zengin bölgeler bulmuş ve çözelti işlemi sırasındaki koşulların γ″ ve γ′ fazlarının oluşumunu nasıl etkilediğini incelemiştir. Bu nedenle, niyobyumun mevcut olması ve hareket ettirilebilmesi, malzemenin yapısının üretim sırasında nasıl oluştuğunu ve yaşlandırmadan sonra nasıl değiştiğini anlamak için çok önemlidir.

2.3.2. Inconel 625

Inconel 625 genellikle katı çözelti ile güçlendirilmiş bir alaşım olarak görülür, ancak bu, üretim sırasında veya kullanım esnasında yapısında çökelmeler olmadığı anlamına gelmez. Katmanlı üretim, daha yüksek çözelti konsantrasyonuna sahip yerel alanlara neden olabilir ve bu da malzemenin daha sonraki ısıl işleme nasıl tepki verdiğini etkiler. Lass ve ark. [17], gerilimi azaltmak için bir saat boyunca 870 santigrat dereceye ısıtıldıktan sonra lazer kaynaklı Inconel 625 metalini incelediler. Katılaşma sırasında, özellikle daha fazla niyobyum ve molibden içeren dendritler arasındaki alanlarda, ortorombik Ni_3Nb δ fazının yağmur gibi oluştuğunu gördüler. Araştırmaları, gerilimi azaltmak için kullanılan bir ısıl işlemin, malzemenin yapısında da büyük bir değişikliğe neden olabileceğini göstermektedir [17]. Zhang ve ark. [18] daha sonra, katmanlı üretim yoluyla üretilen Inconel 625'te δ fazının daha hızlı büyümesini, belirli alanlardaki elementlerin düzensiz dağılımına bağladılar. Mikroskopi, senkrotron ölçümleri ve termodinamik analizlerini birleştirdiklerinde, çökelmenin işlenmiş malzemede olduğundan çok daha hızlı gerçekleştiğini buldular. Bu, yerel kimyanın ısıl işlem süreçlerinin tasarımında önemli bir rol oynadığı anlamına gelir: genel bileşim alaşımın standartlarını karşılayabilir, ancak mikro yapının farklı bölgeleri tavlama sırasında çeşitli şekillerde tepki verebilir [18].

2.3.3. Inconel 939

Inconel 939, γ′ fazı ile güçlendirilmiş bir alaşımdır ve baskıdan sonraki orijinal hali ile ısıl işlemden sonraki hali arasındaki farkı açıkça belirtmek önemlidir. Shaikh ve ark. [19], lazer toz yataklı füzyon kullanılarak üretilen Inconel 939'u incelemiş ve herhangi bir ısıl işlem uygulanmadan oluşturulan yapının sütunlu taneler ve küçük dendritik yapılar içerdiğini, ancak test ettikleri koşullar altında herhangi bir γ′ parçacığının oluştuğunu görmediklerini bulmuşlardır. Bu gözlem önemlidir çünkü bir alaşımın daha güçlü hale gelme yeteneği genellikle üretildikten hemen sonra gerçekleşmez. Doğru türde çökelti oluşturmak için gereken ısıl işlem, malzemenin yapımında

kullanılan sürecin bir parçasıdır. Bu nedenle, bir parça doğru kimyasal bileşime sahip olabilir, ancak gerçek uygulamalarda kullanılacak kadar güçlü olup olmadığını kontrol etmeden önce iç yapısı üzerinde hala çok fazla çalışma yapılması gerekir.

2.4. Güçlendirme Mekanizmaları ve Faz Kararlılığı

2.4.1. Güçlenen çökelmeler ve rekabet eden fazlar

γ′ ve γ″ fazları, kristal yapıları ve işlevlerine göre birbirinden ayırt edilmelidir. Genel açıklamalarda, γ′, Ni_3 (Al, Ti)'den oluşan düzenli bir faz türü iken, γ″, benzersiz bir kristal yapıya sahip Ni_3Nb bazlı farklı bir faz türüdür. Boyutları, nasıl yayıldıkları ve malzemenin ne kadarını kapladıkları, bu alaşımların çökelme yoluyla güçlendirildiklerinde mekanik olarak nasıl tepki verdiklerini etkiler. Inconel 718'de, γ″, γ′ ve δ aynı şey olarak kabul edilemez veya aynı güçlendirme parçacıklarını ifade etmek için birbirinin yerine kullanılamaz. γ″ ve δ'nin her ikisi de Ni_3Nb ile aynı kimyasal bileşime sahip olsalar da, şekilleri ve çevre malzemeyle etkileşimleri farklıdır. Ferreri ve diğerleri [15] tarafından yapılan faz çözünürlüklü ölçümler, bunların özel katkılarını anlamaya yardımcı olur ve farklı işlem adımlarının genel faz dengesini nasıl etkilediğini gösterir [15]. Niyobyum, hem ana yapıda hem de malzemenin farklı ikincil kısımlarında yayılabildiği için önemli bir rol oynar. Katmanlı imalat kullanılarak üretilen Inconel 718 üzerine yapılan araştırmalar, çözelti işlemi ve yaşlandırmayı birlikte gerçekleşen adımlar olarak ele almıştır. Bu adımlar, elementlerin nasıl ayrıldığını ve daha sonra çökelmeler oluşturduğunu değiştirir [16]. Mikro yapının yaşlandırılmasından en iyi sonuçları almak için, malzemenin daha önce nasıl katılaştığını dikkate almadan sadece bir yaşlandırma işlemi uygulamak yerine, başlangıçtaki malzemenin durumuna dikkat etmeniz gerekir [16].

2.4.2. Ayrışma ve yerel faz kararlılığının evrimi

Hızlı katılaşma kimyasal heterojenliği ortadan kaldırmaz. Daha önce bahsedilen Inconel 625 çalışmalarında, niyobyum ve molibden bakımından zengin alanlar, δ fazının oluşması için uygun noktalar oluşturmuştur [17,18]. Sonuçların gösterdiği gibi, hem küçük parçalarda hem de alaşımın tamamında faz kararlılığının kontrol edilmesi önemlidir. Homojenizasyon segregasyonu azaltmaya yardımcı olabilir, ancak belirli üretim koşulları altında iyi çalışıp çalışmadığını kontrol etmek önemlidir. Zhang ve ark. homojenizasyon işleminden sonra δ fazının ortadan kalktığını ve kimyasal bileşimin daha homojen hale geldiğini göstermiştir. Bu kanıt, termal işlemenin sadece artık gerilimi azaltmak için değil, malzemenin yapısını değiştirmek için de kullanılabileceğini göstermektedir [17, 18].

2.5. İşleme–Mikroyapı–Özellik İlişkileri

Şimdiye kadarki kanıtlar, hem CMC'lerin hem de Inconel alaşımlarının ortak bir fikri izlediğini göstermektedir: işlenme biçimleri, performanslarının bir bölümüne yardımcı olabilecek ancak diğer bir bölümüne zarar verebilecek belirli yapılar oluşturur. CMC'lerde, ara fazın kalınlığının değiştirilmesi, malzemenin stresi nasıl ele aldığını ve hasarla nasıl başa çıktığını etkiler. Oksit kompozitlerde, sinterleme sırasındaki değişiklikler, malzemenin birbirine nasıl yapıştığını, hava ceplerinin miktarını ve büzülmeden kaynaklanan çatlakların oluşumunu etkiler. Inconel alaşımlarında, ısıtma ve soğutma işlemleri, elementlerin nasıl ayrıldığını ve küçük parçacıklar oluşturduğunu değiştirebilir ve bazen işlemin istenen sonucu olmayan yeni faz türleri oluşturabilir. Tablo 1, bu ilişkileri özetlemektedir. Genel bir performans sıralaması vermek yerine, malzeme özelliklerine ve bunların mühendislik için ne kadar önemli olduğuna göre yapılandırılmıştır. Bu ilişkiler, bir sonraki bölümde ele alınacak üretim değişiklikleri için başlangıç noktasını oluşturmaktadır. CMC'ler için temel amaç, takviye, ara faz ve matrisin istenen yapısının tüm parça boyunca aynı olmasını sağlamaktır. Inconel alaşımları için amaç, gerekli kimyasal bileşimi ve faz

yapısını elde etmek üzere katılaşma ve ısıl işlem süreçlerini yönetmektir . Her iki durumda da ürünün kalitesi, malzemenin yapısına ve kanıtlanmış performansına bağlıdır.

Tablo 1. Seçilen seramik matris kompozitlerin ve Inconel alaşımlarının bileşen sistemleri, mikroyapısal tasarım değişkenleri ve işleme duyarlı davranışları.

Malzeme sistemi	**Başlıca yapısal bileşenler**	**Merkezi tasarım mekanizması**	**Önemli işleme duyarlı özellikler**	**Mühendislik açısından çıkarımlar**	**Referanslar**
BN bazlı ara fazlı SiC/SiC	SiC lifleri, tasarlanmış ara faz, SiC bazlı matris	Yük transferi, kontrollü ayrılma ve çatlak yönlendirme ile birleştirildi.	Ara faz kalınlığı, katman düzeni, matris durumu	Ara faz optimizasyonu, dayanıklılık ve hasar toleransı arasında denge kurulmasını gerektirir.	[9,10,14]
Mimari C/SiC	Karbon lifleri, SiC bazlı matris, ara faz	Mimari yapıya bağlı güçlendirme ve hasara karşı tepki	Demetler arası ve lifler arası gözeneklilik	Tekstil mimarisi ve infiltrasyon kalitesi birlikte değerlendirilmeli dir.	[12]
Alümina/alümina oksit CMC	Alümina lifleri ve gözenekli alümina matrisi	Gözenekli bir matris aracılığıyla çatlakların yerleştirilmesi	Sinterleme büzülmesi, matris kohezyonu, lif korunması	Daha yüksek yoğunluk tek başına performans artışının yeterli bir göstergesi değildir.	[13]
Inconel 718	γ matrisi, γ″ ve γ′ çökeltileri, δ fazı ve karbürler	bağlı faz dengesi ile çökelmenin güçlendirilmesi	Çözelti işlemi ve yaşlandırma sonrasında Nb	Özellikler, tanımlanmış bir termal ve üretim geçmişiyle	[15,16]

			ayrışması ve faz oranları	ilişkilendirilmelidir.	
Inconel 625	Alaşımlı γ matrisi; termal maruz kalma sırasında ikincil fazlar oluşabilir.	Esas olarak katı çözelti ile güçlendirme	Nb/Mo zenginleşmesi ve δ-faz çökelmesi	Gerilim giderme ve homojenizasyon, faz evriminin kontrolünü gerektirir.	[17,18]
Inconel 939	Isıl işlem yoluyla geliştirilen γ′ güçlendirmeli γ matrisi	Yağışın güçlenmesi	Oluşan dendritik yapı ve ardından oluşan çökelti	Alaşım kimyası tek başına nihai mukavemet koşulunu belirlemez.	[19]

3. Seramik Matris Kompozitlerinde Son Gelişmeler

Seramik matris kompozitlerinde son zamanlarda kaydedilen ilerlemeler, takviye, ara faz, matris oluşumu ve bileşenlerin şekli gibi farklı parçaların nasıl birlikte çalıştığına daha fazla odaklanmaktadır. Araştırmanın amacı sadece malzemelerin bireysel özelliklerini iyileştirmek değil; aynı zamanda bu özellikleri üretim sürecinde bozulmadan korumak ve mekanik ve çevresel streslere maruz kaldığında bile iyi çalışan bir kompozit yapı oluşturmaktır. Son gelişmeler arasında soyulma ve kaymayı ayrı ayrı ele alan tasarımlar, malzemeleri bir araya getiren yöntemler, uzun lifli parçalar üretme yolları ve hasarın malzemenin içinde nasıl oluştuğunu gösteren testler yer almaktadır.

3.1. Elyaf ve Arayüz Mühendisliğindeki Gelişmeler

3.1.1. Elyaf seçiminin kompozit mimariyle entegrasyonu

Doğru liflerin seçimi, kullanıldıkları malzeme türüne ve liflerin bu malzeme içinde nasıl düzenlendiğine bağlıdır. Tek başına iyi çalışan bir lif, nihai kompozit malzemede de iyi performans göstereceği anlamına gelmez. Bhatt ve Halbig [20], Sylramic-iBN veya Hi-Nicalon-S lifleri

kullanan dokuma ve katmanlı eriyik infiltrasyonlu SiC/SiC kompozitler üzerinde çekme-sünme testleri yaparak bu farkı göstermiştir. Testler, 48 ila 138 MPa arasında basınç ve havada 1400 santigrat dereceye kadar sıcaklıklar içermiştir. Test edilen koşullar altında, dokuma kompozitlerde sünme olarak adlandırılan yavaş deformasyon esas olarak CVI işlemiyle yapılan SiC matrisi tarafından kontrol edilirken, lamine Hi-Nicalon-S kompozitlerde sünme daha çok lif davranışından etkilenmiştir. Bu nedenle, kontrol edilen ana kısım, farklı malzemelerden yapılan yapıya bağlı olarak değişmektedir [20]. Bu, takviye parçalarının ve çevreleyen malzemenin üretim sürecinin aynı anda gerçekleşmesi gerektiği anlamına gelir. Liflerin yavaş gerilmeye karşı direncini artırmak, liflerin gerilmesinin kompozit malzemenin davranışında büyük rol oynadığı durumlarda en büyük avantajı sağlayacaktır. Matris davranışı ana faktör olduğunda, matrisi veya takviye ile çalışma şeklini değiştirmek daha iyi bir çözüm olabilir. Bu anlayış, sistemin her bir parçası için test yapılması ve ardından genel yapıda doğru şekilde çalıştığından emin olmak için kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.1.2. Arayüzey ayrılmasının sürtünme kaynaklı yük transferinden ayrılması

Ara faz mühendisliği, ilk ayrılmaya karşı direnci, ayrılmadan sonra oluşan sürtünme direncinden ayırmada giderek daha iyi hale geliyor. Bu süreçler farklı işlevlere hizmet eder. Ayrılma, matristeki bir çatlağın yolunu değiştirebilir ve lifin güvenliğini sağlamaya yardımcı olabilir; sonrasında oluşan kayma direnci ise yükün hareket etmesine ve enerjinin emilmesine yardımcı olur. Hong ve arkadaşları, tek telli karbon/silisyum karbür kompozitlerde biyolojik olarak esinlenilmiş gözenekli pirokarbon katmanları kullanarak bu farkı incelediler. Önerilen tasarım, parçalar artık birbirine yapışık olmadığında çok fazla sürtünme ile birlikte düşük seviyede bir ayrılma kullandı. Yazarlar, malzemelerinin 903 MPa'lık bir çekme dayanımına sahip olduğunu, bunun karşılaştırdıkları normal tasarıma göre yaklaşık %38 daha yüksek olduğunu ve ayrıca 1,8 kat daha fazla kırılma

enerjisine sahip olduğunu söylediler. Bu sonuçlar, hem dayanımın hem de enerji emiliminin mini kompozit seviyesinde iyileştiğini göstermektedir [21]. Bu yöntemin önemi, tek bir genel bağ dayanımı değerini değiştirmek yerine, arayüzdeki farklı hasar aşamalarını yönetmekte yatmaktadır. Bu malzemenin daha büyük tekstil kompozitlerine dönüştürülmesi sırasında, sıkıca paketlenmiş elyaf gruplarında arayüzün aynı şeklinin ve mekanik davranışının korunup korunamayacağının kontrol edilmesi gerekecektir.

3.1.3. Mekanik ve çevresel performansı birleştiren çok katmanlı ara yüzeyler

Çok katmanlı ara yüzeyler, yakındaki malzeme alanlarına farklı roller vermenin başka bir yolunu sunar. Geliştirilmeleri, çatlak sapmasını, yük transferini ve takviyenin korunmasını tek bir ara yüzey sisteminde bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. 2026 yılında BN/SiC çift katmanlı ara yüzeyler hakkında yapılan bir çalışma, SiC katmanının kalınlığının yüksek sıcaklıkta oksidatif bir ortamda çekme özelliklerini nasıl etkilediğini incelemiştir [14]. Bu yöntem, yalnızca ilk mekanik testin sonuçlarını kullanan yaklaşımların aksine, ara yüzeyin çevresel hasarı dikkate alarak nasıl davrandığını inceler. Bu, ara yüzey tasarımının hizmet performansıyla bağlantılı koşullara doğru ilerlediğini göstermektedir. Gözenekli ara yüzeyler üzerine yapılan araştırmalarla birlikte, bu gelişmeler, ara yüzeyin yapısının hasarın meydana gelme sırasını kontrol etmenin bir yolu haline geldiğini göstermektedir. Tepki, yükü çok erken kaybetmeden çatlağı yeniden yönlendirmeyi ve ardından takviye yükü tutmaya devam ederken enerjinin istikrarlı bir şekilde yayılmasını içermelidir.

3.2. Matris Yoğunlaştırma ve Hibrit Üretim Yöntemleri

3.2.1. Kimyasal buhar infiltrasyonunun polimer infiltrasyonu ve piroliz ile birleştirilmesi

Hibrit işleme, kompozitin yapımında her biri ayrı bir iş yapan farklı üretim adımlarını karıştırır. CVI-PIP işleminde, kimyasal buhar infiltrasyonu, kaplanmış bir takviyenin etrafında ilk silisyum karbür tabakasını oluşturur ve ardından polimer infiltrasyonu ve piroliz, matrise daha fazla malzeme ekler. Bir çalışmada, önce bir CVI-SiC koruyucu tabakası uygulanarak ve ardından kimyasal bir öncüye batırma ve yüksek sıcaklıklara ısıtma işlemi tekrarlanarak SiC/BN/SiC kompozitleri test edildi [22]. Araştırmacılar, malzemenin mekanik olarak nasıl davrandığını incelemek için mikromekanik teknikler kullandılar. Bu yöntem faydalıdır çünkü yalnızca kütle mukavemetinin iyileştirilmesi, gerçek değişimin nerede gerçekleştiğini göstermez; bu değişim liflerde mi, aralarındaki tabakada mı yoksa çevreleyen malzemede mi oldu [22]. Başka bir çalışmada, 1100, 1300 ve 1500 santigrat derecede piroliz yapılan CVI ve PIP yöntemlerinin bir karışımı kullanılarak yapılan tek yönlü SiC/SiC kompozitleri incelendi [23]. Çalışma, malzemenin yapısını, normal ve yüksek sıcaklıklarda mekanik olarak nasıl çalıştığını, ısıtıldığında ne kadar genişlediğini ve ısıyı ne kadar iyi ilettiğini inceledi. Deneyin kurulma şekli, piroliz sıcaklığının sadece tek bir mukavemet testine göre değil, farklı performans ihtiyaçlarına göre kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir [23]. Dolayısıyla, hibrit işlemenin gerçek faydası, önceden dikkatlice tasarlanmış bir sistem etrafında matris oluşturmada daha fazla esneklik sağlamasıdır. En iyi sonuçları elde etmek için, adımların sırasına, koruyucu katmanların durumuna ve sonrasında gelen ısı döngüleri tarafından oluşturulan yapıya dikkat etmeniz gerekir.

3.2.2. Erimiş malzeme ile infiltre edilen kompozitlerde artık fazların kontrolü

Erime infiltrasyonu, bazı artık malzemelerin hala mevcut olduğu bir yapı oluşturur ve bu artık malzemeler, malzemenin çok yüksek sıcaklıklarda ne kadar iyi çalıştığını değerlendirirken dikkate alınmalıdır. Bazı artık silikonun bulunması, lifler ve kaplamalarıyla etkileşimi etkileyebilir. Bhatt ve Halbig [20] tarafından incelenen sistemlerde, sıcaklık 1350 °C'nin üzerinde olduğunda, artık

silikon, lifler ve lifler üzerindeki kaplamalar arasında reaksiyonlara neden olmuştur. Bu reaksiyonlar, sürünme kırılması nedeniyle erken arızaya yol açmıştır. Bu bulgu, test edilen malzemelere ve koşullara özgüdür ve tüm erime infiltrasyonlu kompozitler için genel bir sıcaklık sınırı belirlemez [20]. Bu kanıt, gözenekliliği düşürmekten daha büyük bir hedef olduğunu göstermektedir: bu artık malzemelerin miktarı ve nasıl yayıldığı, parçanın maruz kalacağı ısı ile iyi bir şekilde çalışmalıdır. Bu nedenle, matris karakterizasyonu, kimyasal olarak farklı alanları bulmalı ve ayrıca yoğunluklarını ölçmelidir.

3.2.3. Isıl işlemenin hızlandırılması

Üretim verimliliği, farklı ısıtma yöntemlerinin kullanımına da yol açmıştır. Chen ve ark. [24], SiC/SiC kompozitlerinde hem fiber ara fazı hem de matrisi oluşturmak için Joule ısıtmasının kullanılmasını önermiştir. Çalışma, sadece malzemelerin kimyasal yapısına veya tanıtılma sırasına odaklanmak yerine, termal enerjinin nasıl sağlandığına bakarak süreç gelişimini daha da ileriye taşımaktadır. Bu yöntemlerin havacılıkta önemi, süreci hızlandırırken tutarlılığı korumaya dayanmaktadır. Karmaşık parçalar için değerlendirme, farklı alanlardaki sıcaklık değişimlerini, malzemenin yerel olarak nasıl dönüştüğünü, malzemeler arasındaki katmanın nasıl bozulmadan kaldığını ve parçaların tutarlı bir şekilde üretilip üretilemeyeceğini dikkate almalıdır. Bunlar, bir şeyin ölçeklendirilip ölçeklendirilemeyeceğini değerlendirmek için kullanılan standartlardır; sadece başarılı bir hızlı test, bunun endüstride büyük ölçekte üretilebileceği anlamına gelmez.

3.3. Üç Boyutlu Mimari Yapılar ve Karmaşık Bileşen Üretimi

Önemli bir ilerleme, takviyenin yerleştirilmesinin kavisli şekilleri, değişen kalınlıkları ve farklı kuvvet yönlerini ele alması gereken daha karmaşık yapılara CMC işlemesinin genişletilmesidir. Bileşenin şekli hem yapısını hem de nasıl yoğunlaştığını etkiler: ön şekillendirme, yükleri taşımak için doğru yolları oluşturmalıdır, ancak aynı zamanda matrisi oluşturan işlemin çalışması için de

kolay olmalıdır. X. Liu ve diğerleri [25], biyomimetik örümcek ağı tasarımına sahip ve en az 20 mm kalınlığında olan SiC/SiC ve C/SiC türbin blisklerini inceledi [25]. Üretim sürecinde hem CVI hem de PIP yöntemleri kullanıldı ve iç yapıyı ve gözeneklerin nasıl yayıldığını kontrol etmek için mikro-bilgisayarlı tomografi kullanıldı. Çalışma ayrıca, bulguları sadece malzeme örneklerinin ötesine, daha büyük bir dönen yapı modeline genişleten aşırı döndürme testini de içeriyordu [25]. Bu çalışmanın ana katkısı, yapının tasarımını, yapımını, iç kontrolünü ve testini birleştirmektir. Bununla birlikte, aşırı döndürme testi belirli bir yükleme durumuna bakar. Bir havacılık servis zarfı oluşturmak, doğru termal gradyanların, çevresel koşulların, tekrarlanan gerilmenin ve parçaların nasıl bağlandığının kanıtlanmasını da gerektirir. Gelecekteki bileşen geliştirme için önemli soru, parçanın tamamında belirli bir yük taşıyıcı yapının nasıl oluşturulacağı ve kontrol edileceğidir. Geometrik karmaşıklık, tekrar üretilebilen ve beklendiği gibi çalışan bir yapı oluşturmaya yardımcı olduğunda mühendislikte faydalıdır.

3.4. Gelişen Katmanlı ve Hibrit Üretim Yaklaşımları

3.4.1. Sürekli donatının eklemeli yerleştirilmesi

CMC'lerin eklemeli imalatı, kullanılan malzemeler açısından oldukça farklı çeşitli yöntemler içerir. Seramik bir şekil basmak, doğranmış lif karışımı koymak ve uzun lifler eklemek aynı türden güçlü bir yapı oluşturmaz. Bu sürekli lifli kompozitler için en önemli ilerleme, liflerin nereye yerleştirileceğini ve çevredeki malzemenin nasıl yapıldığını planlayabilmektir. Liu ve ark. [26], sürekli lifli eklemeli imalat, ardından öncü infiltrasyon ve piroliz ve daha sonra sıvı faz silikon infiltrasyonu kullanarak sürekli SiC lif takviyeli SiC kompozitleri üreten bir yöntem tanımlamıştır. Bu işlem, eklemeli imalatın ilk yapıyı oluşturabileceğini ve daha sonraki adımların seramik matrisi oluşturduğunu göstermektedir [26]. Bu nedenle, nihai ürün, işleme sırasında geçtiği tüm adımları göstererek açıklanmalıdır. Bir kompoziti sadece "3D baskılı" olarak adlandırmak, farklı

parçalarını, hava boşluklarını ve dokunulduğunda nasıl tepki verdiğini anlamak için önemli olan ısı değişimi ve malzeme yayılımı içeren adımları dışarıda bırakır.

3.4.2. Biriktirilmiş katmanlar boyunca takviye

Katman katman inşa etmek, başka bir önemli tasarım sorusunu gündeme getiriyor: ağırlık bir alandan diğerine nasıl hareket ediyor? Bu sorun, liflerin çoğunlukla biriktirildikleri düzlemle aynı düzlemde düzenlendiğinde özellikle önem kazanıyor. 2024 yılında, sürekli karbon fiber takviyeli silisyum karbür üzerinde yapılan bir çalışma, dikey fiber yerleştirmenin malzeme ekstrüzyon baskı ile birlikte kullanılmasının katmanlar arasındaki zayıf alanları düzeltmeye yardımcı olduğunu buldu [27]. Bu yöntem, takviyenin farklı katmanlar boyunca nasıl düzenlendiğini, yalnızca biriktirilen matrisin alanları arasındaki bağa bağlı olmak yerine, tasarlanabilecek bir şey olarak ele alıyor [27]. Bu yaklaşım, hem düzlem içi hem de kalınlık boyunca yüklerin olduğu alanlardaki havacılık yapıları için önemlidir. Bununla birlikte, avantaj, fiberin yerleştirilmesinin yerel paketlemeyi, infiltrasyonu ve boyutların hassasiyetini nasıl etkilediğiyle birlikte değerlendirilmelidir.

3.5. Hata Kontrolü, Karakterizasyonu ve Üretim Tekrarlanabilirliği

Malzemeleri incelemek için kullanılan son yöntemler, hasar gördüğünde malzemenin içinde görülenlerle test edildiğinde mekanik olarak nasıl davrandığı arasında daha sık bağlantı kurmaktadır. Bu, özellikle ürün yapımında faydalıdır çünkü aynı büyük özellikler farklı iç tasarımlardan kaynaklanabilir. Guo ve ark. [28], SiC/SiC mini kompozitlerin gerilimle ayrıldığında nasıl davrandığını incelemek için dört boyutlu yerinde X-ışını mikrotomografisi, derin öğrenmeye dayalı görüntü segmentasyonu, dijital hacim korelasyonu ve BT bilgilendirilmiş kayma gecikmesi modeli kullandı. Birleşik yöntem, iç hasarın nasıl geliştiğini gerilim-gerinim davranışı ile ilişkilendirdi.[28] Bu yöntemler, üretimde bir geri bildirim sistemi oluşturmaya

yardımcı olur: iç parçaları kontrol eder, hasarı nasıl etkilediklerini görür ve ardından en önemli özellikleri kontrol etmek için üretim sürecini değiştirir. Ana katkıları sadece daha iyi görüntüleme değil, aynı zamanda üretim sırasında yapılan seçimler ile ortaya çıkan mekanik etkiler arasında daha güçlü bir bağlantıdır. Ürün yapımında işlerin iyi gittiğinden emin olmak için, doğru kanıt, bir parçanın içindeki ve fabrikada üretilen farklı gruplar arasındaki farklılıkları göstermelidir. Bir örnekten elde edilen iyi bir sonuç, bunun mümkün olduğunu gösterir; Parçaların tasarımına yardımcı olmak için önemli özelliklerin tutarlı kalıpları gereklidir.

Tablo 2. Seramik matris kompozitlerinde son dönemde yaşanan seçilmiş gelişmeler ve bunların mühendislik açısından önemi.

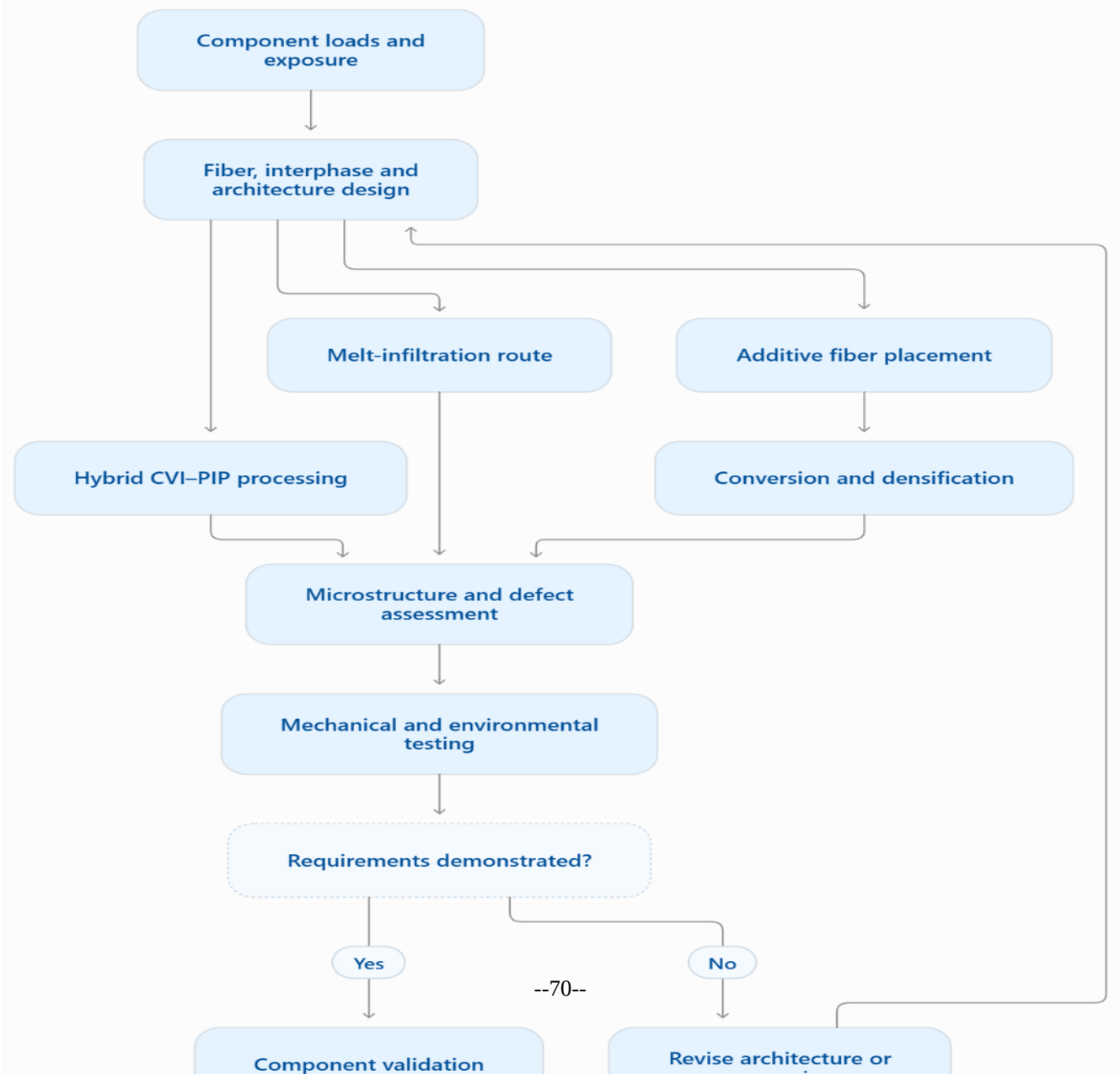
Gelişim	**Malzeme ve yaklaşım**	**Bildirilen kanıtlar**	**Havacılık ve uzay sektörüyle ilgili önemi ve bir sonraki doğrulama adımı**	**Referans**
Mimariye bağlı sürünme değerlendirmesi	Dokuma ve lamine edilmiş eriyik infiltrasyonlu SiC/SiC	İncelenen mimariler arasında sürünmeyi kontrol eden bileşen farklılık gösterdi.	Planlanan mimariye uygun olarak lif ve matris seçimini koordine edin.	[20]
Gözenekli arayüz tasarımı	Gözenekli PyC içeren tek telli C/SiC	Çekme dayanımı ve kırılma enerjisinde eş zamanlı iyileşme	Daha büyük tekstil kompozitlerinde ara faz homojenliğini ve dayanıklılığını değerlendirin.	[21]
Hibrit matris oluşumu	CVI ve ardından PIP ile üretilen SiC/BN/SiC	Oluşan kompozitin mikromekanik incelemesi	Bileşen ölçeğindeki özelliklere bağlı olarak, bileşen ölçeğindeki değişiklikleri ilişkilendirin.	[22]
Termal döngü optimizasyonu	Tek yönlü CVI–PIP SiC/SiC	Üç farklı piroliz sıcaklığının ve çeşitli özelliklerin karşılaştırılması	Mekanik ve termal gereksinimleri bir arada dikkate alarak işleme koşullarını seçin.	[23]
Hızlı ısıtma destekli imalat	Joule ısıtması destekli ara faz ve matris hazırlığı	Alternatif bir ısıl işlem yönteminin gösterimi	Üretim ölçeğini büyütme sırasında sıcaklık homojenliğini ve parti tekrarlanabilirliğini sağlayın.	[24]

Kalın yapısal gösterim cihazları	Mimari SiC/SiC ve C/SiC bliskler	Üretim, dahili tomografi ve aşırı döndürme testi	Yapısal kanıtları temsili birleşik hizmet koşullarına genişletin	[25]
Sürekli elyaf katkılı imalat	Katmanlı yerleştirme, PIP ve silikon infiltrasyonu yoluyla üretilen SiC/SiC	Mimari şekillendirme ve yoğunlaştırmayı birleştiren bir yöntemin gösterimi	Karmaşık geometriler boyunca yönelim etkilerini ve kusurları nicel olarak belirleyin.	[26]
Baskılı katmanlar arasında takviye	Dikey fiber döşemeli C/SiC	Katmanlar arası zayıflığı gidermeye yönelik üretim stratejisi	Çapraz katman takviyesi çevresindeki çok eksenli yükleme ve sızmayı değerlendirin.	[27]
Görüntü tabanlı hasar analizi	Gerilim altındaki SiC/SiC mini kompozitler	Yerinde görüntüleme, segmentasyon, korelasyon ve modellemenin birleştirilmesi	başlangıcı ve ilerlemesiyle ilişkilendirin.	[28]

3.6. Entegre Gelişim Yolu

Yukarıda incelenen gelişmeler, mimari tasarım, imalat, karakterizasyon ve yapısal test arasında yinelemeli bir ilişkiyi desteklemektedir. Şekil 1 bu ilişkiyi özetlemektedir. Üç işlem dalı, alternatif geliştirme yollarını temsil etmektedir; uygun yol, takviye sistemi ve bileşen gereksinimlerine bağlıdır. Mimari ve işleme yöntemleri, bileşen ihtiyaçlarına göre seçilir ve daha sonra gerçek dünya koşullarını temsil eden mikro yapısal analiz ve testler kullanılarak kontrol edilir. Geri bildirim döngüsü, tasarımın otomatik olarak onaylanması değil, iyileştirme sürecini gösterir. Bu bölümde bahsedilen araştırma yöntemlerini birleştiren, yazar tarafından oluşturulmuş bir yöntemdir. Ana ilerleme, özel olarak tasarlanmış bir malzeme özelliğinin, malzemenin nasıl deforme olduğu ve hasar gördüğüyle nasıl bağlantılı olduğunu belirleme yeteneğinin artmasıdır. Farklı fazların düzenlenme şekli, bunların nasıl ayrılıp birbirlerinin yanından geçtiğini etkileyebilir; farklı işleme adımlarının birleştirilmesi, matris malzemesinin işlevlerini birkaç adıma yayabilir; ve malzemelerin belirli alanlara yerleştirilmesi, belirli parçalara mukavemet katabilir.

Entegrasyondaki başarıları, üretim küçük örneklerden gerçek uçak parçalarına geçerken bu özelliklerin aynı kalmasına bağlı olacaktır.



Şekil 1. Yüksek performanslı seramik matris kompozitlerin geliştirilmesi için birleşik bir yaklaşım.

4. Inconel Süper Alaşımlarında Son Gelişmeler

Inconel süper alaşımlarındaki son gelişmeler, üretim sırasında yapılan seçimlerin parçaların performansını nasıl etkilediğini daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Çalışmalar, bir alaşımın belirli bir yöntem kullanılarak üretilebileceğini göstermekten, katılaşma, deformasyon, ısıl işlem ve yüzey hazırlığının birlikte mukavemeti, yorulma direncini ve malzemenin ömrünü nasıl etkilediğini anlamaya doğru evrilmiştir. Bu durum Inconel 718'de açıkça görülmektedir, ancak Inconel 625 ve 939 üzerindeki araştırmalar, bu malzemeleri işlemek için kullanılan yöntemlerin, bunların özel kimyasal yapısına ve mukavemet kazanma şekillerine göre uyarlanması gerektiğini göstermektedir.

4.1. Geleneksel İşlemede Gelişmeler

Geleneksel yöntemler hala bir şeyler üretmek için kullanılıyor ve aynı zamanda yeni eklemeli imalat tekniklerini karşılaştırmak için bir standart görevi görüyor. Toz konsolidasyonu üzerine yapılan son çalışmalar, deformasyonun, orijinal toz malzemeden gelen özelliklerle başa çıkarken yapıyı nasıl daha homojen hale getirebileceğini gösteriyor. Gaikwad ve diğerleri [29], toz dövme yoluyla üretilen Inconel 718'i inceledi ve normal ve daha yüksek sıcaklıklarda mekanik olarak nasıl davrandığını kontrol etti. İşlem görmüş malzeme neredeyse tamamen yoğun hale geldi, parçacıklar arasındaki eski bağlantıları kopardı ve sertleşen parçacıkların daha eşit bir şekilde

yayılmasını sağladı. Yazarlar ayrıca, inceledikleri koşullar altında mekanik özelliklerin neredeyse tüm yönlerde aynı olduğunu söylediler. Bu sonuçlar, malzemenin kimyasal bileşiminin eşit olması ve tutarlı bir yöne sahip olması önemli olduğunda toz dövmenin iyi bir seçenek olabileceğini gösteriyor [29]. Bu değişiklik önemlidir çünkü sadece küçük bir alana çok şey sıkıştırmaktan daha fazlasını yapar. Tozdan yapılan malzemeler, parçacıklardan gelen orijinal yüzey özelliklerinin bir kısmını koruyabilir ve bunları bir araya getirme işlemi, bu alanlarda güçlü bağlar oluşturmayı gerektirir. Deformasyon destekli işleme, hem iç yapıyı hem de dış şekli değiştirmeye olanak tanır. Havacılık ve uzay endüstrisinde parça üretimi için, parçanın ihtiyaçlarına bağlı olarak dövme, döküm, toz konsolidasyonu ve eklemeli imalat yöntemleri arasında seçim yapmalısınız. Geometrik karmaşıklık, parçaların yönü, denetim kolaylığı, ihtiyaç duyulan parça sayısı ve dayanıklılık süresi gibi faktörler bu seçimde rol oynar. Bir işleme yöntemi, beklenen kullanım koşullarına uygun, tutarlı bir mikro yapı oluşturabildiğinde kullanışlı hale gelir.

4.2. Inconel Bileşenlerinin Katmanlı Üretimi

4.2.1. Üretim fizibilitesinden performans optimizasyonuna

Lazer eritme işlemi kullanılarak yapılan Inconel 718 üzerine yapılan ilk çalışmalar, hem üretim şeklinin hem de üretimden sonraki adımların iyi mekanik özelliklere yol açabileceğini göstermiştir [7]. Son çalışmalar, tüm eklemeli imalat malzemelerini aynı tip olarak ele almak yerine, kusurların, malzeme yapısının ve yüzey kalitesinin farklı etkilerini anlamaya odaklanmıştır [7]. 2026 yılında, Bölüm 1'de açıklanan deneysel bir çalışma, Inconel 718'de çeşitli kusur türleri ve farklı malzeme yapıları oluşturmak için lazer toz yataklı füzyon ve ısıl işlemlerin ayarlarını kasıtlı olarak değiştirmiştir [8]. Bu tür kontrollü karşılaştırma önemlidir çünkü iki farklı işlem koşulu aynı genel yoğunluğa yol açabilir, ancak yine de kalan kusurların boyutu, şekli, konumu ve önemi açısından farklılıklar gösterebilir [8]. Bu nedenle, işlem iyileştirmesi, işlerin nasıl ters gidebileceğiyle bağlantılı olmalıdır. İyi çekme dayanımı sağlayan bir koşul, yüzey kusurları veya malzemenin

içindeki küçük kusurlar nedeniyle çatlaklar oluşmaya başlarsa, yorulmaya karşı en iyi direnç olmayabilir.

4.2.2. Hibrit eklemeli-çıkarmalı imalat

Hibrit üretim, bir parçanın oluşturulması sırasında malzeme ekleme sürecini, şekillendirme süreciyle birleştirir. Bu, daha sonraki katmanlar ulaşılması zor hale getirmeden önce yüzeyler üzerinde çalışmayı bitirme şansı verir. Sommer ve ark. [30], lazer toz yataklı füzyon, yerinde yüksek hızlı frezeleme ve daha sonraki ısıl işlemler kullanılarak üretilen Inconel 718'i incelemiştir. Örneklerinde, ortalama yüzey pürüzlülüğü, toz yataklı füzyon kurulumunda yaklaşık 13,4 mikrometreden hibrit üretim yönteminde 0,8 mikrometreye düşmüştür. Çalışma ayrıca, birleştirilmiş üretim süreci nedeniyle daha iyi mekanik performans göstermiştir [30]. Mühendislik çalışması, üretim sürecinde yüzey kontrolü eklemeyi içerir. Karmaşık bir havacılık bileşeni oluştururken, tıpkı parçanın nasıl inşa edildiğini ve desteklerin nasıl çıkarılacağını düşündüğünüz gibi, planlama aşamasında tüm parçalara nasıl ulaşılacağını düşünmek önemlidir. Daha fazla tasarım esnekliğine sahip olmanın avantajı, oluşturulan şekillerin amaçlanan kullanım amacına da iyi hizmet edebildiği zaman en büyüktür.

4.3. Katılaşma, Ayrışma ve Kusur Oluşumu

4.3.1. Yerel kimya ve faz gelişimi

Eklemeli imalat, malzemenin her yeni bölümünü farklı erime, soğutma ve yeniden ısıtma işlemlerine maruz bırakır. Yerel kimya, özellikle çok reaktif olmayan alanlarda, genel bileşimden oldukça farklı olabilir. Eylül 2026'da, lazer toz yataklı kaynaştırılmış Inconel 718'deki mikro ayrışmayı incelemek için taramalı ve iletim elektron mikroskobu, enerji dağılımlı spektroskopi ve JMatPro hesaplamaları kullanan bir çalışma yapıldı [31]. Karşılaştırma, nominal bileşimi kullanan hesaplamaların, deneylerde görülen dendritler arasındaki yüksek oranda ayrışmış alanları doğru

bir şekilde gösteremediğini ortaya koydu [31]. Bu sonuç, süreçler için modeller oluştururken, fazlardaki tahmin edilen değişiklikleri, küçük ölçekte ölçülen gerçek bileşimler ve yapılarla karşılaştırmamız gerektiği anlamına gelir. Toplu bileşim hesaplamaları hala faydalıdır, ancak bunları kullandığımızda, üretim süreci sırasında meydana gelen farklı kimyasal bileşimi dikkate almamız gerekir. Bölüm 2'de ele alınan Inconel 625'ten elde edilen kanıtlar, belirli bölgelerde niyobyum ve molibden birikiminin ısıtma işlemleri sırasında δ fazının oluşumunu hızlandırdığını göstermiştir [17,18]. Bu çalışmalar birlikte, segregasyonun katılaşmanın nasıl gerçekleştiği ve malzemenin daha sonraki ısı işlemine nasıl tepki verdiğiyle bağlantılı olduğunu göstermektedir.

4.3.2. Hata azaltmayı mikro yapısal optimizasyondan ayırt etme

Hata azaltma ve mikro yapısal optimizasyon bağlantılı ancak farklı hedeflerdir. Tek başına bir gözenek kapatmak, çökelmelerin iyi bir dağılımını yaratmaz. Daha güçlü çökelmeler oluşturmak, yüzeydeki bir çentiği düzeltmez. İşleme yöntemleri, istenen mekanik davranışı etkileyen özellikleri dikkate almalıdır. Bir çalışma, sıcak izostatik presleme ve lazer toz yataklı füzyon kullanılarak üretilen Inconel 718'in 600 santigrat derecede yüksek çevrimli yorulma altında nasıl performans gösterdiğini inceledi [32]. Analiz, birçok hata azaltıldıktan sonra çatlakların nasıl başladığını, malzemedeki küçük hareketler ve farklı yönlerdeki tanelerin nasıl etkileşimde bulunduğu gibi şeylere odaklanarak inceledi. Bu, işleme hataları en aza indirildiğinde hasarın kontrol edilme şeklinin değişebileceğini göstermektedir [32]. Buradaki fikir, üretim kalitesi

zamanla iyileştikçe, daha ayrıntılı test ve analiz yapılması gerektiğidir. Büyük hatalar artık ana sorun olmadığında, kristal yönü, malzemenin belirli alanlarda ne kadar büküldüğü veya gerildiği ve malzemenin farklı kısımlarının nasıl düzenlendiği gibi faktörler daha önemli hale gelebilir.

4.4. Isıl İşlem ve Sıcak İzostatik Presleme

4.4.1. Üretim sürecinin bir parçası olarak ısıl işlem

Isıl işlem, bir malzemenin mikro yapısının orijinal halinden nihai haline nasıl değiştiğini kontrol eder. Çökeltme ile güçlendirilmiş Inconel alaşımları için, güçlendirme fazlarının, ayrışmış alanların ve tane sınırı bileşenlerinin birbirleriyle nasıl dengelendiğini etkiler. Sommer ve ark. [30] tarafından yapılan çalışma, statik ve döngüsel performansın birbirinden nasıl farklı olduğuna dair iyi bir örnek vermektedir . Doğrudan yaşlandırma, toz yataklı kaynaştırma yöntemiyle üretilen parçaların nihai çekme dayanımını güçlendirdi, ancak dayanıklılık sınırını parçaların ilk üretildiği zamankinden daha iyi hale getirmedi. HIP'ye dayalı işlemleri, çekme ve yorulma özelliklerinin farklı bir karışımını oluşturdu. Bu deneyde, en yüksek çekme dayanımını veren işlem koşulu, yorulma açısından en iyi performansı gösteren koşul olmak zorunda değildi. Isıl işlem seçimi, gerekli özellik kombinasyonuyla başlamalıdır. Mukavemet, esneklik, tekrarlanan strese dayanma yeteneği, şekil tutarlılığı ve yüksek ısı altında performans, ayrı ayrı optimize edilecek hedefler olarak değil, birlikte ele alınmalıdır.

4.4.2. İşlem sonrası stratejilerinin Inconel 939'a genişletilmesi

Inconel 939, γ′-güçlendirilmiş yapısı Inconel 718'in yapısından farklı olduğu için özel bakım gerektirir. Sadece her iki malzeme de Inconel ailesinin bir parçası diye, tek bir kalite için belirlenmiş programlar kullanılmamalıdır. 2025 yılında yapılan bir çalışmada, yüksek basınç ve ısı ile ısıtılıp preslendikten sonra döküm ve lazerle üretilmiş Inconel 939 parçaları incelenmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikler, standart yöntemlerle dökülmüş malzeme ile karşılaştırılarak,

sürünme koşulları altında ne kadar iyi performans gösterdiği de dahil olmak üzere incelenmiştir. Bu yöntem, eklemeli işlemeyi bilinen bir malzeme durumuna bağlarken, orijinal yapıları ayrı tutar. Daha büyük değişim, belirli bir metal türü ve başlangıçtaki orijinal yapısı için yapılan son işleme doğru ilerlemektir. Isıl işlem, çözelti işlemi ve yaşlandırma, birbirini etkileyen adımlar olarak görülmeli ve bunların yapılma sırası deneylerle kanıtlanmalıdır.

4.5. Yüzey Bütünlüğü, İşleme ve Onarım

4.5.1. Yapısal bir gereklilik olarak yüzey hazırlığı

Yüzey durumu, hem belirli bir alanda stres birikimini hem de hasarın başlangıcını etkiler. Katmanlı imalatla üretilen parçalar için, yüzey işlemesi sadece boyut veya görünüm meselesi olmaktan ziyade yapısal bir endişe haline gelir. Daha önce bahsedilen hibrit üretim sürecinden elde edilen sonuçlar, bir ürünün yapımı sırasında yüzeylerin yönetilmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir [30]. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğü tek başına bitmiş bir parçanın durumunu tam olarak açıklamak için yeterli değildir. Muayene ayrıca yüzeye yakın sorunlara, işleme kaynaklı hasara, kalan strese ve çok fazla strese maruz kalan parçaların şekline de bakmalıdır. Bu faktörler, yüzey işleme gereksinimlerini parçaların ne kadar iyi çalıştığıyla ilişkilendirir.

4.5.2. Yerel onarım için yönlendirilmiş enerji biriktirme

Yönlendirilmiş enerji biriktirme, halihazırda yapılmış bir parçanın belirli alanlarına malzeme eklenmesine olanak tanır. Bu yöntemle bir şeyi onarmak için, eklenen malzemeyi, ısı nedeniyle ısınan alanı ve yeni malzemenin orijinal yüzeyle nasıl bağlantı kurduğunu yönetmeniz gerekir. Cano-Salinas ve diğerleri [34], Inconel 718'i onarmak için alt tabakadaki hazırlanmış özelliklere malzeme ekledikleri bir simülasyon oluşturdular. Araştırmaları, doğru işlem ve parametreleri seçmeyi, bir mikroskop kullanmayı ve onarılan alanda farklı ölçeklerde sertliği ölçmeyi birleştirdi. Bu koşullar altında test edildiğinde, onarımların güçlü metal bağları vardı ve metalin tamamen

birleşmediği çatlaklar veya alanlar yoktu. Biriktirilen malzemenin sertliği, temel malzemeden daha yüksekti [34]. Bu bulgular, sahte nesne oluşturmanın mümkün olduğunu göstermekle birlikte, onarılan alandaki farklılıkları kontrol etmenin neden gerekli olduğunu da açıklamaktadır. Onarılan bir parça, temel malzeme ve eklenen malzeme aynı alaşım türü olarak adlandırılsa bile, farklı ısıtma ve şekillendirme adımlarından geçmiş malzemeye sahiptir.

4.5.3. Onarılan eklemlerin yorulma performansı

Mekanik doğrulama, onarılan eklemi doğrudan kontrol etmeyi gerektirir. Sarkar ve ark. [35], yorulma yükü ana malzeme ile kaynak arasındaki sınıra dik açıyla uygulandığında Inconel 718 onarımlarının ne kadar iyi çalıştığını kontrol etti. Doğrudan yaşlandırılmış ve çözelti işlemine tabi tutulmuş ve yaşlandırılmış koşulları karşılaştırdılar. Biriktirilen malzemenin çekme dayanımı orijinal metale benzerdi, ancak sabit eklemler birçok stres döngüsüne maruz kaldığında yorulmaya karşı daha düşük direnç gösterdi. İki ısıl işlemin birbirine kıyasla gösterdiği performans, uygulanan stres miktarına bağlı olarak değişti [35]. 2026'dan bir çalışma, hem deneyleri hem de malzemelerdeki kristallerin stres altında nasıl davrandığını inceleyen bir tür bilgisayar modelini kullanarak, lazer yönlendirmeli enerji biriktirme ile yapılan onarılan parçaların ne kadar süre dayandığını daha yakından inceledi [36]. Çalışma, yorulma davranışını onarılan malzemedeki farklı faz yapıları ve yüksek stres alanlarıyla ilişkilendirdi [36]. Bu sonuçlar, onarımların iyileştirilmesi için net bir yol göstermektedir: güçlü yerel bağ oluşturmak önemlidir, ancak onarılan yapının tekrarlanan kullanım döngülerine uygun ve tutarlı bir yanıt vermesi de gerekir. Geometrinin onarılması, ısıl işlem uygulanması ve kalan malzemenin durumunun kontrol edilmesi, aynı üretim sürecinin parçası olmalıdır. Burada ele alınan değişiklikler, nihai Inconel parçasının tam bir üretim sürecinin sonucu olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Konsolidasyon veya biriktirme ilk şekli oluşturur; ısıtma malzemenin fazlarını ve kusurlarını

değiştirir; şekillendirme ürünün kullanışlı kısımlarını tamamlar; ve test etme her şeyin olması gerektiği gibi çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Bu ilişki, bir sonraki bölümde yüksek sıcaklıkların nasıl hasara yol açtığını karşılaştırmak için temel oluşturmaktadır.

Tablo 3. Inconel işleme alanındaki seçilmiş son gelişmeler ve bunların havacılık ve uzay bileşenleri üzerindeki etkileri.

Gelişim	Alaşım ve işleme yöntemi	Kanıt veya temel bulgu	Mühendislik açısından çıkarımlar	Referans
Deformasyon destekli toz konsolidasyonu	Toz dövme Inconel 718	Test edilen koşullar altında neredeyse tam yoğunluk, bozulmuş önceki parçacık sınır ağları ve yaklaşık olarak izotropik özellikler gözlemlenmiştir.	Hem konsolidasyonu hem de mikro yapısal homojenliği kontrol etme olanağı sağlar.	[29]
Entegre kaplama ve son işlem	Inconel 718; yerinde öğütme ile toz yataklı füzyon	Yüzey koşullarında ve mekanik performansta iyileşme	Bitirme işlemlerine erişim, inşaat planlamasına dahil edilebilir.	[30]
Yerel bilgilere dayalı faz analizi	Lazer toz yataklı kaynaştırma yöntemiyle üretilmiş Inconel 718	Nominal bileşim hesaplamaları, güçlü şekilde ayrışmış bölgeleri doğrudan yeniden üretmedi.	Termodinamik tahminler, yerel kimyasal ölçümlerle karşılaştırılmalıdır.	[31]
Defekt düzeltmesinden sonra yorgunluk değerlendirmesi	HIP işlemine tabi tutulmuş, toz yataklı kaynaştırma yöntemiyle üretilmiş Inconel 718	600 °C'de yorulma mekanizmalarının incelenmesi	Gözenekliliğin azaltılmasından sonra bile mikroyapısal çatlak oluşumu önemini korumaktadır.	[32]
Sınıf düzeyine özgü son işlem	Dökme ve toz yataklı kaynaştırma yöntemiyle	Isıl işlem, HIP, mikro yapı ve mekanik tepkinin karşılaştırmalı değerlendirmesi	Tedavi programları alaşım kimyasını ve başlangıç yapısını yansıtmalıdır.	[33]

	üretilmiş Inconel 939			
Yerel malzeme restorasyonu	Lazer metal kaplamalı Inconel 718	İncelenen numunelerde onarım arayüzü karakterizasyonu ve başarılı yapıştırma	Süreç uygulanabilirliğini belirler, ardından yapısal doğrulama ihtiyacını ortaya koyar.	[34]
Eklem seviyesinde yorgunluk testi	DED tarafından onarılan Inconel 718	Karşılaştırılabilir deşarj çekme dayanımı, eşdeğer eklem yorulma performansını garanti etmedi.	Onarım bölgesinin tamamını ilgili yük altında test edin.	[35]
Yorgunluk değişkenliğinin analizi	LDED ile onarılmış Inconel 718	Fazla ilişkili gerilim yoğunlaşmalarının deneysel ve modelleme yoluyla incelenmesi	Nitelik değerlendirmesi, ortalama performansın yanı sıra dağılım performansını da ele almalıdır.	[36]

LPBF: lazer toz yataklı füzyon; DED: yönlendirilmiş enerji biriktirme; LDED: lazer yönlendirilmiş enerji biriktirme; HIP: sıcak izostatik presleme. Çalışmalar farklı numune geometrileri ve test koşulları kullanmaktadır ve işlem yöntemlerinin doğrudan bir sıralamasını oluşturmaz.

5. Yüksek Sıcaklık Performansı ve Hasar Mekanizmaları

Yüksek sıcaklık performansı, bir malzemenin aynı anda mekanik stres, ısı ve çevresel faktörlerle karşılaştığında nasıl değiştiğine bağlıdır. Havacılık ve uzay bileşenleri için, ilk dayanım, tepkilerinin sadece bir parçasıdır. Uzun süre yük uygulamak, yavaş esneme veya deformasyona neden olabilir. Aynı yükü birçok kez uygulamak, zamanla malzemeyi zayıflatabilir. Ve malzeme sert veya reaktif ortamlara maruz kalırsa, kırılma veya çatlama şeklini değiştirebilir. Bu süreçler birbirini etkileyebilir, bu nedenle her koşulun uygulanma sırası ve süresi, bir parçanın ne kadar süre dayanacağını etkileyebilir. Seramik matris kompozitler ve Inconel süper alaşımları bu koşulları farklı şekillerde ele alır. Sürekli lifli CMC'lerde, matris çatlaması, arayüzey kayması ve lif köprülemesi, malzeme nihayet kırılmadan önce yükü dağıtmaya yardımcı olabilir. Inconel alaşımlarında, malzemenin kırılmadan nasıl büküldüğü, küçük parçacıkların nasıl yerinde kaldığı,

taneler arasındaki kenarların nasıl davrandığı ve bir çatlağın ucunda ne olduğu, malzemenin mekanik olarak nasıl davrandığı konusunda büyük rol oynar. Dolayısıyla, karşılaştırma yaparken hem ölçülen şeye hem de bunun ardındaki gerçek sürece veya nedene bakmaları gerekir.

5.1. Mekanik Özellikler ve Sıcaklığa Bağlı Davranış

5.1.1. Mukavemet, sertlik ve hasar başlangıcı

CMC'ler için, matris çatlamasının başlangıcı ve maksimum çekme dayanımı, malzemenin nasıl deforme olduğunun farklı aşamalarını gösterir. Hasar görmemiş lifler kırık bölgeleri desteklemeye devam ettiği için, matriste çatlaklar oluşsa bile kompozit yine de iyi dayanabilir. Matris çatlaması, bir şeyin ne kadar sert olduğunu değiştirir, gerilimi etrafa yayar ve çevresel maddelerin içeri girmesine izin verebilir. Bölüm 1'deki deney sırasında doğrudan yapılan gözlemler, malzemenin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında iç hasarın onarılabileceğini göstermiştir [3]. Bu ölçümler, kademeli hasar ile nihai kırılma arasındaki farkı belirlemeye yardımcı olur ve malzemenin stres altında nasıl davrandığını anlamanın daha iyi bir yolunu sunar [3]. Inconel alaşımları için, akma dayanımı, maksimum dayanım, kırılmadan önce ne kadar uzadığı ve tekrarlanan strese nasıl tepki verdiği gibi özellikler, ne kadar iyi çalıştığının farklı kısımlarını gösterir. Bölüm 4'teki sonuçlar, malzemeyi ısıtarak daha güçlü hale getirmenin, test edilen Inconel 718 numunelerinde yorulmaya karşı her zaman daha iyi direnç sağlamadığını göstermiştir [30]. Dolayısıyla, ne esneme gücü ne de sertlik tek başına bir yapının ne kadar süre dayanacağını tam olarak gösteremez [30]. Bu nedenle, bileşenlere dayalı bir karşılaştırma, hangi olayın önemli olduğunu ortaya çıkarmalıdır: şekil değişikliğinin ilk kalıcı anı, matriste çatlakların başlaması, kabul edilemez derecede büyük bir sertlik düşüşü, çatlakların yayılması veya sonunda kırılması. Bu olayların her iki malzeme türünde de aynı maksimum mukavemet seviyesinde gerçekleşmesi gerekmez.

5.1.2. İlgili sıcaklıklarda performansın karşılaştırılması

Sıcaklıkları karşılaştırırken, çevredeki gazın, kaplamanın ve yükü taşıyan malzemenin sıcaklığını açıkça göstermek önemlidir. Yüksek sıcaklık malzeme testinin, ne kadar sürdüğü, uygulanan kuvvet ve çevresel koşullar da dikkate alınarak anlaşılması gerekir. Örneğin, dokuma CVI ve PIP işlem görmüş SiC/SiC malzemeleri üzerinde yapılan çalışmalar, havada 1650 santigrat dereceye kadar yüksek sıcaklıklarda zaman içinde nasıl gerildiklerini ve deforme olduklarını incelemiştir [37]. Bu testler, bir malzemenin belirli koşullar altında ne kadar bükülebileceğini veya kırılabileceğini gösterir; ancak testlerde ulaşılan en yüksek sıcaklık, zaman içinde güvenli bir şekilde dayanabileceği maksimum sıcaklıkla aynı değildir. Malzeme seçerken, bunları karşılaştırmanın doğru yolu, belirli bir sıcaklık, gerilim, maruz kalma süresi ve izin verilen hasar miktarı karışımını ne kadar iyi idare edebileceklerine dayanmaktır. Yalnızca maksimum sıcaklıklara bakmak, havacılık sistemlerinin farklı parçalarının nasıl çalıştığını ve nasıl soğutulduğunu göstermez.

5.2. Sürünme ve Gerilme Kırılması

5.2.1. CMC'lerde Bileşene Bağlı Sürünme

Sürünme, sürekli yükleme altında zamana bağlı deformasyondur. Bir kompozitte, ölçülen gerinim, farklı parçaların nasıl birlikte çalıştığını ve yükün aralarında nasıl hareket ettiğini gösterir. Bhatt ve Halbig [20], sürünme olarak bilinen yavaş gerilmeden sorumlu malzeme parçasının, inceledikleri dokuma ve katmanlı SiC/SiC sistemleri arasında farklı olduğunu göstermiştir. Çalışmaları ayrıca, malzemenin yapısındaki küçük varyasyonlarla bağlantılı olarak, kırılmaların nasıl meydana geldiğinde büyük farklılıklar bulmuştur. Bu sonuçlar, kompozit sürünmesini yalnızca lif özelliklerine bakarak tahmin edememenizin nedenini açıklamaktadır [20]. Araştırma, CVI ve PIP ile üretilen SiC/SiC malzemelerinin 1650 santigrat dereceye kadar nasıl performans gösterdiğini incelemiştir. Ayrıca, farklı partilerin nasıl davrandığını, nasıl büküldüklerini veya kırıldıklarını, neden başarısız olduklarını ve uzun süreli ısı stresine maruz kaldıktan sonra

mukavemetlerini ne kadar iyi koruduklarını da kontrol etmiştir [37]. Sürekli yük testini geçen bir numunenin, daha sonra nasıl çalıştığını etkileyebilecek gizli hasara sahip olabileceği için, hala mevcut olan özellikleri dahil etmek önemlidir [37]. Bu nedenle, sünmeyi tanımlamanın faydalı yolları arasında malzemenin zaman içinde ne kadar esnediğine, kırılmasının ne kadar sürdüğüne, ne tür hasar meydana geldiğine ve bundan sonra ne kadar iyi çalışmaya devam ettiğine bakmak yer alır. Bu ölçümlerin önemi, parçanın ne tür bir sorun yaşadığına bağlıdır; örneğin, çok fazla bükülme, sızıntı, parçalar arasındaki boşluğun kaybolması veya kırılma gibi.

5.2.2. Inconel'de zamana bağlı hasarın mikro yapısal kontrolü

Inconel alaşımlarında, zaman içinde yavaş deformasyona direnme yeteneği, ana malzemenin, güçlendirme parçacıklarının ve tane sınırlarının birlikte nasıl çalıştığına bağlıdır. Sürekli yükleme çok fazla hasara neden oluyorsa, yüksek çekme dayanımı için seçilen malzemenin daha fazla iyileştirmeye ihtiyacı olabilir. Lazer toz yataklı kaynaştırma yöntemiyle üretilen Inconel 718 üzerinde yapılan 2026 tarihli bir çalışma, termomekanik yorulma testinde kısa süreli gerilim eklenmesinin malzemenin ömrünü büyük ölçüde azalttığını göstermiştir. Yazarlar, bu tepkiyi, taneler arasında kaymaya ve çatlamaya yardımcı olabilecek yeterli tane sınırı çökelmesinin olmamasına bağlamışlardır [38]. Bu yorum, çökelmenin nerede oluştuğunun ve genel güçlendirme koşullarının, performansın zaman içinde nasıl değiştiğini etkilediğini vurgulamaktadır [38]. Asıl amaç, malzemenin kullanılacağı planlanan yöntemle iyi çalışan bir mikro yapıya sahip olmaktır. Tek bir döngü veya sabit bir test için en iyi sonucu veren bir işlem, yüksek sıcaklıklarda uzun süreler için en iyi seçim olmayabilir.

5.3. Yorulma ve Termomekanik Yorulma

5.3.1. CMC'lerin Çevreye Duyarlı Yorulması

CMC'lerdeki yorulma, matriste tekrarlanan çatlamalar, arayüzlerde kayma, lifler boyunca gerilimin dağılımındaki değişiklikler ve takviyeye kademeli hasar gibi unsurları içerebilir. Sıcaklık yüksek olduğunda, çevredeki hava bu süreçlerin ne kadar hızlı ve hangi sırayla gerçekleştiğini değiştirebilir. Ruggles-Wrenn ve diğerleri [39], üç farklı SiC/SiC sistemini hem havada hem de buharda 1200 santigrat derecede test etti. Buhar, incelenen geleneksel CVI ve eriyik infiltrasyonlu sistemlerde yorulma performansını önemli ölçüde düşürdü, ancak oksidasyonu engellenmiş matrisli kompozit üzerinde çok daha az etkiye sahipti. Çalışma, çalışma sonunu 2×10^5 döngü olarak belirledi ve hayatta kalan numunelerde hala mevcut olan çekme özelliklerini kontrol etti [39]. Sonuç, sadece "SiC/SiC" demenin, bir malzemenin yanma ortamında yorulmaya ne kadar iyi dayanacağını bilmek için yeterli olmadığını göstermektedir. Matristeki kimyasalların etkileşim şekli ve aralarındaki katmanların nasıl tasarlandığı, tüm malzemenin çevresine ne kadar duyarlı olduğunu etkileyebilir. Çalışma ömrü sonu testi de dikkatli bir yorum gerektirir. Bu test, malzemenin test koşulları altında belirli sayıda döngüye dayanabileceğini gösterir; ancak sonsuza kadar dayanacağı veya tüm orijinal özelliklerini koruyacağı anlamına gelmez.

5.3.2. Termal-mekanik faz ilişkileri

Termomekanik yorulma, aynı döngü sırasında sıcaklık ve mekanik gerinim değiştiğinde meydana gelir. Faz ilişkisi önemlidir: faz içi bir döngüde, maksimum çekme mekanik gerinimi maksimum sıcaklıkla çakışırken, faz dışı bir döngüde maksimum çekme mekanik gerinimi minimum sıcaklığa yakın olur. Guth ve ark. [38], her iki faz ilişkisi altında 300 ile 650°C arasında işlem sonrası lazer toz yataklı kaynaştırılmış Inconel 718'i test ettiler. Bekleme süreleri olmadan, ömürleri geleneksel olarak haddelenmiş malzemeninkine yaklaştı. 650 °C'de on dakikalık çekme bekleme süreleri eklemek, test edilen katkı maddesi koşulunun performansını önemli ölçüde azalttı. Bu nedenle, bir dalga formu altında uyum, diğer bir dalga formu altında eşdeğerlik oluşturmadı [38] . Havacılık

değerlendirmesi için, döngü frekansı, gerinim aralığı, sıcaklık aralığı, bekleme süresi ve faz ilişkisi bu nedenle yorulma sonuçlarına eşlik etmelidir. Bu parametreler, her döngü sırasında zamana bağlı deformasyon ve çevresel hasar için ne kadar fırsat olduğunu belirler.

5.3.3. Bekleme süresine duyarlı çatlak büyümesi

Inconel 718'de bekleme yorgunluğu üzerine yapılan araştırmalar, tane boyutu, sıcaklık, yük altında geçen süre ve çevresel koşullar gibi faktörlerin çatlakların yayılmasını nasıl etkilediğini incelemiştir [40,41]. 2017 yılında yapılan bir araştırma, çatlakların zamanla ve farklı sıcaklıklarda nasıl büyüdüğünü açıklayan bir modele, çatlak ucundaki oksijenin etkilerini de dahil etmiştir [41]. Bu tür çalışmalar, çevresel maruziyeti yorgunluğun gelişmesinde önemli bir faktör olarak ele almaya yardımcı olur [40, 41]. Bu gözlemler ayrıca, sadece çevrim sayısını saymanın neden yeterli olmayabileceğini de göstermektedir. Aynı sayıda çevrime sahip iki geçmiş, her aşamada geçirilen süre veya maruz kalınan koşullar aynı değilse, farklı miktarda hasara neden olabilir.

5.4. Kırılma ve Hasara Karşı Tolerans

5.4.1. Seramik kompozitlerde dağılımsal hasar

Sürekli lifli bir CMC'deki hasar toleransı kısmen, yükü matristeki çatlakların etrafına yayma yeteneğinden kaynaklanır. Arayüzey ayrılması, çatlak sapması, köprüleme ve sürtünmeli kayma, lif gerçekten kırılmadan önce enerjinin tüketilmesine yardımcı olabilir. Bölüm 3'te ele alınan gözenekli arayüzey üzerine 2026 tarihli çalışma, tek telli C/SiC numunelerinin aynı anda daha iyi çekme dayanımına ve kırılma enerjisine sahip olduğunu göstermiştir [21]. Bunun önemi, ilk ayrılmanın daha sonraki sürtünmeli yük transferinden kasıtlı olarak ayrılmasıdır [21]. Bununla birlikte, dağıtılmış hasar, yapı üzerinde hiçbir etkisi olmamasıyla karıştırılmamalıdır. Matris çatlakları, malzemeyi daha az sert hale getirebilir ve bir zamanlar korunan iç alanların açığa

çıkmasına izin verebilir. Hasara iyi bir yanıt, hem güçlü bir yapı hem de hasarlı malzemenin çevreye sürekli maruz kalmayı kaldırabilme yeteneğini gerektirir.

5.4.2. Inconel'de çatlak oluşumu ve yayılması

Inconel parçaları için hasar toleransı, bir çatlağın ilk başladığı an ile daha sonra büyüdüğü an arasındaki farkı ayırt edebilmek anlamına gelir. Ürünün yapımındaki sorunlar, yüzeyin şekli ve malzemedeki küçük detaylar bir çatlağın başlamasına yol açabilir. Sarkar ve diğerleri [35], bağlantıların onarımı konusunda önemli bir noktayı ortaya koymaktadır: eklenen malzemenin mukavemeti orijinal metale benzer olsa bile, tüm bağlantı yorulma açısından aynı performansı göstermeyebilir [35]. Değerlendirme, çatlağın muhtemelen başladığı yeri yakındaki malzemenin durumuyla ilişkilendirmelidir. Bir onarım alanı, işlenmiş bir yüzey veya malzemenin belirli bir bölümü, normal ana malzemeye kıyasla farklı testlere ihtiyaç duyabilir.

5.5. Oksidasyon, Yüksek Sıcaklık Korozyonu ve Çevresel Bozunma

5.5.1. SiC bazlı kompozitlerde iç çevresel saldırı

SiC bazlı CMC'lere çevresel hasar, sadece dış yüzeyde olanların ötesine geçer. Bağlantılı gözenekler, matris çatlakları veya diğer açık yollar, bunların açığa çıkmasına izin verdiğinde, ara faz ve takviye görülebilir. Detwiler ve Opila [42], SiC/BN/SiC'nin 400 ila 800 santigrat derece arasında değişen sıcaklıklarda kuru oksijene ve su buharı ve oksijen karışımına maruz kaldığında nasıl oksitlendiğini inceledi. Çalışmaları, sistemin dayanması gereken en yüksek sıcaklıkların yanı sıra ara sıcaklıklardaki maruz kalmaya da bakmanın ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Çevresel dayanıklılık, sadece en yüksek sıcaklığı test ederek tam olarak açıklanamaz [42]. Daha önce bahsedilen buhar yorgunluğu hakkındaki sonuçlar da çevresel direncin tüm kompozit sisteme

bağlı olduğunu göstermektedir [39]. Bu nedenle, bir şeyin ağırlık altında ne kadar iyi dayanabileceğini kontrol ederken, aynı anda hem mekanik çatlamaya hem de kimyasal maruziyete bakmanız gerekir.

5.5.2. Oksidasyonun, tortu destekli yüksek sıcaklık korozyonundan ayırt edilmesi

Inconel alaşımları için oksidasyon ve sıcak korozyon, iki farklı maruz kalma koşulu türüdür. Sıcak korozyon testleri, koruyucu reaksiyon katmanlarının nasıl oluştuğunu ve stabil kaldığını değiştirebilen tortular oluşturur. Muthu ve ark. [43], hem dövme hem de doğrudan metal lazer sinterlenmiş alaşım 718'i 800 santigrat derecede test ettiler. Malzemeleri, tekrarlayan bir döngüde 120 saat boyunca hava ve tuz dolu ortamlara maruz bıraktılar. Deney, hava oksidasyonunu, maddenin sülfat, klorür ve vanadyum ile karıştırıldığı durumlardan ayırmanın bir yolunu oluşturdu. Bu testler, davranışın belirli tortu kimyasıyla nasıl değiştiğini göstermektedir. Sonuçları, bir parçanın karşılaşabileceği gerçek kirleticiler ve ısı seviyeleriyle ilişkilendirilmelidir. Ne temiz hava oksidasyonuna dirençli olmak ne de kendi başına iyi kısa vadeli mekanik özelliklere sahip olmak, bir malzemenin tortuların neden olduğu saldırıdan korunduğu anlamına gelmez.

5.6. Birleşik Hasar ve Ömür Değerlendirmesi

Önceki kanıtlar, yüksek sıcaklık hasarının birbiriyle bağlantılı bir dizi olay sonucu meydana geldiğini göstermektedir. Mekanik bir çatlak, çevrenin malzemeyi etkilemesini kolaylaştırabilir; kimyasal bir saldırı, parçalar arasındaki bağlantıyı veya malzemenin kenarlarını zayıflatabilir; devam eden gerilim ise malzemenin daha hızlı bükülmesine veya kırılmasına neden olabilir. Hangi etkileşimin en önemli olduğu, malzemenin yapısına, küçük iç özelliklerine ve zaman içinde nasıl

kullanıldığına bağlıdır. Mühendislik değerlendirmesi için bu, tek tek parçalardan, şeylerin nasıl birlikte çalıştığını gösteren gruplara geçmek anlamına gelir. İlk testler, malzemelerin gerilim altında, zaman içinde yavaş gerilme altında, tekrarlanan gerilim altında ve farklı çevresel koşullar altında ayrı ayrı nasıl davrandığını kontrol eder. Daha sonraki testler, parça için hangi kombinasyonların önemli olduğunu gösterir; örneğin, tekrarlanan yükleme sırasında gerilim ve yorulma, parça tekrar tekrar kullanılırken buhara maruz kalma veya parça zaten hasar gördükten sonra ısıtma ve soğutma. Temel bağlantı, hasarın nasıl oluştuğu ve hizmetin ne yapması gerektiği arasındadır. CMC geliştirme, zaman içinde mekanik ve çevresel hasar meydana gelse bile yük transferinin iyi çalışmasını sağlamalıdır. Inconel geliştirme, yük uygulama sürecinin tamamı boyunca malzemenin içindeki doğru yapıyı, doğru türde parçacıkları, tane sınırlarında bulunan koşulları ve yüzey kalitesini korumalıdır. Koruyucu kaplamalar bu yanıtta önemli bir rol oynar ve bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

Tablo 4. CMC'ler ve Inconel süper alaşımları için yüksek sıcaklık hasar mekanizmalarının ve değerlendirme önceliklerinin karşılaştırılması.

Hasar süreci	CMC'nin ilgi çekici yanıtı	Inconel'in ilgi çekici yanıtı	Anlamlı değerlendirme için gerekli ölçümler
İlk mekanik hasar	Matris çatlaması, arayüzey ayrılması ve sertlik değişimi	Akma ve yerel plastik deformasyon	Tam gerilme-gerinim tepkisi, yükleme yönü, sıcaklık ve hasar gözlemleri
Sürekli yükleme	Bileşenlerde sürünme, yük yeniden dağılımı ve lif kopması	Zamana bağlı deformasyon ve tane sınırı hasarı	Gerilme-zaman geçmişi, kırılma süresi, mikro yapı ve korunan özellikler
Döngüsel yükleme	Kayma, kademeli çatlama ve donatı bozulması	Çatlak oluşumu ve yorulma çatlağı yayılımı	Gerilim veya gerinim oranı, frekans, dalga biçimi, yüzey koşulu ve salınım tanımı
Termomekanik döngü	Mimari yapıya bağlı olarak, birleşik termal ve mekanik yüklemeye verilen tepki	Faza bağlı döngüsel deformasyon ve sürünme-yorgunluk etkileşimi	Sıcaklık-gerilim faz ilişkisi, artış hızları ve bekleme süreleri

Çevresel maruziyet	Erişilebilir yollar aracılığıyla ara faz ve lif saldırısı	Oksidasyon ve çevresel destekli çatlama	Atmosfer, basınç, maruz kalma süresi ve kesitsel hasar
Tortu destekli bozunma	Sisteme özgü kaplama ve alt tabaka reaksiyonları	Tuz bağımlı sıcak korozyon	Birikinti bileşimi, yükleme, yenileme ve sıcaklık
Birikmiş hasar	Kalan sertlik ve lif destekli kalan mukavemet	Kalan çatlak büyüme direnci ve yük taşıma bölümü	Maruziyet sonrası testler, önceki yükleme geçmişiyle bağlantılıdır.

6. Koruyucu Kaplamalar ve Arayüz Mühendisliği

Koruyucu kaplamalar, yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan havacılık parçalarında kullanılan malzemelerin önemli bir parçasıdır. Rolleri sadece bir yüzeyi kaplamanın ötesine geçer: ısı hareketini kontrol eder, çevresel hasara karşı koruma sağlar, sıcaklık ve mekanik gerilme nedeniyle genleşme ve büzülmeye izin verir ve hasarın nerede ve nasıl geliştiğini etkiler. Bir kaplamanın ne kadar iyi çalıştığı, malzemelerinin, küçük ölçekte düzenlenme biçimlerinin, bir araya geldikleri yerlerin ve uygulandıkları temel malzemenin birbirleriyle nasıl etkileşimde bulunduklarına bağlıdır. Silisyum karbür bazlı seramik matris kompozitler için, çevresel bariyer kaplamaları esas olarak sert yanma koşullarından kaynaklanan hasarla başa çıkmak için kullanılır. Isı korumasına ihtiyaç duyan Inconel parçaları için, termal bariyer kaplamaları (TBC'ler), uygun bir yapıştırma yöntemi kullanılarak tutturulan seramik bir yalıtım katmanı sunar. Bu işlevler örtüşebilir, ancak çevresel direnç ve termal yalıtım yine de ayrı tasarım ihtiyaçlarıdır.

6.1. Seramik Matris Kompozitler için Çevresel Bariyer Kaplamaları

6.1.1. Nadir toprak silikatları ve çevre koruma

Nadir toprak silikatları, SiC bazlı kompozitleri korumaya yardımcı olan temel malzemelerdir. Ytterbiyum disilikat, $Yb_2Si_2O_7$ ve ytterbiyum monosilikat, Yb_2SiO_5, kimyasal özellikleri ve diğer malzemelerle nasıl etkileşimde bulundukları, sahip oldukları kaplamanın türü ve yapısı

ayarlanarak değiştirilebildiği için çokça incelenmiştir. Bir tür maruz kalmaya karşı direnç, yangın veya yanma içeren tüm durumlara karşı dirençli olduğunuz anlamına gelmez. Bir çalışma, kalsiyumca zengin ve kalsiyumca fakir kalsiyum-magnezyum-alüminosilikat birikintilerine nasıl tepki verdiklerini görmek için plazma püskürtülmüş ytterbiyum monosilikat ve disilikat kaplamalarını karşılaştırdı [44]. Bu yöntem, yutulan minerallerin bileşiminin deneye bağlı olarak değişebileceğini, "CMAS" olarak adlandırılan şeyin sabit bir parçası olmadığını anlamaktadır [44]. Dolayısıyla, doğru EBC'yi seçerken, ne kadar su buharına maruz kalacağı, oluşabilecek tortu türleri, dayanabileceği sıcaklık ve karşılaşacağı mekanik gerilmelere dikkat etmeniz gerekir. Kaplama bileşiminin hem bağlayıcı katmanla hem de uygulandığı ana malzemeyle iyi çalışması şarttır.

6.1.2. Biriktirme kontrollü mikro yapı

Bir parçanın üzerine yerleştirilen katman, düzenlenme şekli, sahip olduğu boş alan miktarı ve farklı bölgelerdeki özel yapısı bakımından orijinal malzemeden farklı olabilir. Bu özellikler, kimyasalların nasıl hareket ettiğini ve ısındıklarında nasıl tepki verdiklerini etkiler. Owusu ve arkadaşları, süspansiyon plazma püskürtme yöntemiyle üretilen iterbiyum disilikat kaplamaları incelediler ve bu kaplamaların buhar ve CMAS'a maruz kaldıklarında nasıl performans gösterdiklerini araştırdılar. 1 ve 5 metre/saniye buhar hızlarını karşılaştırmak için 1350 santigrat derecede 96 saat boyunca testler yapıldı. Daha yavaş hız, silikanın gaza dönüşmesine neden olurken, daha hızlı hız hem silikanın gaza dönüşmesine hem de malzemenin aşınmasına yol açtı. Sonuçlar, sıcaklık ve maruz kalma süresi aynı kalsa bile, gazın hızının değiştirilmesinin malzemenin nasıl bozulduğunu etkileyebileceğini göstermektedir [45]. Bu, EBC performansının sadece kaplama malzemesine veya tek bir oksidasyon testine bakılarak açıklanamayacağı

anlamına gelir. Biriktirme parametreleri başlangıç şeklini belirler ve maruz kalma koşulları bu şeklin zaman içinde nasıl değiştiğini kontrol eder.

6.2. Inconel için Isı Bariyeri ve Oksidasyona Dayanıklı Sistemler

6.2.1. Isı yalıtımı ve bağlayıcı kaplama işlevi

Tipik bir metalik TBC sistemi, seramik bir üst katman, metal bir bağlama katmanı ve süper alaşımlı temel malzemeden oluşur. Alüminyum içeren bir bağlama katmanı kullanan sistemlerde, sistem ısıya maruz kaldığında alümina açısından zengin termal olarak büyümüş bir oksit tabakası oluşabilir. Seramik katman ısıyı engellemeye yardımcı olur ve bağlama katmanı parçaları birbirine yapıştırmaya ve çevresel etkenlerden korumaya yardımcı olur. Bu işlevler ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Yalıtkan bir kaplama, temel alaşımın sıcaklıkla ilgili kısıtlamalarını ortadan kaldırmaz. Termal avantaj, ısı akışına, kaplamanın kalınlığına, ısıyı ne kadar iyi ilettiğine ve parçanın ısıyı ne kadar etkili bir şekilde uzaklaştırabildiğine bağlıdır. Prabhu ve diğerleri [46], Inconel 718 üzerindeki hava plazma püskürtmeli NiCr/YSZ kaplama sisteminin tekrarlanan oksidasyonu nasıl ele aldığını inceledi. Çalışmaları, termal döngünün mikro çatlaklara ve daha hızlı oksidasyona neden olduğunu ve bir kaplamanın başlangıç durumunun, birçok kez maruz kaldıktan sonra stabil kalacağı anlamına gelmediğini gösterdi [46].

6.2.2. Çok Katmanlı Seramik Son Kat Kaplamalar

Üst kaplamanın birden fazla katmanı, farklı seramiklerin farklı faydalı özellikler eklemesine olanak tanır. Tek bir katmanın tüm termal, mekanik ve kimyasal ihtiyaçları karşılaması yerine, tasarım bu işlevleri komşu katmanlar arasında dağıtır. Rajasekaramoorthy ve diğerleri [47], NiCrAlY kaplı Inconel 718 üzerine uygulanan YSZ, gadolinyum zirkonat, YSZ ve GZ'den oluşan bir çift katman ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kaplamalar dahil olmak üzere farklı kaplama türlerini inceledi. Araştırmalarında yüksek sıcaklık X-ışını kırınımının yanı sıra

oksidasyon, termal döngü ve termal şok testleri kullanıldı. Test edilen düzenekler arasında, çift katmanlı sistem bu testlerde daha iyi bir genel sonuç verdi [47]. Bu sonuç, mimariye dayalı optimizasyonun iyi çalıştığını gösteriyor, ancak yine de kullanılan belirli sistemlere ve uygulanan test koşullarına odaklanıyor. Tüm çok katmanlı veya derecelendirilmiş kaplamaların tek katmanlı bir kaplamadan daha iyi çalışacağını kanıtlamıyor.

6.3. Kaplama-Alt Tabaka Uyumluluğu ve Artık Gerilimler

6.3.1. Termal genleşme ve gerilme uyumu

Bitişik kaplama katmanları, ısıtma ve soğutma sırasında genellikle farklı kısıtlanmamış termal gerilmelere maruz kalır. Birbirine yapıştırıldıklarında, bu farklılıklar, büyüklüğü termal genleşmeye, elastik tepkiye, geometriye, sıcaklık gradyanlarına ve gerilmenin gevşeme yeteneğine bağlı olan gerilimler oluşturur.

Uyumsuzluk geriliminin yararlı bir ilk dereceden tanımı şöyledir:

$$\Delta\varepsilon_{\mathrm{th}} = \int_{T_0}^{T} [\alpha_{\mathrm{c}}(T) - \alpha_{\mathrm{s}}(T)]\ dT,$$

burada α_ve α__ Kaplamanın ve alt tabakanın termal genleşme katsayılarını karşılaştırın. Bu ifade, gerilmede bir uyumsuzluktan bahseder; kaplama gerilimini hesaplamak için, malzemenin mekanik özelliklerini ve kenarlardaki koşulları da bilmeniz gerekir. Rajasekaramoorthy ve diğerleri [47], malzemelerin ısıtıldığında nasıl genleştiğini ve yapılarının nasıl değiştiğini ölçmenin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Doğru kaplamayı seçmek, sadece ısıyı iyi iletmeyen bir malzeme seçmekten daha fazlasını gerektirir [47].

6.3.2. Yüzey kimyası ve gömülü arayüz evrimi

Kimyasal uyumluluk da aynı derecede önemlidir. Yüzey katmanındaki elementler, gizli alanlarda oluşan kimyasalları etkileyebilir ve böylece kaplamanın ne kadar süre dayanacağını değiştirebilir. Ardrey ve ark. [5], katı SiC malzemeleri ve SiC bazlı kompozitlerde kullanılan çevresel bariyer sistemlerini inceledi. Isıl olarak büyüyen oksidin davranışındaki değişiklikleri, kompozitten silika katmanına borun hareketi gibi alt tabakanın kimyasıyla ilişkilendirdiler. Bu, basit bir model malzeme üzerinde test edilen bir kaplamanın, gerçek CMC üzerinde kullanıldığında farklı davranabileceğini göstermektedir [5]. Ana fikir, kaplamayı ve uygulandığı malzemeyi birlikte çalışan tek bir sistem olarak ele almaktır. İyi bir üst kaplama, zayıf bir bağ kaplamasını veya değişen bir kimyasal arayüzü tek başına düzeltemez.

6.4. Kaplama Bozulması ve Arıza Mekanizmaları

6.4.1. Termal döngü ve arayüz hasarı

Tekrarlanan ısıtma ve soğutma, kaplama katmanlarında ve farklı parçaların birleştiği yerlerde çatlaklara neden olabilir veya mevcut çatlakları artırabilir. Aynı zamanda, oksidasyon ve malzemenin fazındaki değişiklikler, çatlakların yayıldığı alandaki yapıyı etkiler. Metalik TBC'lere bakıldığında, üç katmanın (termal olarak büyütülmüş oksit, bağlayıcı katman ve seramik katman) birlikte kontrol edilmesi, oksidasyondan kaynaklanan hasar ile esas olarak termal uyumsuzluktan kaynaklanan arıza arasındaki farkı belirlemeye yardımcı olur. EBC'ler için, üst katman-bağlayıcı katman ve bağlayıcı katman-alt tabaka alanlarına dikkat edilmesi gerekir. Inconel 718'in döngüsel oksidasyonu üzerine yapılan çalışma, termal döngü ve oksidasyonun aynı anda gerçekleşebileceğini göstermektedir [46]. Bu nedenle, izotermal maruz kalma ve termal döngü, bir şeyin ne kadar dayanıklı olduğunu kontrol ederken birbirinin yerine kullanılabilecek testler olarak değil, iki farklı ancak ilişkili test olarak görülmelidir [46].

6.4.2. CMAS infiltrasyonu ve reaksiyonu

Erimiş CMAS, kaplamanın kolayca ulaşılabilen özelliklerine girebilir ve daha sonra kaplamadaki malzemelerle reaksiyona girebilir. Ortaya çıkan ürünler ya daha fazla hasarı durdurabilir ya da daha fazla zarara neden olmaya devam edebilir. Etkileri, reaksiyonların ne kadar hızlı gerçekleştiğine, biriken malzemenin neyden yapıldığına ve reaksiyon tabakasının bağlı kalıp kalmadığına bağlıdır. Ytterbiyum silikatları çeşitli CMAS karışımlarıyla karşılaştıran deneyler [44], kaplamaların değerlendirilmesinin önemli bir bölümünü ele almaktadır: çevresel koşullar kimyasal olarak açıkça tanımlanmalıdır. İnsan yapımı bir birikintiden elde edilen bir sonuç, birinin yutabileceği tüm kum veya kül türlerine uygulanmamalıdır.

6.4.3. Kombine buhar-CMAS maruziyeti

Farklı maruz kalmalar birlikte gerçekleştiğinde, her bir maruz kalma tek başına test edildiğinde görülmeyen davranışlara yol açabilirler. Lynam ve arkadaşları, yaklaşık %8, %15 ve %22 gözenekli iterbiyum disilikat kaplamaları incelediler. Bu kaplamaları 1350 santigrat derece yüksek sıcaklıkta 100 saat boyunca buhar, CMAS ve buhar ile CMAS karışımı altında test ettiler. Her iki koşul birlikte ele alındığında, CMAS penetrasyonu yalnızca CMAS kullanıldığında elde edilen değere kıyasla yaklaşık %25 arttı. Reaksiyon ürünleri de değişti ve iterbiyum alüminyum garnet ortaya çıktı. Gözenekliliğin, incelenen aralıkta malzemenin korozyona ne kadar iyi direndiği üzerinde küçük bir etkisi vardı [48]. Bu sonuçlar, tek bir ortamdaki gözenekliliğin veya direncin, bu kaplama sisteminin ne kadar iyi çalıştığını tam olarak açıklamadığını göstermektedir. Su buharı ve mineral birikiminin kontrol edilmesinin ana kullanım amacı olduğu durumlarda, kombine test özellikle faydalıdır.

6.5. Yeni Nesil Çok Katmanlı ve Çok Fonksiyonlu Kaplamalar

6.5.1. Bileşimsel olarak karmaşık çevresel engeller

Çok bileşenli nadir toprak silikatları, EBC'lerin tasarımı için daha fazla seçenek sunar. Değerleri, sadece karmaşık yapılarına bakılarak değil, fazlar sırasında ne kadar kararlı oldukları, nasıl tepki verdikleri ve diğer maddelerle ne kadar iyi çalıştıkları test edilerek belirlenmelidir.

2026 yılında yapılan bir araştırma, yüksek entropili disilikatın CMAS tepkisini inceledi. $(Yb_{0.2}Y_{0.2}Lu_{0.2}Er_{0.2}Dy_{0.2})_2Si_2O_7$.

1500 °C'ye maruz kaldığında, çalışmada bahsedilen diğer malzemelere kıyasla camın hareketini yavaşlatan apatit benzeri bir katman oluştu [49]. Sonuç, kimyasal yapının değiştirilmesinin kaplamaların birikintilerle nasıl tepki verdiğini kontrol etmeye yardımcı olabileceğini göstermektedir [49]. Bir malzemenin korozyona dayanıklı olduğunu göstermek, bir yüzeye uygulanan bir kaplamanın uzun süre dayandığını göstermekten farklıdır. Ayrıca, malzemenin biriktirildiğinde nasıl davrandığını, ne kadar iyi yapıştığını, sıcaklık değişimlerini nasıl ele aldığını ve gerçek CMC sistemleriyle iyi çalışıp çalışmadığını da kontrol etmemiz gerekir.

6.5.2. Aşınma kabiliyeti ve çevresel direnç

Aşındırılabilir kaplamalar başka bir mekanik rol daha ekler: kaplama hareketli bir bıçak ucuyla temas ettiğinde kontrollü malzeme çıkarılmasına olanak tanır. Tasarımları, doğru aşınma tepkisiyle birlikte çevresel koruma gerektirir. Lynam ve diğerlerinin [48] aşındırılabilir EBC üzerine yaptığı çalışma, bu çok amaçlı tasarımın aynı anda farklı kimyasallara maruz kaldığında nasıl çalıştığını kontrol etmenin önemli olduğunu göstermektedir. Korozyon malzemeyi değiştirebilir ve bu değişiklik zamanla aşınmasını veya sürtünmesini etkileyebilir [48]. Bu nedenle geliştirme hedefi, tüm alanlarda adil bir yaklaşımdır. Sertlik, yoğunluk veya kimyasal direnç gibi tek bir şeyi iyileştirmeye çalışmak, en iyi aşındırılabilir sistemi vermeyebilir. Kaplama tasarımının üç temel ihtiyacı karşılaması gerekir: Kullanılacağı ortama karşı koruma sağlamalı, sıcaklık değişimleri sırasında malzeme ile iyi çalışmalı ve uygulanacağı parça üzerinde üretilebilir olmalıdır. Yeni

araştırmalar, birleşik maruz kalma durumlarına ve gizli katmanların zaman içinde nasıl değiştiğine bakarak bu bağlantıyı desteklemektedir. Bu noktalar, bir sonraki bölümde ele alınacak olan havacılık ve uzay uygulamaları için komple malzeme sistemlerinin seçilmesine yardımcı olur.

Tablo 5. CMC'ler ve Inconel alt tabakalarla ilgili temsili kaplama sistemleri ve son gelişmeler.

Kaplama sistemi	Başlıca işlev	Tartışılan kanıtlar	Tasarımın etkisi	Referans
Plazma püskürtmeli iterbiyum monosilikat ve disilikat	Çevre koruma	Kalsiyum açısından zengin ve kalsiyum açısından fakir CMAS ile karşılaştırma	Değerlendirme sırasında tortunun bileşimi belirtilmelidir.	[44]
Süspansiyon plazma püskürtmeli iterbiyum disilikat	Buhar ve tortu direnci	Buhar hızı, gözlemlenen bozunma süreçlerini değiştirdi.	Sıcaklık ve süreye ek olarak ilgili akış koşullarını da dahil edin.	[45]
Inconel 718 üzerinde NiCr/YSZ	Yapıştırıcı tabakalı termal koruma	Döngüsel maruz kalma, mikro çatlamaya ve hızlandırılmış oksidasyona yol açtı.	Termal döngü ve kimyasal hasarı birlikte değerlendirin.	[46]
Inconel 718 üzerinde YSZ/GZ mimarisine sahip NiCrAlY	Isı koruması ve gerilim uyumu	İncelenen testlerde çift katmanlı yapılandırma olumlu sonuç verdi.	Katman düzenini ve bileşimini optimize edin.	[47]
Aşındırılabilir iterbiyum disilikat	Çevre koruma ve kontrollü aşınma	Buhar ve CMAS'ın birlikte maruz kalması nüfuzu artırdı.	Birleşik maruz kalma koşulları altında kimyasal dayanıklılığı doğrulayın.	[48]
Çok bileşenli nadir toprak disilikat	CMAS'a dayanıklı aday malzeme	1500 °C'de nüfuzu sınırlayan bir reaksiyon tabakasının oluşumu	Malzeme düzeyindeki sonuçları kaplama sistemlerine de genişletin.	[49]
SiC tabanlı alt tabakalarda nadir toprak silikat/Si sistemleri	Uyumlu bir kaplama katmanı aracılığıyla koruma	Yüzey kimyası, oksit tabakasının oluşumunu etkiledi.	Dayanıklılığı değerlendirirken temsili alt tabakalar kullanın.	[5]

YSZ: itriyum stabilize zirkonya; GZ: gadolinyum zirkonat; CMAS: kalsiyum-magnezyum-alüminosilikat. Tablo, farklı deneysel sistemleri özetlemektedir ve eşdeğer teknoloji hazırlığı anlamına gelmez.

7. Havacılık ve Uzay Uygulamaları ve Bileşen Seviyesinde Malzeme Seçimi

Seramik matris kompozitlerin (CMC'ler) ve Inconel süper alaşımlarının havacılık ve uzay alanındaki önemi, kaplamalar, soğutma kanalları, bağlantılar ve parçaların birleştirilme yöntemleri de dahil olmak üzere tam bileşenler olarak ne kadar iyi çalıştıklarından kaynaklanmaktadır. Doğru malzemeyi seçmek, sadece ağırlığına, gerildiğinde ne kadar güçlü olduğuna veya dayanabileceği en yüksek sıcaklığa bakmaktan daha fazlasını gerektirir. Dikkate alınması gereken önemli nokta, belirli bir malzeme sisteminin, zaman içinde gerekli yükleri ve koşulları karşılayabilmesi ve aynı zamanda üretim, kontrol ve iyi durumda tutma kurallarına uyabilmesidir. Bu bölümde ele alınan gelişmeler, bu malzemeleri kullanmanın üç farklı yolunu desteklemektedir: belirli yüksek ısıya dayanıklı parçalara CMC eklemek, yeni üretim yöntemleriyle Inconel parçalarını daha iyi hale getirmek ve yapılarını kontrol etmek ve çeşitli malzemeleri tek bir parçada birleştirmek. Bu stratejilerin farklı olgunluk seviyeleri vardır. Ticari üretim, tek tek parçaların test edilmesi ve laboratuvar tabanlı fizibilite çalışmaları, teknolojinin ne kadar ilerlediğini değerlendirirken ayrı alanlar olarak kalmalıdır.

7.1. Uçak Motoru Sıcak Bölüm Bileşenleri

7.1.1. Sabit CMC bileşenleri

Sabit türbin parçaları, CMC malzemelerinin havacılık mühendisliğinde nasıl kullanıldığına dair net bir örnek göstermektedir. GE, 2016 yılında ticari uçuşlarda kullanılmaya başlanan CFM LEAP motoru için 100.000. CMC türbin kapağını sevk etti [50]. Bu üretim başarısı, belirli bir bileşen tasarımının endüstride kullanıldığını göstermektedir; bu, her CMC karışımının veya motor kullanımının aynı geliştirme seviyesine sahip olduğu anlamına gelmez [50]. GE, GE9X yanma

odası ve türbini için parçalar geliştirmek üzerinde çalışıyor; bu da CMC malzemelerinin sadece kapaklardan daha fazla alanda nasıl kullanıldığını gösteriyor. 2015 raporunda, gösterilen motorların test edilmesinden bahsedilmiş ve iç ve dış yanma odası astarları, birinci ve ikinci kademe yüksek basınçlı türbin nozulları ve birinci kademe kapakları gibi parçaların CMC malzemelerinin kullanılmasının planlandığı bileşenler olarak listelendiği belirtilmiştir [51]. Bu bağlamda, türbin nozulu, roket motoru egzoz nozulu değil, sabit bir bıçak tertibatını ifade etmektedir [51]. Bu parçalar için malzeme seçerken, kompozit malzemenin koruyucu kaplama sistemiyle nasıl çalıştığını düşünmek önemlidir. Bölüm 6'da bahsedildiği gibi, çevresel bariyer kaplamasının durumu, alttaki SiC bazlı malzemenin ne kadarının yanma ürünlerine maruz kaldığını belirler. Bu nedenle, bileşen değerlendirmesi, kaplama hasarına, yerel sıcaklık farklılıklarına, parçaları bir arada tutan kuvvetlere ve malzemedeki çatlakların etkilerine bakmalıdır. Tasarımı düşünmenin faydalı bir yolu, gaz akışının sıcaklığını, yükü taşıyan malzemenin sıcaklığıyla karşılaştırmaktır. Soğutma, kaplama özellikleri ve ısı transferi ikincisini etkiler. Bu nedenle, ölçülen motor gazı sıcaklığı, CMC malzemesinin veya başka bir metal alaşımının sürekli olarak maruz kaldığı gerçek sıcaklık olarak kullanılamaz.

7.1.2. Döner CMC bileşenleri

CMC teknolojisinin dönen donanıma genişletilmesi ayrı bir kanıt gerektirir. 2026 yılında yapılan bir çalışmada, biyomimetik bir mimari ve birleştirilmiş kimyasal buhar infiltrasyonu ve polimer infiltrasyonu-piroliz işlemi kullanılarak ultra kalın SiC/SiC ve C/SiC türbin kanatçıklarının üretimi rapor edilmiştir [25]. Bu çalışma, önemli bir üretim zorluğuna değinmektedir: kalın, geometrik olarak karmaşık kompozit yapılar üretmek. Bu, ticari dönen bileşen yeterliliğinin kanıtı olarak değil, deneysel bileşen geliştirme olarak yorumlanmalıdır [25] . Seçim amacıyla, başarılı üretim yalnızca bir değerlendirme aşamasıdır. Dönen bir bileşen ayrıca, mimarisi boyunca yük transferi,

geometrik gerilim konsantrasyonları, üretim değişkenliği, çevresel maruziyet ve tekrarlanan çalışma altında hasar ilerlemesi ile ilgili kanıtlar gerektirir. Sabit kaplamalardan elde edilen sonuçlar bu yetenekleri otomatik olarak belirleyemez.

7.1.3. Inconel'in Süregelen Rolü

Inconel, her birinin farklı şekillerde güçlendirildiği ve farklı amaçlar için kullanıldığı bir alaşım grubudur. Special Metals, havacılık tekliflerinde 617, 625, 706, 718 ve X-750 gibi alaşımları içermektedir [52]. Bunlar arasında seçim yapmak, tüm nikel bazlı süper alaşımlar için genel bir özellik kümesi değil, alaşıma özgü kanıtlar gerektirir. Bölüm 4 ve 5'te ele alınan işleme ve hasar üzerine yapılan çalışmalar, uygulama kararları için malzeme durumunun açıkça belirtilmesinin neden önemli olduğunu da göstermektedir. Sadece "Inconel 718" adını bilmek, parçanın nasıl üretildiğini, ısıl işlem görüp görmediğini, yüzey durumunu, içinde ne kadar gerilim kaldığını veya daha önce onarılıp onarılmadığını size söylemek için yeterli değildir. Bu değişkenler, geleneksel ürünlerin, eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen veya onarılan ürünlerle nasıl karşılaştırıldığını incelerken özellikle önemlidir. Dolayısıyla, karşılaştırmanın doğru yolu, düzgün şekilde kurulmuş iki bileşen kurulumu arasında yapmaktır: biri, kaplaması ve ek parçalarıyla birlikte belirli bir CMC yapısı; diğeri ise, nasıl üretildiği, nasıl soğutulduğu ve yüzeyinin nasıl korunduğuyla birlikte belirli bir Inconel alaşımıdır.

7.2. Roket Tahrik Bileşenleri

Roket motorları, doğru malzemelerin seçilmesinin ve ısının yönetilmesinin, bunların nasıl üretildiğiyle birlikte ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Gradl ve Protz, yönlendirilmiş enerji biriktirme ve lazer teli doğrudan kapatma gibi rejeneratif olarak soğutulan kanal duvarlı nozulların yapımına yönelik gelişmiş yöntemleri incelediler. Araştırmaları, Inconel 625'in yanı sıra diğer olası alaşımları da ele aldı ve malzemelerin yapımını, özelliklerinin kontrol edilmesini ve

sıcak ateşlerle test edilmesini kapsadı [53]. Bu sonuçlar, bileşen düzeyinde belirli üretim yöntemlerinin örneklerini göstermektedir, tüm eklemeli imalatlı Inconel parçaları için genel bir onay değildir [53]. Burada eklemeli imalatın kullanılmasının avantajı, bileşenin şekliyle yakından bağlantılıdır. İç geçitler ve yapısal yüzeyler aynı anda üç gereksinimi de karşılamalıdır: termal performans, basıncın kontrol altında tutulması ve üretim süreçleri yoluyla yapılabilme. İyi bir malzeme seçimi, kanal duvar yapısının ne kadar iyi yapıldığına ve ayrı örneklerin test edilmesinden elde edilen sonuçlara bağlıdır. Çok malzemeli yapı başka bir yol sunmaktadır. NASA'nın RAMPT projesi, farklı eklemeli imalat yöntemleri kullanarak GRCop bakır alaşımlarını Inconel 625 veya NASA HR-1 ile karıştırmayı araştırdı. Program ayrıca gerçekçi bir roket kurulumunda odaları ve nozulları birlikte üretmeyi ve test etmeyi de araştırdı [54]. Bu yöntem, montajdaki her malzemeye ayrı bir görev veriyor [54]. Doğru bir karşılaştırma için, ek arayüzlere dikkatlice bakılması gerekiyor. Farklı malzemelerin bir kombinasyonunun ne kadar iyi yapıştığı, ne kadar tutarlı bir şekilde üretilebildiği, ısıya maruz kaldığında nasıl bükülebileceği veya şekil değiştirebileceği ve bunların incelenmesinin ne kadar kolay olduğu kontrol edilmelidir. Farklı malzemelerin birlikte kullanılmasının olası faydası, bunların birleştirilmesi için gereken şartlarla ilişkili olarak değerlendirilmelidir. CMC tabanlı itme sistemleri konseptleri, her bir parçaya odaklanan benzer bir değerlendirmeye ihtiyaç duyar. Kesilmiş bir parçadan veya birleştirilmiş bir örnekten elde edilen kanıtlar, basınç tutan bir itme parçasının dayanıklı olduğunu tek başına kanıtlayamaz. Bu sonuçlara bakarken, test kurulumu, yapının nasıl yüklendiği ve ne için kullanılacağı açık ve kolay bir şekilde görülebilmelidir.

7.3. Isı Koruması ve Yüksek Sıcaklık Uçuş Yapıları

Termal koruma uygulamaları, uzun süreli türbin işletimine uygulananlara kıyasla farklı bir ihtiyaç dengesi gerektirir. Aday malzemeler, güçlü geçici ısınmaya, oksidasyona, yüzey aşınmasına ve

birçok kez ısıtma ve soğutma döngülerinden geçmeye maruz kalabilir. Değerlendirme, maruz kalmaya dayanma ile yapının bundan sonra hala çalışma yeteneğine sahip olması arasındaki farkı ortaya koymalıdır. Ge ve ark., çökelme, infiltrasyon ve piroliz işlemlerini birleştiren bir yöntem kullanılarak üretilen C/SiC–ZrC kompozitlerinin döngüsel olarak uzaklaştırılmasını incelemiştir [55]. Gözlemleri, SiO_2 ve ZrO_2'den oluşan bir yüzey oksit tabakasının oluştuğunu ve maruz kalma sırasında yüzey kimyasının değişmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, incelenen malzeme ve deneyde kullanılan koşullarla ilgilidir; malzemenin uçuşta kullanıma hazır olduğu anlamına gelmez [55,65-68]. Malzeme seçimi yapılırken, aşındırma sonuçları, maruz kalma geçmişi ve maruz kalma sonrası durumla birlikte değerlendirilmelidir. Düşük bir aşınma oranı tek başına iyi bir kalan mukavemeti, sabit boyutu veya tekrar kullanılabilme yeteneğini sağlamak için yeterli değildir. Farklı çalışmaları karşılaştırmak için ısı akışı, atmosfer, maruz kalma süresi ve test örneklerinin nasıl kurulduğuna dair açık ve eşleşen tanımlamalara ihtiyaç vardır. Bu fark, özellikle "ultra yüksek sıcaklık kapasitesi"nden bahsederken önemlidir. Yüksek yüzey sıcaklığında kısa bir süre kalmak, yük taşırken o sıcaklıkta sürekli çalışmaktan çok farklıdır. Bu nedenle bölüm, aşınma direnci, çevresel dayanıklılık ve yapısal hizmet kapasitesini bağlantılı ancak farklı nitelikler olarak ele almaktadır [69-74].

7.4. Farklı Malzemelerin Birleştirilmesi ve Bütünleştirilmesi

Birleştirme, malzemelerin oluşturulmasını gerçek havacılık parçalarının yapımına bağlar. İyi bir kompozit veya süper alaşım, çok fazla gerilime neden olursa, ısındığında malzemenin hareket etmesini engellerse veya sorunları kontrol etmeyi zorlaştırırsa pek yardımcı olmayabilir. Bu bölümle doğrudan ilgili yakın tarihli bir örnek, Ticusil dolgu maddesi kullanılarak C/C–SiC'nin

Inconel'e lehimlenmesi üzerine 2025 yılında yapılan çalışmadır [56]. Araştırma, arayüzlerin nasıl değiştiğini, birleştirilen parçaların mukavemetini ve kalan gerilimleri inceleyerek, birleşmenin işe yarayıp yaramayacağının hem meydana gelen kimyasal reaksiyonlara hem de malzemelerin fiziksel olarak ne kadar iyi bir araya gelebildiğine bağlı olduğunu göstermiştir. Arayüzlerde reaksiyon ürünlerinin oluşması, birleşmenin kendi özelliklerine sahip ayrı bir malzeme gibi davranmasına neden olur [56]. Bu çalışmaları anlamada iki önemli fark önemlidir. Lehimleme sıcaklığı, kanıtlanmış sürekli hizmet limiti değil, bir üretim parametresidir. İkincisi, birleşmenin ilk mukavemeti, sıcaklık değişimlerine, sürekli basınca ve farklı ortamlara maruz kalmaya karşı ne kadar iyi dayanacağını göstermez. Bileşen geliştirme sürecinde, kanıtlar yapı ve erken mukavemete bakmaktan, gerçek yükleme ve maruz kalma koşulları altında test etmeye doğru kaymalıdır. Değerlendirme ayrıca arızanın nerede meydana geldiğini de ortaya koymalıdır: kompozit malzemenin içinde, dolgu malzemesinde, reaksiyon tabakası boyunca veya metal tabanda. Benzer ölçülen mukavemetler, çok farklı arıza biçimlerini ve kontrol üzerindeki farklı etkileri gizleyebilir.

7.5. Karşılaştırmalı Vaka Çalışmaları ve Malzeme Seçim Çerçevesi

Tablo 6, malzeme ailelerinden herhangi birine evrensel bir sıralama atamak yerine, mevcut kanıtlara göre temsili uygulamaları karşılaştırmaktadır.

Kanıt kategorileri, alıntılanan örnekleri tanımlar; bunlar resmi teknolojiye hazır olma derecelendirmeleri değildir.

Pratik bir seçim prosedürü beş aşamadan oluşur [75-80]:

1. Görevi tanımlayın. Isı maruziyetini, mekanik yükü, ortamı, gerekli ömrü ve izin verilen hasarı belirtin.

2. Malzeme sistemini tanımlayın. İşleme geçmişini, ilgiliyse elyaf mimarisini, kaplamaları, bağlantıları ve soğutma yöntemlerini dahil edin.

3. Arıza mekanizmalarına karşı tarama yapın. Önemli sınırlayıcı koşulları bulmak için 5. ve 6. bölümlerdeki yöntemleri kullanın.

4. Tüm bileşenleri karşılaştırın. Takılan parçaların toplam ağırlığını, kaç adet ünitenin başarıyla üretildiğini, incelemenin ne kadar kolay olduğunu, sorunları gidermek için hangi seçeneklerin mevcut olduğunu ve ürünün kullanım ömrü boyunca toplam maliyeti kontrol edin.

5. Kanıtları kararla eşleştirin. Kupon testlerini, alt parça kontrollerini, tipik bir parçanın gösterilmesini ve gerçek dünya kullanımını birbirinden ayırın.

Bu çerçeve, mühendislik terimleri açısından daha önceki kanıtların bir kombinasyonudur. Her uygulama için özel kararlar alınmasına yardımcı olur, ancak insanların iyi laboratuvar sonuçlarını alıp hizmetin genel olarak iyi çalıştığını söylemek için kullanmalarını engeller. Ayrıca, bir sonraki bölümde ele alınan modelleme, inceleme ve nitelendirme yöntemlerine ilişkin gereksinimleri de ortaya koymaktadır.

Tablo 6. Gelişmiş CMC'ler ve Inconel tabanlı sistemler için uygulamaya özgü fırsatlar ve kanıt sınırları.

Başvuru	Malzeme veya mimari	Bildirilen kanıtlar	Ana seçim sorusu
Ticari türbin kaplamaları	SiC tabanlı CMC sistemi	LEAP üretim ve gelir hizmeti uygulaması [50]	Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, parçanın gerektirdiği ömür ve bakım hedeflerine ulaşılabilir mi?
Yanma odası astarları ve sabit türbin nozulları	CMC sıcak bölüm bileşenleri	GE9X ile ilgili gösterici test ve geliştirme [51]	Termal gradyanlar, çevresel maruziyet ve yapışmalar yeterince ele alınıyor mu?
Deneysel türbin blisk'leri	SiC/SiC ve C/SiC	Karmaşık, kalın bileşenli imalat çalışması [25]	Mimari, temsili dönme yükleri altında kabul edilebilir kapasitesini koruyor mu?
Rejeneratif olarak soğutulan roket nozulları	Araştırılan alaşımlar arasında Inconel 625 de yer alıyor.	Üretim geliştirme ve sıcak ateş testi [53]	Kanal duvarı bütünlüğü ve döngüsel dayanıklılık tekrarlanabilir mi?

Entegre roket düzenekleri	Bakır alaşımı-süper alaşım kombinasyonları	NASA çok malzemeli üretim ve test geliştirme [54]	Arayüz performansı ve termal uyumluluk, amaçlanan görevi destekliyor mu?
Isı koruma adayları	C/SiC–ZrC	Laboratuvar döngüsel ablasyon kanıtı [55]	Gerekli maruz kalma geçmişinden sonra hangi yapısal kapasite kalır?
Kompozit-metal bağlantılar	C/C–SiC, Inconel'e bağlanmıştır.	Lehimleme, arayüz ve artık gerilme araştırması [56]	Bağlantı noktası, kullanım koşulları altında dayanıklı ve denetlenebilir durumda kalıyor mu?

8. Modelleme, Tahribatsız Muayene ve Nitelendirme

Gelişmiş seramik matris kompozitleri ve Inconel süper alaşımlarının etkin kullanımı, bunların nasıl üretildiği, yapısal olarak nasıl davrandıkları, hasarın nasıl ölçülebileceği ve parçanın kabul edilebilir olup olmadığı arasında bir bağlantı gerektirir. Modelleme, bir malzemenin yapısının nasıl çalıştığını nasıl etkilediğini gösterir; tahribatsız değerlendirme, malzemenin üretildiği ve zaman içinde değiştiği zamanki durumu hakkında ayrıntılar verir; kalifikasyon, nihai parçanın yapması gerekeni karşılayıp karşılamadığını kontrol eder. Bu faaliyetler birlikte yapıldığında en iyi sonucu verir. Son araştırmalar, birleşik modeller oluşturmak için görüntüler kullanarak, 3D baskılı Inconel'de malzemelerin nasıl deforme olduğunu simüle ederek ve hasar belirtilerini anlamak için makine öğrenimi kullanarak bu yöntemlerin nasıl birlikte çalıştığını göstermektedir. Bir şeyin mühendislik değeri, tahminlerin amaçlanan kullanım için önemli olan farklı malzeme koşulları, şekiller ve ortamlar altında doğru kalıp kalmamasına bağlıdır [28].

8.1. Seramik Matris Kompozitlerinin Çok Ölçekli Modellemesi

CMC modelleri, hasarın yapının farklı seviyelerinde nasıl meydana geldiğini göstermelidir. Liflerin ve matrisin yükü paylaşma şekli ve arayüzde ayrılma şekli küçük alanlarda gerçekleşir, ancak liflerin düzenlenme şekli, daha fazla matrise sahip malzeme kısımları ve hava ceplerinin varlığı, malzemenin daha büyük alanlarda nasıl büküldüğünü veya gerildiğini etkiler. Bileşen analizi, bu mekanizmaları bir şeyin ne kadar sert olacağı, gerilimin nasıl değişeceği ve hasarın

nasıl oluşacağı hakkında tahminlere dönüştürmelidir. 2024 yılında, bir çalışma, SiC-fiber/SiC mini kompozitlerini analiz etmek için dört boyutlu yerinde mikro-bilgisayarlı tomografi, dijital hacim korelasyonu ve BT tabanlı bir kayma gecikmesi modeli kullandı. Birbiri ardına alınan üç boyutlu görüntüler, malzeme gerildiğinde hasarın nasıl meydana geldiğini gösterdi ve matristeki çatlaklar arasındaki mesafe, daha iyi bir mekanik model oluşturmaya yardımcı oldu. Bu yöntem, yalnızca dışarıdan ölçülen bir yük-yer değiştirme eğrisi kullanmak yerine, iç gözlemleri beklenen gerilim-gerinim davranışına bağlar [28]. Model parametrelerini ayarlamak ile modelin iyi çalışıp çalışmadığını kontrol etmek arasındaki fark, bu tür çalışmaları anlamanın anahtarıdır. Çatlak aralığı ölçülüp bir modele verildiğinde, mekanik tepkiyle eşleşir ve gözlemlenenle uyumlu olduğunu gösterir. Ayrı bir test parçasında, belirli yükleme koşulları altında veya farklı bir yapıda çatlakların nasıl oluşacağını tahmin etmek ise ayrı bir kontrol gerektirir.

Bileşenleri geliştirirken, modeli düzenlemenin faydalı bir yolu hiyerarşi kullanmaktır.

- Liflerin, çevreleyen malzemenin ve aralarındaki alanın nasıl davrandığını inceleyen küçük ölçekli modeller.
- Mezoskal modeller, elyaf demetinin şeklini, malzemenin belirli bölgelerdeki gözenekliliğini ve farklı hasar türlerinin birbirini nasıl etkilediğini gösterir.
- Bileşen ölçekli modeller, termal gradyanları, bağlantıları, geometrik değişiklikleri ve yapısal yüklerin nasıl yeniden dağıtıldığını dikkate alır.

Bu hiyerarşi bir mühendislik sistemidir, her parçanın üç seviyenin tamamını doğrudan kullanması gerektiği anlamına gelen bir kural değildir. Modelin karmaşıklığı, verilmesine yardımcı olduğu karara ve ne kadar iyi çalıştığını kontrol etmek için mevcut verilere göre seçilmelidir.

8.2. Yüksek Sıcaklık ve Çevre Koşullarına Duyarlı Doğrulama

Bir modeli yalnızca normal oda sıcaklığında test etmek, yüksek sıcaklık ortamlarında iyi çalışıp çalışmayacağını bilmek için yeterli değildir. Sıcaklık değişimleri, malzemelerin nasıl davrandığını etkiler ve termal gerilime neden olur; ayrıca çevredeki hava, ortamın tamamen inert olduğu ve hiçbir etkisinin olmadığı bir deneyde meydana gelmeyecek aşınma ve hasara yol açabilir. 2026 yılında, bir çalışma, oda sıcaklığında ve 1200 santigrat derecede çekme kuvvetleri uygularken yerinde X-ışını mikrotomografisi ve dijital hacim korelasyonu kullanarak C/SiC kompozitlerini inceledi. Araştırma, malzemenin içten nasıl deforme olduğunu ve hasarın zaman içinde nasıl geliştiğini, sadece yüzeyde görülenlerin ötesine geçerek inceledi. Bu ölçümler, gerilimin nerede yoğunlaşacağı ve hasarın nasıl oluşacağı hakkındaki tahminlerin ne kadar doğru olduğunu kontrol etmek için kullanılabilecek uzamsal veriler sağlar [57]. Model için sıcaklık, maruz kalma süresi ve atmosfer ayrı girdiler olarak değerlendirilmelidir. Yüksek sıcaklıkta çekme testi için bir sözleşme imzalamak, oksidasyon oranları veya malzemelerin uzun süre ısı altında nasıl davrandığı hakkında herhangi bir şeyi kanıtladığı anlamına gelmez. Tıpkı bunun gibi, nihai kırılma kuvvetini yeniden oluşturabilmek, modelin önceki tüm hasar aşamalarını doğru bir şekilde tahmin ettiği anlamına gelmez. Bileşen bazlı bir şekilde kontrol yapan bir programın birkaç önemli faktöre bakması gerekir: parçanın tamamının ne kadar sert olduğu, farklı bölgelerdeki gerilim miktarı, hasarın nerede meydana geldiği, hasarın nasıl yayıldığı ve hasar meydana geldikten sonra parçanın ne kadar ağırlık taşıyabildiği. Bu ölçümler üzerinde anlaşmak, sadece tek bir sayı üzerinde anlaşmaktan daha sağlam bir kanıt sağlar.

8.3. Inconel Süper Alaşımlarının Mikro Yapıya Duyarlı Modellemesi

Inconel alaşımları için, tahmine dayalı modelleme, üretim yöntemini ve ortaya çıkan mikro yapıyı, malzemenin plastik deformasyonu ve yorulma deneyimiyle ilişkilendirmelidir. Bu gereklilik, özellikle eklemeli imalat için önemlidir, çünkü kristal yapı yönü ve herhangi bir kusur, işlemin

nasıl yapıldığına bağlı olarak değişebilir. 2024 yılında, tel ark eklemeli imalat yoluyla üretilen Inconel 718'in düşük çevrimli yorulma altında nasıl davrandığına dair bir çalışma yapıldı. Kristal yönlerini ve malzemedeki herhangi bir kusuru dikkate alan kristal-plastisite adı verilen bir model kullandılar ve sonuçlarını gerçek deneylerle kontrol ettiler [58]. Çalışma, malzemenin iç yapısı hakkındaki ayrıntıların, sadece gerilim ve gerinim arasındaki genel bir ilişki kullanmak yerine, yorulmayı analiz etmede nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Bu modelin kullanışlılığı, malzeme ve yükleme koşullarının nasıl tanımlandığına bağlıdır. Bir malzeme biriktirme yöntemi için yapılan parametreler, başka bir yöntem, farklı bir ısıl işlem veya diğer yüzey koşulları için doğrudan kullanılmamalıdır. Sadece izotermal çevrim altında yapılan doğrulama, bir şeyin bekleme süreleriyle termomekanik yorulmadan geçtiğinde ne kadar iyi çalıştığını göstermez. Mühendislik uygulamalarında, mikro yapıyı dikkate alan simülasyonlar, bir şeyin nasıl üretildiğine bağlı olarak sonuçlarda belirgin bir fark gösterdiklerinde özellikle faydalıdır. Bir kusur popülasyonunun veya yönelim dağılımının yerel deformasyonu nasıl etkilediğini gösteren bir model, daha iyi işleme kararları alınmasına yardımcı olabilir. Parçaların ne kadar süre dayanacağını kontrol etmek için kullanılması da, ne kadar emin olabileceğimiz konusunda tahminler ve uygun durumlarda kendi başlarına yapılan kontroller gerektirir.

8.4. Tahribatsız Değerlendirme ve Hasar İzleme

Muayene yöntemleri, hasar türüne ve alınması gereken karara göre seçilmelidir. Üretim kabulü, laboratuvar hasar karakterizasyonu ve hizmet içi izleme, benzer algılama teknolojilerini kullansalar bile farklı hedeflere sahiptir. X-ışını tomografisi ve dijital hacim korelasyonu farklı ancak faydalı bilgiler sağlar: tomografi iç yapıyı gösterir ve görüntüler arasındaki korelasyon, parçaların içeride nasıl hareket ettiğini ve gerildiğini ölçmeye yardımcı olur. CMC'deki son çalışmalar, bunların birlikte kullanılmasının hasarın nerede başladığını ve deformasyonun nasıl

hareket ettiğini nasıl değiştirdiğini anlamaya yardımcı olduğunu göstermiştir [57,58]. Bir laboratuvar örneğinde bir özelliği net bir şekilde görebilme yeteneği, farklı bir şekle sahip ve ulaşılması daha zor olan daha büyük bir parçada güvenilir bir şekilde bulunabileceği anlamına gelmez. Akustik emisyon, hasarın meydana geldiği anda görülmesinin başka bir yolunu sağlar. Muir ve ark., tek yönlü SiC/SiC kompozitlerinde sabit gerilime maruz kaldıklarında hasarın nasıl geliştiğini incelemek için akustik emisyon ölçümleri, X-ışını bilgisayarlı tomografisi ve otoenkoder tabanlı bir analiz kullandılar [59]. Ses sinyallerini tek başına görülen hasarla ilişkilendirmek, hasara tam olarak neyin neden olduğunu bilmek için yeterli değildir. Bu nedenle, sesleri gözlemlenenlerle ilişkilendirmek faydalıdır.

Tablo 7. Gelişmiş CMC ve Inconel geliştirme süreçlerinde modelleme, ölçüm ve doğrulama arasındaki ilişkiler[57-59].

Yaklaşmak	Elde edilen bilgiler	Mühendislik kullanımı	Doğrulama sorusu
CT destekli CMC mekanik modelleme	İç mimari, çatlama ve ilgili mekanik tepki	Gözlemlenen hasarı rijitlik ve yük transferiyle ilişkilendirin.	Model, bağımsız bir numuneyi veya yükleme koşulunu tahmin edebilir mi?
Dijital hacim korelasyonlu yüksek sıcaklık BT	Isıl yükleme sırasında iç deformasyon ve hasar	Tahmin edilen gerilim lokalizasyonunu ve hasar ilerlemesini değerlendirin.	Sıcaklık, atmosfer ve maruz kalma süresi temsili nitelikte mi?
AM Inconel'in kristal-plastisite modellemesi	Mikro yapıya bağlı plastik deformasyon ve yorulma göstergeleri	Yönelim ve kusur etkilerini karşılaştırın	Doğrulama işlemi, gerçek işleme ve malzeme koşullarını kapsıyor mu?
Akustik emisyonun BT ile birleştirilmesi	Gözlemlenen hasarla bağlantılı zamana bağlı sinyaller	Hasar tespit yöntemleri geliştirin	Sınıflandırmalar, farklı örnekler ve sensör konfigürasyonları genelinde geçerliliğini koruyor mu?
Üretim ve denetim kayıtları	İzlenebilir işleme ve kabul kanıtı	Tekrarlanabilirliği ve bileşen yerleşimini destekleyin.	Süreç değişiklikleri kontrol ediliyor ve denetim yetenekleri sergileniyor mu?

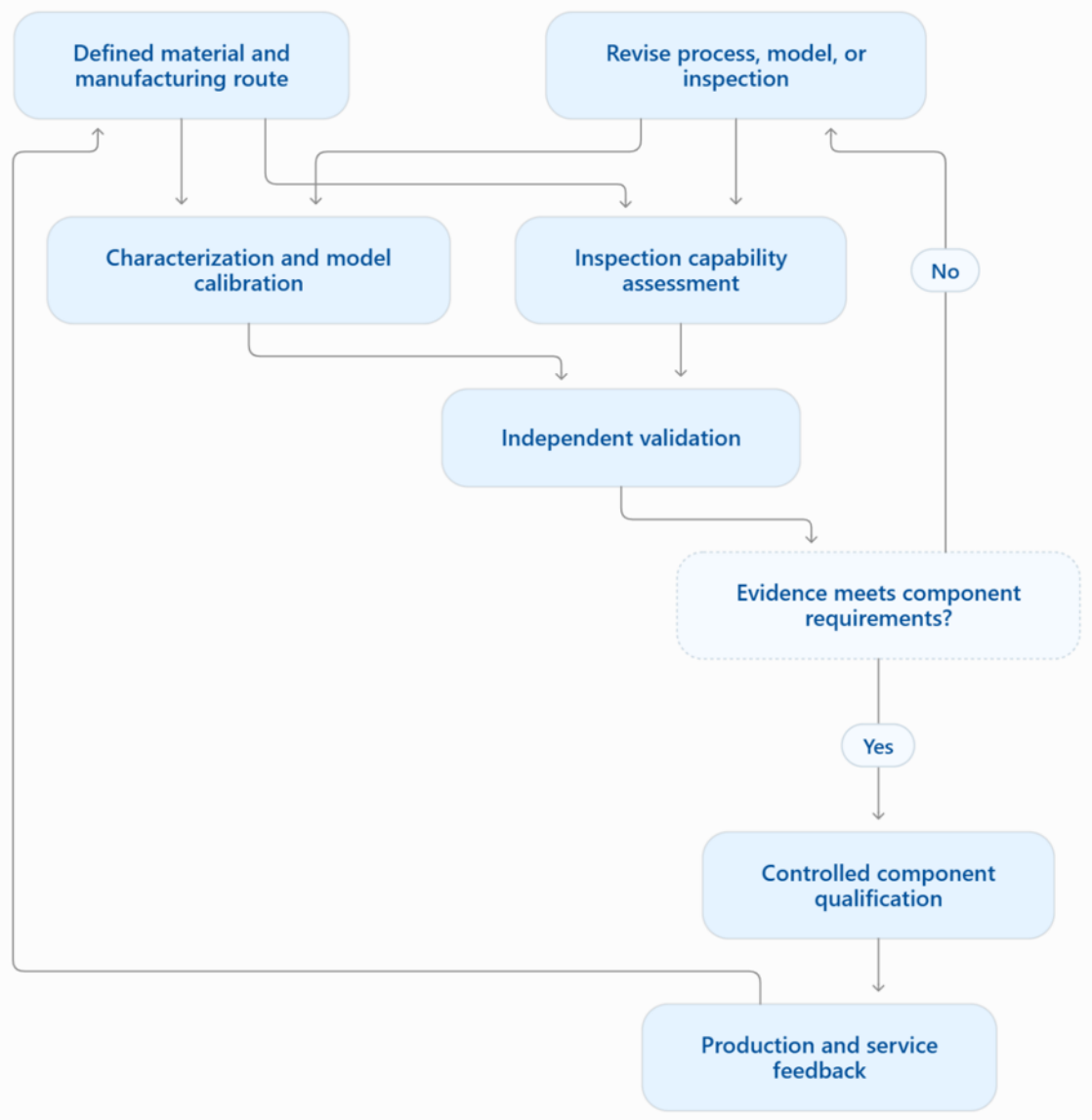
8.5. Makine Öğrenimi, Veri Bütünlüğü ve Tahmin Belirsizliği

Makine öğrenimi, verileri gruplara ayırmada, sinyalleri anlamada ve akıllı ve hızlı bir şekilde tahminlerde bulunmada yardımcı olabilir. Muir ve ark. [60], açık bir örnek olan çok modlu bir yaklaşım gösterdi: akustik emisyon analizini fiziksel hasar gözlemleriyle ilişkilendirdiler. Bu yöntemin gerçek mühendislik durumlarında kullanılması, aynı testten rastgele sinyalleri bölmekle kalmayıp, farklı malzemeler ve çeşitli ölçüm yöntemleriyle ne kadar iyi çalıştığını kontrol etmeyi gerektirir. Modeller geliştiren gelecekteki programlar için, eğitim ve test, modelin kullanılacağı önemli aşamada ayrı ayrı yapılmalıdır. Amaç, yeni üretilen bir parça hakkında bir şey tahmin etmekse, ayrı yapılar veya örneklerle test yapmak, paylaşılan bir deneyden belirli görüntü parçalarını veya ses kliplerini çıkarmaktan daha iyi sonuçlar verir. Belirsizlik de ana nedenlerine göre ayrılmalıdır. Ölçüm belirsizliği, gözlemlerin ne kadar doğru olduğuyla ilgilidir; malzeme değişkenliği, aynı olması gereken örnekler arasındaki farklılıkları ifade eder; parametre belirsizliği, modelin ne kadar iyi kalibre edildiğiyle ilgilidir; ve model tutarsızlığı, modeldeki matematiğin hesaba katmadığı şeylerle ilgilidir. Bu katkıları raporlamak, daha fazla test yapmanın, daha iyi anlamanın veya modeli değiştirmenin tahminin doğruluğunu en çok artırıp artırmayacağına karar vermeye yardımcı olur. Dijital ikiz, bu unsurların belirli bir parçanın değişen durumuyla bağlantılı olmasını gerektirir. Statik bir simülasyon veya tek başına eğitilmiş bir vekil model bu bağlantıyı kurmaz. İncelediğimiz sistemler için iyi bir hedef, üretim ve denetim süreçlerinden gelen bilgileri kullanarak bileşen durumlarının tahminlerini güncellemek ve tahminlere ne kadar güvendiğimiz konusunda net sınırlar belirlemektir.

8.6. Niteliklendirme ve Bileşen Kabulüne Geçiş

Niteliklendirme, tekrarlanabilir olduğunu ve iyi çalıştığını göstermelidir. Başarılı bir test, belirli bir kurulumun çalıştığını gösterir; üretimde kabul edilmesi için, testin çalışmasını sağlayan koşulların kontrol altında olduğundan da emin olmanız gerekir. NASA-STD-6030, eklemeli imalat

kullanarak uzay uçuşu parçalarının nasıl tasarlanacağı, üretileceği ve test edileceği de dahil olmak üzere iyi bir kılavuz sunmaktadır [60]. NASA'nın açıklamasına göre, eklemeli imalat kontrol planı ve kalite yönetim sistemi çerçevenin kilit parçalarıdır. Kapsamı, sivil uçakların sertifikalandırılmasında kullanılan süreçten ve CMC'lerin nitelendirilmesinde kullanılan süreçten farklıdır [60]. Ekipman ve tesis kontrolü, NASA-STD-6033'e göre ayrı olarak ele alınmaktadır [61]. Bu ayrım, malzeme özelliklerinin kontrol edilmesi ve parçaların test edilmesinin kontrollü bir üretim kurulumuyla yapılması gerektiğini göstermektedir [61]. Hem CMC hem de Inconel geliştirme için bu sıra, bir bileşenin kabul edilmesinde ilerlemek için gereken temel kanıtı göstermektedir: Asıl nokta, niteliklendirme kanıtının belirli bir malzeme ve üretim yöntemiyle bağlantılı kalması gerektiğidir. Elyafın yapısında, kaplanmasında, katkı maddeleriyle işlenmesinde, ısıtılmasında, onarım sırasında sabitlenmesinde veya kontrol edilmesinde meydana gelen her türlü değişiklik, mevcut kanıtları nasıl etkilediği açısından incelenmelidir. Proses kontrolü ile gerçek performans arasındaki bu bağlantı, modelleme ve karakterizasyonu iyileştirmeye yardımcı olur ve bu da havacılık donanımının daha güvenilir ve tutarlı hale getirilmesini destekler.



Şekil 2. Üretim kontrolü, tahmine dayalı modelleme, muayene ve bileşen kalifikasyonunun önerilen entegrasyonu. Diyagram, belirlenmiş bir sertifikasyon prosedürü değil, mühendislik sentezidir.

9. Endüstriyel Zorluklar ve Gelecekteki Araştırma Yönleri

Gelişmiş seramik matris kompozitleri ve Inconel süper alaşımlarının geliştirilmesindeki bir sonraki adım, daha iyi malzemeleri her zaman güvenilir şekilde çalışan parçalara dönüştürmektir. Daha yüksek sıcaklık dayanımı, daha az ağırlık ve parça üretiminde daha fazla esneklik hala temel

hedeflerdir, ancak endüstrideki kullanışlılıkları, ne kadar iyi üretilebildiklerine, ne kadar uzun süre dayandıklarına, sorunların ne kadar kolay kontrol edilebildiğine, onarım maliyetlerinin ne kadar düşük olduğuna ve kullanım süreleri boyunca toplam maliyetlerine bağlıdır. Önceki bölümlerden gelen araştırma hedefleri, malzemeleri, şeylerin nasıl yapıldığını ve yapıların nasıl tasarlandığını bir araya getirmeye odaklanmaktadır.

9.1. Üretim Ölçeklenebilirliği ve Proses Tekrarlanabilirliği

CMC'ler için, bir fabrikada üretim yapılırken, malzemenin özelliklerinin uzayda nasıl dağıldığı ve malzemenin genel yoğunluğu veya mukavemeti dikkate alınmalıdır. Suyun toprağa nasıl girdiği, malzemenin nasıl çekildiği veya sürüklendiği ve ne kadar boş alan kaldığı gibi yerel farklılıklar, bazı alanların daha küçük test örneklerinde görülenlerden farklı davranmasına neden olabilir. Daha büyük veya daha karmaşık bir parçada başarılı bir işlem gerçekleştirmek istediğinizde, malzemelerin nasıl hareket ettiğini ve kimyasal reaksiyonların tüm yapı boyunca nasıl gerçekleştiğini yönetmeniz gerekir. Shinde ve arkadaşları, kimyasal buhar infiltrasyonu kullanarak C/SiC kompozitleri üretmek için bir model oluşturdu. Bu model, gazın reaktörde nasıl hareket ettiğini, kompozit oluşmadan önce gözenekli malzeme boyunca nasıl hareket ettiğiyle ilişkilendirir [62]. Tahminler, toplam yoğunluğun ve işlemden sonra ne kadar boş alan kaldığının gerçek ölçümlerine göre kontrol edildi. Bu çalışma, reaktör koşullarını üretilen kompozitin iç durumuna bağlamanın, malzemenin ne kadar eşit şekilde paketlendiğini dikkate almadan sadece işlem süresini iyileştirmeye çalışmaktan daha iyi olduğunu göstermektedir [62]. Gerçek dünya araştırma hedeflerinden biri, başlangıç malzemesinin şekli ve ilk hava ceplerinin gerçek durumlarda değiştiği durumlarda bile sürecin iyi çalıştığı zaman dilimlerini bulmaktır. Bu nedenle, gelecekteki üretim araştırmaları, özelliklerin uzayda nasıl dağıldığı, farklı partiler arasında sonuçların ne kadar tutarlı olduğu ve parçaların yüzde kaçının gerekli standartları karşıladığı hakkında bilgi

içermelidir. Bu adımlar, endüstrileri karşılaştırırken daha hızlı işleme seçeneklerini daha faydalı hale getirecektir. Katmanlı üretim yoluyla üretilen Inconel için, hammaddenin yönetimi, tekrarlanabilirliğin kullanılan sürece nasıl bağlı olduğunun iyi bir örneğidir. Keller ve ark., Inconel 718 tozunun farklı şekillerde -bazılarında yeni toz eklenerek, bazılarında eklenmeden- 54 defadan fazla nasıl yeniden kullanılabileceğini inceledi [63]. Toz özelliklerinde bazı değişiklikler fark ettiler, ancak test ettikleri koşullar altında malzemenin yorulmaya dayanma yeteneğinde büyük bir azalma görmediler. Mekanik numuneleri işlenmişti, bu da orijinal, üretildiği gibi yüzeylerini koruyan bileşenler için sonuçları yorumlarken önemlidir. Sonuçlar, geri dönüşümün incelenen süreç içinde kontrollü bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir; Ancak, bir şeyin kaç kez geri dönüştürülebileceğine dair genel bir sınır koymuyorlar.[63] Daha önemli nokta, malzemeleri nasıl tanımladığımıza üretim geçmişinin de dahil edilmesi gerektiğidir. CMC'ler için bu, ön şekillendirme ve yoğunlaştırma süreci geçmişini içerir; Inconel için ise hammadde durumu, üretim geçmişi, ısıl işlem ve son işlem sürecini içerir. Bu değişkenler izlenebildiğinde ve kabul kanıtına bağlanabildiğinde endüstriyel transfer daha güvenilir hale gelir.

9.2. Birleşik Hizmet Koşulları Altında Dayanıklılık

Kullanım sırasında çevresel ve mekanik hasar birlikte meydana geldiğinde, bunlar aynı anda kontrol edilmelidir. Oksidasyon ve yorulma için ayrı testler, malzeme arızasının nedenlerini anlamada hala yardımcıdır, ancak bu testlerin sonuçları tek başına, malzemenin her iki soruna aynı anda maruz kaldığında nasıl davrandığını her zaman göstermeyebilir. Bhatt ve ark., 1204 ve 1315 santigrat derece sıcaklıklarda buharda sürekli tepe düşük çevrimli yorulmaya maruz bırakılan hem kaplamalı hem de kaplamasız eriyik infiltrasyonlu SiC/SiC kompozitlerini incelemiştir [64]. Gözlemleri, kaplama hasarını daha sonraki nemle ilgili hasar ve kompozitteki çatlak büyümesiyle ilişkilendirmiştir. Bu, bir şeyin ne kadar süre dayandığını değerlendirirken, hem kaplamaya hem

de bağlı olduğu malzemeye bakmanız gerektiğini gösterir, çünkü bunlar birbirini etkiler. Gelecekteki testler, yüklerin nasıl uygulandığına ve malzemelerin nasıl maruz kaldığına dair tipik örneklere bakarak bu yöntemi geliştirmelidir. Örneğin , kaplamada daha önce bir hasar varsa, bu, malzemenin daha sonra çevreye nasıl tepki vereceğini etkileyebilir. Ayrıca, malzeme daha önce bir şeye maruz kalmışsa, daha sonra mekanik strese nasıl tepki vereceği değişebilir. Bu olayların birbirine nasıl bağlı olduğunu bilmek, tek tek maruz kalma durumlarına bakmaktan daha doğru bir ömür değerlendirmesi oluşturmaya yardımcı olabilir. Inconel parçaları için asıl amaç, Bölüm 5'te bahsedilen yorulma, sürünme ve çevresel faktörleri malzemenin gerçek durumuyla ilişkilendirmektir. Katmanlı üretim ve onarım, çeşitli alanlarda farklı mikro yapılar oluşturabilir, bu nedenle her parçayı yakından kontrol etmek özellikle önemlidir. Bu nedenle araştırma programları, hasarın başladığı yerleri ürünün nasıl üretildiği ve üretimden sonra yapılan işlemlerle ilişkilendirmeli ve daha sonra bu bağlantıların tipik ısı ve hareket koşullarına maruz kaldığında hala geçerli olup olmadığını kontrol etmelidir.

9.3. Yüksek Sıcaklık Kaplama Sistemleri

Bir CMC'nin sıcaklık kapasitesini genişletmek, koruyucu kaplama çerçevesinin tamamında tutarlı ilerlemeler gerektirir. Temel katman sıcaklık sınırlayıcı bileşen haline gelirse, daha sert bir üst kaplama sınırlı avantaj sağlar. Lee ve ark. 2026 yılında 1482 °C'ye odaklanan SiC/SiC sistemleri için organik direnç kaplamaları üzerine yaptıkları bir araştırmada bu zorluğu ele aldılar [65]. Çalışma, geleneksel silikon bağlayıcı kaplamalara alternatif olarak mullit bazlı bir malzemeyi inceledi ve ısıtıcı buhar döngüsü ve yanma ile ilgili düzenekler aracılığıyla kaplama optimizasyonunu değerlendirdi. Katmanlar arasındaki termal genleşme uyumluluğu ve kimyasal etkileşim temel hususlardı. Geliştirme hedefi olarak ifade edilen sıcaklık, gösterilen bileşen fayda kapasitesinden belirlenmelidir [65]. Bu nedenle, faydalı bir araştırma yönü, alt tabaka, bağlayıcı

kaplama, ara katmanlar ve açıkta kalan yüzeyin kolaylaştırılmış tasarımıdır. Aday sistemler, güvenilir uygulama koşulları ve arıza tanımları kullanılarak karşılaştırılmalıdır. Önemli sonuçlar arasında yapışma tutunumu, organik infiltrasyon, reaksiyon katmanı gelişimi ve kalan alt tabaka özellikleri yer almaktadır. Aynı bileşen düzeyindeki düşünce, Inconel üzerindeki koruyucu kaplamalar için de geçerlidir. Kaplama iyileştirmesi, özellikle alt tabakanın ek malzeme üretimi veya onarımı geçirdiği durumlarda, referansın ve sonuç olarak ortaya çıkan sunumun temel bileşimi nasıl etkilediğini ortaya koymalıdır. Yüzey korumasındaki iyileştirmeler, tüm bileşenin mekanik gereksinimleriyle tutarlı kalmalıdır.

9.4. Tamir Edilebilirlik ve Ömür Uzatma

Başlangıçtaki kumaş ve bileşen seçimi sırasında onarılabilirlik dikkate alınmalıdır. Yeni üretildiğinde iyi performans gösteren bir kumaş çerçeve, hasar biriktikten sonra farklı bir bakım tekniği gerektirebilir. Daha önce incelenen Inconel onarım çalışmaları [34,35], kaplama tabanlı geri kazanımı değerlendirmek için bir temel sağlar, ancak gelecekteki çalışmalar halihazırda açıkta kalan alt tabakalara daha fazla önem vermelidir. Onarılan bileşenler, hem tutulan kumaşı hem de yeni ortaya çıkan kumaşı, ayrıca bir arayüzü ve değiştirilmiş bir termal geçmişi içerir. Değerlendirme, dolayısıyla orijinal alt tabakanın durumunu ve ortaya çıkan hasarın yerini içermelidir. CMC sistemleri için, nitelendirme konusunda kritik bir soru, çevresel korumayı geri kazanmak ile yapısal yeteneği geri kazanmak arasındadır. Hasarlı bir kaplamanın değiştirilmesi, bozulmuş tellerin veya arayüzlerin iyileşmesini kendi başına göstermez. Değerli bir onarım geliştirme programı, onarım öncesi değerlendirmeyi, onarım süreci kontrolünü ve ajan yüklemesi altında onarım sonrası uygulamayı birleştirecektir. Her iki kumaş ailesi için de, yapı hedefi, doğrulanmış bir kalan ömür değerlendirmesi olabilir. Bu, algılanabilir hasarı, onarım sınırlarını ve

sonuç olarak ortaya çıkan dayanıklılığı birbirine bağlayan kanıt gerektirir. Çok sayıda destek müdahalesinin hedeflendiği durumlarda, tekrarlanan onarım geçmişleri de incelenmelidir.

9.5. Ekonomik ve Çevresel Değerlendirme

Finansal ve doğal karşılaştırmalar, havacılık uygulamasını yansıtan faydacı bir öncül kullanmalıdır. Kilogram başına elde edilen ve bileşen başına üretim enerjisi aydınlatıcıdır, ancak fayda ömrü, inceleme, onarım sıklığı veya operasyonel performans farklılıklarını yakalamazlar. Makul bir yaşam döngüsü karşılaştırması, hammadde üretimi, işleme, atık parçalar, paketleme, kaplama, bakım ve kullanım ömrü sonu işlemlerini hesaba katmalıdır. Operasyonel faydalar, yalnızca uygun bir bileşen veya sistem değerlendirmesiyle desteklendiğinde dahil edilmelidir. Özellikle, bir bileşen kütlesindeki azalma, konumu, çalışma profili ve sistem entegrasyonu dikkate alınmadan bir uçak yakıt tasarrufu iddiasına dönüştürülmemelidir. Toz geri dönüşümü, yukarıda incelenen kontrollü geri dönüşüm kanıtıyla desteklenen Inconel üretiminde kaynak verimliliğinde ilerleme kaydetmek için bir fırsat sunmaktadır [64]. Bununla birlikte, ekonomik avantajı ilgili sınıflandırma, işleme ve tanıma gereksinimlerine bağlıdır. CMC'ler için, işleme yeteneklerindeki gelişmeler, enerji tüketimi ve üretim dayanımının yanı sıra işleme süresi üzerinden de değerlendirilmelidir. Gelecekteki çalışmalar, tanımlanmış bir hizmet aralığı boyunca performans gereksinimlerini gösteren bir bileşen montajı gibi açıkça tanımlanmış işlevsel bir birimi detaylandırdıkları takdirde daha karşılaştırılabilir olacaktır. Hassasiyet analizi daha sonra sonuçların güç kaynağı, üretim dayanımı, destek varsayımları ve tamamlanmış bileşen ömrü ile nasıl değiştiğini ortaya koymalıdır.

9.6. Endüstriyel Çeviri için Araştırma Öncelikleri

Önceki çalışmalar, ölçülebilir tasarım sonuçları etrafında organize edilmiş bir araştırma planını desteklemektedir. Tablo 8, ticari durum tahminleri yerine önerilen ihtiyaçları sunmaktadır. Bu sistemden üç ilişkili hedef ortaya çıkmaktadır. İlk olarak, üretim değişiklikleri tekrarlanabilir bir malzeme durumu yaratmalıdır. İkinci olarak, karakterizasyon ve modelleme, bu durumun üretim sırasında nasıl geliştiğini ortaya koymalıdır. Üçüncü olarak, inceleme ve destek, bileşenin tolere edilmesi, onarılması veya kullanımdan kaldırılması için kullanılabilir kriterler sağlamalıdır. CMC'ler için bu hedefler, entegre çevresel güvenlik, yapı tutarlılığı ve hasara duyarlı yapısal tasarıma odaklanmayı içerir. Inconel süper alaşımları için ise, üretim koşullarına özgü performans, kontrollü malzeme geri dönüşümü ve kanıtlanmış onarımı vurgular. Her iki alandaki ilerleme, gelişmelerin dikkatlice tanımlanmış örneklerden tekrarlanabilir havacılık düzenlemelerine geçişte başarılı olduğunu göstermeye bağlı olacaktır.

Tablo 8. Gelişmiş CMC'lerin ve Inconel süper alaşımlarının endüstriyel gelişimi için araştırma öncelikleri[55-60].

Öncelik	CMC araştırma odağı	Inconel araştırma odağı	İlerlemenin gösterilmesi için kanıt gereklidir.
Tekrarlanabilir üretim	Sızma homojenliğini, mimarisini ve artık gözenekliliğini kontrol edin.	Hammadde kontrolü, üretim değişkenliği, ısıl işlem ve yüzey durumu.	Bağımsız partiler arasında tutarlı özellikler ve kabul edilebilir verim.
Karma ortam dayanıklılığı	Kaplama hasarı, çevresel etkenler ve kompozit malzemenin bozulması arasında bağlantı	Döngüsel deformasyon, bekleme süresi yüklemesi ve çevresel hasar arasındaki etkileşimleri çözümleyin.	Belirlenmiş arıza mekanizmalarına sahip temsili yükleme-maruz kalma testleri
Koruyucu sistem uyumluluğu	Uyumlu yüksek sıcaklık kaplama katmanları geliştirin.	Üretim ve onarım durumlarında kaplama-alt tabaka etkileşimlerini değerlendirin.	Maruz kalma sonrasında korunan koruma ve mekanik işlevsellik
Onarım ve bakım	Kaplama onarımını yapısal iyileştirmeden ayırt edin.	Tutulan alt tabakayı, birikmiş malzemeyi ve onarım arayüzlerini karakterize edin.	Onaylanmış onarım limitleri ve kalan ömür değerlendirmeleri

Tahmin yöntemleri	Mimariyi ve iç hasarı bileşen davranışına bağlayın.	Mikro yapıyı ve kusurları deformasyon ve yorulmayla ilişkilendirin.	Nicelleştirilmiş belirsizlikle bağımsız doğrulama
Denetleme	Tespit edilebilir belirtileri olası hasarlarla ilişkilendirin.	Hata oluşumlarını ve yüzey durumunu bileşen kabul edilebilirliğiyle ilişkilendirin.	Temsili geometrilerde tespit yeteneği gösterilmiştir.
Kaynak verimliliği	Verimi ve dayanıklılığı korurken işleme yükünü azaltın.	Kontrollü üretim rotaları dahilinde tozun yeniden kullanımını ve onarımını yönetin.	Eşdeğer bileşen fonksiyonuna dayalı yaşam döngüsü karşılaştırmaları
Bileşen entegrasyonu	Bağlantı noktalarını ve kompozit-metal arayüzlerini doğrulayın.	Çok malzemeli geçişleri ve yerel termal geçmişleri doğrulayın.	İlgili termal ve mekanik yükleme altında montaj seviyesindeki performans

10. Sonuçlar

2010 ile 2026 yılları arasında seramik matris kompozitleri ve Inconel süper alaşımlarındaki gelişmeler, zorlu ısı, basınç ve çevre koşullarında iyi performans gösteren havacılık parçaları üretme seçeneklerini artırdı. Gelişimleri farklı ancak ilişkili şekillerde ilerliyor: CMC'ler yüksek sıcaklık alanlarında daha hafif parçalar üretme olanağı sağlarken, Inconel süper alaşımları özel alaşım özellikleri, bilinen üretim yöntemleri ve daha iyi eklemeli üretim ve onarım teknikleri kullanarak güçlü, karmaşık parçalar üretmeye yardımcı oluyor. Başarıları, belirli bir parça ve çalışacağı koşullar için tüm malzeme sisteminin seçilmesine ve kontrol edilmesine bağlıdır. CMC'ler için, lif yapısındaki gelişmeler, liflerin ve matrisin etkileşim biçimi, malzemenin nasıl sıkıca paketleneceği ve çevresel etkenlerden korunması, bunların endüstrideki sabit motorların belirli parçalarında kullanılmasını mümkün kılmıştır. Daha fazla büyüme, tüm yapının dikkatli bir şekilde yönetilmesini, parçaların nasıl üretildiğindeki farklılıkları, kaplamaların dayanıklılığını ve malzemelerin birbirine ne kadar iyi yapıştığını gerektirir. Çevresel bariyer kaplamaları, kalıcı dayanıklılık için önemlidir çünkü bozulurlarsa, altındaki malzemenin çevreden daha hızlı ve daha fazla zarar görmesine neden olabilirler. Dolayısıyla, temel malzemenin dayanabileceği sıcaklık iyileştikçe, koruyucu kaplamanın da bu değişikliklerle iyi çalışacak şekilde geliştirilmesi gerekir.

Ayrıca, malzemenin yapısının aynı anda farklı stres türleri ve çevresel koşullar altında bile güçlü kaldığını göstermesi gerekir. Katmanlı üretim, Inconel süper alaşımlarına daha fazla tasarım esnekliği kazandırmış ve parçaları birleştirmenin ve bileşenleri onarmanın yeni yollarını sağlamıştır. Bu faydalar, kusurların yönetimi, kristalografik doku, artık gerilim, ısıl işlem ve yüzey durumuyla yakından bağlantılıdır. Sadece bir alaşım tanımına sahip olmak, geleneksel yöntemlerle, katmanlı üretimle veya onarım süreçleriyle üretilen ürünlerin aynı şekilde performans gösterip göstermediğini belirlemek için yeterli değildir. Artık tozun kullanılması ve yeni malzemenin biriktirilmesiyle onarım, kaynakların daha iyi kullanılmasına yardımcı olabilir, ancak bu yöntemlerin zaman içinde dayanıklılık, çevresel hasara karşı koruma ve amaçlandıkları özel iş için ne kadar güvenilir oldukları açısından ne kadar iyi çalıştığını kontrol etmek önemlidir. Bu malzeme aileleri arasındaki karşılaştırma, tek tek parçalara bakıldığında en faydalı olanıdır. Yoğunluk ve sıcaklık sınırları başlangıçta seçenekleri daraltmaya yardımcı olur, ancak nihai kararda ısı değişimleri, soğutma ihtiyaçları, malzemenin daha önce nasıl kullanıldığı, karşılaşacağı ortam, sorunların kontrol edilmesinin ne kadar kolay olduğu ve ne kadar bakım gerektirdiği dikkate alınmalıdır. Hibrit düzenekler farklı malzemelere farklı görevler verebilir, ancak bağlantı noktalarının ısıyı yönetmesi, kuvvetleri paylaşması ve daha uzun süre dayanması gerekir. Bu nedenle, malzeme değiştirmek, yalnızca tek tek malzemelerin özelliklerini karşılaştırmak yerine tüm düzeneği incelemeniz gerektiği anlamına gelir. Tomografi, tam alan deformasyon ölçümü, akustik emisyon ve mikro yapıya odaklanan modellerdeki yeni gelişmeler, işlemenin hasarın nasıl geliştiğiyle ne kadar iyi ilişkili olduğunu iyileştiriyor. Bu yöntemler, tahminleri kendi başlarına kontrol edilirse ve belirsizlikleri açıkça açıklanırsa, daha iyi tasarım seçimleri yapılmasına yardımcı olabilir. Makine öğrenimi karmaşık ölçümleri anlamlandırmaya yardımcı olabilir, ancak mühendislikteki faydası, fiziksel prensiplere dayanan ve farklı malzemeler, üretim ortamları ve

gerçek yaşam koşullarında çalıştığı kanıtlanmış gerçek dünya verilerini kullanmaktan gelir. Niteliklendirme, bu analitik iyileştirmeler ile güvenilir havacılık donanımı arasındaki temel bağlantı olmaya devam etmektedir. Gelecekteki ilerleme, parçaların ne kadar dayanıklı olduğu, ürünlerin ne kadar tutarlı bir şekilde üretildiği ve uzun vadeli faydaların ne kadar açık bir şekilde gösterildiğiyle değerlendirilmelidir. Seramik matris kompozitler (CMC'ler) için temel odak noktaları çevreyi korumak, güvenilir bir şekilde tekrarlanabilir mimariler oluşturmak ve güçlü yapısal bağlantılar sağlamaktır. Inconel süper alaşımları için performans üretim sırasında kontrol edilir, onarımlar onaylanmış yöntemlerle yapılır ve hammadde kullanımı mümkün olduğunca verimli hale getirilir. Malzeme geliştirmeyi üretim, denetim ve malzemelerin ne kadar dayanıklı olduğuyla birleştirmek, daha hafif, daha verimli ve bakımı daha kolay havacılık sistemleri oluşturmanın en iyi yolunu sunar.

REFERANSLAR

[1] NP Padture, "Havacılık ve uzay itiş sistemlerinde gelişmiş yapısal seramikler," *Nature Materials,* cilt 15, sayı 8, s. 804–809, 2016/08/01 2016, doi: 10.1038/nmat4687.

[2] TM Pollock, "Uçak motorları için alaşım tasarımı," *Nature Materials,* cilt 15, sayı 8, s. 809–815, 2016/08/01 2016, doi: 10.1038/nmat4709.

[3] HA Bale *ve diğerleri* , "1600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yük altında malzemelerdeki arıza olaylarının gerçek zamanlı kantitatif görüntülenmesi", *Nature Materials,* cilt 12, sayı 1, s. 40–46, 2013/01/01 2013, doi: 10.1038/nmat3497.

[4] K. Solberg, D. Wan ve F. Berto, "Çentik etkilerini de içeren, eklemeli imalatla üretilen, yapım aşamasındaki ve ısıl işlem görmüş Inconel 718 numunelerinin yorulma değerlendirmesi", *Mühendislik Malzemeleri ve Yapılarının Yorulma ve Kırılması ,* cilt 43, sayı 10, s. 2326–2336, 2020/10/01 2020, doi: https://doi.org/10.1111/ffe.13300 .

[5] KD Ardrey, MJ Lance ve MJ Ridley, "Yüksek Sıcaklıkta Buhar Maruziyeti Sırasında EBC Sistemlerinde TGO Ölçek Büyümesi Üzerine SiC Alt Tabaka Bileşiminin Etkisi", *Amerikan Seramik Derneği Dergisi,* cilt 109, sayı 2, s. e70540, 2026/02/01 2026, doi: https://doi.org/10.1111/jace.70540 .

[6] J. Liu, L. Zhang, Q. Liu, L. Cheng ve Y. Wang, "Polimer Türevli SiOC–baryum–stronsiyum alüminosilikat Kaplamalar, C/SiC Kompozitleri için Çevresel Bariyer Olarak", *Amerikan Seramik Derneği Dergisi,* cilt 93, sayı 12, s. 4148–4152, 2010/12/01 2010, doi: https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04000.x .

[7] KN Amato *ve diğerleri* , "Seçici lazer eritme ile üretilen Inconel 718'in mikro yapıları ve mekanik davranışı", *Acta Materialia,* cilt 60, sayı 5, s. 2229–2239, 2012/03/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.032 .

[8] I. Nandi, S. Soman, R. Molaei, W. Tilson, N. Shamsaei ve S. Shao, "Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen Inconel 718'in yorulma davranışında hacimsel kusurların ve mikro yapının rekabetçi rolü: Deneysel bir çalışma," *Uluslararası Yorulma Dergisi,* cilt 207, s. 109486, 2026/06/01/ 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2026.109486 .

[9] M. Chen *ve diğerleri* , "BN ara yüzey tabakasının SiC fiber takviyeli SiC seramik matris kompozitlerinin mekanik davranışına etkisi", *Uluslararası Uygulamalı Seramik Teknolojisi Dergisi,* cilt 21, sayı 3, s. 1892–1904, 2024/05/01 2024, doi: https://doi.org/10.1111/ijac.14645 .

[10] H. Qiu *ve diğerleri* , "PyC/BN arayüz fazlarının SiC/SiC kompozitlerinin mekanik davranışına etkisi", *Uluslararası Uygulamalı Seramik Teknolojisi Dergisi,* cilt 21, sayı 3, s. 1802–1811, 2024/05/01 2024, doi: https://doi.org/10.1111/ijac.14657 .

[11] L. Turpin *ve diğerleri* , "Yerinde tomografik ve termografik görüntülemeden 3 boyutlu dokunmuş SiC/SiC kompozitlerinin nicel termomekanik karakterizasyonu", *Kompozit Yapılar,* cilt 307, s. 116626, 2023/03/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116626 .

[12] R. Krishna, P. Wilson, MA Williams, P. Srirangam, A. Udayakumar ve R. Mitra, "Çok katmanlı ara fazlı 2.5D ve 3D Cf/SiC kompozitlerinin elastik özellikleri ve mekanik davranışları üzerinde CVI

kaynaklı gözenekliliğin etkisi", *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 44, sayı 8, s. 4930–4948, 2024/07/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.02.039 .

[13] H. Farhandi, MN Karim, RSM Almeida, K. Tushtev ve K. Rezwan, "İki aşamalı sinterleme ile oksit seramik matrisli mini kompozitlerin çekme dayanımının artırılması", *Amerikan Seramik Derneği Dergisi,* cilt 105, sayı 3, s. 1928–1938, 2022/03/01 2022, doi: https://doi.org/10.1111/jace.18212 .

[14] X. Wu *ve diğerleri* , "SiCf/SiC kompozitlerinde üstün yüksek sıcaklık mekanik özellikleri için BN/SiC çift katmanlı ara fazın ayarlanması", *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 46, sayı 8, s. 118162, 2026/07/01/ 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2026.118162 .

[15] NC Ferreri, SC Vogel ve M. Knezevic, "Gelişmiş bir nötron kırınımı prosedürü kullanılarak Inconel 718'deki γ, γ′, γ″, δ ve MC-karbür fazlarının hacim oranlarının işleme geçmişine bağlı olarak belirlenmesi", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği: A,* cilt 781, s. 139228, 2020/04/20/2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139228 .

[16] R. M, S. Koppoju, G. Telasang, R. Korla ve P. G, "Toz yataklı füzyon-katkılı imalat yöntemiyle üretilen IN718 alaşımının çift yaşlandırma işlemi sırasındaki mikroyapısal evrim üzerinde çözelti sıcaklığının etkisi", *Malzeme Karakterizasyonu,* cilt 172, s. 110868, 2021/02/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110868 .

[17] E. Lass *ve diğerleri* , "Toz yataklı lazer füzyonlu eklemeli imalat yoluyla üretilen gerilim giderilmiş Inconel 625'te Ni3Nb delta fazının oluşumu", (ingilizce), 2017–08–23 2017, doi: https://doi.org/10.1007/s11661-017-4304-6 .

[18] F. Zhang *ve diğerleri* , "Toz Yataklı Füzyon Lazer Sinterleme ile Katkı Maddesi Üretilen Nikel Bazlı Süper Alaşımın Mikro Yapısal Evrimine Isıl İşlemin Etkisi", (ingilizce), 15 Haziran 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.03.017 .

[19] AS Shaikh, M. Rashidi, K. Minet-Lallemand ve E. Hryha, "Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen Inconel 939'da üretim sonrası mikroyapı ve çözelti işlemi gerekliliği üzerine", *Toz Metalurjisi,* cilt 66, no. 1, s. 3–11, 2023/01/01 2023, doi: 10.1080/00325899.2022.2041787.

[20] RT Bhatt ve MC Halbig, "Sylramic™-iBN ve Hi-Nicalon™-S lifleri ile eriyik infiltrasyonlu SiC/SiC kompozitlerinin sürünme özellikleri", *Uluslararası Uygulamalı Seramik Teknolojisi Dergisi,* cilt 19, sayı 2, s. 1074–1091, 2022/03/01 2022, doi: https://doi.org/10.1111/ijac.13996 .

[21] W. Hong *ve diğerleri* , "Biyo-esinlenmiş gözenekli ara fazlar yoluyla seramik matrisli kompozitlerde hem mukavemeti hem de tokluğu artırma", *Nature Communications,* cilt 17, sayı 1, s. 8145, 2026/06/30 2026, doi: 10.1038/s41467-026-75001-z.

[22] L. Li, X. Zhen, R. Zheng, C. Ma ve C. Liu, "CVI+PIP hibrit tekniği ile hazırlanan SiCf/BN/SiC kompozitlerinin geliştirilmiş mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılması: Mikro-mekanik yöntemlerin uygulanması", *Composites Part B: Engineering,* cilt 283, s. 111633, 15/08/2024/2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111633 .

[23] W. Yucong, Y. Fang, Z. Yi, G. Guangda, C. Yuchen ve C. Laifei, "Hibrit CVI ve PIP yöntemleriyle hazırlanan SiCf/SiC kompozitlerinin ultra yüksek oda ve yüksek sıcaklık mekanik özellikleri: PIP sıcaklığının etkileri," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* cilt 188, s. 108502, 2025/01/01/2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108502 .

[24] H. Chen, J. Chen, Q. Zeng, J. He, Z. Hussain ve H. Kan, "Joule ısıtma destekli arayüz hazırlama ve PIP işlemi yoluyla SiCf/SiC kompozitlerinin hızlı üretimi", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* cilt 209, s. 109965, 2026/10/01/2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.109965 .

[25] X. Liu *ve diğerleri* , "Hibrit CVI+PIP teknikleriyle üretilen ultra kalın biyomimetik örümcek ağı yapılı SiC/SiC ve C/SiC türbin bliskleri," *Ceramics International,* cilt 52, sayı 1, s. 349–363, 2026/01/01/2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.11.332 .

[26] Z. Liu *ve diğerleri* , "Eklemeli imalat manipülatörü ile hazırlanan ultra yüksek mukavemetli ve tokluklu sürekli SiCf/SiC seramik matris kompozitleri", *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 45, sayı 6, s. 117176, 2025/06/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117176 .

[27] Z. Li, W. Wang, X. Gao, C. Shen, G. Wang ve R. He, "Dikey Elyaf Döşeme ve Malzeme Ekstrüzyonu 3B Baskı ile Sürekli Karbon Elyaf Takviyeli SiC Seramik Matris Kompozitleri",

Advanced Engineering Materials, cilt 26, no. 12, s. 2400218, 2024/06/01 2024, doi: https://doi.org/10.1002/adem.202400218 .

[28] W. Guo, D. Zhang, Y. Zhang, Y. Du ve C. Chen, "4D yerinde mikro-CT ve veri odaklı modelleme yoluyla SiCf/SiC mini-kompozitlerin çekme hasarı evrimi ve mekanik davranışı", *Composites Part B: Engineering,* cilt 279, s. 111439, 15/06/2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111439 .

[29] SD Gaikwad, VV Dabhade, SVS Narayana Murty ve S. Manwatkar, "Toz dövme yöntemiyle işlenmiş IN718 süper alaşımının yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri ve deformasyon mekanizması", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği: A,* cilt 924, s. 147803, 2025/02/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147803 .

[30] D. Sommer, S. Hornung, C. Esen ve R. Hellmann, "Katmanlı imalat yöntemiyle üretilen IN718 bileşenlerinin yorulma davranışının optimizasyonu için yerinde yüksek hızlı frezeleme ve termal son işlem", *Malzeme Araştırmaları Dergisi,* cilt 40, sayı 16, s. 2388–2401, 2025/08/01 2025, doi: 10.1557/s43578-025-01656-x.

[31] L. Zheng *ve diğerleri* , "Lazer Toz Yataklı Füzyonlu Inconel 718'de Üretim Sonrası Mikro Ayrışma ve JMatPro Analizi," *Metals,* cilt 16, s. 960, 09/01 2026, doi: 10.3390/met16090960.

[32] J. Radhakrishnan, S.-H. Li ve U. Ramamurty, "600 °C'de lazer toz yatağı eritme ve sıcak izostatik presleme yöntemiyle üretilen Inconel 718'in çentiksiz yorulma davranışı", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği: A,* cilt 920, s. 147527, 2025/01/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147527 .

[33] J. Sedlak *ve diğerleri* , "Döküm ve LPBF yoluyla üretilen Inconel 939'un yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde ısıl işlem ve sıcak izostatik preslemenin etkisi", *İmalat Süreçleri Dergisi,* cilt 145, s. 556–570, 15/07/2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.04.082 .

[34] L. Cano-Salinas, M. Salem, K. Moussaoui, S. Le Roux, A. Hor ve R. Zitoune, "Inconel 718 için onarım teknolojisi olarak lazer metal biriktirme," *Uluslararası İleri İmalat Teknolojisi Dergisi,* cilt 136, sayı 5, s. 2193–2208, 2025/01/01 2025, doi: 10.1007/s00170-024-14982-x.

[35] R. Sarkar, B. Chen, ME Fitzpatrick, D. Fabijanic ve T. Hilditch, "IN718 süper alaşımının eklemeli imalat tabanlı onarımı ve bağlantının yüksek çevrimli yorulma değerlendirmesi", *Eklemeli İmalat,* cilt 60, s. 103276, 2022/12/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103276 .

[36] Y. Zhou *ve diğerleri* , "Lazer yönlendirilmiş enerji biriktirme ile onarılan Inconel 718 süper alaşımının yüksek çevrimli yorulma ömrünün dağılımı üzerine", *Additive Manufacturing,* cilt 127, s. 105321, 2026/07/05/ 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2026.105321 .

[37] RT Bhatt ve JD Kiser, "CVI ve PIP SiC/SiC kompozitlerinin 1650 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda havada sürünme davranışı ve arıza mekanizmaları", *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 41, sayı 13, s. 6196–6206, 2021/10/01/2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.059 .

[38] S. Guth *ve diğerleri* , "Lazer Işınlı Toz Yatak Füzyonu ile Katmanlı Olarak Üretilen Inconel 718'in Termomekanik Yorulması ve Sürünme-Yorulma Etkileşimi", *Gelişmiş Mühendislik Malzemeleri,* cilt n/a, sayı n/a, s. e202502624, 2026/03/01 2026, doi: https://doi.org/10.1002/adem.202502624 .

[39] M. Ruggles-Wrenn, N. Boucher ve C. Przybyla, "Üç gelişmiş SiC/SiC seramik matris kompozitinin 1200°C'de havada ve buharda yorulması", *Uluslararası Uygulamalı Seramik Teknolojisi Dergisi,* cilt 15, sayı 1, s. 3–15, 2018/01/01 2018, doi: https://doi.org/10.1111/ijac.12773 .

[40] J. Saarimäki, M. Lundberg ve JJ Moverare, "Inconel 718'de Tane Boyutuna Bağlı Bekleme Süresi-Yorulma Çatlağı Büyümesi", *Advanced Engineering Materials,* cilt 20, sayı 6, s. 1700930, 2018/06/01 2018, doi: https://doi.org/10.1002/adem.201700930 .

[41] M. Schlesinger, T. Seifert ve J. Preussner, "Inconel 718'de yorulma çatlaklarının zamana ve sıcaklığa bağlı büyümesinin deneysel olarak incelenmesi ve mekanizmaya dayalı ömür tahmini", *Uluslararası Yorulma Dergisi,* cilt 99, s. 242–249, 2017/06/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.015 .

[42] KN Detwiler ve EJ Opila, "SiC/BN/SiC seramik matris kompozitlerinin orta sıcaklıklarda kuru ve ıslak oksijende oksidasyonu", *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 42, sayı 10, s. 4110–4120, 2022/08/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.04.003 .

[43] SM Muthu, D. Veeman, S. Paul ve M. Prem Kumar, "Doğrudan metal lazer sinterlenmiş ve dövme alaşım 718'in 800°C'de havada ve Na2SO4, V2O5 ve NaCl içeren erimiş tuzlarda döngüsel oksidasyon ve sıcak korozyon performansı", *Korozyon Mühendisliği, Bilim ve Teknoloji,* cilt 58, no. 7, s. 631–644, 2023/10/01 2023, doi: 10.1080/1478422X.2023.2244236.

[44] B. Zhou *ve diğerleri* , "Yterbiyum silikat çevresel bariyer kaplamalarının erimiş kalsiyum-magnezyum-alüminosilikat (CMAS)'a karşı direnci: Kapsamlı bir çalışma," *Yüzey ve Kaplama Teknolojisi,* cilt 479, s. 130540, 15/03/2024/2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130540 .

[45] EB Owusu, A. Rincón Romero, A. Lynam, B. Zhang, O. Gavalda-Diaz ve T. Hussain, "Süspansiyon plazma püskürtmeli iterbiyum disilikat kaplamalar: Aşırı ortamlarda faz kararlılığı ve mikro yapısal evrim," *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 44, sayı 15, s. 116779, 2024/12/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116779 .

[46] R. Prabhu, V. Kavimani, PM Gopal ve J. Sahadevan, "Inconel 718 üzerinde termal bariyer kaplama: döngüsel oksidasyon kinetiğinin anlaşılması", *Yüzey Mühendisliği,* cilt 40, sayı 4, s. 478–486, 2024/04/01 2024, doi: 10.1177/02670844241253886.

[47] M. Rajasekaramoorthy *ve diğerleri* , "Yerinde Yüksek Sıcaklık XRD Kullanılarak Gadolinyum Zirkonat Bazlı Termal Bariyer Kaplamaların Termal Davranışının ve Termal Genleşme Katsayısının Değerlendirilmesi", *Termal Püskürtme Teknolojisi Dergisi,* cilt 34, sayı 7, s. 2939–2955, 2025/10/01 2025, doi: 10.1007/s11666-025-02069-2.

[48] A. Lynam *ve diğerleri* , "Aşınabilir iterbiyum disilikat çevresel bariyer kaplamaları: Buhar, CMAS ve birleşik buhar-CMAS korozyonunun incelenmesi", *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 45, sayı 14, s. 117544, 2025/11/01/2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117544 .

[49] Y. Wang *ve diğerleri* , "1500 °C'de yüksek entropili nadir toprak disilikatının CMAS kaynaklı korozyon davranışı", *npj Malzeme Bozunması,* cilt 10, sayı 1, s. 75, 2026/04/14 2026, doi: 10.1038/s41529-026-00784-x.

[50] GE Aviation. "GE Aviation, daha yakıt verimli jet motorları için gelişmiş üretimde yeni kilometre taşlarına ulaştı." https://www.geaerospace.com/news/press-releases/other-news-information/ge-aviation-reaches-new-milestones-advanced-manufacturing (erişim tarihi: 29 Eylül 2026).

[51] GE Aviation. "GE Aviation, CMC'ler konusunda heyecanlandı." https://www.geaerospace.com/news/press-releases/other-news-information/ge-aviation-fired-cmcs (erişim tarihi: 29 Eylül 2026).

[52] Special Metals Corporation. "Havacılık ve Uzay." https://www.specialmetals.com/markets/aerospace.html (erişim tarihi 29 Eylül 2026).

[53] PR Gradl ve CS Protz, "Sıvı roket motorlarında kanal duvarı nozül imalatı için teknolojik gelişmeler", *Acta Astronautica,* cilt 174, s. 148–158, 2020/09/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.04.067 .

[54] P. Gradl, T. Gibson, D. Ellis, J. Fikes ve M. Garcia, "Çok Metalli Katmanlı Üretim Kullanarak Roket Motoru Bileşenlerinin Optimizasyonu", 8. Yıllık Uluslararası İleri Üretim Konferansı'nda (ASTM ICAM) sunulmuştur, Washington, DC, Amerika Birleşik Devletleri, 30 Ekim–3 Kasım 2023, 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://ntrs.nasa.gov/citations/20230015432 .

[55] Z. Zhao, K. Li, W. Li ve L. Zhang, "2000 ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda iki ısı akısı ile oksiasetilen meşalesi altında C/C-ZrC-SiC-ZrB2 kompozitlerinin döngüsel aşınma davranışı", *Korozyon Bilimi,* cilt 181, s. 109202, 01/04 2021, doi: 10.1016/j.corsci.2020.109202.

[56] A. Kamal, BV Rajasekhar ve VS Nair, "C/C-SiC'nin Inconel alaşımına lehimlenmesi: Optimizasyon, arayüz evrimi, eklem mukavemeti ve artık gerilme simülasyonu", Alaşımlar ve *Bileşikler Dergisi ,* cilt 1027, s. 180536, 10/05/2025/2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180536 .

[57] L. Zhang *ve diğerleri* , "Yüksek sıcaklıkta çekme yüklemesi altında C/SiC kompozitlerinin yerinde 3 boyutlu deformasyonu ve hasar evrimi: µCT ve dijital hacim korelasyon analizi," *Avrupa Seramik Derneği Dergisi,* cilt 46, sayı 5, s. 118015, 2026/05/01/ 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.118015 .

[58] N. Xi *ve diğerleri* , "Kristalografik yönelimler ve kusurlardan kaynaklanan etkileri içeren kristal plastisite modellemesi ile katkılı imalat yöntemiyle üretilen IN718'in düşük çevrimli yorulma özelliklerinin tahmini", *Sanal ve Fiziksel Prototipleme,* cilt 19, sayı 1, s. e2328266, 2024/12/31 2024, doi: 10.1080/17452759.2024.2328266.

[59] C. Muir *ve diğerleri* , "Otoenkoderler kullanılarak akustik emisyonlardan SiC/SiC kompozitlerinde makine öğrenimine dayalı hasar tespiti," *Composites Part B: Engineering,* cilt 287, s. 111802, 2024/12/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111802 .

[60] Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi, "Uzay Uçuş Sistemleri için Katmanlı Üretim Gereksinimleri", 21 Nisan 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://standards.nasa.gov/node/2739

[61] Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi, "Ekipman ve Tesis Kontrolü için Katmanlı Üretim Gereksinimleri", 21 Nisan 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://standards.nasa.gov/node/2740

[62] VM Shinde, A. Kamal, BV Rajasekhar, R. Devasia ve K. Sharma, "C/SiC yapısal kompozitler için endüstriyel izotermal kimyasal buhar infiltrasyon prosesinin modellenmesi", *Amerikan Seramik Derneği Dergisi,* cilt 108, sayı 8, s. e20591, 2025/08/01 2025, doi: https://doi.org/10.1111/jace.20591 .

[63] C. Keller *ve diğerleri* , "Lazer toz yataklı füzyon yöntemiyle üretilen Inconel 718'in toz, mikro yapı ve mekanik özelliklerine toz geri dönüşüm protokolünün etkisi", Uluslararası *İleri İmalat Teknolojisi Dergisi ,* cilt 145, sayı 3, s. 2239–2253, 2026/07/01 2026, doi: 10.1007/s00170-026-18432-8.

[64] RT Bhatt, S. Kalluri, KN Lee ve J. Stuckner, "Buhar ortamında yüksek sıcaklıklarda çevresel bariyer kaplamalı iki boyutlu dokuma SiC/SiC kompozitinin yorulma dayanıklılığı", *Uluslararası Uygulamalı Seramik Teknolojisi Dergisi,* cilt 22, sayı 3, s. e15038, 2025/05/01 2025, doi: https://doi.org/10.1111/ijac.15038 .

[65] KN Lee *ve diğerleri* , "2700°F SiC/SiC Seramik Matris Kompozitleri için Yüksek Sıcaklık Çevresel Bariyer Kaplamalarının Optimizasyonu", *Amerikan Seramik Derneği Dergisi,* cilt 109, sayı 6, s. e70839, 2026/06/01 2026, doi: https://doi.org/10.1111/jace.70839 .

[66] Ramachandran, K., Bear, JC ve Jayaseelan, DD (2025). Yüksek sıcaklık ortamları için oksit bazlı seramik matris kompozitleri: Bir inceleme. Gelişmiş Mühendislik Malzemeleri, 27(7), 2402000.

[67] Katz-Demyanetz, A., Popov Jr, VV, Kovalevsky, A., Safranchik, D., & Koptyug, A. (2019). Havacılık ve uzay uygulamaları için toz yataklı eklemeli imalat: Teknikler, metalik ve metal/seramik kompozit malzemeler ve trendler. İmalat incelemesi, 6, 5.

[68] Fu, WANG, Qiang, YANG, Di-chen, LI, Yun-song, ZHAO ve Jian-tao, WU (2026). Seramik matris kompozitleri/Ni bazlı süper alaşımlar eklemlerinin gerilim giderme yöntemlerindeki ilerleme: Bir inceleme. Çin Demir Dışı Metaller Derneği İşlemleri, 36(6), 1685-1711.

[69] Naslain, R., & Christin, F. (2003). Gelişmiş jet motorları için SiC matrisli kompozit malzemeler. Mrs Bulletin, 28(9), 654-658.

[70] Elmaghraby, A., & Ahsan, AMM (2024). Seramik Takviyeli Ni Bazlı Süper Alaşımların Bir İncelemesi.

[71] Samanta, S., Paul, S., & Salwan, GK (2024, Aralık). Gaz türbin motorları için malzemelerdeki son gelişmeler: Süper alaşımlar, kompozitler ve gelişmiş kaplamalar. Uluslararası Makine ve Mekanizma Endüstriyel Problemleri Konferansı'nda (s. 363-372). Singapur: Springer Nature Singapore.

[72] Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Havacılık motoru uygulamaları için seramik matris kompozitleri—bir inceleme. Uygulamalı Bilimler, 13(5), 3017.

[73] Li, L. (2024). Havacılık motorlarındaki sıcak bölüm bileşenlerinde seramik matrisli kompozitlerin uygulanmasında ilerleme. Elyaf Takviyeli Kompozitler - Son Gelişmeler, Yeni Perspektifler ve Uygulamalar.

[74] Sengupta, P., & Manna, I. (2022). Petrokimya, metalurji, enerji ve havacılık sektörlerinde gelişmiş yüksek sıcaklık yapısal malzemeleri—Genel bir bakış. Hindistan'da yapısal malzemelerin gelecekteki görünümü, 79-131.

[75] Gottlieb, R., Poges, S., Monteleone, C., Suib, SL ve Suib, SL (2016). Sürekli elyaf takviyeli seramik matris kompozitleri. Gelişmiş seramik malzemeler, 146-199.

[76] Alam, MA, Ya, HH, Sapuan, SM, Mamat, O., Parveez, B., Yusuf, M., ... & Ilyas, RA (2022). Havacılık ve uzay uygulamaları için gelişmiş kompozitlerdeki son gelişmeler: bir inceleme. Havacılık ve uzay mühendisliği uygulamalarında gelişmiş kompozitler, 319-339.

[77] Tiwari, S., Bansal, G., & Kumar, S. (2024). Seramik matris kompozitleri: Gelişmiş üretim süreçleri ve zorluklar. Kompozitler, 149-165.

[78] Behera, A., Sahoo, AK ve Mahapatra, SS (2023). Havacılık türbin kanadında Ni bazlı süper alaşımın uygulaması: Bir inceleme. Makine Mühendisleri Enstitüsü Bildirileri, Bölüm E: Proses Mekanik Mühendisliği Dergisi, 09544089231219104.

[79] Yurtkuran, H. (2021). Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan titanyum ve nikel bazlı süper alaşımların işlenebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesi. İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 2(2), 10-29.

[80] Fereiduni, E., Ghasemi, A., & Elbestawi, M. (2020). Alüminyum ve titanyum matris kompozitlerinin seçici lazer eritmesi: havacılık endüstrisindeki son gelişmeler ve potansiyel uygulamalar. Havacılık, 7(6), 77.

BÖLÜM 4

Aşınmaya Dirençli Demir Esaslı Alaşım Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu

Hasan İsmail Yavuz[1]
Serkan Oktay[2]
Onur Muratal[3]
Funda Gül Koç[4]
Egemen Avcu[5]
Rıdvan Yamanoğlu[6]

Giriş

Madencilik, enerji, mineral işleme ve ağır makine endüstrilerinde kullanılan çelik bileşenler, servis sırasında şiddetli abrasif aşınmaya uğramaktadır. Aşınma, bileşenlerin servis ömrünü

[1]Arş. Gör.,Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6198-2560
[2]Ar&Ge Müh., Çolakoğlu Metalurji, Orcid: 0000-0001-9206-6127
[3]Ar&Ge Müh., Toyotetsu, Orcid: 0000-0002-4661-8215
[4]Dr. Öğr. Üyesi, Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6517-1239
[5]Prof. Dr. Kocaeli Üniversitesi,Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksekokulu, Orcid: 0000-0002-3244-1316
[6]Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-4661-8215

kısaltıp plansız duruşlara neden olmakta ve sonuç olarak bakım ve işletme maliyetlerinde büyük ekonomik kayıplar oluşturmaktadır (Adefila et al., 2026; Singh et al., 2022). Bu bileşenlerin yüzey direncini artırmak amacıyla geleneksel olarak kobalt ve nikel esaslı sert dolgu alaşımları kullanılmaktadır (Ahmed et al., 2026). Ancak yüksek hammadde maliyeti ve piyasa fiyatlarındaki dalgalanmalar, bu alaşımların maliyetini artırmaktadır. Bununla birlikte, toz üretimi ve yüksek sıcaklıkta kaplama sırasında oluşan toksik ve kanserojen partiküller iş sağlığı açısından risk oluşturmaktadır (Begum et al., 2022; Prueitt et al., 2020). Bu nedenle, günümüzde daha düşük maliyetli ve sürdürülebilir alternatif aşınmaya dirençli kaplama malzemelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar giderek artmaktadır.

Demir esaslı alaşımlar, düşük hammadde maliyetlerinin yanı sıra çevreye zararlı salınımlarının olmaması ve yerkabuğunda yüksek oranda bulunması gibi ekolojik avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Sünek metalik matris içerisinde yüksek oranda sert ikincil faz içerebilmeleri, bu alaşımları aşınmaya dayanıklı uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Fashu & Trabadelo, 2023). Madencilik ve mineral işleme uygulamalarında en yaygın kullanılan Fe esaslı malzemeler, metalik matris içinde sert ötektik karbürler bulunduran beyaz dökme demirlerdir (Jilleh et al., 2021). Bunlar arasında Ni-Hard alaşımları, martensitik matris içinde M_7C_3 ve MC tipi ötektik karbürler içeren ve aşındırıcı ortamlarda yaygın kullanılan bir örnektir (Çöl et al., 2016). Ancak bu alaşım nikel ihtiyacını bütünüyle gidermez ve içerdiği iri, sürekli karbür ağı darbeli yüklemelerde malzemenin darbe tokluğunu düşürür (Camkerten et al., 2025).

Aşınmaya dirençli demir esaslı alaşımların performansı, matris içerisinde oluşan sert fazların türü, boyutu ve dağılımına bağlıdır (Pawlik et al., 2026). Çalışmada, çok bileşenli Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım sisteminin bileşimi, mikroyapı ve

tribolojik özellikleri optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Alaşımdaki yüksek krom içeriği, primer karbür oluşumunu desteklerken korozyon direncine de katkı sağlamaktadır (Jain et al., 2021). Niyobyum ve molibden, karbürlerin çekirdeklenme ve büyüme mekanizmasını etkileyerek daha ince ve homojen dağılmış karbür oluşumuna katkı sağlamaktadır (Cao et al., 2025). Küçük atom yarıçapına sahip bor, katılaşma esnasında karbür kafesine girerek yüksek sertliğe sahip kompleks borokarbür fazlarının oluşumuna yol açmaktadır (Efremenko et al., 2024). Ayrıca, bor ilavesinin sıvı metalin akış davranışını ve katılaşma özelliklerini etkilediği bildirilmiştir (Bedolla-Jacuinde et al., 2021).

Geleneksel döküm koşullarında gerçekleşen yavaş soğuma süreci, çok bileşenli alaşımlarda karbürlerin oluşumu ve büyümesi için yeterli süreyi sağlayarak karbür kabalaşmasına yol açmaktadır. Karbürler ile metalik matris arasındaki termal genleşme farkı, iç gerilmelerin ve mikro çatlakların oluşumuna neden olmaktadır (Theska et al., 2023). Bu tür mikroyapısal özellikler, malzemenin mekanik ve tribolojik performansını olumsuz etkilemektedir. Alaşımın toz formunda üretilmesi, geleneksel döküm yapısında karşılaşılan segregasyon ve kaba faz oluşumlarını engeller. Gaz atomizasyonu sürecinde ulaşılan yüksek soğuma hızları, katılaşma süresini kısaltarak sert fazların kabalaşmasını engellemekte ve mikroyapıda çok daha ince, homojen bir şekilde dağılmalarını sağlamaktadır. Öte yandan, bu yöntem ile toz esaslı kaplama uygulamaları için gerekli morfolojiye, boyuta ve uygun fiziksel özelliklere sahip tozlar üretilebilmektedir (Muratal et al., 2024).

Bu çalışmada, termodinamik modelleme (CALPHAD) yöntemi kullanılarak Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşımı tasarlanmış ve döküm sonrası mikroyapısal ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonraki aşamada ise, alaşım gaz atomizasyonu yöntemiyle toz haline getirilmiştir. Atomizasyon sonrası tozların partikül boyut dağılımı, akış özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Ayrıca, mikroyapıda

görülen farklı fazların mekanik özellikleri nanoindentasyon testi ile belirlenmiştir. Böylece alaşımın dökümden toz üretimine uzanan süreçteki mikroyapısal ve mekanik özellikleri değerlendirilerek toz üretiminin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

Materyal ve Yöntem

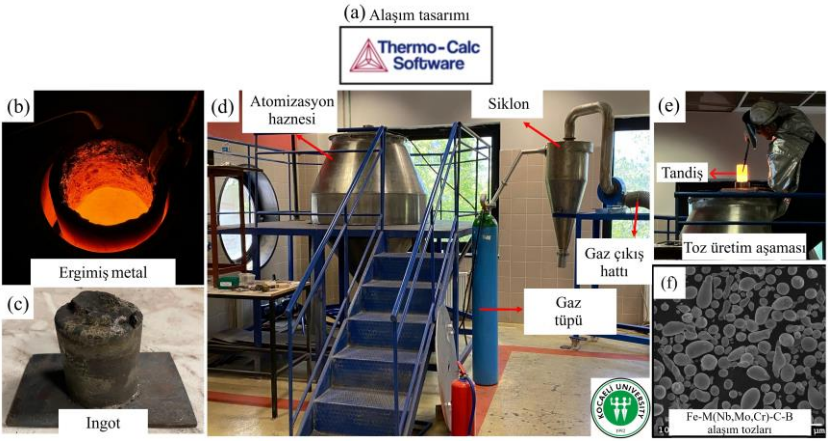
Alaşım Tasarımı, Döküm ve Toz Üretimi

Çalışmada kullanılan Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşımının kimyasal kompozisyonu, Thermo-Calc yazılımı (Thermo-Calc Software AB, Stockholm, İsveç) ve TCFE13 termodinamik veritabanı kullanılarak CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) yöntemi ile tasarlanmıştır.

Belirlenen kompozisyona uygun oranlarda hazırlanan şarj malzemeleri, yüksek frekanslı indüksiyon ocağında ergitilmiştir (Şekil 1b). Ergitme sırasında oksidasyonu önlemek ve alaşım elementi kayıplarını sınırlandırmak amacıyla sürekli koruyucu argon gaz akışı uygulanmıştır. Ergitme sıcaklığı optik pirometre ile takip edilmiştir. Homojen hale gelen sıvı metal kalıba dökülerek döküm külçeleri elde edilmiştir (Şekil 1c). Bu külçeler, sonraki aşamada gerçekleştirilen toz üretim işleminde hammadde olarak kullanılmıştır.

Alaşım tozları, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan yüksek basınçlı gaz atomizasyon ünitesinde üretilmiştir (Şekil 1d). Döküm külçeleri, atomizasyon sisteminin indüksiyon ergitme haznesinde argon koruyucu gaz atmosferi altında yeniden ergitilmiştir. Ergitme işlemi 1500 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık, alaşımın likidüs sıcaklığının 150 °C üzerindedir.

Şekil 1. Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşımının üretim aşamaları



Tamamen sıvı hale gelen homojen ergiyik, ön ısıtılmış grafit tandişe aktarılmıştır. Ardından 4 mm iç çapa sahip grafit döküm nozülünden atomizasyon odasına beslenmiştir (Şekil 1e). Sıvı metal akışı, 30 bar çalışma basıncındaki yüksek saflıkta (%99,9) azot gazı jeti ile parçalanmıştır. Bu işlem, yakın temaslı (close-coupled) nozül bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Gaz jeti, sıvı metal akışını mikro damlacıklara ayırmıştır. Damlacıklar atomizasyon odasında hızlı soğuma koşullarına maruz kalmış ve küresel partiküller halinde katılaşmıştır. Katılaşan partiküller siklon haznesinde toplanmıştır. Bu işlem sonucunda, kaplama uygulamalarında kullanılmak üzere Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım tozları elde edilmiştir (Şekil 1f).

Döküm ve Toz Karakterizasyonu

Döküm külçelerinin mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu için numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Kesilen numuneler, Tegramin model otomatik cihazda (Struers ApS, Ballerup, Danimarka) 320, 600, 1000 ve 2000 mesh SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Ardından 9, 3 ve 1 µm elmas süspansiyonlar kullanılarak parlatılmıştır. Döküm mikroyapısı ve alaşım elementlerinin fazlar arasındaki dağılımı, Oxford Instruments AZtec

enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) dedektörü ile donatılmış GeminiSEM 300 model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen, Almanya) kullanılarak incelenmiştir.

Döküm mikroyapısında bulunan matris ve primer borokarbür fazlarının yerel mekanik özellikleri, Berkovich elmas uca sahip Anton Paar Step 501/MCT3/NHT3 indentasyon/scratch cihazı (Anton Paar GmbH, Graz, Avusturya) ile incelenmiştir. Cihazın optik mikroskobu kullanılarak farklı faz bölgeleri seçilmiştir. Bu bölgelere maksimum 250 mN yük uygulanmış ve 10 saniye bekleme süresi kullanılmıştır. Vickers sertliği ve elastisite modülü değerleri, elde edilen yük-batma derinliği eğrileri üzerinden Oliver-Pharr yöntemi ile hesaplanmıştır.

Gaz atomizasyonu ile üretilen Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım tozlarının fiziksel özellikleri partikül boyut dağılımı, akış süresi ve yığın açısı üzerinden değerlendirilmiştir. Partikül boyut dağılımı, ASTM B214 standardına uygun kuru elek analizi ile belirlenmiştir. Tozların akış süresi, ASTM B213 standardına göre Hall akışmetresi kullanılarak ölçülmüştür. Bu analizde 50 g tozun akış süresi s/50 g olarak kaydedilmiştir. Serbest dökülen tozun oluşturduğu koninin yığın açısı ImageJ yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Tozların mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu için partiküller sıcak reçine içerisine gömülmüş ve enine kesitleri hazırlanmıştır. Kesitler zımparalandıktan sonra elmas süspansiyonlarla parlatılmıştır. EBSD analizi için son parlatma işlemi 50 nm kolloidal silika süspansiyonu ile 10 dakika uygulanmıştır. Hazırlanan kesitler optik mikroskop ile incelenerek partikül morfolojisi değerlendirilmiştir.

Partikül içindeki kristalografik yapı ve tane yönelimleri, FE-SEM cihazına entegre Oxford Instruments EBSD sistemi kullanılarak incelenmiştir. Haritalama işlemleri 15 kV hızlandırma

voltajı ve 0,05 µm adım boyutu ile gerçekleştirilmiştir. EBSD verileri TSL OIM Analysis v7.3.1 yazılımı (EDAX Inc., AMETEK, Draper, UT, ABD) kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda ters kutup figürü (IPF), tane yönelim yayılımı (GOS) ve Schmid faktörü haritaları oluşturulmuştur.

Tek bir partikül kesitindeki farklı mikroyapı bölgelerinin yerel mekanik özellikleri de Berkovich elmas uca sahip Anton Paar Step 501/MCT3/NHT3 indentasyon/scratch cihazı (Anton Paar GmbH, Graz, Avusturya) kullanılarak incelenmiştir. Farklı mikroyapı bölgelerine maksimum 25 mN yük uygulanmış ve 10 saniye bekleme süresi kullanılmıştır. Vickers sertliği ve elastisite modülü değerleri, yük-batma derinliği eğrilerinden Oliver-Pharr yöntemi ile hesaplanmıştır.

Bulgular ve Tartışma

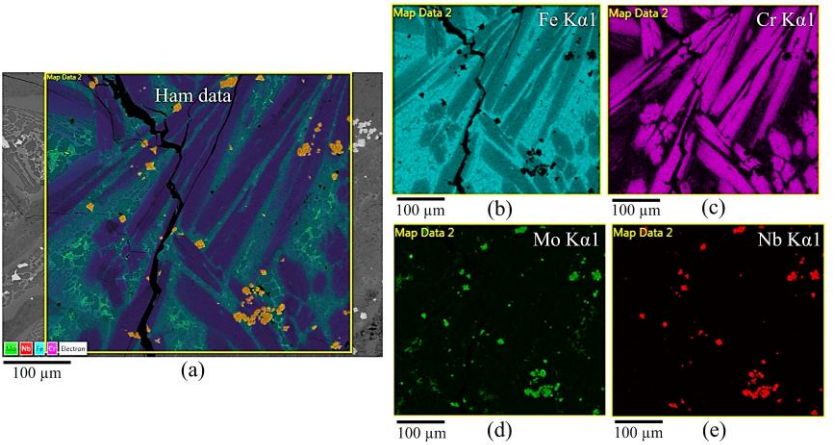
Döküm Durumunun Karakterizasyonu

Döküm numunesinin mikroyapısı ve alaşım elementlerinin dağılımı SEM-EDS analizleri ile incelenmiştir (Şekil 2). EDS element dağılım haritalarında Fe ve Cr elementlerinin matris ve birincil fazlar boyunca genel olarak homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 2b, c). Buna karşılık, güçlü karbür yapıcı elementler olan Nb ve Mo belirli bölgelerde yoğunlaşmıştır (Şekil 2d, e). Bu bölgeler kompleks karbür ve borokarbür fazlarının oluştuğu alanları göstermektedir.

Geleneksel döküm sırasında oluşan düşük soğuma hızı, elementlerin difüzyonu ve fazların büyümesi için daha uzun bir süre sağlamaktadır. Bu durum, mikroyapıda iri primer borokarbürlerin oluşmasına yol açmaktadır (Klančnik et al., 2024; Sohaib et al., 2026). Ayrıca mikroyapının farklı bölgelerinde yerel mikro çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 2a). Bu çatlaklar, gevrek karbür fazları ile Fe esaslı matris arasındaki termal genleşme katsayısı farkının

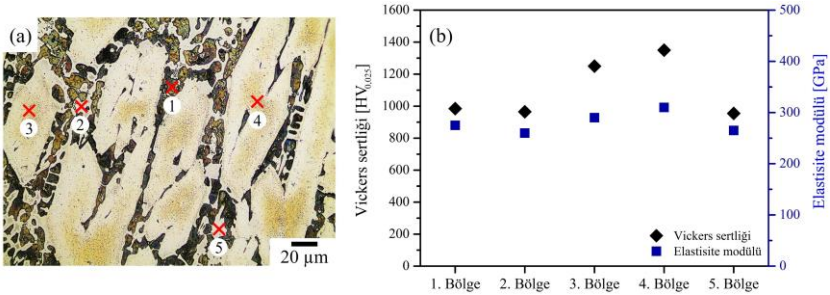
oluşturduğu iç gerilmelerden kaynaklanmaktadır (Xu & Huang, 2022).

Şekil 2. Döküm numunesine ait EDS element dağılım haritaları: (a) elektron görüntüsü ve katmanlı harita, (b) Fe Kα1, (c) Cr Kα1, (d) Mo Kα1, (e) Nb Kα1



Mikroyapıyı oluşturan farklı fazların mekanik özelliklerini incelemek için optik mikroskop altında beş farklı bölgede nanoindentasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a). Fe esaslı matrisi temsil eden 1, 2 ve 5 numaralı bölgelerde sertlik değerleri 890-980 $HV_{0,025}$ aralığında ölçülmüştür. Matristeki yüksek sertlik değeri, katı eriyik sertleşmesi ve matris içerisindeki ince ikincil çökeltilerle açıklanabilir (Xu et al., 2025). İnce ikincil borokarbür bölgesini temsil eden 3 numaralı geçiş bölgesinde sertlik yaklaşık 1250 $HV_{0,025}$ ölçülmüştür. Primer borokarbür fazını temsil eden 4 numaralı bölgede ise yaklaşık 1380 $HV_{0,025}$ sertlik ve 330 GPa elastisite modülü ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, primer borokarbür fazı matrise göre daha yüksek sertlik ve elastisite modülüne sahiptir.

Şekil 3. Döküm numunesinin mekanik karakterizasyonu: (a) nanoindentasyon ölçüm bölgelerini gösteren optik mikroyapı görüntüsü, (b) bölgelere ait Vickers sertliği ve elastisite modülü dağılım grafiği



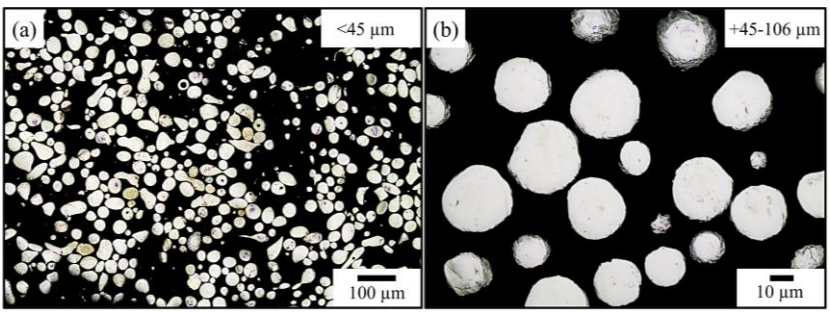
Döküm durumunda elde edilen mikroyapı ve mekanik özellikler birlikte değerlendirildiğinde, CALPHAD yöntemi ile tasarlanan alaşımda yüksek sertliğe sahip $M_7(C,B)_3$ ve M(C,B) fazlarının bulunduğu belirlenmiştir (Chabak et al., 2025). Yüksek sertlik değerleri, bu fazların alaşımın aşınma direncini artırabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, düşük soğuma hızı iri primer fazların gelişmesine ve termal gerilmeye bağlı mikro çatlakların oluşmasına neden olmuştur. Bu mikroyapısal özellikler, döküm durumundaki alaşımın mekanik ve tribolojik performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Alaşımın daha homojen ve ince bir mikroyapıya sahip toz formunda elde edilmesi ve kaplama hammaddesi olarak kullanılabilmesi amacıyla gaz atomizasyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen tozların karakterizasyonu sonraki bölümde incelenmiştir.

Toz Karakterizasyonu

Gaz atomizasyonu ile üretilen Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım tozlarının fiziksel özellikleri, partikül boyut dağılımı, Hall akış süresi ve yığın açısı ile değerlendirilmiştir. Tozların D10, D50 ve D90 değerleri sırasıyla 45 µm'nin altında, ~60 µm ve ~90 µm olarak belirlenmiştir. Hall akış testinde 50 g tozun huniden geçiş süresi 27 s, yığın açısı ise 26° olarak ölçülmüştür. Gaz atomizasyonu ile üretilen Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım tozlarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, tozların genel olarak küresel morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. En

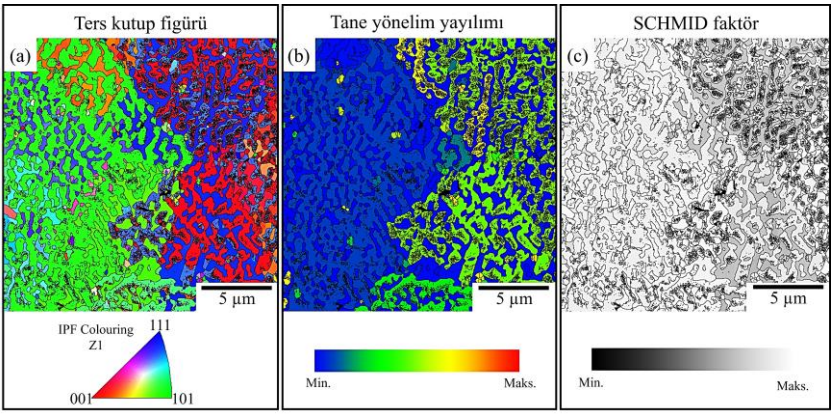
küçük boyut dağılımına sahip tozlarda (Şekil 4a) bazı partiküllerde uydu oluşumları ve düzensiz şekiller tespit edilmiştir. Buna karşılık, +45-106 µm boyut dağılımına sahip tozlarda daha düzgün yüzey morfolojisi ve küresel forma daha yakın partiküller gözlenmiştir. Tozların morfolojik yapısı, kaplama proseslerindeki akıcılık performansını etkilemektedir. Artan küresellik oranı, partiküller arası sürtünme direncini azaltarak tozun akış özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır (Muratal et al., 2024; Zhu et al., 2024).

Şekil 4. Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım tozlarının optik mikroskop kesit görüntüleri: (a) <45 µm ve (b) +45-106 µm partikül boyut fraksiyonları



Tozların kaplama performansını etkileyen dış yüzey morfolojisi ve akış özelliklerinin yanı sıra, hızlı katılaşma sonucunda oluşan partikül içi mikroyapı da önem taşımaktadır. Bu kapsamda, üretilen tozların partikül içi kristalografik özelliklerini incelemek amacıyla tek bir partikülün kesitine EBSD analizi uygulanmıştır (Şekil 5). Ters kutup figürü haritası (Şekil 5a), partikül içerisindeki eş eksenli tanelerin farklı kristalografik yönelimlere sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, gaz atomizasyonu sırasında gerçekleşen hızlı ısı transferi ve katılaşmanın yönlü tane büyümesini sınırlandırmasından kaynaklanmaktadır (Wu et al., 2025).

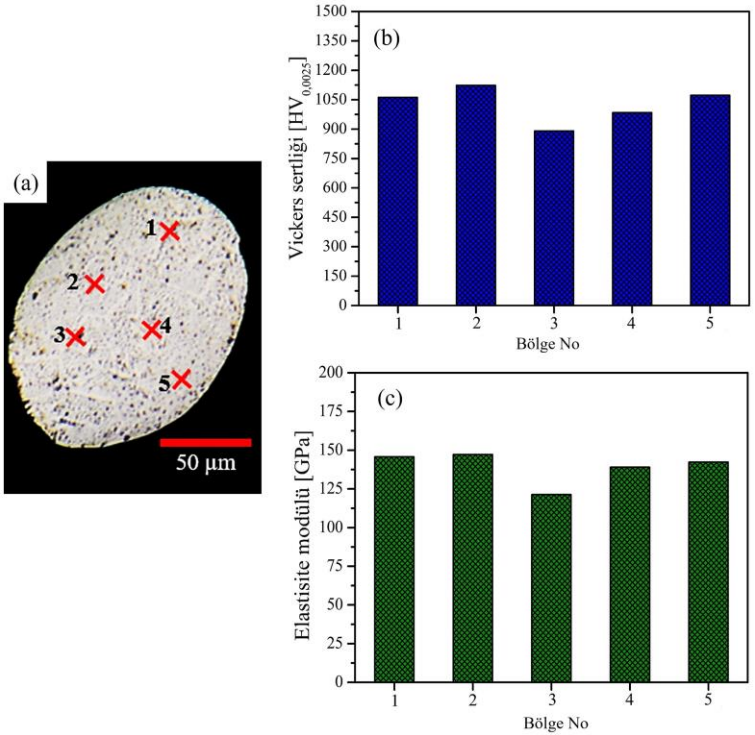
Şekil 5. Partikül içine ait EBSD haritaları: (a) ters kutup figürü (IPF), (b) tane yönelim yayılımı (GOS) ve (c) Schmid faktörü dağılımı



Tane yönelim yayılımı (GOS) haritasında, Fe matrisinin büyük bölümünde düşük GOS değerleri belirlenmiştir (Şekil 5b). Yüksek GOS değerleri, özellikle sert borokarbür fazları ile Fe matrisi arasındaki arayüzeylerde ve bu bölgelerin yakın çevresinde ölçülmüştür. Gaz atomizasyonu sırasında gerçekleşen hızlı soğuma, Fe matrisi ile borokarbür fazları arasındaki termal genleşme katsayısı farkı ve kristalografik uyumsuzluk nedeniyle arayüzey bölgelerinde yüksek lokal gerilmeler oluşturabilir (Cui et al., 2026). Bu gerilmelerin ve kristalografik uyumsuzlukların giderilmesi, yapısal sürekliliğin korunması ve lokal deformasyonun karşılanması için sert fazların çevresinde geometrik olarak gerekli dislokasyonların (GND) oluşumu artmaktadır. Bu nedenle, yüksek GOS değerleri lokal kafes deformasyonu ve sert fazların çevresinde biriken yüksek GND yoğunluğu ile ilişkilendirilmektedir.

Schmid faktörü haritasında tanelerin büyük bölümünde 0,5 (beyaz - açık gri) değerine yakın sonuçlar belirlenmiştir (Şekil 5c). Bu dağılım, Fe esaslı matris içerisindeki tanelerin kayma sistemlerinin etkinleşmesi açısından elverişli kristalografik yönelimlere sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Tariq & Jun, 2026).

Şekil 6. Tek bir partikülü üzerinden alınan nanoindentasyon ölçüm sonuçları: (a) ölçüm noktalarını gösteren optik mikroyapı görüntüsü, (b) ölçülen noktalara ait Vickers sertliği grafiği ve (c) elastisite modülü dağılımı



Hızlı katılaşma (10^3-10^6 K/s), elementlerin difüzyonunu sınırlandırarak fazların büyümesini azaltmıştır (Yamanoğlu, 2001). Gaz atomizasyonu sonrasında elde edilen ince ve homojen mikroyapı, partiküllerin mekanik özelliklerini de etkilemiştir. Tozların sertliği 950-1150 $HV_{0,0025}$, elastisite modülü ise 120-150 GPa aralığında ölçülmüştür (Şekil 6b, c). Döküm durumunda gözlenen iri primer fazlar ve mikro çatlaklar, gaz atomizasyonu sonrasında incelenen partikül kesitlerinde gözlenmemiştir. Küresel partikül morfolojisi, iyi akış özellikleri, ince mikroyapı ve yüksek

sertlik değerleri birlikte değerlendirildiğinde, üretilen Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşım tozlarının fiziksel, mikroyapısal ve mekanik açıdan aşınmaya dirençli kaplama uygulamaları için uygun özellikler gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç

Bu çalışmada, aşınma ve yüzey hasarına karşı dirençli toz esaslı kaplama uygulamalarına yönelik yeni bir Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşımı CALPHAD yaklaşımı kullanılarak tasarlanmış, önce döküm yöntemiyle üretilmiş ve ardından yüksek basınçlı gaz atomizasyonu ile toz formuna dönüştürülerek incelenmiştir. Döküm durumunda iri primer borokarbürler ve bunların çevresinde mikro çatlaklar bulunurken, gaz atomizasyonu sonrasında partiküllerde daha ince ve homojen bir mikroyapı oluşmuştur. Tozların küresel partikül morfolojisi, iyi akış özellikleri ve yüksek sertlik değerleri, gaz atomizasyonu ile kaplama uygulamalarına yönelik toz üretiminin gerçekleştirilebildiğini ortaya koymuştur. EBSD analiziyle, partiküllerin rastgele dokuya sahip olduğu ve borokarbür fazları çevresinde yerel kafes deformasyonlarının oluştuğu belirlenmiştir. Sonuçlar, gaz atomizasyonunun geliştirilen Fe-M(Nb,Mo,Cr)-C-B alaşımından ince ve homojen mikroyapıya sahip tozların üretimi için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu veriler ışığında, geliştirilen alaşımın madencilik, enerji, çelik ve ağır sanayi ekipmanlarına yönelik toz esaslı kaplama işlemlerinde hammadde olarak kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir.

Kaynakça

Adefila, E., Nabifo, B., Olakanmi, E., Prasad, R., Leso, T., Setswalo, K., Botes, A., Ndeda, R., Pityana, S., & Ematang, N. (2026). Failure analysis and remanufacturing techniques in drilling and crushing equipment in mining industries: a review. *Journal of Remanufacturing, 16*(1), 6.

Ahmed, N., Manthar, A., Ding, H., & Wang, W. (2026). Transition metal based plasma sprayed coatings for tribological applications. *Plasma Science and Technology*.

Bedolla-Jacuinde, A., Guerra, F., Guerrero-Pastran, A., Sierra-Cetina, M., & Valdez-Medina, S. (2021). Microstructural effect and wear performance of high chromium white cast iron modified with high boron contents. *Wear, 476*, 203675.

Begum, W., Rai, S., Banerjee, S., Bhattacharjee, S., Mondal, M. H., Bhattarai, A., & Saha, B. (2022). A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC advances, 12*(15), 9139-9153.

Camkerten, R., Sahin, O., Yilmaz, T., Cakil, D. D., Nalcaci, B., & Erdogan, M. (2025). The relationships among microstructure, impact toughness and wear resistance in newly developed austempered low alloy white cast iron. *Journal of Alloys and Compounds, 1010*, 177983.

Cao, K., Wang, Z., Wang, D., Xiao, J., Zhao, A., & Huang, H. (2025). Effects of niobium and yttrium additions on carbide

characteristics, microstructural evolution, and performance enhancement in D2 cold work die steel. *Journal of Materials Research and Technology*.

Chabak, Y., Golinskyi, M., Podobova, M., Petryshynets, I., Efremenko, V., Zurnadzhy, V., Halfa, H., Efremenko, B., & Khrunyk, Y. (2025). Exploring the Solidification Sequence and Solid-State Transformations in High-Boron Multi-Component Cast Alloys by Differential Scanning Calorimetry. *International Journal of Metalcasting, 19*(5), 2757-2773.

Cui, C., Ma, R., Hao, Z., Wang, P., Shu, Y., & He, J. (2026). Tailoring the properties of laser powder bed fusion H13 steel via tungsten addition: roles of particle size and heat treatment. *Materials Science and Engineering: A, 962*, 150179.

Çöl, M., Koç, F. G., Öktem, H., & Kır, D. (2016). The role of boron content in high alloy white cast iron (Ni-Hard 4) on microstructure, mechanical properties and wear resistance. *Wear, 348*, 158-165.

Efremenko, V., Chabak, Y. G., Lekatou, A., Shimizu, K., Petryshynets, I., Zurnadzhy, V., Efremenko, B., Kusumoto, K., & Halfa, H. (2024). Microstructural map and phase chemical compositions in hybrid multi-component cast alloys Fe–W–Mo–V–Cr–Ti–(1.5–3.5 Wt Pct) B–(0.3–1.1 Wt Pct) C. *Metallurgical and Materials Transactions A, 55*(8), 2756-2772.

Fashu, S., & Trabadelo, V. (2023). Development and performance of high chromium white cast irons (HCWCIs) for wear–

corrosive environments: a critical review. *Metals, 13*(11), 1831.

Jain, A.-S., Chang, H., Tang, X., Hinckley, B., & Zhang, M.-X. (2021). Refinement of primary carbides in hypereutectic high-chromium cast irons: a review. *Journal of materials science, 56*(2), 999-1038.

Jilleh, A., Babu, N. K., Thota, V., Anis, A. L., Harun, M. K., & Talari, M. K. (2021). Microstructural and wear investigation of high chromium white cast iron hardfacing alloys deposited on carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds, 857*, 157472.

Klančnik, G., Burja, J., Klančnik, U., Šetina Batič, B., Krajnc, L., & Resnik, A. (2024). Microstructure and Properties Variation of High-Performance Grey Cast Iron via Small Boron Additions. *Crystals, 14*(1), 103.

Muratal, O., Yamanoğlu, R., Duran, C., Gönülalan, Y., Akyıldız, Y., Koç, F. G., & Barutçuoğlu, B. (2024). Production of Ni-Hard Alloy Powders by Gas Atomization. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 8*(1), 124-129.

Pawlik, J., Prysyazhnyuk, P., Vytvytskyi, V., Medvid, I., & Bembenek, M. (2026). comparative analysis of microstructure, phase composition, and wear characterization of Fe-Cr-C, Fe-Mn-Mo-B, and Ni-WC hardfacing alloys. *Coatings, 16*(2), 178.

Prueitt, R. L., Li, W., Chang, Y.-C., Boffetta, P., & Goodman, J. E. (2020). Systematic review of the potential respiratory carcinogenicity of metallic nickel in humans. *Critical Reviews in Toxicology, 50*(7), 605-639.

Singh, K., Anand, K. A., & Kumar, V. (2022). Wear prevention & control as a preventive maintenance strategy. *Materials Today: Proceedings, 66*, 3949-3954.

Sohaib, H., Schaefer, H., Lentz, J., Weber, S., & Röttger, A. (2026). Microstructure evolution and hard phase formation in boron-containing tool steels for additive manufacturing. *Materials & Design*, 115647.

Tariq, H. M. R., & Jun, T.-S. (2026). Advances in EBSD-based approaches for quantifying slip activity in deformed Mg alloys. *Applied Microscopy, 56*(1), 4.

Theska, F., Tse, W. F., Schulz, B., Buerstmayr, R., Street, S. R., Lison-Pick, M., & Primig, S. (2023). Review of microstructure–mechanical property relationships in cast and wrought Ni-based superalloys with boron, carbon, and zirconium microalloying additions. *Advanced Engineering Materials, 25*(8), 2201514.

Wu, J., Huang, Y., Tan, Y., Zhou, J., Yao, J., Tan, L., Wang, Z., Huang, L., & Liu, F. (2025). Particle size-dependent solidification heterogeneity: Simulation and experimental decoupling of gas-atomized Ni-based superalloy powders. *Powder Technology*, 121658.

Xu, H., & Huang, H. (2022). Plasma remelting and injection method for fabricating metal matrix composite coatings reinforced with tungsten carbide. *Ceramics International, 48*(2), 2645-2659.

Xu, T., Wang, T., Wang, M., Zhang, S., Zhang, C., Wu, C., Sun, X., Chen, H., & Chen, J. (2025). Influence of solid solution time on microstructure and precipitation strengthening of novel maraging steels. *Materials Science and Engineering: A, 920*, 147535.

Yamanoğlu, R. (2001). *Atomizasyon teknikleri ile toz üretimi, sinterlenmesi ve karakterizasyonu* Doctoral thesis,[Powder production, sintering and characterization by …].

Zhu, X., Xie, J., Zhang, H., Liu, W., Zhang, H., & Zhu, J. (2024). Insights into powder coating excellence: Unveiling the effects of particle-size distribution. *Progress in Organic Coatings, 197*, 108815.

BÖLÜM 5

Demir Esaslı Alaşımlar ve Sert Kaplama Teknolojileri: Endüstriyel Uygulamalar ve Pazar Analizi

Hasan İsmail Yavuz[1]
Funda Gül Koç[2]
Rıdvan Yamanoğlu[3]

Giriş

Endüstriyel ekipmanlarda aşınma ve korozyon kaynaklı yüzey hasarları, parça ömrünü kısaltmakta ve işletme maliyetini artırmaktadır (Zhai et al., 2021). Kritik bileşenlerin tamamını pahalı malzemelerden üretmek yerine yalnızca temas yüzeylerini dirençli bir tabaka ile kaplamak, endüstride yaygın ve ekonomik bir yaklaşımdır (Grigoriev, 2023). Sert kaplamalar, yeni parçaların kullanım ömrünü uzatmak ve aşınmış ekipmanı onararak yeniden

[1] Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi,Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6198-2560
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Kocaeli Üniversitesi,Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-6517-1239
[3] Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi,Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-4661-8215

kullanıma kazandırmak için birçok sektörde uygulanmaktadır (Gao et al., 2023).

Yüzey koruma uygulamalarında uzun süre kobalt ve nikel esaslı alaşımlar öne çıkmıştır (Chen & Li, 2025; Tandon et al., 2023). Ancak bu elementlerin yüksek maliyeti, tedarik belirsizlikleri ve çevresel kısıtlamalar, kullanıcıları daha ekonomik alternatiflere yöneltmektedir (Geiger & Cooper, 2010; Prueitt et al., 2020). Demir esaslı alaşımlar, düşük hammadde maliyeti, kolay temin edilebilirliği ve farklı üretim yöntemlerine uyarlanabilirliği nedeniyle güçlü bir alternatif haline gelmiştir (Singla et al., 2024). Bu alaşımlar geniş bir bileşim aralığında tasarlanabilir ve geleneksel kaynak yöntemlerinden ileri termal püskürtme süreçlerine ve eklemeli imalata kadar çeşitli yöntemlerle istenilen yüzeye uygulanabilmektedir (Fayazfar et al., 2018; Ndumia et al., 2021).

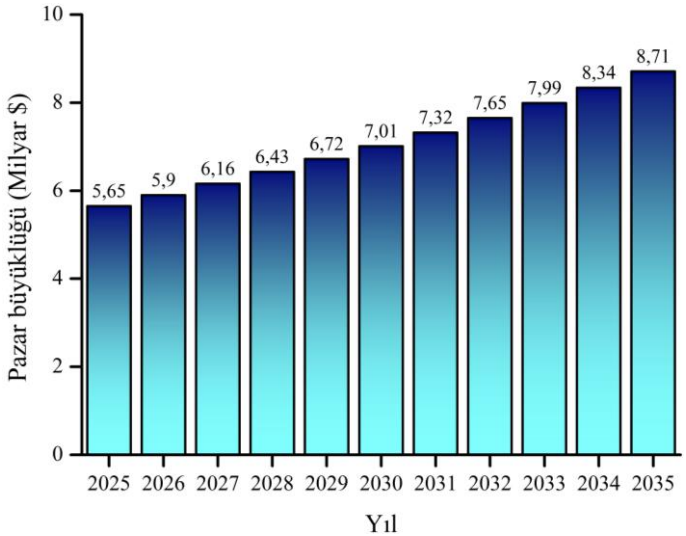
Teknolojik gelişmelerin endüstriyel karşılığını değerlendirmek için teknik özelliklerin yanı sıra pazar eğilimlerinin ve sektörel gereksinimlerin de incelenmesi önem arz etmektedir. Bibliyometrik analiz, yayınların zamana ve ülkelere dağılımını, öne çıkan araştırma temalarını ve üretim teknolojilerine yönelik akademik ilgiyi göstermektedir. Yayın sayısı endüstriyel kullanım oranını veya teknolojik olgunluğu yansıtmadığından, bu veriler teknik ve sektörel bilgilerle birlikte yorumlanmalıdır. Bu bölümde demir esaslı alaşımlar ve sert kaplama teknolojilerine ilişkin küresel pazar verileri, sektörel dağılımlar, yayın eğilimleri ve üretim yöntemlerindeki güncel yönelimler birlikte incelenmiştir.

Küresel Pazar Dinamikleri ve Endüstriyel Uygulama Alanları

Sanayi tesislerinde bakım maliyetlerini düşürme, plansız duruşları azaltma ve mevcut ekipmanların ömrünü uzatma hedefleri, yüzey koruma ve sert kaplama pazarının büyümesini desteklemektedir. Aşınan parçaları değiştirmek yerine kaplamayla onarmak, kaynak verimliliği ve sürdürülebilirlik politikaları

açısından da avantaj sağlamaktadır (Okechukwu et al., 2017; Wood & Lu, 2024). Grafik 1'de küresel sert kaplama pazarının 2025-2035 dönemi için büyüme öngörüsü verilmiştir. Küresel sert kaplama pazarı 2025'te 5,65 milyar dolara ulaşmış ve sonraki yıllarda düzenli artış göstermiştir. Pazar hacminin 2030'da 7,01 milyar dolara, 2035'te ise 8,71 milyar dolara çıkması beklenmektedir. Öngörülen istikrarlı büyüme, yüzey koruma çözümlerinin imalat ve bakım sektörlerindeki payının arttığını göstermektedir.

Grafik 1. 2025-2035 yılları arasında küresel sert kaplama pazar büyüklüğü

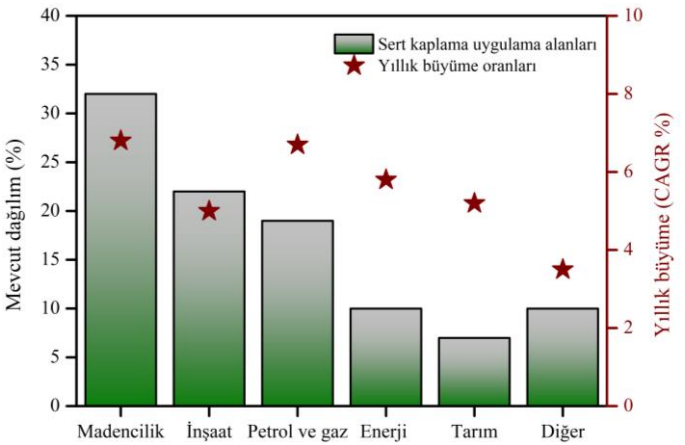


Kaynak: Spherical Insights. (2026). World's top 15 companies in hard coatings market 2025: Industry intelligence report by Spherical Insights (2026–2035). https://www.sphericalinsights.com/blogs/world-s-top-15-companies-in-hard-coatings-market-2025-industry-intelligence-report-by-spherical-insights-2026-2035

Sert kaplama teknolojilerine yönelik talep, sektörlerin çalışma koşullarına ve ekipman yenileme sıklıklarına bağlı olarak değişmektedir. Grafik 2'de sert kaplama uygulamalarının mevcut sektörel dağılımı ve bu sektörlerin yıllık bileşik büyüme oranları

(CAGR %) verilmiştir. Madencilik, %32'lik payla en büyük uygulama alanıdır. Onu %22 ile inşaat sektörü ve %19 ile petrol ve gaz endüstrisi takip etmektedir. Bu üç sektör pazarın yaklaşık dörtte üçünü oluşturmaktadır. Kazı, kırma, delme ve malzeme taşıma işlemlerinin yoğun olduğu bu alanlarda ekipmanlar sürekli aşındırıcı koşullarda çalıştıkları için düzenli yüzey koruma ve onarım gereksinimi bulunmaktadır (Maroli et al., 2017).

Grafik 2. Sert kaplama uygulama alanlarının mevcut sektörel dağılımı (%) ve yıllık bileşik büyüme oranları (CAGR %)



Kaynak: Grand View Research. (2025). Hardfacing market size, share & trends analysis report by product, by end-use, and segment forecasts 2025 - 2035. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hardfacing-market-report

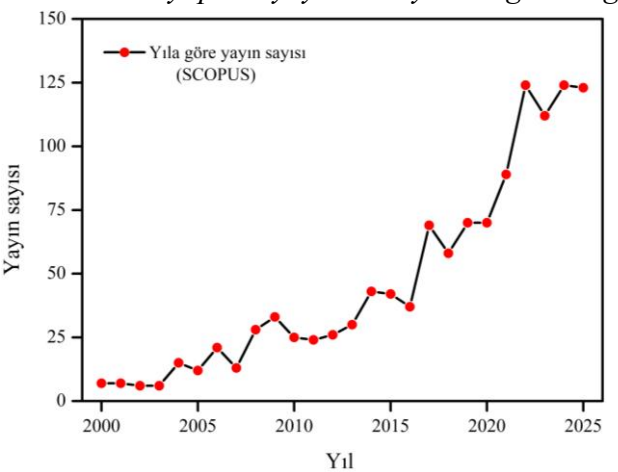
Yıllık bileşik büyüme oranları (CAGR) incelendiğinde en yüksek değerler yaklaşık %6,8 ile madencilikte ve %6,7 ile petrol-gazda görülmektedir. Hammadde ve enerji talebindeki artış bu sektörlerde ekipmanların daha yoğun ve aşındırıcı koşullarda çalışmasına neden olmaktadır. Bu durum aşınmaya dayanıklı kaplamalara olan talebi artırmaktadır. Enerji (%5,8), tarım (%5,2) ve inşaat (%5,0) sektörleri pazar ortalamasının üzerinde büyümektedir. Enerji sektöründeki büyüme, enerji üretim sistemleri ile içten yanmalı motor bileşenlerinde verimliliği artırmaya yönelik

ekonomik kaplama çözümleriyle ilgilidir (Liu et al., 2023). Diğer uygulamalarda büyüme oranı yaklaşık %3,5 ile pazar ortalamasının altındadır. Madencilik, inşaat ve tarım gibi büyük ölçekli sektörlerde kaplama ihtiyacının artması, daha ekonomik kaplama malzemelerine yönelimi artırmaktadır. Aşınma direncini düşük maliyetle bir araya getiren demir esaslı alaşımlar, bu açıdan öne çıkmaktadır.

Literatürde Demir Esaslı Alaşımlar: Bibliyometrik ve Tematik Eğilimler

Sektörel büyümeyle birlikte ekonomik kaplama malzemelerine olan ihtiyaç artmıştır. Kobalt ve nikel esaslı sistemlere yakın aşınma ve korozyon direncinin daha düşük maliyetle sağlanması hedefi, bu ihtiyacı karşılayabilecek demir esaslı alaşımlara yönelik çalışmaları artırmıştır. Bilimsel veri tabanlarındaki yayın istatistikleri, endüstriyel talebe paralel olarak gelişen bu akademik ilginin zaman içindeki değişimini göstermektedir. Grafik 3'te, Scopus veri tabanına göre 2000-2025 yılları arasında demir esaslı sert kaplama alaşımları alanındaki yayınların yıllara göre dağılımı verilmiştir.

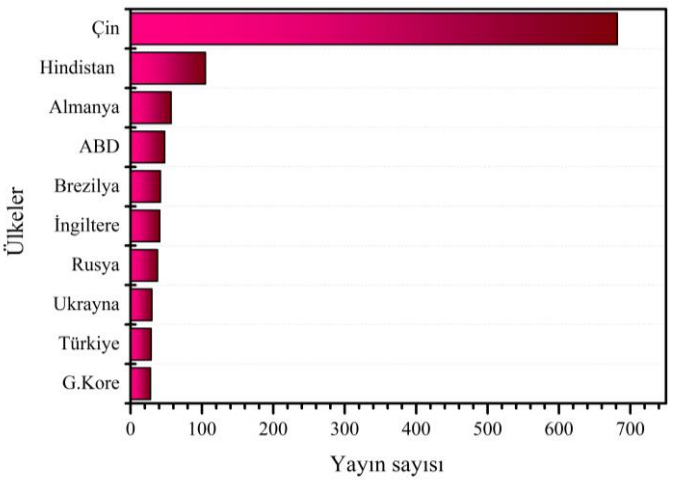
Grafik 3. 2000-2025 yılları arasında demir esaslı sert kaplama alaşımları üzerine yapılan yayınların yıllara göre dağılımı



Kaynak: Scopus veri tabanı (Erişim tarihi: [Ekim 2026], arama sorgusu: "iron-based hard coating")

Grafik 3'e göre, 2000'li yılların başında yılda 10'un altında olan yayın sayısı kademeli olarak artmış ve 2010 civarında yılda 25-30 düzeyine ulaşmıştır. 2010-2016 döneminde yıllık yayın sayısı 25 ile 45 arasında değişmiş, 2017'den itibaren ise belirgin biçimde artmıştır. Bu artış 2020 sonrasında hızlanmış ve 2022-2025 döneminde yıllık yayın sayısı 110-125 aralığında değişmiştir. Bu dönemdeki artış, lazer ve toz tabanlı ileri kaplama teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla ilişkili olabilir. Son yirmi beş yıldaki bu eğilim, demir esaslı kaplamaların akademik literatürde sürekli ilgi gören bir araştırma alanı olduğunu göstermektedir.

Grafik 4. Demir esaslı sert kaplama alaşımları konusunda en fazla yayın yapılan ülkeler



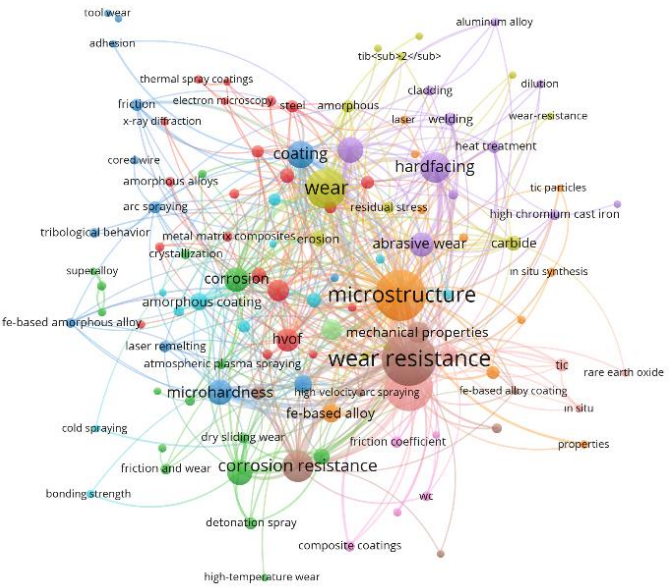
Kaynak: Scopus veri tabanı (Erişim tarihi: [Ekim 2026], arama sorgusu: "iron-based hard coating")

Grafik 4'te ülkelerin yayın sayılarına göre dağılımı verilmiştir. Buna göre Çin, yaklaşık 700 yayınla ilk sırada yer almaktadır. Çin'in madencilik, metalurji ve ağır makine imalatındaki üretim hacmi, ilgili araştırmaların bu ülkede yoğunlaşmasıyla

açıklanabilir. Çin'i yaklaşık 105 yayınla Hindistan takip etmektedir. Üçüncü sırada Almanya ve dördüncü sırada ABD yer almaktadır. Bu ülkeleri sırasıyla Brezilya, İngiltere, Rusya, Ukrayna, Türkiye ve Güney Kore izlemektedir. Türkiye'nin ilk on ülke arasında yer alması, ülkedeki demir-çelik ve imalat sanayisinin yüzey mühendisliği araştırmalarına olan ihtiyacını göstermektedir.

Yayın sayılarının zamana ve ülkelere göre dağılımı araştırma hacmini ortaya koyarken, anahtar kelime analizleri çalışmaların hangi teknik problemlere odaklandığını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Şekil 1'de VOSviewer yazılımı ile oluşturulan ve literatürdeki kavramların birbirleriyle olan ilişkisini gösteren anahtar kelime ağ haritası verilmiştir.

Şekil 1. Demir esaslı sert kaplama literatüründe öne çıkan kavramların VOSviewer anahtar kelime ağ haritası



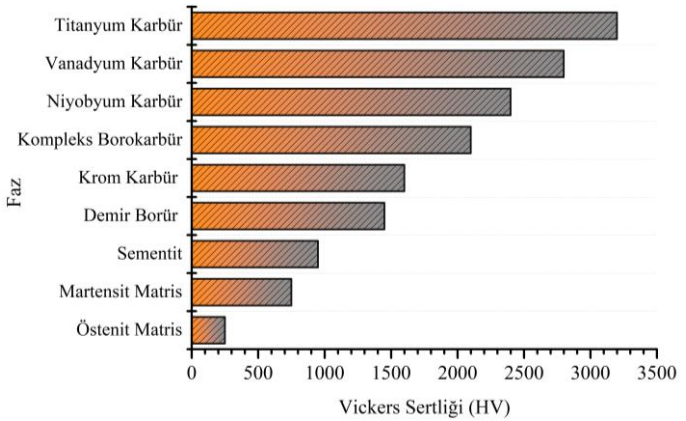
Kaynak: Scopus veri tabanı verileri kullanılarak VOSviewer yazılımı ile yazar tarafından oluşturulmuştur (Erişim tarihi: Ekim 2026, arama sorgusu: "iron-based hard coating")

Ağ haritasında anahtar kelimeler üç küme oluşturmaktadır. Sağ üstteki ilk kümede lazer, kaplama, kaynak, abrazif aşınma, karbür, titanyum karbür ve in situ sentez terimleri öne çıkmaktadır. Sol ve ortadaki ikinci kümede yüksek hızlı oksi-yakıt (HVOF) püskürtme, atmosferik plazma sprey, ark sprey, soğuk püskürtme ve amorf kaplama terimleri görülmektedir. Alttaki üçüncü küme korozyon direnci, mikrosertlik, kuru kayma aşınması ve sürtünme katsayısı terimlerini içermektedir.

Bu kümelenmelerin ortak noktası, aşınma direncini artırmak için demir matris içinde sert takviye fazlarının oluşturulmasıdır. Kaplamanın servis performansını belirleyen temel parametre, seçilen alaşım elementlerine bağlı olarak oluşan bu fazların sertliğidir. Grafik 5'te, demir esaslı sert kaplamalarda yaygın olarak görülen matris yapıları ile sert takviye fazlarının Vickers sertlik (HV) değerleri karşılaştırılmıştır.

Kaplamanın ana yapısını oluşturan östenit matrisin sertliği yaklaşık 250 HV, martensit matrisin sertliği ise yaklaşık 750 HV'dir. Matris fazları kaplamanın darbe direncini ve bütünlüğünü sağlamaktadır. Aşındırıcı koşullarda yeterli dayanım için ise daha sert fazlar gereklidir (Singla et al., 2024). Geleneksel Fe-C sistemlerinde oluşan sementitin sertliği yaklaşık 950 HV'dir. Bor ve krom ilavesiyle oluşan demir borür, krom karbür ve kompleks borokarbür fazları sertliği artırmaktadır. Literatürde niyobyum karbür, vanadyum karbür ve titanyum karbür gibi daha sert karbürlerin kaplama yapısında oluşturulması üzerine çalışmalar bulunmaktadır (Tang et al., 2024; Wang et al., 2025).

Grafik 5. Demir esaslı kaplamalarda bulunan başlıca matris ve sert fazların Vickers sertlik (HV) değerleri



Kaynak: (Bhadeshia, 2020; Lentz et al., 2018; Tang et al., 2024; Wang et al., 2025)

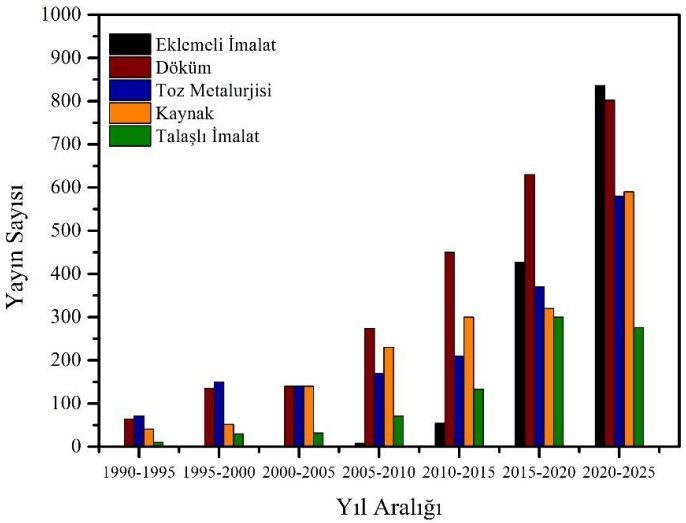
Kaplama içindeki sert faz oranını ve sertliğini artırmak tek başına yeterli değildir. Sert fazların matris içinde homojen dağılması, çatlama riskinin azaltılması ve kaplamanın altlığa iyi bağlanması da üretim yöntemine bağlıdır (Li et al., 2023). Bu nedenle alaşım tasarımındaki gelişmeler, lazer ve eklemeli imalat gibi proses parametrelerinin daha hassas kontrol edildiği üretim yöntemlerine yönelimi artırmıştır.

Üretim Teknolojilerinin Gelişimi: Geleneksel Yöntemlerden Eklemeli İmalata

Demir esaslı alaşımların aşınma ve korozyon direncini artırmaya yönelik çalışmalar, alaşım tasarımından yüzey kaplama teknolojilerine kadar uzanan geniş bir alanda sürdürülmektedir. Döküm, toz metalurjisi, kaynak ve talaşlı imalat gibi geleneksel yöntemler, uzun yıllar boyunca parçaların şekillendirilmesinde ve yüzey özelliklerinin kazandırılmasında

temel süreçler olmuştur. Son yıllarda karmaşık geometrili parçalara olan talep, dar tolerans gereksinimleri ve hurda oranını azaltma hedefi, üretim yöntemlerinin eklemeli imalat ve lazer tabanlı süreçlere kaymasına katkı sağlamıştır (Yamanoğlu et al., 2024). Grafik 6'da demir esaslı alaşımlara yönelik yürütülen çalışmaların farklı üretim ve imalat yöntemlerine göre yıllık dağılımı verilmiştir.

Grafik 6. Demir esaslı alaşımlar üzerine yapılan araştırmaların yıllara göre üretim yöntemlerine dağılımı



Kaynak: 1990-2025 yılları arasında farklı imalat yöntemleri ile Fe-esaslı alaşımlar üzerine yapılan akademik yayınların dağılımı (Tarama Web of Science veri tabanı üzerinden Haziran 2026 tarihinde "Eklemeli imalat", "Döküm", "Toz metalurjisi", "Kaynak" ve "Talaşlı imalat" anahtar kelimeleri kullanılarak yapılmıştır.)

Grafik 6'ya göre 1990'lı yıllardan 2010'lu yıllara kadar demir esaslı alaşım literatüründe döküm ve toz metalurjisi gibi geleneksel yöntemler ağırlıktadır. Kaynak ve kaplama esaslı çalışmaların yıllık yayın sayısı bu dönemde sabit kalmıştır. 2010 sonrasında eklemeli imalat yayınları hızla artmış ve 2020-2025 döneminde 800'ü aşarak döküm dâhil geleneksel yöntemleri geçmiştir. Bu sonuç, eklemeli

imalatın demir esaslı alaşımların üretimi ve yüzey mühendisliğinde başlıca araştırma konularından biri olduğunu göstermektedir.

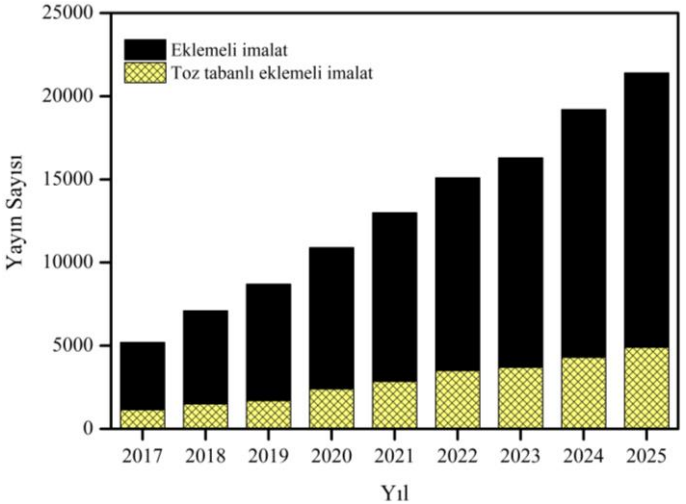
Endüstriyel uygulamalarda proses seçimi kaplama kalınlığına, gözeneklilik oranına, sertliğe ve maliyete bağlıdır. Tablo 1'e göre HVOF, soğuk püskürtme ve lazer kaplama düşük gözeneklilik ve yüksek yoğunluk sağlar. HVOF ve soğuk püskürtmede partiküllerin yüksek hızla çarpması, lazer kaplamada ise toz ve altlığın birlikte ergitilmesi bu sonucu oluşturmaktadır. Plazma ve ark sprey yöntemleri, yüksek kaplama hızları ve görece düşük uygulama maliyetleri sayesinde geniş yüzeylerde kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerle üretilen kaplamalarda gözenek oluşumu ve kaplama ile altlık arasındaki bağın mekanik tutunmaya dayanması, kaplama performansını sınırlayabilmektedir. PTA ve kaynakla sert dolgu yöntemleri ise yüksek ısı girdisi ve malzeme birikimi sağladığından kalın tabaka gerektiren ağır hizmet uygulamalarında kullanılmaktadır.

Eklemeli imalat yayınları içinde toz beslemeli (DED) ve toz yataklı (PBF) sistemler ağırlıktadır. Grafik 7'de bu süreçlerin 2017-2026 yılları arasındaki değişimi verilmiştir. Bu sistemlerde farklı bileşimdeki tozlar harmanlanarak veya ayrı hatlardan beslenerek tek adımda işlenebilmektedir. Böylece Fe-Cr-C ve Fe-B alaşımları ile karbür takviyeli kompozit tozlar üretilebilmektedir. Lazer veya elektron ışınıyla yapılan ergitme, yüksek soğuma hızları oluşturur. Bu durum ince taneli mikroyapı ile ince ve dağılmış karbür ve borür fazlarının oluşmasını sağlayarak sertliği ve aşınma direncini artırmaktadır. Ayrıca kalıp gerekmediği için karmaşık geometrili parçalar doğrudan üretilebilir, DED ile aşınmış parçalar onarılabilir ve sert kaplama yalnızca gerekli bölgeye uygulanabilir. Bu avantajlar, toz tabanlı sistemlere olan ilgiyi artırmıştır.

Tablo 1. Yüzey kaplama ve üretim proseslerinin teknik özellikleri ve tipik uygulama alanları

Proses	Kalınlık	Gözeneklilik	Sertlik	Göreli Maliyet	Tipik Uygulama	Referans
HVOF	100-500 µm	Çok düşük (<%1-2)	600-1200 HV	Orta - Yüksek	Aşınma ve korozyon dirençli kaplamalar	(Bobzin et al., 2019; Sassatelli et al., 2016; Singla et al., 2024)
Plazma sprey	100-500 µm	Orta (%2-5)	250-750 HV	Orta	Termal bariyer, korozyon/aşınma dirençli metal kaplamalar	(Bobzin et al., 2018; Qadir et al., 2024)
Ark sprey	100-500 µm	Orta - yüksek (%2-8)	300-1200 HV	Düşük - orta	Geniş yüzeylerin korunması ve Fe esaslı kaplamalar	(Ndumia et al., 2021)
PTA / kaynakla sert dolgu	750 µm - birkaç mm	Çok düşük (< %1-1,5)	600-2700 HV	Düşük - orta	Kalın, metalurjik bağlı aşınma ve darbe dirençli tabakalar ekipmanları	(Boulos et al., 2023; Li et al., 2019)
Lazer kaplama	0,5-2,0 mm	Çok düşük (< %1-1,5)	550-1400 HV	Yüksek	Hassas yüzey onarımı ve korozyon/aşınma dirençli metal kaplamalar	(Chen et al., 2026; Fayazfar et al., 2018; Shanthar et al., 2023)
Soğuk püskürtme	100-1000 µm	Çok düşük (< %1-2,5)	50-500 HV	Orta - yüksek	Isıya duyarlı, oksitlenmeye hassas yüzeylerin onarımı, erozyon ve korozyon koruyucu kaplamalar	(Kumar, 2022; Ranjan & Das, 2022)

Grafik 7 2017-2025 yılları arasında eklemeli imalat ve toz tabanlı eklemeli imalat yayın sayıları



Kaynak: 2017-2025 yılları arasında eklemeli imalat ve toz tabanlı eklemeli imalat üzerine yapılan akademik yayınların dağılımı (Tarama Web of Science veri tabanı üzerinden Haziran 2026 tarihinde "Additive manufacturing" ve "Powder-based additive manufacturing" anahtar kelimeleri kullanılarak yapılmıştır.)

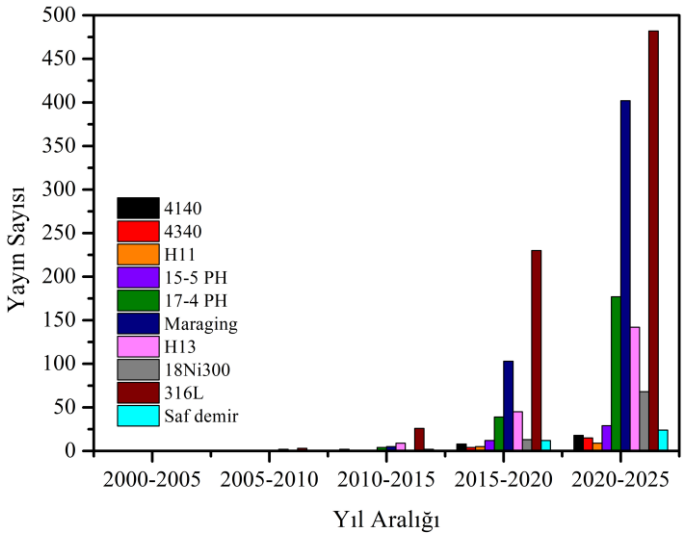
Toz tabanlı eklemeli imalat ve yüzey kaplama çalışmalarında kullanılan demir esaslı alaşım türü, malzemenin mekanik ve tribolojik performansını belirlemektedir. Grafik 8'de, 2000-2025 yılları arasında farklı demir esaslı alaşım ve çelik türlerinin eklemeli imalat yayınlarındaki dağılımı verilmiştir.

Grafik 8'e göre 316L paslanmaz çeliği yaklaşık 480 yayınla en çok çalışılan alaşımdır. Bunu maraging çelikleri, 17-4 PH paslanmaz çeliği ve H13 sıcak iş takım çeliği izlemektedir. 4140 ve 4340 gibi düşük alaşımlı çelikler ile H11 takım çeliği ise daha az sayıda çalışmada ele alınmıştır. Bu dağılım, eklemeli imalat literatüründe demir esaslı alaşımların belirli sistemlerde yoğunlaştığını göstermektedir.

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, demir esaslı malzemelerde eklemeli imalat ve toz tabanlı süreçlere yönelik

çalışmaların arttığı görülmektedir. Bu nedenle sert kaplama ve parça üretiminde proses ve alaşım bileşiminin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Grafik 8 2000-2025 yılları arasında farklı demir esaslı alaşımların eklemeli imalat yayın eğilimleri



Kaynak: Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen farklı Fe-esaslı alaşımlara ilişkin yıllara göre yayın sayısının dağılımı (Tarama Web of Science veri tabanı üzerinden Haziran 2026 tarihinde "4140", "4340", "H11", "15-5 PH", "17-4 PH", "Maraging", "H13", "18Ni300", "316L" ve "saf demir" anahtar kelimeleri kullanılarak yapılmıştır.)

Sonuç

Bu çalışmada yapılan değerlendirmeler, demir esaslı sert kaplamaların geliştirilmesinde endüstriyel gereksinimlerin, malzeme seçiminin ve üretim yöntemlerinin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Madencilik ve petrol-gaz gibi yüksek aşınma koşullarına sahip sektörlerde sert kaplamalara olan talep artmaktadır. Kobalt ve nikel esaslı sistemlerin maliyeti yüksek olduğundan, maliyet ve performans açısından dengeli olan demir esaslı alaşımlar tercih edilmektedir. Bu eğilim ilgili alandaki

akademik çalışmaların artmasıyla da uyumludur. Aşınma direnci demir matris içindeki sert fazların türüne ve dağılımına bağlıdır. Bu fazların oluşturulması için yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı katılaşma gerekmektedir. Lazer kaplama ve toz tabanlı eklemeli imalat bu koşulları sağladığı için geleneksel döküm ve toz metalurjisine alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler ayrıca karmaşık geometrili parça üretimine ve yalnızca gerekli bölgenin kaplanmasına olanak tanımaktadır.

Eklemeli imalatta çalışılan demir esaslı alaşımların sınırlı sayıda sistemde toplanması, alaşım çeşitliliğinin proses gelişiminin gerisinde kaldığını göstermektedir. Gelecekteki çalışmaların eklemeli imalata uygun yeni alaşımların geliştirilmesine, proses parametrelerinin mikroyapı ve aşınma performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesine ve yüksek sertlik ile tokluk arasında uygun bir dengenin kurulmasına odaklanması gerekmektedir. Süreç standardizasyonu ve uzun süreli servis performansının doğrulanması da endüstriyel kullanımın yaygınlaşması için oldukça önemlidir.

Kaynakça

Bhadeshia, H. (2020). Cementite. *International Materials Reviews, 65*(1), 1-27.

Bobzin, K., Öte, M., Königstein, T., Dröder, K., Hoffmeister, H.-W., Mahlfeld, G., & Schläfer, T. (2018). Development of novel Fe-based coating systems for internal combustion engines. *Journal of Thermal Spray Technology, 27*(4), 736-745.

Bobzin, K., Zhao, L., Öte, M., & Königstein, T. (2019). Development of a FeCrMnBC-based economical wear and corrosion resistant coating. *Surface and Coatings Technology, 362*, 12-20.

Boulos, M. I., Fauchais, P. L., & Pfender, E. (2023). Plasma torches for cutting, welding, and PTA coating. In *Handbook of thermal plasmas* (pp. 659-741). Springer.

Chen, J., Han, Z., Shang, F., Zhou, C., & Wang, L. (2026). A Review of High Wear-Resistant Fe-Based Laser Clad Coatings: Alloy Design, Process Optimization and Post-Treatment. *Powders, 5*(3), 26.

Chen, Y., & Li, J. (2025). The Determinants and Volatility of Prices in the Energy and Critical Mineral Markets. *Energy and Critical Mineral Security in China* (pp. 219-241). Springer.

Fayazfar, H., Salarian, M., Rogalsky, A., Sarker, D., Russo, P., Paserin, V., Toyserkani, E. J. (2018). A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys:

Process parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*, *144*, 98-128.

Grigoriev, S. N. (2023). Technologies of coatings and surface hardening: industrial applications. *Coatings*, *13*(3), 511.

Geiger, A., & Cooper, J. (2010). Overview of airborne metals regulations, exposure limits, health effects, and contemporary research. *Environmental Protection Agency, Air Quality: Washington, DC, USA*.

Gao, P., Guo, Q., Xing, Y., & Guo, Y. (2023). Structural, mechanical, and tribological properties of hard coatings. *Coatings*, *13*(2), 325.

Kumar, S. (2022). Influence of processing conditions on the mechanical, tribological and fatigue performance of cold spray coating: a review. *Surface Engineering, 38*(4), 324-365.

Lentz, J., Röttger, A., & Theisen, W. (2018). Hardness and modulus of Fe2B, Fe3 (C, B), and Fe23 (C, B) 6 borides and carboborides in the Fe-CB system. *Materials characterization, 135*, 192-202.

Li, M., Huang, K., & Yi, X. (2023). Crack formation mechanisms and control methods of laser cladding coatings: A review. *Coatings, 13*(6), 1117.

Li, Y., Dong, S., He, P., Yan, S., Li, E., Liu, X., & Xu, B. (2019). Microstructure characteristics and mechanical properties of new-type FeNiCr laser cladding alloy coating on nodular cast iron. *Journal of Materials Processing Technology, 269*, 163-171.

Liu, J., Zhang, Y., & Liao, B. (2023). A review on preparation process and tribological performance of coatings for internal combustion engine piston ring. *Advances in Mechanical Engineering, 15*(5), 16878132231175752.

Maroli, B., Dizdar, S., & Bengtsson, S. (2017). Iron-based hardfacing alloys for abrasive and impact wear. ITSC2017,

Ndumia, J. N., Kang, M., Gbenontin, B. V., Lin, J., & Nyambura, S. M. (2021). A review on the wear, corrosion and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings. *Nanomaterials, 11*(10), 2527.

Okechukwu, C., Dahunsi, O., Oke, P., Oladele, I., & Dauda, M. (2017). Review on hardfacing as method of improving the service life of critical components subjected to wear in service. *Nigerian Journal of Technology, 36*(4), 1095-1103.

Prueitt, R. L., Li, W., Chang, Y.-C., Boffetta, P., & Goodman, J. E. (2020). Systematic review of the potential respiratory carcinogenicity of metallic nickel in humans. *Critical Reviews in Toxicology, 50*(7), 605-639.

Qadir, D., Sharif, R., Nasir, R., Awad, A., & Mannan, H. A. (2024). A review on coatings through thermal spraying. *Chemical papers, 78*(1), 71-91.

Ranjan, R., & Das, A. K. (2022). A review on surface protective coating using cold spray cladding technique. *Materials Today: Proceedings, 56*, 768-773.

Sassatelli, P., Bolelli, G., Lusvarghi, L., Manfredini, T., & Rigon, R. (2016). Manufacturing and properties of high-velocity oxygen fuel (HVOF)-sprayed FeVCrC coatings. *Journal of Thermal Spray Technology, 25*(7), 1302-1321.

Shanthar, R., Chen, K., & Abeykoon, C. (2023). Powder-based additive manufacturing: a critical review of materials, methods, opportunities, and challenges. *Advanced Engineering Materials, 25*(19), 2300375.

Singla, Y. K., Maughan, M. R., Arora, N., & Dwivedi, D. (2024). Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes, 120*, 135-160.

Tandon, D., Li, H., Pan, Z., Yu, D., & Pang, W. (2023). A review on hardfacing, process variables, challenges, and future works. *Metals, 13*(9), 1512.

Tang, J., Wang, K., & Fu, H. (2024). Laser cladding in situ carbide-reinforced iron-based alloy coating: A review. *Metals, 14*(12), 1419.

Wang, T., Wang, M., Wang, Z., Xu, T., Wu, C., Zhang, C., Zhang, S., & Chen, H. (2025). Effect of in situ NbC synthesis via laser cladding on microstructure and slurry erosion of carbide-reinforced iron-based coatings. *Materials Today Communications, 42*, 111314.

Wood, R. J., & Lu, P. (2024). Coatings and surface modification of alloys for tribo-corrosion applications. *Coatings, 14*(1), 99.

Yamanoğlu, R., Avcu, E., Yavuz, H. İ., Kiraç, M., Başcı, Ü. G., Sevinç, E. F., & Bayram, E. (2024). Effect of laser energy density on microstructural properties of Inconel 625 alloy produced by selective laser melting. *Journal of Advances in Manufacturing Engineering, 5*(2), 84-93.

Zhai, W., Bai, L., Zhou, R., Fan, X., Kang, G., Liu, Y., & Zhou, K. (2021). Recent progress on wear-resistant materials: designs, properties, and applications. *Advanced Science, 8*(11), 2003739.

BÖLÜM 6

ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR DÖNÜŞÜMÜ: KAĞIT FABRİKASI ATIKSU ÇAMURLARININ YAPI MALZEMELERİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ümmühan Birsen KUZKAYA[1]
Tamer SÖZBİR[2]
Cengiz Ayhan ZIBA[3]
Gonca DÜZKALE SÖZBİR[4]

Giriş

Endüstriyel atıkların sürdürülebilir biçimde yönetilmesi ve yeniden değerlendirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynakların verimli kullanılması açısından önem taşımaktadır. Kâğıt endüstrisinde üretim süreçleri ve atıksu arıtımı sonucunda oluşan arıtma çamurları ise yüksek nem içerikleri, heterojen yapıları ve bertaraf gereksinimleri nedeniyle çevresel ve ekonomik açıdan önemli bir yönetim konusu oluşturmaktadır. Bu çamurların yalnızca bertaraf edilmesi gereken atıklar olarak değil, özellikleri doğrultusunda yeniden kullanılabilecek ikincil hammaddeler olarak ele alınması, alternatif geri kazanım olanaklarının değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz yaklaşımları kapsamında, kâğıt fabrikası atıksu arıtma çamurlarının yapı malzemelerinde kullanılması dikkat çeken değerlendirme alanlarından biridir. Literatürde çamurun beton, harç, tuğla ve çimento esaslı levha gibi ürünlerde kullanımına yönelik çalışmalar; mekanik dayanım, su emme, boyutsal kararlılık ve mikro yapısal özellikler bakımından ele alınmaktadır. Bununla birlikte, çamurun bileşimindeki değişkenlik ve olası ağır metal sızıntısı gibi çevresel riskler, kullanım olanaklarının belirlenmesinde malzeme performansının yanı sıra karakterizasyon ve çevresel uygunluk değerlendirmelerini de gerekli kılmaktadır.

Bu bölümde, kâğıt fabrikası atıksu arıtma çamurlarının oluşum süreçleri ve fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelenmekte; geleneksel bertaraf yöntemlerinin çevresel ve ekonomik etkileri ile yapı malzemelerinde değerlendirilme potansiyeli ele alınmaktadır. Bu kapsamda, farklı yapı malzemelerinde kullanımına ilişkin literatür bulguları teknik performans ve çevresel uygunluk açısından değerlendirilerek çamurun geri kazanımını etkileyen temel faktörler ortaya konulmaktadır. Böylece, atık miktarının azaltılması ve doğal hammadde kullanımının sınırlandırılması hedefleri doğrultusunda, kâğıt fabrikası arıtma çamurlarının katma değerli

[1] Uzm, Arge Merkezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği a.d, brsnkzky06@gmail.com, 0009-0003-5062-9640
[2]Dr, Arge Merkezi, Orman Endüstri Mühendisliği, tamersozbir@hotmail.com, 0000-0001-9035-8214
[3]Doç. Dr, KSÜ, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği a.d, caziba@gmail.com, 0000-0003-2372-6819
[4]Doç. Dr, KSÜ, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği a.d, goncaduzkale@gmail.com, 0000-0002-0728-841X

ürünlere dönüştürülme olanaklarının ve sürdürülebilir kaynak yönetimine sağlayabileceği katkının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Küresel Atık Yönetimi ve Kağıt Endüstrisi Atıksu ve Katı Atık Profili

Günümüz sanayi üretiminde hammadde tüketimi ve üretim hacimleri hızla artarken, sanayi kaynaklı atıksuların ve katı atıkların yönetimi küresel ölçekte kritik bir çevre problemi haline gelmiştir. Kağıt ve selüloz endüstrisi, üretim süreçlerinde en yoğun su kullanan ve buna bağlı olarak yüksek hacimlerde atıksu ile arıtma çamuru üreten sektörlerin başında yer almaktadır. Avrupa'daki kağıt endüstrisi yıllık yaklaşık 11 milyon ton katı atık üretmekte olup, bu atık hacminin %70'i geri dönüştürülmüş kağıt üreten tesislerden kaynaklanmaktadır (Monte ve ark., 2009). Türkiye'de ise kağıt geri dönüşüm ve üretim kapasitesi 5 milyon tona ulaşmış olup yakın gelecekte 8 ila 10 milyon ton seviyesine ulaşması hedeflenmektedir (Gülçek, 2023). Kağıt fabrikalarında arıtma tesislerinden çıkan çamurlar; birincil çamur (primary sludge), biyolojik/ikincil çamur (secondary sludge), mürekkep giderme çamuru (deinking sludge) ve üretim eleklerinin altından elde edilen elek altı çamuru (under-screen sludge) gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır (Geng ve ark., 2007; Topyüz ve ark., 2025).

Ortaya konulan bu veriler, kâğıt endüstrisinde atık oluşumunun üretim faaliyetlerinin doğal bir sonucu olduğunu ve özellikle çamur yönetiminin önemli bir sürdürülebilirlik konusu olduğunu göstermektedir. Çamurun, geleneksel bertaraf yöntemlerinin yanı sıra alternatif kullanım seçeneklerinin de değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu açıdan, çamurun oluştuğu kaynağa mümkün olduğunca yakın bir şekilde değerlendirilmesi; taşıma, depolama ve ilave işlem gereksinimlerinin azaltılması bakımından ayrıca önem taşımaktadır.

Kağıt Fabrikası Atıksu Çamurlarının (PMS) Oluşumu ve Karakterizasyonu

Kâğıt fabrikası atık çamuru (PMS), yüksek kül ve kalsiyum içeriğiyle dikkat çeken, endüstriyel ölçekte geri kazanım potansiyeli yüksek bir atık türüdür. PMS'nin kimyasal karakteristiği; uygulanan arıtma teknolojileri, üretim yöntemleri ve hammadde olarak kullanılan lif kaynaklarına bağlı olarak değişkenlik gösteren heterojen bir doğaya sahiptir (Koken ve ark., 2010). Güncel literatür, bu çamurların kalsiyum fosfat ve hidroksit eldesi, enerji depolama sistemleri için biyokarbon üretimi ve inşaat sektöründe yapı malzemesi katkısı gibi çeşitli katma değerli alanlarda değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Hassan ve ark., 2023). Türkiye ölçeğinde gerçekleştirilen uygulamalar, atık çamurun kâğıt üretim süreçlerine entegrasyonunun, ürün mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığını doğrulamaktadır (Karahan ve Karademir, 2020).

PMS'nin Oluşum Mekanizması

Kağıt fabrikası atıksu çamurları, üretim hattında geri kazanılamayan kısa lifler, ince partiküller, dolgu mineralleri ve biyolojik arıtma sırasında oluşan mikrobiyal biyokütlenin atıksu arıtma sistemlerinde tutulmasıyla oluşmaktadır (Courtois ve ark., 2021). Anaerobik arıtma, kağıt endüstrisi atıksularında yaygın olarak seçilmiş akımlara uygulanırken; biyolojik çamurun kendisinin anaerobik sindirimi hâlâ değişken performans gösteren bir ajan olarak tanımlamaktadır (Meyer ve ark., 2014).

- Primer çamur, çöktürme veya çözünmüş hava flotasyonu ile uzaklaştırılan askıda katılardan oluşur ve lif ile mineral dolgu maddelerince zengindir.
- Sekonder çamur, çözünmüş organiklerin mikroorganizmalarca parçalanmasıyla oluşan biyokütledir. Organik içeriği daha yüksek, susuzlaştırılması daha zordur.
- Mürekkep giderme çamuru, geri kazanılmış lif kullanılan tesislerde ortaya çıkar ve mürekkep parçacıkları, kaplama kalıntıları ve yüksek mineral fraksiyon içermektedir.

Bu açıdan, kağıt fabrikası atıksu çamurunun yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi, atıkların farklı kullanım alanları üzerinden yeniden ele alınmasına yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım, çalışmanın döngüsel ekonomi çerçevesindeki temel amacını oluşturmaktadır.

PMS'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

PMS'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri, hammadde türüne, hamurlaştırma tekniğine ve arıtma prosesine göre belirgin biçimde değişmektedir (Jele ve ark., 2022). Organik faz başlıca selüloz, hemiselüloz ve bir miktar ligninden; inorganik faz ise çoğunlukla kalsiyum karbonat, kil mineralleri ve diğer dolgu maddelerinden oluşmaktadır (Jwaida ve ark., 2024). Özellikle mürekkep giderme kökenli çamurlarda kuru madde bazında %40–60 selüloz lif ve %40–60 mineral dolgu rapor edilmiş, buna eşlik eden yüksek kül oranı yapı malzemeleri açısından dolgu ve hafifletici etki bakımından önemli görülmüştür (Gievers ve ark., 2022).

Primer ve sekonder çamurların morfolojileri de farklıdır. Primer çamur daha düzensiz, köşeli ve uzamış lifsi yapılara sahipken, sekonder çamur daha küresel ve gözenekli bir doku göstermektedir. Elementel analizlerde karbon ve oksijen baskın olsa da kalsiyum, alüminyum, magnezyum, silisyum, sodyum ve manganez gibi elementler de anlamlı miktarlarda saptanmıştır (Mohanapragash ve ark., 2026). Nem içeriği geniş aralıkta değişmekte, uygulamada %30–80 nem aralığı taşımayı ve doğrudan kullanımını zorlaştırırken, ön kurutma veya yakma sonrası elde edilen kül daha kararlı bir ikincil hammadde olmaktadır (Jwaida ve ark., 2024). Primer ve biyolojik çamurların mikro yapısal farklarını ve gözenekli morfolojisini SEM görüntüleri açık biçimde gösterilmektedir **(**Courtois ve ark., 2021).

PMS'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişkenliği, yapı malzemesi tasarımında doğrudan dikkate alınması gereken bir husustur. Özellikle nem içeriği, organik madde miktarı, kül oranı, lif yapısı ve mineral bileşim, bağlayıcı ile etkileşim, su alma ve mekanik performans üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle literatürde bildirilen değerlerin doğrudan başka bir tesisten elde edilen çamura aktarılması yerine, kullanılacak gerçek çamurun karakterizasyon sonuçlarının esas alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Kağıt Fabrikası Atıksu Arıtma Çamuru (PMS)' nun Mineral Yapısı

Mineral içeriği olarak PMS (paper mill sludge) ve özellikle yakılmış PMS, yapı malzemeleri açısından kritik olan kalsiyumlu ve silikatlı fazlar içermektedir. XRD analizlerinde kalsit, kaolinit, illit, kuvars, feldspat, smektit ve muskovit gibi kristalin ve amorf fazlar birlikte tanımlanmıştır (Mohanapragash ve ark., 2026). Yakma sonrası oluşan kağıt fabrikası atıksu arıtma çamuru külü (paper sludge ash (PSA)) çoğunlukla CaO, SiO_2 ve Al_2O_3 bakımından zengindir,

ayrıca MgO da anlamlı seviyelerde bulunabilir ve bu durum bazı karışımlarda dayanıklılığı etkileyebilmektedir (Courtois ve ark., 2021).

Yakma sıcaklığı mineral içeriği doğrudan değiştirmekte; 700–750 °C aralığında kil minerallerinin dönüşümü pozzolanik davranışı etkilemektedir. Buna karşılık bazı incelemelerde, yakılmış çamur külündeki gehlenitin ($Ca_2Al_2SiO_7$) suda görece inert davrandığı ve reaktivitenin külün oluşum koşullarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle PMS'nin yapı malzemelerinde değerlendirilmesinde yalnızca "çamur" tanımı yeterli değildir, lifli ham çamur, biyolojik çamur ve yakılmış kül fraksiyonları ayrı malzeme sınıfları olarak ele alınmalıdır (Jwaida ve ark., 2024).

Ağır Metaller ve Bağlayıcı Etkileşimi

Kağıt fabrikası çamurlarında ağır metaller genellikle düşük fakat ölçülebilir düzeylerde rapor edilmiştir ve Pb, Cd, Cr, Cu, Ni ve Zn en sık bildirilen elementlerdir. Mürekkep giderme çamurlarında klororganik bileşikler, mineral yağ ve bazı ağır metallerin diğer çamur türlerine göre daha yüksek olabildiği bildirilmiştir. Bu nedenle yapı malzemesi uygulamalarında yıkanma davranışı mutlaka değerlendirilmelidir (Gievers ve ark., 2022). Özellikle mürekkep, kaplama kalıntısı ve proses kimyasalları içeren çamurlar, çevresel uygunluk açısından daha dikkatli karakterizasyon gerektirmektedir.

Sonuç olarak, kağıt fabrikası atıksu çamurlarının oluşumu ve karakterizasyonu, onları tek bir atık sınıfı olarak değil, proses kökenine bağlı çok bileşenli mühendislik hammaddeleri olarak ele almayı gerektirmektedir. Yapı malzemelerinde güvenli ve verimli kullanım için lif oranı, kül ve silis içeriği, mineralojik fazlar, nem durumu ve ağır metal sızıntı potansiyeli birlikte değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, kağıt fabrikası atıksu çamurunun yapı malzemelerinde değerlendirilmesi, çamurun karakteristik özellikleri ile bağlayıcı sistem arasındaki uyumun gözetildiği bütüncül bir malzeme tasarımını gerektirmektedir. Bu yaklaşım, atığın katma değerli bir ürüne dönüştürülmesinde kullanım amacına uygun malzeme geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

KAĞIT FABRİKASI ENDÜSTRİYEL ATIĞIN KULLANIM ALANLARI

Kağıt Fabrikası Atıksu Arıtma Çamurlarının Geleneksel Bertaraf Yöntemlerinin (Depolama, Yakma) Çevresel ve Ekonomik Yükleri

Kağıt fabrikası atık çamurlarının bertarafında tarihsel olarak uygulanan temel iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar düzenli depolama (landfilling) ve tesis içi yakma (incineration) yöntemleridir (Monte ve ark., 2009; Oladejo ve ark., 2019). Ancak günümüzde her iki geleneksel yöntem de ciddi çevresel ve ekonomik sorunları beraberinde getirmektedir. Bunlar:

Depolama (Landfilling): Depolama alanlarının (düzenli depolama sahaları) hızla tükenmesi, arazi maliyetlerinin yükselmesi ve sıkılaşan çevre mevzuatları (örneğin Avrupa Birliği Düzenli Depolama Direktifi 1999/31/EC) depolamayı kısıtlamaktadır (Monte ve ark., 2009). Ayrıca atık çamur içerisindeki organik maddelerin biyolojik olarak ayrışması, sızıntı sularının yeraltı sularına karışma riski, koku oluşumu ve zararlı gaz emisyonları çevresel açıdan sürdürülemez bir durum yaratmaktadır (Oladejo ve ark., 2019).

Yakma (Incineration): Atık çamurun yakılarak enerjisi geri kazanılmak istendiğinde, çamurun yüksek nem içeriği ön kurutma işlemi gerektirmekte ve bu durum yakma sürecini enerji

açısından verimsiz hale getirebilmektedir. Bunun yanı sıra yakma bacalarından çıkan CO_2, NOx, SO_2 ağır metal emisyonlarının tutulması için yüksek maliyetli gaz arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yakma sonrasında ortaya çıkan ve ağır metaller içerebilen yüksek miktardaki dip ve uçucu küllerin bertarafı da ayrı bir çevresel ve ekonomik yük oluşturmaktadır (Monte ve ark., 2009; Oladejo ve ark., 2019).

Bu değerlendirmeler, geleneksel bertaraf yöntemlerinin çamurun içerdiği potansiyel kaynakların yeniden değerlendirilmesine olanak vermediğini göstermektedir. Özellikle yüksek nem içeren çamurlar açısından kurutma, taşıma ve bertaraf aşamalarının oluşturduğu ilave yükler dikkate alındığında, malzemenin doğrudan veya minimum ön işlemle değerlendirilebileceği alternatiflerin araştırılması önem kazanmaktadır. Dolayısıyla çamurun yapı malzemesi içerisinde değerlendirilmesi, yalnızca bir bertaraf alternatifi değil, aynı zamanda mevcut atık akışının üretim döngüsüne yeniden kazandırılması açısından değerlendirilebilmektedir.

Yapı Malzemelerinde Endüstriyel Atık Kullanım Alanları

Endüstriyel atıkların, özellikle kağıt fabrikası atıksu çamurlarının ve lignoselülozik kalıntıların inşaat sektöründe sürdürülebilir bir şekilde geri dönüştürülmesine yönelik mevcut literatürü ve teknolojik yaklaşımları incelemektedir. Modern yapı endüstrisi, CO_2 emisyonlarını azaltmak ve doğal kaynak tüketimini minimize etmek amacıyla çimento esaslı kompozitlerde atıklara odaklanmaktadır (Altunci, 2024; Tanuja, 2025). Çalışmalar, kağıt fabrikası çamuru "Kağıt Fabrikası Çamuru (WPS)", odun külü ve çeşitli endüstriyel atıkların çimentonun kısmi yerine kullanılabileceğini, ancak mekanik performansın korunması için ikame oranlarının optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Kore ve ark., 2023; Tanuja, 2025; Mir ve Kumar, 2025).

Temel bulgular, kağıt fabrikası çamuru ve atıksu çamuru için %5-%10 civarındaki düşük katılma oranlarının yapısal bütünlüğü korurken, daha yüksek oranların hidratasyon süreçlerini geciktirdiğini ve mekanik mukavemette düşüşe neden olduğunu ortaya koymaktadır (Yadollahi ve ark., 2013; Kore ve ark., 2023). Ahşap-çimento kompozit levhaların (WCB) üretiminde ise lignoselülozik bileşenlerin çimento hidratasyonu üzerindeki engelleyici etkileri en kritik engeldir. Odun külü, çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek ikincil kalsiyum silikat hidrat jelleri oluşturur ve bağlayıcı matrisi güçlendirmektedir (Vaičienė ve ark., 2023; Panek ve ark., 2025).

İnşaat sektörü, küresel olarak en yüksek hammadde tüketimine ve karbon ayak izine sahip endüstrilerden biridir. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, endüstriyel yan ürünlerin ve atıkların yapı malzemelerinde değerlendirilmesi hem atık yönetimi hem de kaynak verimliliği açısından stratejik öneme sahiptir (Garcia ve ark., 2023). Özellikle kağıt fabrikalarından çıkan büyük miktarlardaki atıksu çamuru ve lignoselülozik kalıntılar, çevre üzerinde ciddi bir yük oluşturmaktadır (Yadollahi ve ark., 2013).

Bu atıkların çimento esaslı kompozitlerde, örneğin beton, harç ve Betopan gibi ahşap-çimento levhalarda kullanımı, "yeşil inşaat" kavramının merkezinde yer almaktadır (Siddique, 2023). Ancak, bu atıkların kimyasal bileşimi ve fiziksel yapısı, çimentonun hidratasyon reaksiyonlarını ve nihai ürünün mekanik performansını doğrudan etkilemektedir (Li ve ark., 2022).

Kâğıt Fabrikası Arıtma Çamurunun Yapı Sektöründe Değerlendirilmesinde Döngüsel Ekonomi ve Endüstriyel Simbiyoz Yaklaşımları

Geleneksel "al-kullan-at" doğrusal ekonomi modelinin yarattığı çevresel tahribat, yerini kaynağında koruma, yeniden kullanım ve atıkların ikincil hammaddeye dönüştürüldüğü döngüsel ekonomi (circular economy) ve endüstriyel simbiyoz yaklaşımlarına bırakmıştır (Oladejo ve ark., 2019; Gülçek, 2023). Fransa ve AB genelinde uygulanan "Atık Statüsünden Çıkış" (End-of-Waste / EoW) kriterleri, belirli standartları sağlayan endüstriyel yan ürünlerin atık değil, katma değerli birer ikincil hammadde olarak tanımlanmasını sağlamaktadır (Gülçek, 2023).

Bu noktada inşaat ve yapı sektörü, büyük hacimli endüstriyel atıkların güvenli ve fonksiyonel bir şekilde bünyesine katılabileceği en stratejik alanlardan biridir (Monte ve ark., 2009; Karahan ve Karademir, 2020). Kağıt fabrikası atık çamurları ile santral uçucu küllerinin yapı malzemelerinde değerlendirilmesi hem çamurun araziye atılması sorununu ortadan kaldırmakta hem de doğal hammadde kullanımını azaltarak maliyet avantajı sağlamaktadır (Topyüz ve ark., 2025).

Atık kağıt çamuru ve uçucu kül katkısıyla üretilen beton bloklar (Topyüz ve ark., 2025), orta yoğunlukta lif levhalar (MDF) (Geng ve ark., 2007), ambalaj kartonları ve izolasyon/dolgu panelleri (Karahan ve Karademir, 2020) üzerinde yapılan araştırmalar; bu atıkların malzemede hafiflik sağladığını, poröz yapısı sayesinde ısı ve ses yalıtımını iyileştirdiğini, lif içeriği sayesinde çatlak direncini ve tokluğu artırdığını göstermektedir. Kağıt fabrikası atıksu çamurlarının yapı sektörüne entegrasyonu, hem çevre kirliliğini önleyen hem de döngüsel ekonomiye katkı sağlayan sürdürülebilir bir endüstriyel simbiyoz örneği sunmaktadır (Oladejo ve ark., 2019; Karahan ve Karademir, 2020). Bu yaklaşımlar birlikte değerlendirildiğinde, kâğıt fabrikası çamurunun yapı malzemesi üretiminde kullanılması döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz kavramlarının kesiştiği bir uygulama olarak değerlendirilebilir. Burada temel amaç yalnızca atık miktarını azaltmak değil, atığın sahip olduğu lif ve mineral bileşenleri yeni bir ürünün hammaddesine dönüştürmektir. Böyle bir yaklaşımın uygulanabilirliği ise elde edilen malzemenin teknik performansının yanı sıra çevresel güvenliği ve ekonomik olarak sürdürülebilirliği ile birlikte değerlendirilmelidir.

Bununla birlikte endüstriyel atıkların yapı malzemelerine entegrasyonu için çeşitli metodolojik yaklaşımlar benimsenmiştir. Bu yaklaşımlar temel olarak atıkların çimento ikamesi veya agrega ikamesi olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Literatürde farklı endüstriyel atıkların beton, harç, tuğla ve levha gibi farklı yapı malzemelerinde değerlendirilebildiği görülmektedir. Ancak her atığın malzeme içerisindeki davranışı kendine özgü olduğundan, farklı sektörlerden elde edilen sonuçların doğrudan kâğıt fabrikası çamuruna uygulanması doğru olmayacaktır. Bu nedenle mevcut çalışmalar, doğrudan bir sonuçtan ziyade, kâğıt fabrikası çamurunun uygun bağlayıcı sistemi ve kullanım oranı belirlenerek yapı malzemesine dönüştürülmesi için bir bilimsel temel oluşturmaktadır.

Arıtma Çamurunun Levha Performansına Etkileri: Mekanik ve Fiziksel Özellikler

Arıtma çamurlarının yapısal levha üretiminde değerlendirilmesi, mekanik dayanım parametrelerini, boyutsal kararlılığı ve arayüz mikroyapısını doğrudan etkileyen çok boyutlu bir süreçtir (Cavdar ve ark., 2017; Ashori ve ark., 2024). Bu kapsamda eğilme direnci, elastisite

modülü, su alma-şişme davranışları ve lif-matris kenetlenmesine dair çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Mehrvan ve ark., 2024; Jindain ve ark., 2026). Burada arıtma çamurunun levha sistemlerine dahil edilmesinde performansın tek bir parametreyle açıklanamayacağını göstermektedir. Mekanik dayanım, su emme, kalınlık şişmesi, yoğunluk ve mikroyapı gibi özelliklerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle çamur esaslı veya çamur katkılı bir levhanın başarılı olarak değerlendirilebilmesi için yalnızca dayanım değerinin değil, ürünün hedeflenen kullanım koşullarındaki bütünsel performansının dikkate alınması gerekmektedir.

Eğilme Direnci ve Elastisite Modülü

PMS kağıt fabrikası ilavesi, levhaların mekanik kapasitesini ikame oranına ve bağlayıcı matris türüne bağlı olarak çift yönlü etkilemektedir (Taramian ve ark., 2006). Düşük ve orta katkı seviyelerinde (genellikle %5 ila %20) eğilme direnci (MOR) ve elastisite modülü (MOE) korunabilmekte veya artış gösterebilmektedir (Cavdar ve ark., 2017; Engin ve ark., 2026). Örneğin, yonga levhalarda parçacık boyutu 1 mm altına indirildiğinde %15'e kadar PMS katkısı, MOR ve MOE değerlerini geliştirmektedir. Çamur içeriği ve parçacık boyutunun eğilme özellikleri üzerindeki bu belirgin etkisi deneysel çalışmalarda açıkça izlenmektedir (Mehrvan ve ark., 2024).

Buna karşın, lif levha ve yonga levhalarda katkı oranı kritik noktayı aştığında kusurlu lif yapısı ve tutkallama yetersizliği sebebiyle mekanik direnç zayıflamaktadır (Taramian ve ark., 2006). Mürekkebi giderilmiş çamurun %50 oranında kullanılması MDF'nin mekanik özelliklerinde %36 ile %57 oranında azalmaya yol açmıştır (Ashori ve ark., 2024). Çimento esaslı kompozitlerde ise anaerobik arıtma çamurları %20 düzeyine kadar EN standartlarını karşılarken, inorganik çimento hidratasyonu mekanik sürekliliği desteklemektedir (Cavdar ve ark., 2017). Kalsiyum silikat levhalarda ise %20-30 aralığındaki kül ve çamur tozu gözenekliliği azaltarak eğilme mukavemetini iyileştirmektedir (Chen ve ark., 2019).

Boyutsal Kararlılık: Su Emme ve Şişme

Çamur ikamesinin su emme (WA) ve kalınlık şişmesi (TS) üzerindeki etkileri, lif hidrofilikliği ile levha iç yapısının yoğunluğuna göre değişmektedir (Mehrvan ve ark., 2024).

Organik reçineli kompozitlerde çamurun hidrofilik karakteri yüksek oranlarda su alımını artırabilirken, polimerik ve inorganik bağlayıcılı sistemlerde çamurun inorganik dolgu etkisi boşlukları doldurarak su alımını ve genleşmeyi kısıtlayabilmektedir (Hamzeh ve ark., 2011; Azevedo ve ark., 2024).

Su emme ve kalınlık şişmesi, özellikle yapı levhalarının kullanım ömrünü ve kullanım alanını belirleyen önemli performans kriterlerindendir. Çamurun hidrofilik karakteri ve levha içerisindeki gözenek yapısı bu özellikleri olumsuz etkileyebileceği gibi, mineral bileşenlerin dolgu etkisi bazı sistemlerde bu etkiyi sınırlandırabilir. Bu nedenle geliştirilecek ürünün yalnızca kuru durumdaki mekanik performansı değil, su ile temas sonrası boyutsal ve mekanik davranışı da değerlendirilmelidir.

Mikroyapısal Mekanizmalar ve Lif Kenetlenmesi

Levhaların mikroyapısal karakterizasyonu, çamur liflerinin bağlayıcı matris içerisindeki tutunma dinamiklerini doğrulamaktadır.

- Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri, çamur yapısındaki kalsit ve kil gibi inorganik dolgu bileşenlerinin varlığını ve matris içi dağılımını gösterir (Jindain ve ark., 2026).
- Çimento esaslı kompozitlerde, çimento jelinin ve kristal fazların gözenekler ile hücre lümenlerine yerleşmesi yoğun bir ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ) inşa eder (Azevedo ve ark., 2024).
- Termoplastik ve reçineli levhalarda ise arayüzey kusurları, lif kenetlenmesini zayıflatarak gerilme aktarımını sınırlandıran birincil mekanizmadır (Ashori ve ark., 2024).
- Matrise uyumlaştırıcı kimyasalların eklenmesi lifler arası esterleşme ve kenetlenmeyi güçlendirerek mekanik bütünlüğü korur (Hamzeh ve ark., 2011).

Sonuç olarak, arıtma çamurunun optimum ikame oranları (%15-20) ve kontrollü parçacık boyutları ile kullanılması, mekanik ve fiziksel levha performans standartlarının sürdürülebilir biçimde karşılanmasını sağlamaktadır (Taramian ve ark., 2006; Mehrvan ve ark., 2024; Ashori ve ark., 2024).

Mikroyapı incelemeleri, makroskopik mekanik özelliklerde gözlenen değişimlerin nedenlerinin açıklanması açısından tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Özellikle liflerin bağlayıcı matris içerisindeki dağılımı, boşlukların oluşumu ve bağlayıcı ile lif arasındaki ara yüzey, levhanın dayanım davranışını açıklamada önemlidir. Bu nedenle SEM/EDS gibi analizlerin mekanik ve fiziksel deneylerle birlikte kullanılması, geliştirilen kompozit yapının davranışının daha kapsamlı şekilde açıklanmasına katkı sağlayacaktır.

Çevresel ve Ekonomik Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

Kâğıt ve selüloz endüstrisi, üretim süreçlerinin doğal bir sonucu olarak büyük miktarlarda atıksu ve çamur üretmektedir. Yılda yaklaşık 14 milyon m^3 atıksuyun yüzey sularına veya tarım arazilerine arıtılmadan deşarj edilmesi ciddi çevre sorunlarına yol açmaktadır (Rahman ve Kabir, 2010). Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurun yönetimi, işletme maliyetlerinin %50 ile %60'ını oluşturabilmekte ve genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir (Fauzi ve ark., 2016; Simão ve ark., 2018). Son yıllarda, bu atıkların "atık" olmaktan çıkarılıp "hammadde" olarak yapı malzemelerinde değerlendirilmesi sürdürülebilir bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Kâğıt fabrikası çamurları, içerdikleri kalsiyum karbonat ve organik lifler sayesinde beton, harç ve tuğla üretiminde çimento veya agrega ikamesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Vashistha ve ark., 2019; Martins, 2025). Bu yaklaşım, hem doğal kaynakların korunmasını sağlamakta hem de endüstriyel atıkların çevresel etkilerini minimize etmektedir.

Kâğıt fabrikası çamurunun (PMS) sürdürülebilirlik değerlendirmesi, teknik uygulanabilirliğin yanı sıra ekolojik ve finansal performansın bütünleşik analizini gerektirir. Sürdürülebilir atık yönetimi, atığın depo sahalarına gönderilmesini önleyerek döngüsel ekonomi prensiplerini uygulamayı hedeflemektedir (Mustonen ve ark., 2020; Martins, 2025).

Bu kapsamda yapılan çalışmalar, mürekkep giderme çamuru gibi spesifik atık türlerinin çimento tesislerinde veya hafif agrega fabrikalarında değerlendirilmesinin en umut verici seçenekler olduğunu göstermektedir. Sürdürülebilirlik profili, taşıma maliyetlerinden teknolojik adaptasyon risklerine kadar pek çok faktöre bağlıdır. Örneğin, hammadde mevcudiyeti ve çamur kullanımıyla ilişkili teknolojik riskler, endüstriyel ortakların bu tür atıkları benimseme istekliliğini sınırlayan önemli darboğazlardır. Ancak, uygun koşullar sağlandığında, bu dönüşüm hem

maksimum ekonomik değer geri kazanımını hem de çevresel etki azaltımını desteklemektedir (Deviatkin ve ark., 2015).

Karbon Ayak İzi Azaltımı ve Sera Gazı Emisyonlarına Etkisi

Yapı malzemelerinde kâğıt fabrikası çamuru kullanımı, özellikle çimento üretimi gibi karbon yoğun süreçlerin ikame edilmesi yoluyla sera gazı emisyonlarını düşürmektedir. Geleneksel Portland çimentosu (OPC) üretimi, ton başına yaklaşık eşit miktarda CO_2 salınımı yapmaktadır (Dangi ve ark., 2023). PMS kullanımı bu emisyonları doğrudan ve dolaylı yollarla azaltmaktadır.

Bu noktada, çevresel kazanımların kalıcı hâle gelmesi, atıkların yeniden kullanımının üretim süreçleriyle uyumlu biçimde planlanmasıyla mümkündür. Geliştirilen malzemenin teknik gereklilikleri karşılaması ve üretim sürecinde kaynakların verimli kullanılması, çevresel faydaların sürdürülebilir bir üretim anlayışıyla bütünleşmesini sağlayacaktır.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Bulguları

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) metodolojileri (ISO 14040 ve ISO 14044), çamur yönetim senaryolarının çevresel etkilerini ölçmek için kullanılmaktadır. Yapılan analizler şu bulguları ortaya koymaktadır:

- **Küresel Isınma Potansiyeli (GWP):** Çimento fabrikalarında çamur kullanımı, GWP değerinde %13'e varan bir azalma sağlayabilmektedir (Deviatkin ve ark., 2015).
- **Hafif Agrega Üretimi:** Hafif agrega tesislerinde çamur kullanımıyla GWP'de %2,1, abiyotik tükenme potansiyelinde (ADP) %1,7 ve ötrofikasyon potansiyelinde (EP) %1,8 oranında iyileşme kaydedilmiştir (Deviatkin ve ark., 2015).
- **Kompozit Malzemeler:** Çamur bazlı polimer kompozit üretimi, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ikamesiyle iklim değişikliği etkisini 1,2 kg CO_2-eq. düzeyinde azaltmaktadır (Mustonen ve ark., 2020). Ayrıca, kâğıt fabrikası çamurunun piroliz yoluyla biyoçömleğe dönüştürülmesi ve toprakta kullanılması, karbonun toprakta sabitlenmesini (sequestering) sağlayarak sera gazı emisyonlarını negatif değerlere çekebilmektedir (Mohammadi ve ark., 2019).

LCA çalışmalarından elde edilen farklı sonuçlar, atıksu çamurunun değerlendirilmesinde tek bir senaryonun bütün uygulamalar için çevresel açıdan üstün kabul edilemeyeceğini göstermektedir. Çamurun yakıt, hammadde veya kompozit malzeme olarak değerlendirilmesi farklı enerji ve emisyon profilleri oluşturabilmektedir. Bu nedenle yapı malzemesi geliştirme çalışmalarında alternatif bertaraf ve geri kazanım senaryolarının aynı sistem sınırları içerisinde karşılaştırılması, çevresel kazanımın daha objektif biçimde ortaya konulmasını sağlayacaktır.

İkame Stratejilerinin Emisyon Etkisi

LCA çalışmalarında, çamurun yakıt olarak mı yoksa hammadde olarak mı kullanılacağı çevresel sonuçları belirleyen kritik bir faktördür. Yakıt ikamesinin (ısı enerjisi geri kazanımı), hammadde ikamesine göre çevresel etkileri azaltmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir (Deviatkin ve ark., 2015). Örneğin, biyogazın ulaşım yakıtı olarak kullanılması, tüm çevresel etki kategorilerinde en yüksek performansı sergilemektedir (Mohammadi ve ark., 2019). Atıksu arıtma tesisi kuru çamurunun betonda kısmi ikame olarak kullanılması, enerji tasarrufu sağlamakta ve

doğal kaynakları koruyarak dairesel ekonomiye katkı sunmaktadır (Dixit and Srivastava, 2024). Bu sonuçlar, atıksu çamurunun hangi amaçla ve hangi malzemenin yerine kullanıldığının çevresel performans açısından kritik olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla yalnızca "atığın değerlendirilmesi" çevresel kazanım için yeterli değildir; gerçekleştirilen ikamenin gerçekten kaynak ve enerji tüketimini azaltıp azaltmadığının da ortaya konulması gerekir. Bu yaklaşım, geliştirilecek yapı malzemesinin sürdürülebilirlik değerlendirmesinde teknik performans ile çevresel performansın birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Depo Sahası Maliyetlerinin Bertaraf Edilmesi ve Hammadde Maliyet Optimizasyonu

PMS'nin yapı malzemelerinde değerlendirilmesinin ekonomik boyutu, atık bertaraf maliyetlerinden kaçınılması ve ucuz hammadde teminidir. Atıksu arıtma maliyetlerinin yaklaşık yarısı ile %60'ı çamur bertarafıyla ilgilidir (Fauzi ve ark., 2016; Simão ve ark., 2018).

Çamurun malzeme olarak değerlendirilmesi durumunda ekonomik faydanın iki temel kaynaktan oluşabileceği görülmektedir. Mevcut bertaraf maliyetlerinin azaltılması ve geleneksel hammaddelerin kısmen ikame edilmesi. Ancak bu potansiyel faydanın gerçek ekonomik değeri, özellikle çamurun hazırlanması, taşınması, depolanması ve üretim prosesine dahil edilmesi için gereken maliyetlerle birlikte değerlendirilmelidir. Bu nedenle ekonomik değerlendirmede yalnızca kaçınılan bertaraf maliyetinin değil, alternatif ürünün toplam üretim maliyetinin dikkate alınması gerekmektedir.

Maliyet-Fayda Analizi ve Ekonomik Fizibilite

Maliyet-fayda analizi (CBA) sonuçları, projenin ölçeğine ve kullanılan teknolojiye göre değişkenlik göstermektedir. Öne çıkan ekonomik veriler şunlardır:

- **BCR Oranları:** Ağır yakıt yağının kuru mürekkep giderme çamuru ile ikame edildiği senaryolarda, tüm çamur kullanıldığında 3.6 gibi yüksek bir fayda-maliyet oranı (BCR) elde edilmiştir. Çimento üretiminde kullanımda ise bu oran 1.1 olarak hesaplanmıştır (Deviatkin ve ark., 2015).
- **Maliyet Düşüşü:** Kağıt fabrikası atık çamuru ve çelik fiber karışımlı beton kullanımı, normal betona göre %6,51 oranında daha az maliyetlidir (Dangi ve ark., 2023).
- **Karton Kirişler:** Atık kartonların inşaat sektöründe kiriş olarak değerlendirilmesi, ahşap kirişlere kıyasla %83 oranında etkileyici bir yaşam döngü maliyeti düşüşü sağlamaktadır (Venkatesan ve ark., 2024).

Farklı ekonomik sonuçlar, bir atığın yapı malzemesine dönüştürülmesinin ekonomik uygulanabilirliğinin proje ve proses koşullarına bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle tesis ölçeği, hammadde sürekliliği, taşıma mesafesi, enerji ihtiyacı ve nihai ürünün piyasa değeri ekonomik fizibiliteyi etkileyebilecek temel unsurlardır. Bu nedenle ilerleyen aşamalarda laboratuvar sonuçlarının ölçek büyütme ve gerçek üretim koşullarıyla ilişkilendirildiği ayrıntılı bir maliyet-fayda analizinin yapılması gerekmektedir.

Hammadde Tasarrufu ve Endüstriyel Tasarruflar

PMS kullanımı, inşaat firmaları için hammadde tasarrufu anlamına gelmektedir. Örneğin, uçucu kül ve kâğıt fabrikası çamurunun harçlarda dolgu maddesi olarak kullanılması, harç üreticisine ton başına 7,19 € ile 8,85 € arasında tasarruf sağlayabilmektedir. Bu çözüm aynı

zamanda kâğıt üreticisi için de depo sahası maliyetlerinden tasarruf sağlamakta, ton başına yaklaşık 91,82 kg atığın depolamaya gitmesi önlenerek 1,11 € ile 2,87 € arasında üretici tasarrufu elde edilmektedir (depo maliyetleri 12,11 - 29,35 €/ton baz alındığında) (Capela ve ark., 2022). Ayrıca, kâğıt çamuru küllerinin (WPSA) çimento üretiminde kullanımı, kireç taşı tüketimini azaltarak ekonomik olarak sürdürülebilir bir inşaat süreci sunmaktadır (Fauzi ve ark., 2016). Atık bertaraf sübvansiyonları, bu tür geri dönüşüm projelerinin ekonomik performansını vergisel avantajlardan (kurumsal gelir vergisi vb.) daha fazla etkileyen hayati bir unsurdur (Zhang ve ark., 2024).

Hammadde tasarrufu açısından bakıldığında, kâğıt fabrikası çamurunun yapı malzemelerinde kullanılması iki farklı kaynak tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bir tarafta atığın bertarafı için gerekli kaynaklar, diğer tarafta geleneksel yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan doğal hammaddeler. Ancak bu kazanımın miktarı, kullanılacak çamur oranı ve üretim yöntemine bağlı olacaktır. Bu nedenle potansiyel tasarrufların gerçek üretim verileri kullanılarak ayrıca hesaplanması, literatürdeki genel sonuçların uygulamaya aktarılması açısından önemlidir.

Sonuç ve Öneriler

Kâğıt fabrikası atıksu çamurlarının araştırılması ve bu çamurun kullanımına yönelik literatürün incelenmesi, bu atığın yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak değil, uygun şekilde karakterize edildiğinde ikincil bir hammadde olarak değerlendirilebilecek potansiyele sahip bir endüstri atığı olduğunu göstermektedir. Çamurun içerdiği selülozik lifler, mineral dolgular ve özellikle kalsiyum karbonat gibi bileşenler, farklı yapı malzeme sistemlerinde fonksiyonel bir katkı veya kısmi hammadde ikamesi olarak kullanılabilmesine olanak sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, çamurun özelliklerinin üretim prosesi, kullanılan hammadde, arıtma teknolojisi ve çamur türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişmesi, malzeme tasarımında standartlaştırılmış tek bir yaklaşımın uygulanmadığını göstermektedir.

Literatürdeki çalışmalar, düşük ve kontrollü çamur ikame oranlarının çeşitli çimento esaslı kompozit ve levha sistemlerinde kabul edilebilir mekanik performans sağlayabildiğini; buna karşılık yüksek ikame oranlarının hidratasyon, lif-matris etkileşimi, su emme ve boyutsal kararlılık üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildiğini göstermektedir. Bu nedenle çamurun yapı malzemelerinde kullanımında optimum ikame oranının deneysel olarak belirlenmesi temel bir gerekliliktir. Özellikle yoğunluk, su emme, kalınlık şişmesi, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi özelliklerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında SEM/EDS ve benzeri analizlerle çamur bileşenlerinin bağlayıcı matris içerisindeki dağılımının incelenmesi, performans değişimlerinin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Çevresel açıdan bakıldığında, atıksu çamurunun yapı malzemelerine dönüştürülmesi; depolama veya diğer bertaraf yöntemlerine olan ihtiyacın azaltılması, doğal kaynak kullanımının sınırlandırılması ve endüstriyel atıkların yeniden üretim sistemine kazandırılması açısından döngüsel ekonomi yaklaşımıyla uyumludur. Ancak bu potansiyelin gerçek bir çevresel kazanıma dönüşebilmesi için yalnızca atığın ürüne dönüştürülmesi yeterli değildir. Kurutma, taşıma, öğütme, bağlayıcı kullanımı, üretim enerjisi ve ürünün kullanım ömrü gibi aşamaların da değerlendirmeye dahil edildiği yaşam döngüsü analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle ham çamurun doğrudan kullanılması ile kurutulmuş veya termal işlem görmüş çamurun kullanılması arasındaki çevresel

ve ekonomik farkların karşılaştırılması önem taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda öncelikle kullanılacak çamurun proses kökeni belirlenmeli ve nem, organik madde, kül, selülozik lif, mineralojik bileşim ve ağır metal içeriği açısından ayrıntılı olarak karakterize edilmelidir. Özellikle yapı malzemelerinde kullanım amacıyla ağır metal ve diğer potansiyel kirleticilerin sızıntı davranışının değerlendirilmesi çevresel güvenlik açısından zorunlu bir araştırma alanıdır. Daha sonra farklı çamur/bağlayıcı oranları ve mümkünse farklı parçacık boyutları kullanılarak deneysel levha üretimleri gerçekleştirilmeli; elde edilen ürünlerin ilgili yapı malzemesi standartları açısından performansı değerlendirilmelidir.

Son olarak, laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçların endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğinin belirlenmesi için t fizibilite, hammadde sürekliliği, üretim kapasitesi, enerji ve taşıma gereksinimleri, bertaraf maliyetlerinden kaçınma ve nihai ürünün ekonomik değeri birlikte ele alınmalıdır. Bu kapsamda yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ile maliyet-fayda analizinin (CBA) birlikte yürütülmesi, alternatif kullanım senaryolarının karşılaştırılmasına olanak sağlayacaktır. Böylece kâğıt fabrikası atık su çamurunun yapı malzemesine dönüştürülmesi yalnızca bir atık bertaraf alternatifi olmaktan çıkarılarak, teknik olarak uygulanabilir, çevresel açıdan güvenli ve ekonomik açıdan değerlendirilebilir bir döngüsel ekonomi uygulamasına dönüştürülebilir.

Kaynakça

Altunci, Y. T. (2024, December). A study on the utilization of wastewater treatment sludge in the construction sector. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*. https://doi.org/10.62301/usmtd.1592727

Ashori, A., Heydari, V., Besharatifar, K., & Maghsoodi, D. (2024). Utilizing de-inked paper sludge for sustainable production of medium-density fiberboard: A comprehensive study. *Polymer Composites*. https://doi.org/10.1002/pc.28202

Azevedo, A., Filomeno, R., Gonçalves, M., Faria, P., & Savastano, H. (2024). Innovative MOS-based fiber cement boards: Effect of kraft pulp mills waste and curing by accelerated carbonation. *Construction and Building Materials*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136525

Capela, M. N., Vilarinho, I. S., Vieira, I., Tarelho, L. A. C., Seabra, M. P., & Labrincha, J. A. (2022). Valorization of Kraft pulp and paper mill slaker grits and biomass fly ash as fillers in a commercial screed mortar formulation. *Molecules*, *27*(23), 8613. https://doi.org/10.3390/molecules27238613

Cavdar, A., Yel, H., Boran, S., & Peşman, E. (2017). Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler. *Construction and Building Materials, 142*, 410-416. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.099

Chen, M.-X., Zheng, Y., Zhou, X., Li, L.-B., Wang, S., Zhao, P., Lu, L., & Cheng, X. (2019). Recycling of paper sludge powder for achieving sustainable and energy-saving building materials. *Construction and Building Materials, 229*, 116874. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116874

Courtois, N., Pochard, I., Remery, M., Hihn, J., & Tourneret, L. (2021). Influence of the characteristics of paper mill sludges on their anaerobic digestion. *Waste Management & Research, 40*, 1256 - 1266. https://doi.org/10.1177/0734242x211065698

Dangi, N., Misra, R., Parihar, R. S., Jha, A. K., & Kumar, B. (2023). Hypo sludge and steel fiber as partially replacement of cement and sand in concrete by adding superplasticizer: An experimental study. *International Journal For Science Technology And Engineering*, *11*(2), 309–312. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49006

Deviatkin, I., Kujala, A., & Horttanainen, M. (2015). *Deinking sludge utilization possibilities: technical, economic, and environmental assessments*. LUT Scientific and Technological Reports. Lappeenranta University of Technology. https://lutpub.lut.fi/handle/10024/104853

Dixit, M., & Srivastava, J. B. (2024). Utilization of treated wastewater dry sludge for lightweight concrete and the use of treated waste water as a curing medium. *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.12161149

Engin, M., & Konukcu, A. C. (2026). Impact Of Paper Deınkıng Sludge And Glutaraldehyde On Some Natural Fıber Composıte Propertıes. *Cellulose Chemistry and Technology*. https://doi.org/10.35812/cellulosechemtechnol.2026.60.15

Fauzi, M. A., Sulaiman, H., Ridzuan, A. R. M., & Azmi, A. N. (2016). The effect of recycled aggregate concrete incorporating waste paper sludge ash as partial replacement of cement. *AIP Conference Proceedings*, *1774*(1), 030007. https://doi.org/10.1063/1.4965063

Garcia, A. C. S., da Silva, E. M., Santos, Y. B. I., Quaresma, D. da S., Ribeiro, H. M. C., & Coutinho, E. de C. (2023, November). Sustainability in the scope of civil construction: Recycling of solid waste in concrete manufacturing. *CLM*. https://doi.org/10.53660/clm-2285-23r46

Geng, X., Zhang, S. Y., & Deng, J. (2007). Characteristics of paper mill sludge and its utilization for the manufacture of medium density fiberboard. *Wood and Fiber Science*, 39(2), 346–351.

Gievers, F., Walz, M., Loewe, K., Bienert, C., & Loewen, A. (2022). Anaerobic co-digestion of paper sludge: Feasibility of additional methane generation in mechanical-biological treatment plants.. *Waste management, 144*, 502-512 . https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.016

Grigorjev, V., Azenha, M., & De Belie, N. (2024). Second Life for Recycled Concrete and Other Construction and Demolition Waste in Mortars for Masonry: Full Scope of Material Properties, Performance, and Environmental Aspects. *Materials, 17*. https://doi.org/10.3390/ma17205118

Gülçek, M. (2023, 27 Nisan). *Türkiye'de geri dönüşümlük kağıt ve kağıt geri dönüşüm sanayii* [Slayt sunumu]. Kağıt Geri Dönüşüm Sanayicileri Derneği (AGED).

Hamzeh, Y., Ashori, A., & Mirzaei, B. (2011). Effects of Waste Paper Sludge on the Physico-Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Wood Flour Composites. *Journal of Polymers and the Environment, 19*, 120-124. https://doi.org/10.1007/s10924-010-0255-3

Hassan, M., Hassan, E. A., Elseoud, W. S. A., & Moustafa, A. M. (2023). Utilization of paper sludge in preparation of high-purity calcium formate. Biomass Conversion and Biorefinery. https://doi.org/10.1007/s13399-023-05216-3

Jele, T. B., Sithole, B., Lekha, P., & Andrew, J. (2022). Characterisation of pulp and paper mill sludge for beneficiation. *Cellulose, 29*, 4629 - 4643. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04578-7

Jindain, S., Supansomboon, S., Wanakamol, P., Pakawanit, P., Phinichka, N., & Boonsombuti, A. (2026). Valorization of fibrous sludge waste in eco-friendly particleboard production using citric-sucrose based bio-adhesives. *Journal of Wood Chemistry and Technology, 46*, 214 - 228. https://doi.org/10.1080/02773813.2026.2671257

Karahan, S., & Karademir, A. (2020). Kâğıt fabrikası arıtım suyu çamurunun diğer atık kâğıtlarla birlikte ambalaj kartonu üretiminde değerlendirilmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(1), 140–145. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.600429.

Karahan, S., & Karademir, A. (2020). Kâğıt fabrikası arıtım suyu çamurunun diğer atık kâğıtlarla birlikte ambalaj kartonu üretiminde değerlendirilmesi. 10(1), 140–145. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.600429

Koken, E., & Buyukkamaci, N. (2010). Kağıt endüstrisi atıksu arıtma tesislerinde çamur işleme ünitelerinin toplam maliyete etkisi. 20(1), 66–76.

Kore, S. D., Rajput, B. L., Agarwal, A. L., & Pawar, A. (2023). Concrete made from waste paper sludge (WPS): A sustainable material. *Technological Sustainability*, *2*(2), 188–205. https://doi.org/10.1108/techs-09-2022-0035

Li, X., ve ark. (2022). A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. *Journal of Building Engineering*, *45*, 103447. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103447

Martins, R. (2025). Toward greener mortars with wastewater sludge as cement replacement. *Inżynieria Mineralna*, *3*(2), 34. https://doi.org/10.29227/im-2025-02-03-34

Mehrvan, K., Jonoobi, M., Ashori, A., & Ahmadi, P. (2024). Optimizing paper sludge content and particle size to enhance particleboard properties. *Scientific Reports, 14*. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72905-y

Meyer, T., & Edwards, E. (2014). Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastewater and sludge.. *Water research, 65*, 321-49 . https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.022

Mir, A. H., & Kumar, R. (2025, June). *A green approach to cement reduction: Utilizing waste paper sludge and wood ash in concrete*. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6889618/v1

Mohammadi, A., Venkatesh, G., Sandberg, M., Eskandari, S., & Granström, K. (2019). Life cycle assessment of combination of anaerobic digestion and pyrolysis: Focusing on different options for biogas use. *Advances in Geosciences*, *49*, 57–66. https://doi.org/10.5194/adgeo-49-57-2019

Mohanapragash, A. G., Kaleeswari, R. K., Baskar, M., Umamaheswari, T., Selvamurugan, M., Ramesh, T., & Madhupriyaa, D. (2026). Sustainable management of paper mill sludge: Insights from advanced instrumental characterization. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 106(4), 896–924. https://doi.org/10.1080/03067319.2025.2527775

Monte, M. C., Fuente, E., Blanco, A., & Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. Waste Management, 29(1), 293–308. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002.

Mustonen, K., Deviatkin, I., Horttanainen, M., & Kärki, T. (2020). Implications of pulp and paper mill primary sludge incineration versus use in composites production: Decision-making based on life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, *2020*, 00046. https://doi.org/10.3808/JEIL.202000046

Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2019). A review of sludge-to-energy recovery methods. Energies, 12(1), Article 60. https://doi.org/10.3390/en12010060.

Panek, R., Szeląg, M., Cwirzen, A., & Habermehl-Cwirzen, K. (2025). The Impact of the High-Energy Grinding of Wood Ash on Its Pozzolanic Activity. *Materials, 18*. https://doi.org/10.3390/ma18133100

Rahman, Md. M., & Kabir, K. B. (2010). Wastewater treatment options for paper mills using recycled paper/imported pulps as raw materials: Bangladesh perspective. *Chemical Engineering Research Bulletin*, *14*(1), 65–68. https://doi.org/10.3329/CERB.V14I1.5236

Siddique, R. (2023, February). Utilization of waste materials and industrial by-products in the development of sustainable greener concrete. *CIC*. https://doi.org/10.29117/cic.2023.0006

Simão, L., Hotza, D., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J. A., & Montedo, O. R. K. (2018). Resíduos da produção de papel e celulose - uma revisão da geração e alternativas de reciclagem. *Cerâmica*, *64*(371), 443–453. https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712414

Tanuja, V. (2025, January). Performance assessment of concrete using paper and wastewater sludge to replace part of the cement. https://doi.org/10.5281/zenodo.14988569

Taramian, A., Doosthoseini, K., Mirshokraii, S. A., & Faezipour, M. (2006). Particleboard manufacturing: an innovative way to recycle paper sludge.. *Waste management, 27 12*, 1739-46 . https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.09.009

Topyüz, B., Yaşar, M., & Karademir, A. (2025). Evaluation of paper factory screen underflow sludge and power plant fly ash in concrete block production: Improvement of mechanical and physical properties. Journal of Innovative Science and Engineering, 9(2), 191–204. https://doi.org/10.38088/jise.1593473

Vaičienė, M., Malaiškienė, J., & Maqbool, Q. (2023). The Impact of Milled Wood Waste Bottom Ash (WWBA) on the Properties of Conventional Concrete and Cement Hydration. Materials, 16. https://doi.org/10.3390/ma16196498

Vashistha, P., Kumar, V., Singh, S. K., Dutt, D., Tomar, G., & Yadav, P. (2019). Valorization of paper mill lime sludge via application in building construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, *211*, 399–415. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.085

Venkatesan, S., Zhang, J., Law, D. W., Gravina, R. J., & Navaratnam, S. (2024). Application of recycled cardboard to construction based on life cycle assessment. *Sustainability*, *16*(19), 8386. https://doi.org/10.3390/su16198386

Yadollahi, R., Hamzeh, Y., Ashori, A., Pourmousa, S., Jafari, M., & Rashedi, K. (2013). Reuse of waste sludge from papermaking process in cement composites. *Polymer Engineering and Science*, *53*(1), 183–188. https://doi.org/10.1002/pen.23283

Zhang, J., Matsumoto, T., & Liang, Z. (2024). Comparative analysis of wastewater-activated sludge recycling system in China: Environmental and economic performances. In *Comparative Analysis of Wastewater-Activated Sludge Recycling System in China* (pp. 187–201). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3897-1_13.

BÖLÜM 7

MANUFACTURİNG TECHNOLOGİES, MATERİAL SELECTİON, PROCESS CHARACTERİSTİCS, AND AUTOMOTİVE APPLİCATİONS OF FİBER-REİNFORCED POLYMER COMPOSİTES

ERCAN ŞİMŞİR[1]

Introduction

Composites are engineering materials that possess properties which their individual components cannot offer on their own; they are formed by combining at least two distinct materials (Şahin et al., 2023a). Fiber-reinforced polymer (FRP) composites are widely used in the aerospace, defense, automotive, construction, maritime, and energy sectors due to their high specific strength, low density, corrosion resistance, and design flexibility (Şimşir et al., 2026; Yavuz et al., 2025). Among these materials, glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites are industrially significant due to their low cost, widespread availability, and favorable mechanical properties that make them well-suited for industrial applications.

The performance of fiber-reinforced composites depends not only on the properties of the constituent fibers and the matrix material but also on the manufacturing method and process

[1] Associate Professor Dr, Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering, Orcid: 0000-0001-6655-2324

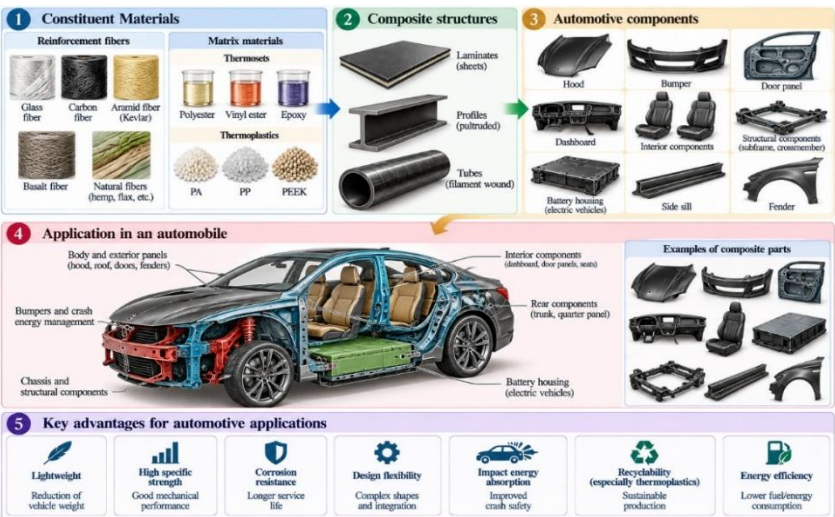
conditions. The process influences the fiber volume fraction, void content, fiber orientation, and the quality of the fiber-matrix interface; these factors, in turn, determine the final mechanical properties and operational performance of the composite (Güven et al., 2022). Therefore, selecting an appropriate manufacturing technology is crucial for achieving the targeted material properties and ensuring production quality.

Fiber-reinforced polymer composites can be manufactured using a variety of processes, such as hand lay-up, spray-up, vacuum assistance resin transfer molding (VARTM), resin transfer molding (RTM), pultrusion, filament winding and thermoplastic composite processing methods. These techniques offer different material, process, and end-product related tradeoffs regarding material process and product process compatibilities, process parameters, production rate, cost, product geometry, and quality features of the end-product.Each process has its own advantages and disadvantages, for example in terms of production volumes, requirements to the mold, labor intensity, or level of control over manufacturing defects.In addition, the application of hybrid composites, which refer to the combination of different types of fibers, can further improve the mechanical and/or functional properties of tailored application-dependent composites (Islam et al., 2024) .

One of the key markets that can benefit from the use of fiber-reinforced composites is the automotive sector, due to the lightweight nature and design flexibility of these materials.

Components such as vehicle bodies and exterior panels, bumpers and crash-energy management systems, interior parts, chassis and structural elements, and battery enclosures for electric vehicles use these materials (Wazeer et al., 2023; Yan & Xu, 2025). Whether composites succeed in automotive use depends on balancing several factors, including strength, cost, crash protection, long-term reliability, and ease of production. When these needs are met, composites can make vehicles lighter and more energy-efficient while allowing multiple functions to be built into fewer parts (Yan & Xu, 2025). The basic components, various structural forms, primary automotive applications, and engineering advantages of fiber-reinforced polymer composites are schematically illustrated in Figure 1.

Figure 1 Schematic representation of the basic components, structural forms, automotive applications, and key engineering advantages of fiber-reinforced polymer composites.



However, factors such as high material and production costs, the difficulty of detecting and repairing damage, and challenges regarding end-of-life recycling have hindered the widespread adoption of fiber-reinforced composite materials. In this context, the development of recycling techniques, the exploration of mechanical recovery options, and the adoption of sustainable manufacturing philosophies have become increasingly critical(De et al., 2024a; Qureshi, 2022) .

This chapter reviews the fundamental manufacturing techniques for fiber-reinforced polymer composites, covering their operating principles, material compatibility, process parameters, as well as their respective advantages and limitations. Furthermore, it examines key criteria affecting production quality, hybrid composite technologies, and issues related to recycling and sustainability. Finally, the applications of these manufacturing techniques within the automotive industry are discussed, comparing the current potential of fiber-reinforced composites in automotive engineering with future development possibilities. The schematic illustrations included in this book chapter were created using AI-powered image generation tools to provide visual explanations of the manufacturing methods and engineering processes.

Component Selection

Reinforcement Fibers; Materials used for reinforcement in fiber-reinforced composites include glass, carbon, aramid (Kevlar),

basalt, and natural fibers (Korku et al., 2025). While glass fiber is the most preferred reinforcement material due to its low cost and wide range of applications, glass fiber-reinforced composites possess significant properties such as high strength, good elasticity, design and molding flexibility, superior dielectric characteristics, and lightness (Korku et al., 2024). Aramid fibers excel in terms of impact toughness and stiffness (Öndürücü et al., 2020a) whereas carbon fiber offers high specific stiffness and strength. Fibers are available in various forms; common types include continuous roving, woven fabric, unidirectional fabric, chopped fiber mat, and hybrid fabrics. The fiber form depends on the chosen manufacturing method; for instance, pultrusion necessitates the use of continuous roving, while hand lay-up employs woven fabric or mats (Yesil & Asi, 2019). Natural fibers (such as hemp, nettle, and sunflower husk) are attracting increasing interest due to sustainability concerns. However, factors such as moisture absorption, interfacial compatibility with the matrix, and the reproducibility of mechanical properties require careful selection of the process and matrix when using natural fibers (Büyükkaya, 2019).

Matrix Materials; Matrix materials are divided into two primary categories: thermoset and thermoplastic matrices (Şahin et al., 2023b). Thermoset matrices (polyester, vinyl ester, epoxy, benzoxazine) are widely preferred for structural applications due to their low processing viscosity, excellent fiber-wetting capability, and high dimensional stability. Polyester resin is the most commonly

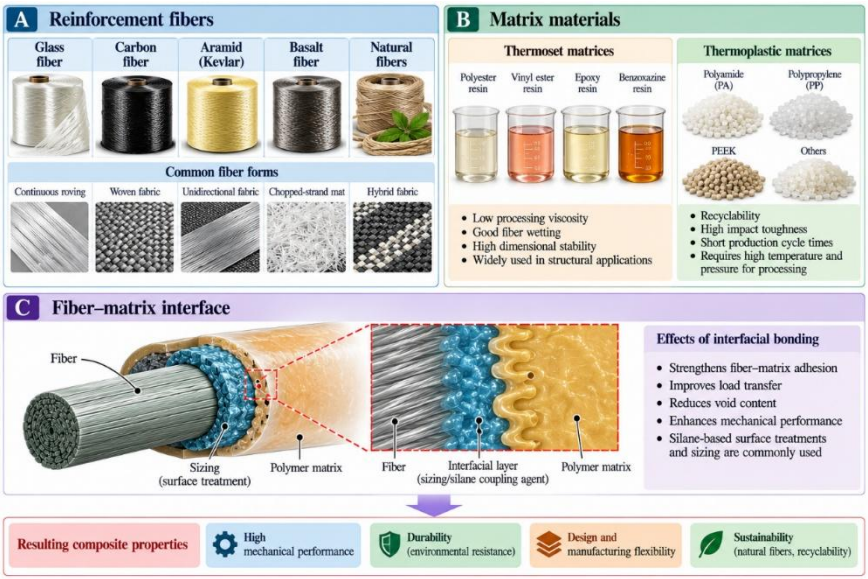
used thermoset matrix due to its low cost, while epoxy offers superior mechanical properties and chemical resistance (Korku et al., 2024). Thermoplastic matrices (nylon, polypropylene, PEEK, etc.) offer advantages such as recyclability, high impact toughness, and short production cycle times. However, due to their high melt viscosity, achieving effective fiber wetting is more challenging, and processing requires high temperatures and pressures. The processing of thermoplastic composite materials specifically those reinforced with continuous fibers is carried out using techniques such as thermocompression, tape winding, compression molding, autoclave processing, and diaphragm forming(Şahin et al., 2023a).

Fiber-Matrix Interface; The quality of the interface between the fiber and the matrix directly determines load transfer and, consequently, the mechanical performance of the composite. Silane-based surface treatments and sizings are the industrial standard for strengthening the fiber-matrix bond. It has been experimentally demonstrated that the addition of Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles improves the mechanical properties of glass fiber-reinforced epoxy composites produced via the vacuum-assisted resin infusion method (Güven et al., 2022). Similarly, it has been reported that treating silica (SiO_2) nanoparticles with a silane coating strengthens the fiber-matrix interfacial bond and reduces void content. The influence of the type and form of the reinforcing fiber, the properties of the matrix material, and the fiber-matrix interfacial interactions on the

performance of fiber-reinforced polymer composites is shown schematically in Figure 2.

Drop weight testing machines are meticulously engineered to have finely controlled test conditions. This test is carried out by just dropping a mass from a certain height. The sample can be loaded in compression or prestressed depending on the way it is anchored to its structure.The specimen carries kinetic energy equal to the potential energy possessed by the same impact device before the weight at its end is released. Testing machines may have an acceleration unit that increases the impact energy through an elastic mechanism. Beyond this subsystem, some can be equipped with hardware such as an environmental chamber that alters the environmental conditions. Therefore, it changes its properties and characteristics, or a recoil mechanism, mechanisms that prevent the impact device from receiving further impacts after the initial impact (preventing subsequent impacts). To measure the impact load in such tests, piezoelectric sensors, such as an accelerometer or load cell, are typically used. These sensors generate an electrical charge (piezoelectricity) that is directly proportional to the mechanical load applied to a piezoelectric material such as crystal quartz or lead zirconium titanate (PZT). Since there are no moving parts, the structure is very solid and compact and high dependability in measurement can be expected (Tressler et al., 1998).

Figure 2. Schematic representation of reinforcement fibers, thermoset and thermoplastic matrix materials, and the fiber–matrix interface in fiber-reinforced polymer composites.

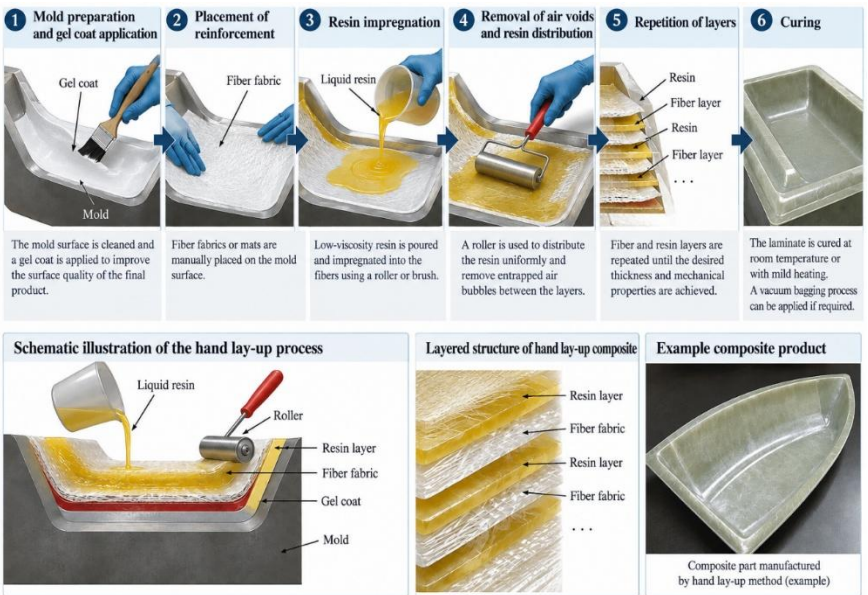


Basic Production Methods

The Hand Lay-Up Method is the oldest and most widely used open-mold technique for the production of fiber-reinforced polymer composites. In this process, fiber fabrics or mats are manually placed onto an open mold surface, and liquid resin is applied by hand using a roller or brush to saturate the reinforcement. A gelcoat is typically applied to the mold surface first to enhance the surface quality of the final product. Layers are added successively until the desired thickness is achieved; the composite is then cured either at room temperature or through the application of mild heat (Şimşir et al., 2024).

In some applications, a vacuum process is applied after hand lay-up to eliminate air gaps between the layers. For instance, in the production of Kevlar-glass fiber/epoxy hybrid composite plates reinforced with alumina and silica, the hand lay-up method was employed, followed by a 12-hour vacuum process (Öndürücü et al., 2020b). The basic production stages of the hand lay-up method and a schematic representation of the resulting laminated composite structure are presented in Figure 3.

Figure 3. Schematic representation of the production stages of fiber-reinforced polymer composites via the hand lay-up method and their layered composite structure.



Material Compatibility: The hand lay-up method is compatible with virtually all forms of fibers, including woven fabrics, unidirectional fabrics, chopped strand mats, and hybrid

fabrics (Öndürücü et al., 2020b) Low-viscosity polyester or epoxy resins are typically used as the matrix. Natural fiber-reinforced composites can also be produced using this method; for instance, nettle fiber/polymethyl methacrylate composites have been successfully manufactured via the hand lay-up technique.

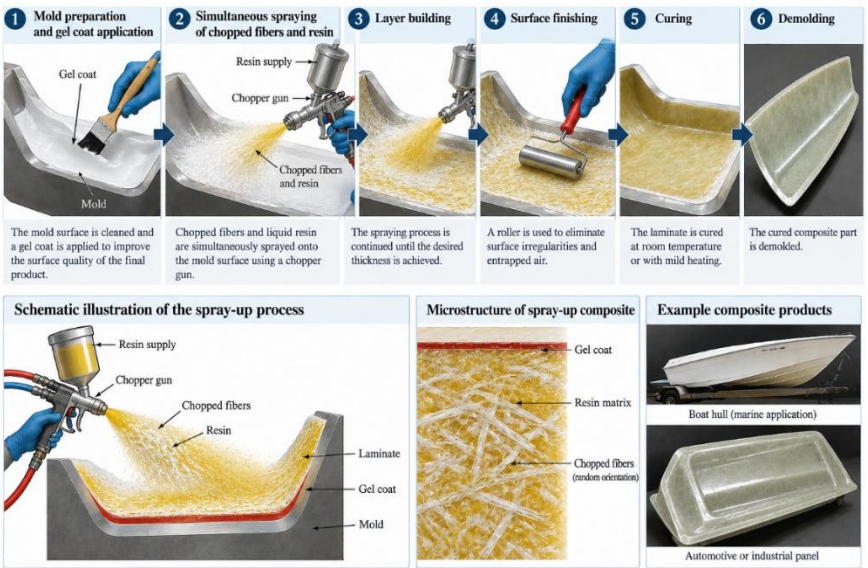
Advantages and Limitations: The primary advantages of the hand lay-up method include low mold costs, suitability for producing large parts with complex geometries, a requirement for low capital investment, and a wide range of available materials (Hasyim et al., 2023). On the other hand, this method also has significant limitations: controlling the fiber volume fraction and void content is difficult, product quality depends on the operator's skill, and repeatability is low. Furthermore, when polyester resin is used, styrene emissions pose an environmental concern.

Regarding application areas, the hand lay-up method is widely used for boat hulls, automotive components, architectural panels, irrigation canal linings, prototype parts, and small-batch production. In Indonesia, a combination of hand lay-up and spray-up techniques was employed to manufacture GFRP materials for use as irrigation canal linings; the average surface roughness (Ra) of the produced materials was reported to range approximately between 5.19 and 5.97 μm (Hasyim et al., 2023).

The spray-up method is a semi-automated variation of the hand lay-up process. In this method, short fibers chopped by a

specialized gun and resin are simultaneously sprayed onto the surface of an open mold. The fiber-chopping process is performed by a separate mechanism integrated into the spray gun; any irregularities that may form on the surface following the spraying process are smoothed out using a roller. The fundamental stages of the production process in the spray-up method, which begins with the simultaneous application of chopped fibers and liquid resin onto the mold surface, are shown schematically in Figure 4.

Figure 4. Schematic representation of the production stages, internal composite structure, and example application areas of fiber-reinforced polymer composites manufactured via the spray-up method.



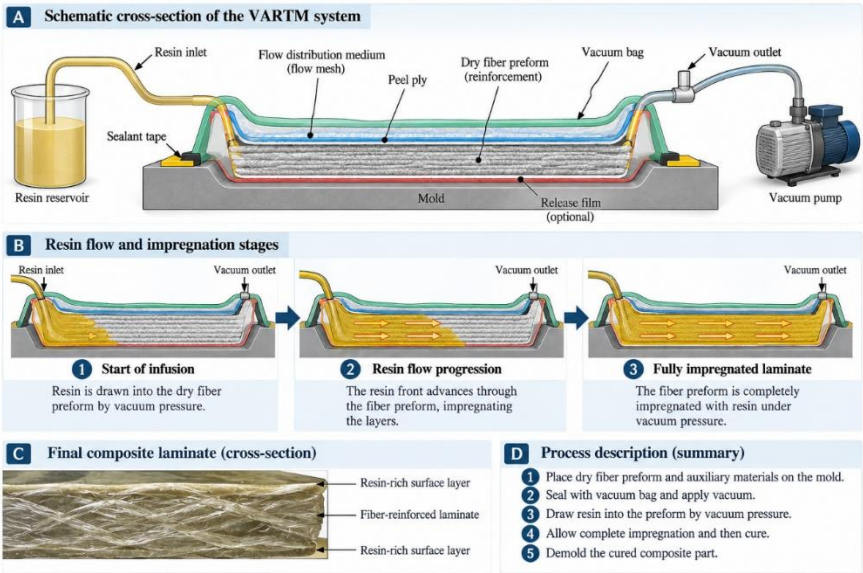
Advantages and Limitations: The spray-up method offers faster production capabilities compared to the hand lay-up method and is advantageous for covering large surface areas (Hamamcı,

2018; Hasyim et al., 2023) Due to the use of chopped fibers, the mechanical properties are lower than those of composites reinforced with continuous fibers. Since fiber orientation is random, it is not possible to control anisotropic properties. Furthermore, styrene emission remains a significant environmental concern with this method.

Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM/vacuum infusion) is a process based on placing dry fiber preforms into a closed mold and drawing resin into the preforms with the aid of vacuum pressure. In this method, the fiber preform is covered by a vacuum bag or a rigid upper mold; the negative pressure generated by a vacuum pump allows the resin to penetrate between the fibers (Yavuz et al., 2024).

In the production of glass fiber-reinforced epoxy composites using the vacuum-assisted resin infusion method, composites containing 30%, 40%, 50%, and 60% glass fiber by volume were successfully manufactured; it was observed that maximum stress, tensile elongation, elastic modulus, and impact strength properties improved as the fiber content increased. The same study reported that successful composite production via the VARTM method could be achieved with glass fiber contents of up to 60%. In the VARTM process, the impregnation of a dry fiber preform with resin under vacuum, the progression of the resin flow, and the formation of the final composite structure are shown schematically in Figure 5.

Figure 5. Schematic representation of the system components, resin infusion stages, and the resulting composite structure for the vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) method.



Process Parameters and Quality Control, In the VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) process, critical parameters include resin viscosity, vacuum integrity, fiber architecture, resin degassing, and the curing cycle. Precise control of these parameters is essential for minimizing void content and ensuring uniform fiber wetting. A study on glass fiber-reinforced epoxy composite plates produced via VARTM and enhanced with Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticlesdemonstrated experimentally that the addition of these nanoparticles improves both mechanical properties and buckling resistance.

Advantages and Applications, The primary advantages of the VARTM process include significantly lower void content compared

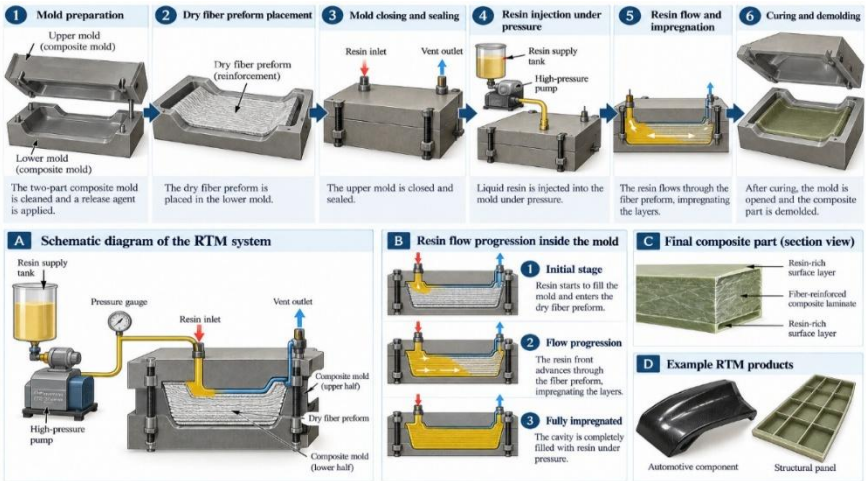
to open-mold methods, high-quality surface finishes on both sides, a consistent and repeatable fiber volume fraction, and low volatile emissions. This method is preferred for the production of large structural panels, bridge decks, wind turbine blades, and components for the aerospace and construction sectors that require high quality.

Resin Transfer Molding (RTM), Resin transfer molding (RTM) is based on placing the dry fiber preform in a two-piece closed mold and injecting the resin under pressure. While open molds are generally used in the hand lay-up method, two-piece closed molds are preferred in the RTM method. RTM molds can be produced from metal or composite materials, and composite molds can provide a cost advantage compared to metal molds in certain applications. The RTM method offers faster production and longer mold life compared to the hand lay-up system (Ekuase et al., 2022; Rajak et al., 2021a).

Closed-mold approaches, similar to those used in the RTM (Resin Transfer Molding) process, are also employed in the production of glass-carbon hybrid fiber-reinforced I-profiles manufactured via the pultrusion method. In studies where organic fiber-reinforced, epoxy-matrix composite materials were produced using the RTM process, it was observed that their impact toughness was lower compared to that of synthetic fiber-reinforced composites. The fundamental production stages of the RTM method placing a dry fiber preform into a closed mold, injecting resin under pressure,

impregnating the fibers with the resin, and curing are shown schematically in Figure 6.

Figure 6. Schematic representation of the production stages of fiber-reinforced polymer composites via the resin transfer molding (RTM) method, the resin flow mechanism, and the resulting composite structure.

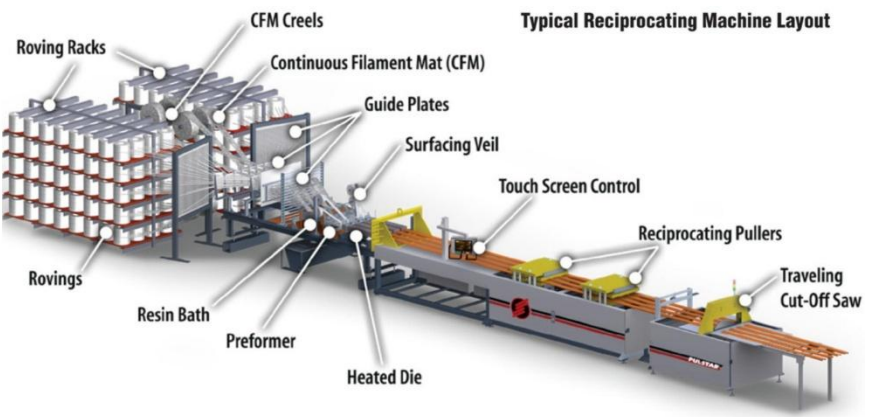


Advantages and Limitations: The advantages of the RTM method include low volatile emissions due to the use of a closed mold, high-quality surface finish on both sides, high dimensional accuracy, and suitability for medium-to-high production volumes. Its limitations include higher mold costs compared to the hand lay-up process and the difficulty of preparing preforms for complex geometries (Shanthar et al., 2026; Torres, 2019).

Pultrusion is the most widely used continuous manufacturing method for producing fiber-reinforced plastic profiles with a constant cross-section. In this process, continuous fiber rovings

and/or fabrics are passed through a resin bath to become impregnated; they are then pulled through a heated die, where curing takes place, resulting in a profile with a constant cross-section. (Volk et al., 2022). Hybrid I-profiles with a polyester matrix, reinforced with glass and carbon fibers, were produced using the pultrusion method; the effects of different fiber configurations on impact behavior were investigated experimentally. It has been reported that when hybrid mats are used for the outer layers of glass-fiber-reinforced composite materials, there is a 111% increase in notched impact toughness compared to standard glass-fiber-reinforced composites (Chen & Lien, 2006). The basic production stages of the pultrusion process consisting of the impregnation of continuous fibers with resin, preforming, curing in a heated die, pulling, and cutting are shown schematically in Figure 7.

Figure 7. Schematic representation of the production stages for continuous fiber-reinforced polymer composites via the pultrusion process.



Process Parameters: In the pultrusion method, the critical process parameters are die temperature, pulling speed, resin formulation, and preform compaction. These parameters directly determine the fiber volume fraction, void content, and mechanical homogeneity. In hybrid pultrusion applications, a UV-curing variant may be preferred to prevent heat-sensitive fiberssuch as nylon from sustaining damage at high temperatures (Gadam et al., 2000) .

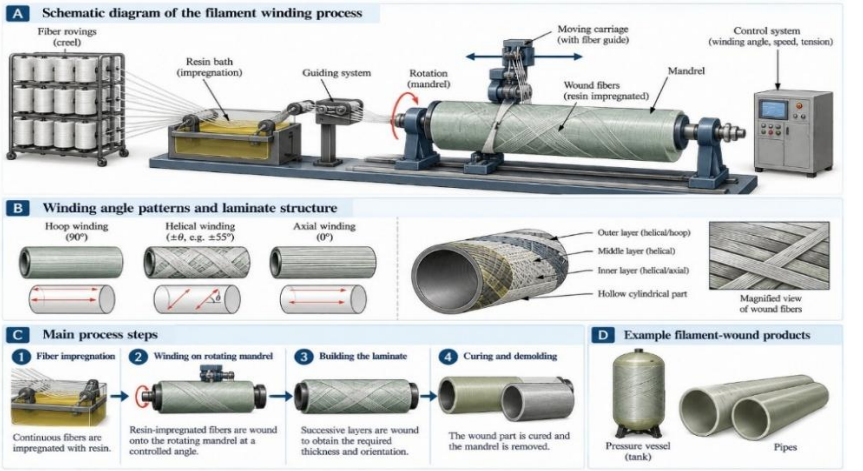
Hybrid Pultrusion Applications: The pultrusion process also enables the production of hybrid profiles that incorporate different types of fibers. In a study where hybrid I-profiles reinforced with glass and carbon fibers were manufactured via pultrusion, it was found that the types of fiber, matrix, and mat significantly influence the impact resistance of the hybrid composite materials (Yesil & Asi, 2019). Furthermore, a "pultrusion-winding-pultrusion" hybrid method has been developed to enhance the compressive capacity and ductility of GFRP (glass fiber- Advantages and Areas of Application: The primary advantages of the pultrusion method include continuous production, a high fiber volume fraction, low unit cost, and high dimensional repeatability (Onder & Asi, 2019). This method has become the industrial standard for the production of long, constant-cross-section products, such as FRP profiles, poles, rods, bridge components, and structural sections (Vedernikov et al., 2020) .

Filament winding is based on the process of winding continuous fiber strands impregnated with resin onto a rotating

mandrel at controlled angles. As the number of wound fiber layers increases, the product hardens, after which the rotating mold is removed. This method is typically used to manufacture tanks, pipes, and pressure vessels with circular geometries (Azeem et al., 2022) .

Glass/epoxy pipes have been produced via the filament winding method with a fiber orientation of ±55°, and their mechanical behavior in a seawater environment has been investigated. In a study where CNT-reinforced glass/epoxy pipes were manufactured using the filament winding technique, it was determined that the incorporation of CNTs into the composite structure reduced delamination damage and resulted in a 21% increase in strength under dry conditions, as well as an approximately 18% increase in strength during long-term use (Taşyürek & Ekinci, 2021). Figure 8 presents the basic production stages of the filament winding method which consist of impregnating continuous fibers with resin, winding them onto a rotating mandrel at specific angles, forming a laminate structure, and curing along with a schematic illustration of various winding angles.

Figure 8. Schematic representation of the filament winding method, including the production setup, basic process stages, various fiber winding angles, laminate structure, and examples of applications.



Winding Angle and Laminate Design, In the filament winding process, the winding angle (circumferential/axial) is the fundamental design parameter that determines the anisotropic stiffness and strength properties of the laminate. Since circumferential stresses exceed axial stresses in pipes subjected to internal pressure, a "hoop-dominant" laminate design is achieved by increasing the proportion of circumferential winding. Full-scale internal pressure tests have confirmed that GFRP pipes manufactured via the filament winding process exhibit predominantly linear elastic behavior within their service range, and that circumferential stresses consistently exceed axial stresses (Ilincă et al., 2026).

Advantages and Areas of Application, The advantages of the filament winding method include a high fiber volume fraction, the ability to design anisotropic properties through the control of winding angles, suitability for the production of large-diameter cylindrical components, and high repeatability. This method is widely used in applications such as chemical storage tanks, pipelines, pressure vessels, and LOHC (liquid organic hydrogen carrier) tanks (Azeem et al., 2022).

Thermoplastic Composite Manufacturing Methods: The production of thermoplastic composite materials presents different process requirements compared to thermoset composites. Due to high melt viscosity, fiber wetting is challenging, and the processing necessitates high temperatures and pressures. Nevertheless, advantages such as recyclability, high impact toughness, and short production cycle times are driving increased interest in thermoplastic composites (Li et al., 2024) .

Processing Methods for Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites: The following are the processing methods for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: (Li et al., 2024);

- Thermoforming: Heat a pre-consolidated thermoplastic sheet, then press it into the desired shape using a mold.
- Tape winding: Wrap heated thermoplastic prepreg tape around a mandrel to build up the part.

- Compression molding: Shape thermoplastic composite material by applying substantial pressure in a mold
- Autoclave processing: Consolidate the material using high pressure and elevated temperatures.
- Diaphragm forming: Use a flexible membrane to press the material into shape.

Hybrid Yarn Technologies: Hybrid yarn technologies were developed exploiting the idea of combining reinforcing fibres and a matrix in the solid state to overcome the high melt viscosity limitation for thermoplastic composite processing. Hybrid yarns can be manufactured through a range of processes including ring spinning, commingling, coating and wrapping processes.Hybrid yarns can also be produced by commingling or plied-and-twisted. It is stated that reinforced composites with commingled or plied and twisted yarns have a much higher tensile strength than other samples; in fact a composite structure with commingled yarns was 80% stronger in a bidirectional tensile test.

In a hybrid yarn structure, the fiber content is an extremely important parameter regarding the physical properties and mechanical design of the composite; in practice, fiber contents exceeding 30% can be achieved in continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. This limitation may only apply to specific hybrid yarn systems or production conditions. A high fiber content and a homogeneous distribution of the components are among the

primary objectives in the production of thermoplastic composites (Svensson et al., 1998). The primary manufacturing techniques for continuous fiber reinforced thermoplastic composites, along with the hybrid yarn technologies used to combine fiber and thermoplastic matrix components, are shown schematically in Figure 9.

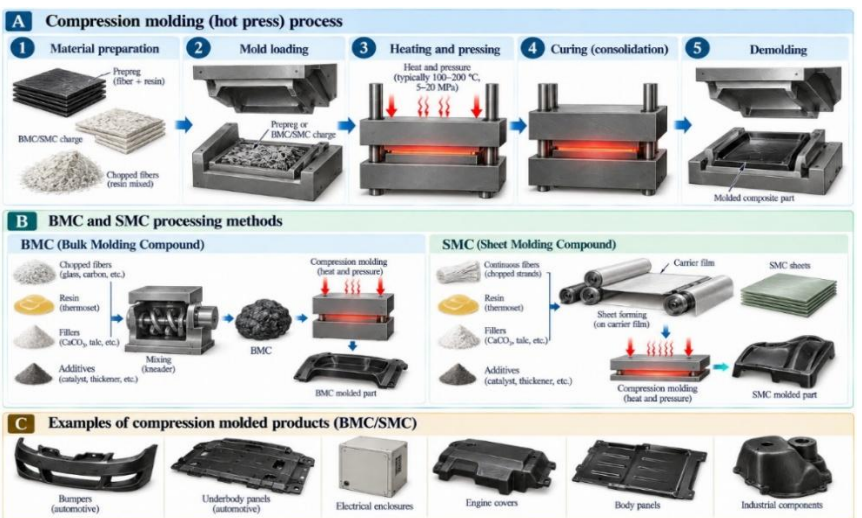
Figure 9. Schematic representation of production techniques for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites (A) and hybrid yarn production methods (B).



Compression Molding and BMC/SMC Methods: Compression molding is a technique used to manufacture fiber-reinforced composites by molding them under heat and pressure. In a study focused on the production of glass fiber/epoxy composite plates, prepregs prepared using epoxy resin and a hardener were shaped via the compression molding method, and the samples were cured at 120 °C under a pressure of 8–10 bar for one hour (Mertgenç Yoldaş, 2025).

In research on the mechanical recovery of thermoset-based glass fiber-reinforced polymer (GFRP) panels, recycled materials were used to replace virgin fibers in bulk molding compound (BMC) formulations at mass-based proportions of 4%, 8%, 12%, and 16%. The study reported that the reduction in tensile test results for samples containing recycled glass fibers remained below 5% when compared to the original (virgin) samples (Balıkoğlu et al., 2018). The production processes for BMC and SMC which involve material preparation, placement into the mold, shaping under heat and pressure, curing, and demolding as applied in the manufacturing of fiber-reinforced composites via the hot-pressing method, are shown schematically in Figure 10.

Figure 10 Schematic representation of the production stages for fiber-reinforced polymer composites via the compression molding method, including BMC and SMC manufacturing processes and examples of applications.



Advantages and Applications: The advantages of the hot press method include short cycle times, good surface quality, high dimensional accuracy, and suitability for medium-to-high production volumes. This method is widely used in applications such as automotive components (bumper beams, body panels), electrical/electronic housings, and industrial parts (Campbell, 2003).

Conclusions

A literature review on the manufacturing methods for fiber-reinforced polymer composites reveals that the production process has a decisive impact on the final product's quality, mechanical properties, cost, and manufacturability. When selecting a manufacturing method, factors such as part geometry, production volume, fiber orientation, resin penetration into the fiber structure, void formation, and process repeatability must be considered collectively. Consequently, it is not possible to identify a single ideal manufacturing method applicable to every application; the most suitable method depends on the balance between the technical requirements of the part and the production conditions (De et al., 2024b; Maiti et al., 2022).

Hand lay-up and spray-up methods can be used for the manufacturing of large-sized parts with low production volumes, owing to their low initial equipment costs and adaptability to various geometries. However, the reliance on manual labor can lead to inconsistencies in the distribution of resin and reinforcement

materials, limitations in production speed, and variability in the properties of the final products. In contrast, closed-mold processes allow for greater control over resin infusion and molding conditions, thereby contributing to higher quality and improved repeatability. Nevertheless, investments in molds and equipment are cost factors that must be taken into account when selecting a manufacturing method (Maiti et al., 2022).

VARTM and RTM methods are notable for the control they offer over resin flow and the process of wetting the fibers with resin. While RTM is based on placing a dry fiber preform into a two-part closed mold and injecting resin into the mold cavity, the VARTM process utilizes vacuum pressure to facilitate the movement of resin through the fiber structure. RTM can be a suitable option for medium-scale production volumes and parts requiring controlled mold surfaces, whereas VARTM offers the advantage of flexibility in the manufacturing of large-scale composite structures. However, non-uniform resin flow, pressure differentials within the mold, and the formation of voids are factors that can affect product quality in both methods (Maiti et al., 2022; Tamakuwala, 2021).

Pultrusion and filament winding methods demonstrate the significant role that the geometry of a composite part and its load-bearing requirements play in the selection of a manufacturing process. Pultrusion enables the production of profiles with a constant cross-section by continuously pulling fibers after they have been impregnated with resin through a heated die. This characteristic

makes the method suitable for continuous and repeatable production. Filament winding, on the other hand, is based on winding continuous fibers at specific angles onto a rotating mandrel; it can be used for components with axial symmetry, such as pipes, tanks, and pressure vessels. In the filament winding process, the fiber angle and the stacking sequence are crucial for designing the composite's capacity to withstand loads from different directions (Maiti et al., 2022; Rajak et al., 2021b).

The development of thermoplastic and recyclable composite systems is an important area of research in terms of material sustainability. Since conventional thermoset matrices form a cross-linked structure after curing, they cannot be remelted and reshaped; this can complicate the recovery of composites that have reached the end of their service life. However, the recycling of composites does not depend solely on the type of matrix; factors such as the recoverability of fibers, the separation of materials, the properties of the recovered fibers, and economic viability must also be considered. Therefore, when evaluating manufacturing methods, one should account not only for initial mechanical performance and production costs but also for the end-of-life management of the product (De et al., 2024b; Maiti et al., 2022)

As a result, determining the appropriate method in the production of fiber reinforced polymer composites; It requires evaluating part geometry, production volume, quality expectation, mechanical performance, cost and environmental impacts together.

While methods such as hand lay-up and spraying provide design flexibility and low initial costs, resin transfer methods such as RTM and VARTM stand out in terms of controlled molding and quality targets. While pultrusion and filament winding enable continuous or oriented fiber production for specific geometries, studies on sustainable composites reveal the importance of material selection and end-of-life processes. In future research, comparing production methods in terms of void ratio, fiber volume ratio, mechanical properties and production time, as well as evaluating energy consumption, material loss and recycling performance will contribute to the development of more efficient and sustainable composite production processes (De et al., 2024b; Maiti et al., 2022; Rajak et al., 2021b).

References

Azeem, M., Ya, H. H., Alam, M. A., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., Gemi, L., Khan, R., Ahmed, T., Ma, Q., Sadique, M. R., Mokhtar, A. A., & Mustapha, M. (2022). Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review. *Journal of Energy Storage*, *49*, 103468. https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.103468

Balıkoğlu, F., Kerem Demircioğlu, T., Ataş, A., Beyaz, S., Arslan, N., Üniversitesi, B., Fakültesi, M., Bölümü, M. M., Fakültesi, F. E., Bölümü, K., Celal, M., Üniversitesi, B., Ferdi, H., Fakültesi, T., Mühendisliği, E. S., Manisa, T., & Yazarın, S. (2018). Termoset Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Polimer CTP Atıkların Mekanik Geri Dönüşüm Ürünlerinin Sıcak Pres Kalıplama Bileşiminde BMC

Tekrar Değerlendirilmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, *8*(1), 168–180. https://doi.org/10.7212%2Fzkufbd.v8i1.936

Büyükkaya, K. (2019). Isırgan-polimetilmetakrilat kompozitlerin mekanik testlerinde lif kalınlığının kritik lif oranına etkisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *9*(1), 111–122. https://doi.org/10.31466/KFBD.554085

Campbell, F. C. (2003). Manufacturing Processes for Advanced Composites. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, 1–517. https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-415-2.X5000-X

Chen, C. H., & Lien, K. C. (2006). Pultruded hybrid fibre (glass/carbon) reinforced unsaturated polyester composites: Mechanical and thermal properties. *Polymers and Polymer Composites*, *14*(2), 155–163. https://doi.org/10.1177/096739110601400204;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

De, B., Bera, M., Bhattacharjee, D., Ray, B. C., & Mukherjee, S. (2024a). A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management. *Progress in Materials Science*, *146*, 101326. https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2024.101326

De, B., Bera, M., Bhattacharjee, D., Ray, B. C., & Mukherjee, S. (2024b). A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management. *Progress in Materials Science*, *146*, 101326. https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2024.101326

Ekuase, O. A., Anjum, N., Eze, V. O., & Okoli, O. I. (2022). A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing. *Journal of Composites Science 2022, Vol. 6, Page 172*, *6*(6), 172. https://doi.org/10.3390/JCS6060172

Gadam, S. U. K., Roux, J. A., McCarty, T. A., & Vaughan, J. G. (2000). The impact of pultrusion processing parameters on resin pressure rise inside a tapered cylindrical die for glass-fibre/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, *60*(6), 945–958. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00181-5

Güven, C., Kisa, M., Özen, M., & Demircan, G. (2022). Al2O3 ve TiO2 nanopartikül katkısının cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerine ve burkulma davranışına etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, *7*(3), 161–172. https://doi.org/10.46578/HUMDER.1148418

Hamamcı, B. (2018). [논문]Yeşil kompozitlerde Biyopolimerlerin Kullanımının Önemi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *8*(1), 12–24. https://doi.org/10.31466/KFBD.395192

Hasyim, S., Salam, N., Pallu, M. S., & Maricar, F. (2023). Study on the Manufacturing of Composite Materials Made from Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) in Indonesia for Use as Lining in Open Channels. *Key Engineering Materials*, *959*, 207–219. https://doi.org/10.4028/P-95WREA

Islam, T., Chaion, M. H., Jalil, M. A., Rafi, A. S., Mushtari, F., Dhar, A. K., & Hossain, S. (2024). Advancements and challenges in natural fiber-reinforced hybrid composites: A comprehensive review. *SPE Polymers*, *5*(4), 481–506. https://doi.org/10.1002/PLS2.10145;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Ilincă, C. N., Ramadan, I. N., Doukeh, R., Neacsa, A., Diniță, A., Laudacescu, E. V., Petrescu, M. G., Bădicioiu, M., & Gavrilă, Ștefan A. (2026). Experimental Assessment of Stress–Strain Response in Filament-Wound GFRP Pipes Under Internal Pressure Loading. *Materials*, *19*(3), 639. https://doi.org/10.3390/MA19030639/S1

Korku, M., Feyzullahoğlu, E., & İlhan, R. (2024). Farklı Türlerde Polyester ve Çekme Katkısı İçeren Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerde Çevresel Koşulların Aşınma Davranışlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, *27*(1), 197–209. https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1105329

Korku, M., İlhan, R., & Feyzullahoğlu, E. (2025). Investigation of effects of environmental conditions on wear behaviors of glass fiber reinforced polyester composite materials. *Polymer Composites*, *46*(1), 355–371. https://doi.org/10.1002/PC.28992;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:15480569;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Li, J., Huang, Q., Yin, Y., Xu, J., Jiang, Y., & Du, W. (2024). The technology and current applications of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymer Composites*, *45*(15), 13480–13498. https://doi.org/10.1002/PC.28764;ISSUE:ISSUE:DOI

Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J., & Karim, N. (2022). Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Advanced Sustainable Systems*, *6*(11), 2200258. https://doi.org/10.1002/ADSU.202200258;WGROUP:STRING:PUBLICATION

Mertgenç Yoldaş, D. (2025). Investigation of Diffusion Induced Fiber–Matrix Interface Damages in Adhesively Bonded Polymer Composites. *Polymers*, *17*(12), 1672. https://doi.org/10.3390/POLYM17121672

Öndürücü, A., Can, G., & Kelimeler, A. (2020a). Fonksiyonellendirilmiş Alümina ve Silika Katkılı Kevlar-Cam Elyaf/Epoksi Reçineli Hibrit Kompozitlerin Cam ve Kevlar Yüzeylerine Uygulanan Darbe Enerjilerinin Darbe Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *24*(3), 707–717. https://doi.org/10.19113/SDUFENBED.638388

Öndürücü, A., Can, G., & Kelimeler, A. (2020b). Fonksiyonellendirilmiş Alümina ve Silika Katkılı Kevlar-Cam Elyaf/Epoksi Reçineli Hibrit Kompozitlerin Cam ve Kevlar Yüzeylerine Uygulanan Darbe Enerjilerinin Darbe Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *24*(3), 707–717. https://doi.org/10.19113/SDUFENBED.638388

Qureshi, J. (2022). A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 16855*, *14*(24), 16855. https://doi.org/10.3390/SU142416855

Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021a). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3721*, *13*(21), 3721. https://doi.org/10.3390/POLYM13213721

Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021b). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers 2021, Vol. 13, Page 3721*, *13*(21), 3721. https://doi.org/10.3390/POLYM13213721

Şahin, E., Boztoprak, Y., & Yazıcı, M. (2023a). Polimer ve Polimer Kompozit Yapılarda Kendi Kendine İyileşme Yöntemleri. *Farklı Mühendislik Yaklaşımlarıyla Kompozit Malzemeler III*. https://doi.org/10.58830/OZGUR.PUB251.C1223

Şahin, E., Boztoprak, Y., & Yazıcı, M. (2023b). Polimer ve Polimer Kompozit Yapılarda Kendi Kendine İyileşme Yöntemleri. *Özgür Yayınları*, 1–14. https://doi.org/10.58830/OZGUR.PUB251.C1223

Shanthar, R., Prosser, R., Potluri, P., Abeykoon, C., & Advani, S. G. (2026). Modelling and simulation of the polymer resin flow through fibres during Resin Transfer Moulding: a comprehensive review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *208*, 109839. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2026.109839

Şimşir, E., Akçin Ergün, Y., & Yavuz, İ. (2024). Investigation of Damping Properties of Natural Fiber-Reinforced Composites at Various Impact Energy Levels. *Polymers 2024, Vol. 16, Page 3553*, *16*(24), 3553. https://doi.org/10.3390/POLYM16243553

Şimşir, E., Yavuz, I., & Serbest, E. (2026). Mechanical Performance and Energy Absorption Characteristics of Sustainable Bio-based Luffa/Woven Carbon Fabric Hybrid Epoxy Composites. *BioResources*, *21*(2), 4919–4938. https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/25519

Svensson, N., Shishoo, R., & Gilchrist, M. (1998). Manufacturing of thermoplastic composites from commingled yarns - A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *11*(1), 22–56. https://doi.org/10.1177/089270579801100102;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Tamakuwala, V. R. (2021). Manufacturing of fiber reinforced polymer by using VARTM process: A review. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 987–993. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.11.102

Taşyürek, M., & Ekinci, Ş. (2021). Deniz içi nakil hatlarında polimer esaslı CNT takviyeli kompozit boruların kullanılabilirliği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *11*(2), 609–621. https://doi.org/10.17714/GUMUSFENBIL.767802

Torres, M. (2019). Parameters' monitoring and in-situ instrumentation for resin transfer moulding: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *124*, 105500. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105500

Tressler, J. F., Alkoy, S., & Newnham, R. E. (1998). Piezoelectric sensors and sensor materials. *Journal of Electroceramics*, *2*(4), 257–272. https://doi.org/10.1023/A:1009926623551/METRICS

Vedernikov, A., Safonov, A., Tucci, F., Carlone, P., & Akhatov, I. (2020). Pultruded materials and structures: A review. *Journal of Composite Materials*, *54*(26), 4081–4117. https://doi.org/10.1177/0021998320922894

Volk, M., Yuksel, O., Baran, I., Hattel, J. H., Spangenberg, J., & Sandberg, M. (2022). Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies. *Composites Part B: Engineering*, *246*, 110135. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2022.110135

Wazeer, A., Das, A., Abeykoon, C., Sinha, A., & Karmakar, A. (2023). Composites for electric vehicles and automotive sector: A review. *Green Energy and Intelligent Transportation*, *2*(1), 100043. https://doi.org/10.1016/J.GEITS.2022.100043

Yan, L., & Xu, H. (2025). Lightweight composite materials in automotive engineering: State-of-the-art and future trends. *Alexandria Engineering Journal*, *118*, 1–10. https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2024.12.002

Yavuz, I., Barıs¸, B., & Barıs¸s¸enol, B. (2024). *Investigation of mechanical behavior of glass fiber reinforced extruded polystyrene core material composites*. https://doi.org/10.1039/d4ra01740d

Yavuz, I., Şenol, B., & Şimşir, E. (2025). Examination of energy damping behavior of fiberglass reinforced sandwich structures with extruded polystyrene core material. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, *73*(3), e153430–e153430. https://doi.org/10.24425/BPASTS.2025.153430

Yesil, O., & Asi, O. (2019). Investigation of the Impact Behavior of Pultruded Hybrid Composite Profiles. *International Journal of Scientific and Technological Research*, *5*(5), 26–33. https://doi.org/10.7176/JSTR/5-5-04


BİDGE