

BİDGE Yayınları

Savunma Sanayisinde ve Endüstride İleri Üretim Teknikleri

Editör: Prof. Dr. Hasan Köten

ISBN: 978-625-372-444-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2024

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



İçindekiler

Savunma Sanayii Sektöründe Sistem Mühendisliği Süreçleri Ve V Modelin Uygulanması.....	6
Ali ÜZER	6
Bakır Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu	31
Barış DOĞAN	31
Özgür ÖZGÜN.....	31
Zülküf BALALAN	31
Ömer EKİNCİ	31
Kompozit Malzemelerde Yaşlandırma İşlemleri ve Güncel Yaşlandırma İşlemi Uygulamaları	58
Ersan KIRAR	58
Park Fren Kolu Dişli Elemanın Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi Ve Topoloji Optimizasyonu	75
Funda KAHRAMAN	75
Mehmet KÜÇÜK	75
Denizcilik Endüstrisinde Kullanılan İleri Kaynak Teknikleri ve Uygulama Alanları.....	95
Şakir ALTINSOY.....	95
Nuray BEKÖZ ÜLLEN.....	95
Hafifletilmiş Çelik Dişlilerde aktif taraf kavrama açısının ve rim kalınlığının tek diş rijitliğine etkilerinin incelenmesi	112
Tufan Gürkan YILMAZ.....	112
Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin İşlenmesi	123
Yılmaz KÜÇÜK.....	123
Volkan KAYA.....	123

S960ql Çeliklerde Kaynak Boyunun Çekme Mukavemetine Etkisi	162
Eda BÜYÜKKAYA	162
Standart Sürüş Çevrimlerinin Karşılaştırılarak Performanslarının Değerlendirilmesi.....	184
Tevfik ATAMAN.....	184
Müslüm GÜR ²	184
Plastik Parçaların Üretiminde Tasarım İlkeleri ve Uygulamaları	197
Tuğçe TEZEL.....	197
Volkan KOVAN.....	197
Askeri Kara Araçlarında Güvenilirlik ve İdame Ettirilebilirlik Testinin Prototip Aşamasındaki Önemi	224
Yunus AYZASEVEN.....	224
Seryum ve Lantan Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozitlerin Eriyik Akış İndekslerinin Analizi	241
Yılmaz KISMET	241
Çağdaş GÜNEŞ.....	241
Kompozit Malzemeler.....	254
Fevzi KELEN	254
AZ31B Magnezyum ve EN AW 7075-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağında Takım İlerleme Hızının Etkisi	286
Zülküf BALALAN	286
Ömer EKİNCİ	286
Güç Üretim Santrali Boylerlerinde By-Pass Klepelerindeki Sızdırmazlıkların Güç Üretimine Etkisi.....	296
Mehmet ALTINKAYNAK	296

Muammer Zafer ÖZTÜRK	296
Yüksek Yapılı Barajların Rüzgar Akış Dinamikleri ve Hava Kalitesine Etkileri	304
Haluk KELEŞ.....	304
Examination of the alternatives for the use of additive and metal additive manufacturing methods in light weapons	327
Faruk GÜNER.....	327
Hasan Onur TAN ²	327

BÖLÜM I

Savunma Sanayii Sektöründe Sistem Mühendisliği Süreçleri Ve V Modelin Uygulanması

Ali ÜZER¹

Giriş

Zamanla, ihtiyaçlarımızı karşılamak üzere tasarlanan ürünler, teknolojik gelişmeler ve artan kullanıcı beklentileri doğrultusunda giderek daha karmaşık hale gelmiştir. Özellikle savunma sanayinde, ürünler birçok alt sistemden oluşan karmaşık sistemler olarak geliştirilmekte ve bu durum hem ileri teknoloji standartlarını hem de sofistike süreç yönetimini zorunlu kılmaktadır.

Bu bağlamda, sistem mühendisliği disiplini, bu tür ürün ve sistemlerin geliştirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Sistem mühendisliği, geliştirme yaşam döngüsünün erken aşamalarında müşteri gereksinimlerinin net bir şekilde tanımlanmasına ve

¹ Ali ÜZER., Kıdemli Sistem Mühendisi, Koluman Otomotiv Endüstri AŞ, Orcid: 0009-0004-1472-6053, ali.uzer@koluman.com

doğrulanmasına odaklanır ve bu gereksinimleri karşılamak için gerekli işlevlerin belirlenmesini sağlar. Bu süreç yalnızca gereksinimlerin ayrıntılı bir şekilde belgelenmesini değil, aynı zamanda tasarım sentezi, sistem entegrasyonu, doğrulama faaliyetleri, yaşam döngüsü yönetimi, teknik risk analizi ve entegre lojistik destek gibi unsurları içeren kapsamlı bir yaklaşımı da kapsar. Bu bütüncül metodoloji, ürün geliştirme sürecinin her aşamasında karşılaşılabilecek olası zorlukların etkili bir şekilde çözülmesini garanti eder.

Bu çalışma, savunma sanayi ürünlerinin geliştirilmesinde uygulanan sistem mühendisliği süreçlerini derinlemesine incelemektedir. Ayrıca, Sistem Mühendisliği Yaşam Döngüsü'nün ayrılmaz bir parçası olan V-Model'in kullanımını detaylandırmaktadır. V-Model, gereksinim analizi, tasarım, entegrasyon, doğrulama ve doğrulama sonrası aşamaları birbirine bağlayarak yapılandırılmış ve izlenebilir bir yaklaşım sunar. Sistem mühendisliğinin vazgeçilmez bir unsuru olan V-Model, süreç yönetimine rehberlik ederek sistematik ve verimli bir geliştirme süreci sağlar.

1990'lı yılların başında, ODC Türkiye ile Savunma Sanayii Müsteşarlığı (SSM) iş birliğiyle gerçekleştirilen eğitimler, sistem mühendisliği disiplininin savunma sanayi çalışanlarına tanıtılmasında önemli bir kilometre taşı olmuştur. Bu eğitimler, sistem mühendisliğinin yalnızca bir mühendislik dalı olmadığını, aynı zamanda çok disiplinli ekiplerin birlikte çalıştığı yapılandırılmış bir geliştirme süreci sunduğunu göstermiştir.

Yöntem

1. Sistem Mühendisliği ve Süreçleri

Sistem mühendisliği, tüm disiplinleri ve uzmanlık gruplarını, konseptten üretime ve işletmeye doğru ilerleyen yapılandırılmış bir geliştirme süreci oluşturan bir ekip çalışmasına entegre eder. Sistem mühendisliği, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayan kaliteli bir ürün sunmak amacıyla tüm müşterilerin hem iş hem de teknik ihtiyaçlarını göz önünde bulundurur (Liu, 2016).

Sistem Mühendisliği, kullanıcıya malzeme yetenekleri sunmak için teknik çerçeveyi oluşturur. Her şeyin üzerine inşa edildiği temeli sağlar ve program başarısını destekler. Sistem Mühendisliği, bir programın satın alma yaşam döngüsüne ne zaman girdiğinden bağımsız olarak entegre, disiplinli ve tutarlı Sistem Mühendisliği faaliyetleri ve süreçleri kullanarak maliyet, zamanlama, performans ve risk açısından dengeli bir yaklaşımın uygulanması yoluyla yeteneğin etkili bir şekilde geliştirilmesini ve sunulmasını sağlamayı amaçlar. Sistem Mühendisliği güvenilir, güvence altına alınmış ve kolayca değiştirilebilen dayanıklı sistemlerin geliştirilmesini sağlar (Systems Engineering Guidebook, 2022).

Ayrıca, sistem mühendisliği süreci, teknik incelemelerden ve denetimlerden başlayarak programın olgunluğunu değerlendirmeye, maliyet analizlerine ve teknik risklerin yönetimine kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Bu süreç, bir ürünün tasarımı, geliştirilmesi, uygulanması, teknik yönetimi, operasyonları ve nihai olarak emekliliğine kadar olan tüm aşamaları planlar ve yönetir. Sistem

mühendisliği, bu yönleriyle yalnızca bir teknik yaklaşım değil, aynı zamanda stratejik bir karar verme süreci olarak da karşımıza çıkar.

Etkili bir sistem mühendisliği yaklaşımının uygulanması, sağlam bir program yönetimiyle desteklenmeli ve entegre edilmelidir. Program başlamadan önce, proje lideri ve sistem mühendisi, teknik temelleri oluşturacak şekilde kapsamlı bir geliştirme planı hazırlamalıdır. Bu hazırlık aşaması, programın başarıyla yürütülmesi için kritik bir adımdır ve teknik temelin sağlamlığı, sonraki süreçlerin verimliliğini doğrudan etkiler.

Bu bağlamda, sistem mühendisliği disiplini, yalnızca bir sistemin teknik olarak geliştirilmesini değil, aynı zamanda operasyonel ve sürdürülebilir bir çerçevede teslim edilmesini sağlayarak, savunma sanayii gibi karmaşık ve yüksek riskli sektörlerde stratejik bir rol üstlenmektedir.

Müşteri ihtiyaçlarına yönelik sistemlerin kurgulanması, yalnızca bir tasarım sürecinden ibaret değildir; aynı zamanda disiplinli bir yapı ve sistematik bir yaklaşımı gerektirir. Bu noktada Sistem Mühendisliği, hem teknik gereksinimleri hem de kullanıcı beklentilerini karşılayacak nitelikte sistemlerin oluşturulmasını sağlayan temel bir disiplin olarak karşımıza çıkar. Sistem mühendisliği sürecinde, belirli bir sıra ve yapı içinde izlenmesi gereken temel adımlar şunlardır:

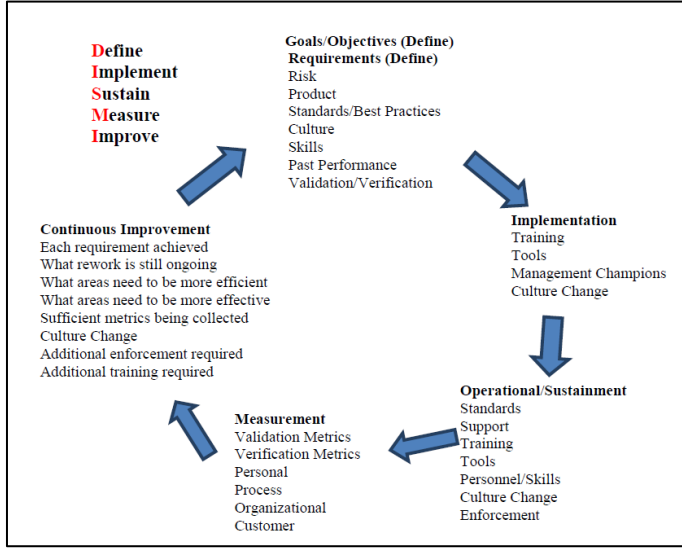
Müşteri İhtiyacı: Sistem geliştirme sürecinin ilk adımı, müşterinin ihtiyaçlarının net bir şekilde tanımlanmasıdır. Bu aşama, sistemin ne amaçla kullanılacağı, hangi problemlere çözüm getireceği ve hangi performans kriterlerini karşılaması gerektiği gibi unsurları kapsamaktadır.

Sistem Gereksinimleri: Müşteri ihtiyaçlarının, teknik olarak ölçülebilir ve izlenebilir gereksinimlere dönüştürülmesi gerekir. Sistem gereksinimleri, yalnızca sistemin fiziksel ve işlevsel özelliklerini değil, aynı zamanda güvenilirlik, sürdürülebilirlik, maliyet ve zaman kısıtlamaları gibi faktörleri de içermelidir.

Sistem Mimarisi: Gereksinimlerin belirlenmesinden sonra, bu gereksinimlerin hangi bileşenlerle ve nasıl karşılanacağını tanımlayan bir sistem mimarisi oluşturulur. Sistem mimarisi, tüm alt sistemler ve bileşenler arasındaki ilişkileri açıkça gösterir ve sistemin genel yapısını ortaya koyar.

Sistem Tasarımı: Mimari oluşturulduktan sonra, tasarım süreci başlar. Bu aşamada, her bir alt sistemin detaylı tasarımı yapılır, prototipler oluşturulur ve gerekli analizler gerçekleştirilir. Bu süreç, hem yazılım hem de donanım unsurlarını kapsar.

Sistem Tasarımı ve Kabulleri: Tasarımın tamamlanmasının ardından, sistemin performansını doğrulamak ve müşteri gereksinimlerini karşıladığını onaylamak amacıyla kabul testleri yapılır. Bu testler, sistemin güvenilirliği, uyumluluğu ve işlevselliği hakkında geri bildirim sağlayarak son düzenlemelerin yapılmasına olanak tanır.



Şekil 1 Sistem Mühendisliği Süreçlerinde DISMI Kullanımı

Kaynak: INCOSE, System Engineer Guidebook (2022), Hall Associates LLC



Şekil 2 Sistem Mühendisliği Arayüzü

Kaynak: INCOSE, System Engineer Guidebook (2022), Hall Associates LLC

1.1 Gereksinim Yönetimi

Gereksinim yönetimi gereksiniminin amacı ve kapsamı, gereksinimleri geliştirme, belgeleme, analiz etme, izleme, önceliklendirme ve bunlar üzerinde anlaşmaya varma ve ardından değişikliği kontrol etme (gereksinim yönetimi, gereksinimlerdeki değişiklikleri yönetmektir) ve ilgili paydaşlara iletme sürecini tanımlamaktır. Bir program/proje boyunca devam eden bir süreçtir. Gereksinim yönetimi süreci müşteri ve paydaş ihtiyaçlarını analiz eder, gereksinimleri oluşturur/geliştirir, işlevsel analizler gerçekleştirir, gereksinimleri türetir, gereksinim kalitesini sağlar, gereksinimleri tahsis eder, gereksinimleri kontrol eder, gereksinim veritabanını korur, gereksinim yönetimi planları geliştirir ve uygular ve etkinlik ve performans ölçümleri geliştirir. Bir gereksinim, bir proje sonucunun (ürün veya hizmet) uyması gereken bir yetenektir. Gereksinim yönetimi ve mühendisliğin amacı, bir kuruluşun müşterilerinin ve iç veya dış paydaşlarının ihtiyaçlarını ve beklentilerini belgelemesini, doğrulamasını ve karşılmasını sağlamaktır. (Systems Engineering Guidebook, 2022)

Sistem mühendisliği, karmaşık sistemlerin yaşam döngüsü boyunca başarılı bir şekilde tasarlanması, geliştirilmesi ve yönetilmesi için uygulanan disiplinler arası bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, sistemin tüm bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını sağlamak için gereksinimlerin belirlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesini temel alır. Gereksinim yönetimi, sistem mühendisliği süreçlerinin başlangıç noktasını oluşturur ve müşteri ihtiyaçlarının doğru bir şekilde anlaşılmasını sağlar. İyi bir gereksinim yönetimi, sistemin hem teknik hem de operasyonel gereklilikleri karşılmasını garanti eder ve proje risklerini minimize eder. Literatürde,

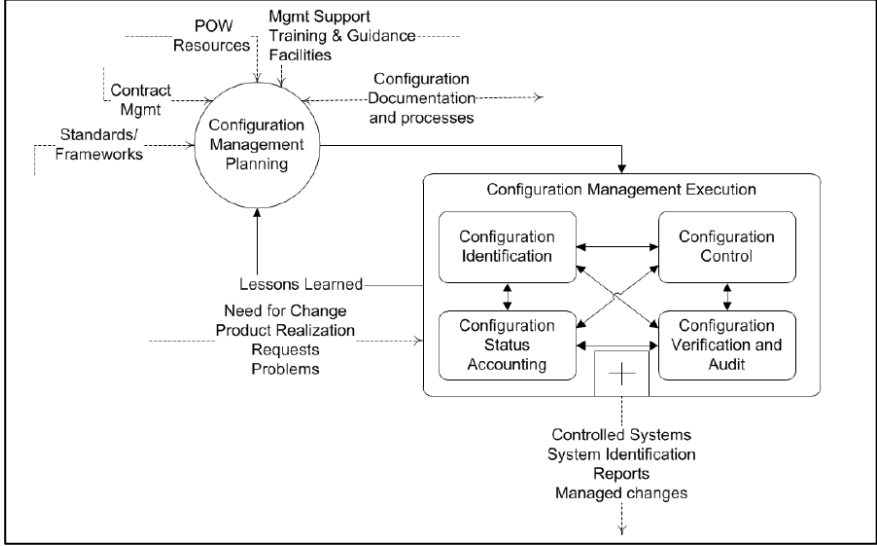
gereksinim yönetiminin etkili yapılmaması durumunda proje başarısızlık oranlarının ciddi şekilde arttığı belirtilmektedir (INCOSE, 2017).

Gereksinim yönetimi, sadece başlangıç aşamasında değil, sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca devam eden bir süreçtir. Gereksinimlerin değişen operasyonel şartlara uyum sağlayacak şekilde güncellenmesi ve izlenebilir olması hayati önem taşır. Bu doğrultuda, sistem mühendisliği uygulamalarında izlenebilirlik matrisleri ve gereksinim yönetim araçları sıkça kullanılır. Özellikle savunma sanayii gibi yüksek riskli sektörlerde, gereksinim yönetiminin doğruluğu ve tutarlılığı, projenin başarısı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu standartlara uyum sağlanması, hem kaliteyi artırmakta hem de uluslararası kabul edilebilirliği desteklemektedir.

1.2 Konfigürasyon Yönetimi

Konfigürasyon yönetimi faaliyetleri amacı ve kapsamı, şirket/kuruluş tarafından tasarlanan, geliştirilen, üretilen ve bakımı yapılan ürünlerin geliştirilmesini ve değişikliklerini kontrol etmek ve yönetmek için kullanılan yapılandırma yönetimi politikasını, sürecini, prosedürlerini ve faaliyetlerini tanımlamaktır. Konfigürasyon yönetimi, ürün temel çizgisini ve sistemde yapılan tüm değişiklikleri sistematik olarak belirleyerek, kontrol ederek ve muhasebeleştirerek bir ürünün teknik bütünlüğünün yaşam döngüsü boyunca oluşturulması ve sürdürülmesi sürecidir. Bu konfigürasyon yönetimi faaliyetleri, ürünün konfigürasyon birimlerini yaşam döngüsü aşaması, karmaşıklığı, boyutu, amaçlanan kullanımı (ortak ve birleşik birlikte çalışabilirlik dahil), görev kritikliği ve lojistik desteği temelinde ürüne özgü yapılandırma yönetimi gereksinimlerine uyacak şekilde uyarlanabilir. Konfigürasyon

yönetimi süreci Sistem Mühendisliği süreçlerine direk katkıda bulunarak ömür yaşam döngüsünde sistemin başarılı olmasında büyük önem sağlar.



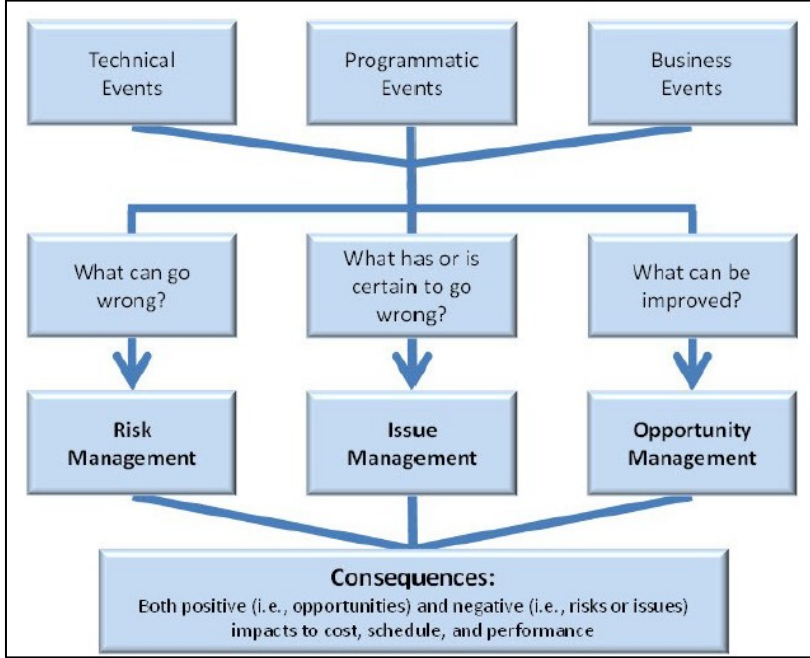
Şekil 3 Konfigürasyon Yönetimi Prosesi

Kaynak: LCCMP – Core, Version 1.5

1.3 Risk Yönetimi

İşletmeleri/kuruluşları/programları etkileyen riskler, ekonomik performans ve profesyonel itibarın yanı sıra çevresel, güvenlik ve toplumsal sonuçlar açısından da sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, riski etkili bir şekilde yönetmek, kuruluşların belirsizliklerle dolu bir ortamda iyi performans göstermesine yardımcı olur. Risk yönetimi, risk yönetimi planları geliştirir ve uygular, risk sorunlarını belirler, risk sorunlarını değerlendirir, riskleri öncelik sırasına koyar, risk azaltmayı geliştirir ve uygular ve risk azaltma faaliyetlerini izler. Her risk yönetim sistemi, genellikle

yeterli olmayan genel bir yaklaşım olarak bir işletmenin/kuruluşun özel koşullarını yansıtmalıdır. Bununla birlikte, risk yönetim standartları kapsamlı ve tutarlı bir risk yönetim sistemi tasarlamak ve uygulamak için yararlı destek sağlayabilir. (INCOSE, 2017)



Şekil 4 Risk, Sorun ve Fırsatlar

Kaynak: Systems Engineering Guidebook,2022

Risk yönetimi, herhangi bir program için program başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Programlardaki riskleri ele almanın amacı, program maliyeti, zamanlaması ve performans hedeflerinin yaşam döngüsünün her aşamasında gerçekleştirilmesini sağlamak ve tüm paydaşlara program belirsizliklerinin ortaya çıkarılması, kapsamının belirlenmesi ve yönetilmesi sürecini iletmektir. Risk, bir programın tüm yönleriyle ilişkilendirilebileceğinden, risk

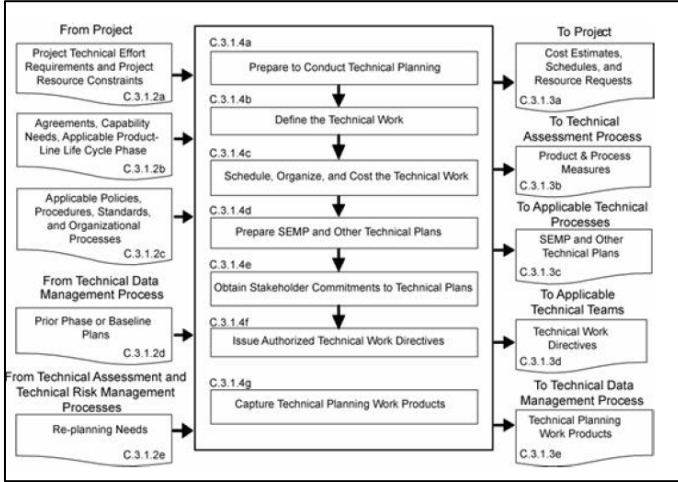
tanımlamasının yalnızca program yöneticisi veya sistem mühendisinin değil, herkesin işinin bir parçası olduğunu kabul etmek önemlidir. Buna test yöneticisi, mali yönetici, sözleşme görevlisi, lojistikçi ve diğer tüm ekip üyeleri dahildir. Sistem mühendisliği süreçlerinde teknik risklerin belirlenmesi ve tanımlanması da bu açılardan oldukça önemlidir.

1.4 Sistem Mühendisliği Teknik Planlaması

Planlama faaliyetleri, sistem mühendisliği ve yönetiminin her düzeydeki temel işlevlerinden biridir. Diğer sistem mühendisliği işlevlerinin, özellikle izleme ve kontrol etme işlevlerinin temelini oluşturur. Bu sistem mühendisliği teknik planlaması, programların planlanmasıyla ilgilidir. Çoğu planlama süreci, planın uygulandığı organizasyonel düzeyden bağımsız olarak birbirine çok benzerdir. Genellikle dahil olan personel ve planlanan çabanın kapsamı bakımından farklılık gösterirler. Genel olarak, tüm planlama süreçleri şunları içermelidir:

- **Hedefler:** Hedef, planın başarılı bir şekilde yürütülmesiyle elde edilecek istenen bir durumun ifadesidir.
- **Stratejiler:** Strateji, plan hedeflerine ulaşmanın bir yolunun açıklamasıdır.
- **Amaçlar:** Amaç, plan yürütülürken elde edilecek önemli, ölçülebilir, zamanla ilgili bir ara durumu tanımlar.

- **Gerçekleştirilecek bir dizi etkinlik:** Etkinlik, belirtilen hedeflere ulaşmaya yardımcı olan atanabilir, ayrı bir adımdır.
- **Tahsis edilen kaynaklar:** Plan, planlanan etkinliklerin tüketmesine izin verilen kaynakların bir değerlendirmesini içermelidir (bunların başında zaman gelir). (INCOSE, 2017)



Şekil 5 Sistem Mühendisliği Teknik Planlama

Kaynak: INCOSE, System Engineer Handbook (2017), Hall Associates LLC

1.5 Sistem Mimarisi Tasarımı

Günümüzdeki eğilim, sistem mimarisi ve sistem tasarımını farklı ve ayrı faaliyet kümeleri olarak, ancak eşzamanlı ve güçlü bir şekilde iç içe geçmiş olarak ele almaktır. Sistem mimarisi faaliyetlerinin amacı, birbirleriyle mantıksal olarak ilişkili ve tutarlı ilkeler, kavramlar ve özelliklere dayalı kapsamlı bir çözüm tanımlamak, temel ve alternatif aday kavram ve mimarileri

belirlemek, ticaret çalışmaları yürütmek ve belgelemek, aday kavram ve mimarileri değerlendirmek ve optimize etmek, sistem/zm açıklama belgeleri hazırlamaktır (INCOSE, 2017).

Sistem mimarisi tasarımı, bir sistemin işlevsel ve yapısal temelini oluşturan kapsamlı bir planlama sürecidir. Bu süreçte, sistemin bileşenlerinin yapısı, birbirleriyle ilişkileri ve tüm sistemin genel organizasyonu belirlenir. Sistem mimarisi, gereksinimlerin analizinden başlayarak, teknik tasarımların gerçekleştirilmesine kadar tüm aşamalarda rehberlik eden bir araçtır. Özellikle karmaşık sistemlerde, mimarinin doğru tasarlanması, sistemin uzun vadeli sürdürülebilirliği ve esnekliği açısından kritik önem taşır. Bu bağlamda, mimari tasarımın başarılı bir şekilde yapılabilmesi için hem kullanıcı ihtiyaçlarının hem de teknik sınırlamaların net bir şekilde anlaşılması gereklidir (Rechtin & Maier, 2002).

Sistem Mimarisi soyut, kavramsallaştırma odaklı, küreseldir ve sistemin misyon ve yaşam döngüsü kavramlarını başarmaya odaklanmıştır. Ayrıca sistemlerdeki ve sistem elemanlarındaki yüksek seviyeli yapıya odaklanır. İlgi duyulan sistemin mimari prensiplerini, kavramlarını, özelliklerini ve karakteristiklerini ele alır. Ayrıca birden fazla sisteme uygulanabilir, bazı durumlarda benzer veya ilişkili sistemlerin sınıflar için ortak yapı, desen ve gereksinim kümesini oluşturur.

1.6 Kalifikasyon, Validasyon ve Verifikasyon

1.6.1 Kalifikasyon

Kalifikasyon, belirli ürün veya ekipmanın, yapması gereken şeyin niteliklerini doğrulamak için önceden belirlenmiş kabul kriterlerini karşılayabileceğinin güvence altına alınması sürecidir.

Belirtilen gereklilikleri yerine getirme yeteneğini gösterme sürecidir. Birkaç tür kalifikasyon türü vardır.

- **Altyapı kalifikasyonu:** Proses ekipmanı ve yardımcı sistemlerin uygun kodlar ve onaylı tasarım amaçlarıyla uyumlu olduğuna ve üreticinin önerilerinin uygun şekilde dikkate alındığına dair güvenin oluşturulması. Başka bir deyişle: üreticinin talimatlarına göre donanım ve sistem yazılımının kurulumu veya onaylı bir prosedüre göre sanal bir makinenin sağlanması ve üreticinin talimatlarına göre sistem yazılımının kurulumu,
- **Operasyonel kalifikasyon:** Proses ekipmanlarının ve alt sistemlerinin belirlenen sınırlar ve toleranslar dahilinde sürekli olarak çalışabileceğine dair güvenin oluşturulması. Başka bir deyişle: belgelenmiş ve onaylanmış gerekliliklere göre test etme ve özellikler (belgelenmiş ve onaylanmış sistem tasarım özelliklerine göre birim, dizi ve entegrasyon testi; ve belgelenmiş ve onaylanmış işlevsel gereksinimlere göre sistem testi),
- **Performans kalifikasyonu:** Süreç performans niteliği: sürecin etkili ve tekrarlanabilir olduğuna dair güvenin oluşturulması veya ürün performans niteliği: belirli bir süreçle üretilen bitmiş ürünün işlevsellik ve güvenlik açısından tüm serbest bırakma gerekliliklerini karşıladığına dair uygun testler yoluyla güvenin oluşturulması, (INCOSE, 2017)

1.6.2 Validasyon

Validasyon, belirli bir sürecin/faaliyetin önceden belirlenmiş özelliklerini ve kalite özelliklerini karşılayan bir ürünü sürekli olarak üreteceğine dair yüksek derecede güvence sağlayan belgelenmiş kanıt oluşturmaktır. Süreç ekipmanlarının ve alt sistemlerinin belirlenen sınırlar ve toleranslar dahilinde sürekli olarak çalışabileceğine dair güven oluşturmaktır. (INCOSE, 2017)

Validasyon, mühendislik ve bilimsel alanlarda kritik bir süreçtir. Örneğin, bir sistemin gerçek ortamda kullanıcı beklentilerini karşılayıp karşılamadığını test etmek amacıyla yürütülen değerlendirmeler için kullanılır. Bu süreçte, tasarım ve geliştirmenin doğruluğu test edilir. Önemli olarak, validasyonun temel amacı, geliştirilen ürünün amacına uygun olup olmadığını ortaya koymaktır. Cambridge Üniversitesi tarafından yayımlanan bir çalışmada validasyonun, modeller ve simülasyonlar için güvenilirlik ve doğruluğun artırılmasında merkezi bir rol oynadığı belirtilmiştir.

1.6.3 Verifikasyon

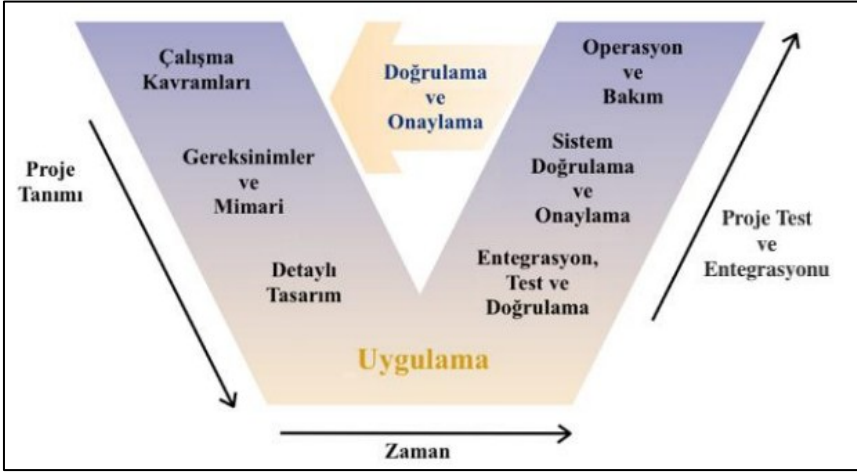
Ürün (sistem) doğrulaması, bir ürün ögesi, bir ürün, bir belge, bir hizmet, bir görev, bir gereksinim vb. gibi herhangi bir ögenin doğruluğunu kontrol etmek için kullanılan bir dizi eylemdir. Bu tür eylemler, ürünün yaşam döngüsü boyunca planlanır ve gerçekleştirilir. Doğrulama, gerçekleştiği bağlam içinde örnekletirilmesi gereken genel bir terimdir. Bir süreç olarak doğrulama, ürünün her yaşam döngüsü aşamasına çapraz bir etkinliktir. Özellikle, ürünün geliştirme döngüsü sırasında, doğrulama süreci ürün tanımı ve ürün gerçekleştirme süreçleriyle paralel olarak gerçekleştirilir ve herhangi bir etkinliğe ve etkinlikten

kaynaklanan herhangi bir ürüne uygulanır. Her yaşam döngüsü sürecinin faaliyetleri ve doğrulama sürecinin faaliyetleri birlikte çalışabilir. Doğrulamanın dört temel yöntemi; Denetim, Gösterim, Test ve Analizdir. Bu dört yöntem doğası gereği biraz hiyerarşiktir, çünkü her biri bir ürün veya sistemin gereksinimlerini artan bir titizlikle doğrular. (INCOSE, 2017)

2. Sistem Mühendisliğinde V-Model'in Rolü ve Uygulaması

Sistem mühendisliği süreçleri uygulanırken V-Model, sürecin temel rehberi olarak kabul edilir. V-Model, sistem geliştirme sürecinin karmaşıklığını basitleştiren bir çerçeve sunar. Modelin "V" şeklindeki yapısı, geliştirme sürecinin her aşamasının doğrulama ve doğrulama süreçleriyle nasıl ilişkilendirildiğini görselleştirir.

V-döngüsü doğrulama modeli olarak da adlandırılan V-döngüsü sistem mühendisliği, sistemlerle ilgili karmaşıklığı basitleştirmek üzere tasarlanmış kavramsal modelden oluşan tasarım yöntemidir (Forsberg & Mooz, 1991). Burada yaşam döngüsü modelleri ve proje yönetimi modelleri üzerine odaklanılır. V döngüsü konsept ve kavram geliştirme ile başlayarak, tasarım, uygulama ve entegrasyon sonrası test ve operasyon ile ürünün tüm yaşam çevrimini temsil eder (Forsberg, Mooz, & Cotterman, Visualizing Project Management, 2005).



Şekil 6 Şekil 1 Konfigürasyon Yönetimi İlişkileri

Kaynak: TMMOB, Engineer and Machinery, vol. 61, no. 698, p. 1-16, January March 2020

Eş-zamanlı mühendislik ile doğrusal tasarımı yerine, süreç V içerisinde her seviyede evrilerek ilerler. Böylece sol kısım kavram geliştirme, gereksinimlerin ve şartnamelerin oluşturulması sonrası tasarımı temsil ederken, sağda ise ilgili seviyelerde parçaların ve sonrasında sistemin entegrasyonu ile sol kol ile doğrulanmaları ve operasyonla bakım temsil edilmektedir; dolayısı ile zamana yayılan işlemler Şekil 1'de gösterilen V üzerinde ilerleyerek gerçekleştirilmektedir (Despautz, Kovacs, & Werling, 2008).

V Model, sistem mühendisliği süreçlerinde kullanılan bir modeldir ve proje geliştirme aşamalarını şematik olarak bir "V" yapısında sunar. Bu modelde, soldan sağa doğru gidildikçe sistemin farklı bileşenlerinin ayrıntılı bir şekilde planlanıp tasarlanmasından, bu bileşenlerin entegrasyonuna ve test edilmesine kadar olan

aşamalar temsil edilir. Soldaki kol planlama ve tasarım süreçlerini, sağdaki kol ise doğrulama ve geçerlilik süreçlerini kapsar (Blanchard & Fabrycky, 2006)

Sistem mühendisliğinde V Model, özellikle gereksinimlerin detaylandırılması ve sistemin üst seviyeden alt seviyeye doğru kademeli olarak kırılıp tasarlanması ile ardından tüm bu bileşenlerin entegre edilerek doğrulanması ve sistem testine tabi tutulmasını sağlar (Forsberg, Mooz, & Cotterman, Visualizing Project Management, 2005). V Model, sistem mühendisliği, tasarım mühendisliği ve proje mühendisliği başlığı altında sıkça kullanılır.

Bu model, her aşamada önceki adımlarla olan ilişkiyi açıkça göstererek, hem proje yönetimi hem de teknik faaliyetler için yapılandırılmış bir yaklaşım sunar.

V-modeli, şirketlerin ve tasarımcıların projelerin planlanması ve gerçekleştirilmesi konusunda rehberlik etmelerine yardımcı olur. V-modeli kullanımı ile proje riskleri en aza indirgenerek, kalitenin iyileştirilmesi sağlanır ve güvence altına alınır; böylece sistem ömrü boyunca toplam maliyetin azaltılması ile tüm paydaşlar arasındaki iletişimin iyileştirilmesi hedeflenir (V-Modell®XT, 1997. "Limits of the V Model", 2017).

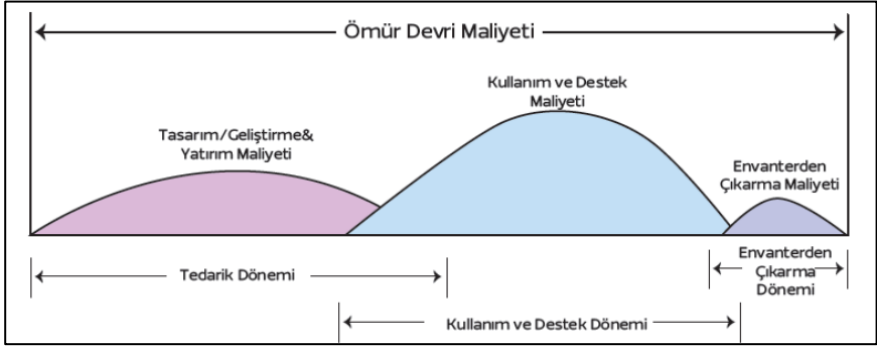
Yaşam döngüsünün ilk aşamaları ürün ihtiyaçlarını tanımlanmaya başlanır ve ardından sistem gereksinimlerini olgunlaşmaya başlar. Sistemler, bu sistemi oluşturan alt sistemlerden oluştuğu için daha sonra alt sistemlerin gereksinimlerini tanımlanır ve sistemin olgunlaşan gereksinimleri detaylanmış olur. Yaşam döngüsünün sonraki aşamalarında olgunlaşan alt sistem ve sistem gereksinimlerini doğrulayarak devam eder.

Savunma sanayii projeleri, yüksek güvenilirlik, işlevsellik ve güvenlik gereksinimlerine sahiptir. Bu tür projelerde V Model'in kullanımı, projelerin başından sonuna kadar titiz bir gereksinim yönetimi ve entegrasyon testi süreci sağlar. Örneğin, bir askeri radar sisteminin geliştirilmesinde V Model, sistemin en başından itibaren her bileşenin gereksinimlerini tanımlamak ve her bileşenin doğrulama sürecine dahil etmek için kullanılır (Systems Engineering Fundamentals, 2001). V Model, böylelikle bileşenler arası uyumsuzluk riskini azaltır ve sistemin nihai işlevselliğini sağlar (Jackson & McDerimid, 2011).

Sistem mühendisliği çalışmalarında, sistemin bir fikir olarak doğmasından kullanımdan çıkarılmasına kadar geçen süre ömür devri olarak modellenir. Ömür devri modelinde ise V Model kullanımı oldukça yaygındır.

Ömür devri modeli, süreç adımlarının ve ilgili faaliyetlerin yer aldığı kavramsal çerçeveyi gösterir. Bu model, çalışmaların yönetiminde tüm paydaşlar için ortak bir bakış açısı ve referans sağlar. Sistem geliştirme, ömür devrinin her bir aşamasındaki ihtiyaçları karşılayacak şekilde gerçekleştirilir (Baktır, 2019).

Sistemlerin ömür devri maliyetleri içerisinde en büyük maliyet kalemleri kullanım ve destek safhalarında oluşmaktadır. Bu nedenle maliyet etkin bir ömür devri için kullanım ve destek maliyetlerinin en verimli şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Bunun en önemli yolu, geliştirme döneminde kullanım ve destek aktivitelerinin ayrıntılı bir şekilde analiz edilerek sistem tasarımının buna göre yapılması, kullanım/destek döneminde ise bu analizlerin güncellenerek olası en uygun destek çözümünün uygulanmasıdır.



Şekil 7 Sistem Ömür Devri

Kaynak: Özgür Bayar, Osman Günhan Bayat, Ömür Devri Yönetim Sözleşmeleri Sistem Performansını Ve Kullanıma Hazır Olabilirliği Artırmanın Anahtarı, 2024

Sonuç

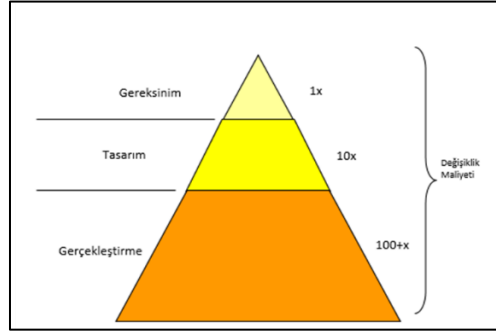
Savunma sanayii projeleri, doğası gereği karmaşık, çok disiplinli ve yüksek güvenlik gereksinimlerine sahip projelerdir. Bu nedenle, her aşamanın dikkatle yönetilmesi, sistemin her bileşeninin uyum içinde çalışması ve tüm gereksinimlerin karşılanması, projenin başarıyla tamamlanabilmesi için kritik öneme sahiptir. V Model, sistem mühendisliğinin bu gereksinimlere uygun olarak ve etkili bir şekilde yönetilmesinde kullanılan güçlü bir araçtır.

V Model'in savunma sanayi projelerindeki uygulanabilirliği, gereksinimlerin eksiksiz bir şekilde belirlenmesinden başlayarak, tasarım, geliştirme, test etme ve doğrulama aşamalarına kadar uzanır. Sistem mühendisliği süreçlerinin her aşaması, proje sürecinin ilerleyen aşamalarında doğabilecek riskleri en aza indirmek ve sistemin sonunda beklenen performansı sağlamak için gereklidir. Her adımda yapılan doğrulama ve doğrulama testleri, savunma sanayii projelerinin başarısı için kritik öneme sahiptir çünkü bu

testler, sistemin doğru çalıştığını ve tüm gereksinimlerin yerine getirildiğini doğrular.

Savunma sanayii projelerinin başarısını etkileyen bir diğer önemli faktör, değişiklik yönetimidir. Bu tür projelerde, gereksinimler veya tasarımda yapılan değişiklikler, başlangıçta tahmin edilenden daha yüksek maliyetlere ve zaman kaybına yol açabilir. V Model, bu tür değişiklikleri yönetmek için etkili bir çerçeve sunar. Gereksinimlerin doğru bir şekilde tanımlanması ve her aşamada bu gereksinimlerin doğrulanması, proje sürecinde yapılacak değişikliklerin daha hızlı bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Ayrıca, sistem mühendisliği süreçlerinde yapılan doğrulama faaliyetlerinin eksiksiz olması, sonradan yapılacak düzeltme faaliyetlerinin maliyetlerini önemli ölçüde azaltır.

Sistem mühendisliği süreçlerinin yanlış uygulanması durumunda, özellikle savunma sanayii projelerinde, yalnızca değişiklik maliyetleri artmakla kalmaz, aynı zamanda projenin tamamlanma süresi de uzar. Bu durum, projelerin bütçesel ve operasyonel verimliliğini olumsuz yönde etkiler. V Model'in doğru uygulanması, bu tür sorunların önüne geçilmesine yardımcı olur. Çünkü V Model, her aşamanın birbirine bağlı ve birbirini doğrulayan bir süreç olarak işlediği bir yapıyı teşvik eder. Böylece, erken aşamalarda yapılan hatalar veya eksiklikler, sonraki aşamalarda tespit edilip düzeltilebilir ve bu da sonradan yapılacak değişikliklerin maliyetini minimize eder.



Şekil 8 Değişiklik Maliyeti

Ayrıca, savunma sanayii projelerinde sistem mühendisliği süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, yalnızca maliyetleri kontrol altına almakla kalmaz, aynı zamanda ürünün güvenilirliğini ve kalitesini de artırır. Bu, savunma sanayii projelerinde en önemli hedeflerden biridir. Güvenilirlik, özellikle askeri alanda, yaşam kayıplarını ve operasyonel başarısızlıkları önlemek adına büyük önem taşır. Kaliteli bir sistem tasarımı ve bu tasarımın her aşamasında yapılan titiz doğrulama süreçleri, sistemin uzun ömürlü ve sorunsuz çalışmasını sağlar.

Sonuç olarak, sistem mühendisliği süreçlerinin V Model kullanılarak yönetilmesi, yalnızca savunma sanayii projelerinde değil, tüm endüstriyel projelerde yüksek verimlilik ve düşük maliyetle başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlar. Proje yönetiminde yapılan hatalar, sistem mühendisliği süreçlerinin etkili bir şekilde uygulanmaması, büyük bütçesel zararlara yol açabilir. Bu nedenle, sistem mühendisliği süreçlerinin doğru bir şekilde yönetilmesi ve V Model'in bu süreçlere entegre edilmesi, projelerin başarısını garanti altına almak için önemli bir faktördür. Sistem mühendisliğinin bu alandaki rolü, projelerin her aşamasında kaliteyi, güvenilirliği ve

maliyet etkinliğini artırarak, savunma sanayii gibi stratejik ve hassas alanlarda başarılı sonuçlar elde edilmesini mümkün kılar.

Kaynakça

Baktır, E. (2019). Sistem Gerçekleştirme ve Lojistik. *Savunma Sanayii Gündemi*.

Blanchard, B., & Fabrycky, W. (2006). *Systems Engineering and Analysis*. Prentice Hall.

Despautz, J., Kovacs, K. S., & Werling, G. (2008). GAMP Standards For Validation of Automated Systems. *Pharmaceutical Processing*.

Forsberg, K., Mooz, H., & Cotterman, H. (2005). *Visualizing Project Management*. John Wiley and Sons.

Forsberg, K., & Mooz, H. (1991). The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. *Proceedings of the First Annual Symposium of National Council on System Engineering*, (s. 57–65).

INCOSE. (2017). *Systems Engineering Handbook*. Hall Associates LLC.

Jackson, S., & McDermid, J. (2011). *Systems Engineering for Defence Capabilities*. Springer.

Liu, D. (2016). *Systems Engineering Design Principles and Models*. Boca Raton.

Rechtin, E., & Maier, M. (2002). *The Art of Systems Architecting*.

Systems Engineering Fundamentals. (2001). Defense Acquisition University Press.

Systems Engineering Guidebook. (2022). Office of the Deputy Director for Engineering.

V-Modell®XT, 1997. "*Limits of the V Model*". (2017). <http://v-modell.iabg.de/XThtmleng/index.html>. adresinden alındı

BÖLÜM II

Bakır Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Barış DOĞAN¹
Özgür ÖZGÜN²
Zülküf BALALAN³
Ömer EKİNCİ⁴

Giriş

İnsanların bulduğu en eski metallere biri olan bakır, yaklaşık 10.000 yıldır kullanılmaktadır. Bronz ve pirinç gibi bakır ve bakır alaşımları Yunanlılar, Mısırlılar, Çinliler, Romalılar ve Sümerler de dahil olmak üzere çeşitli eski medeniyetlerde hem dekoratif hem de

¹ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0009-0008-7809-9510, bdogan@bingol.edu.tr

² Doç. Dr., Bingöl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3816-6746, oozgun@bingol.edu.tr

³ Doç. Dr., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5808-6263, zbalalan@bingol.edu.tr

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, Sivas/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0179-6456, omerekinci@sivas.edu.tr

pratik gayelerle kullanılmıştır. Antik çağlardan günümüze kadar tarih boyunca bakır, askeri uygulamalar, çan ve heykel gibi sanatsal yaratımlar, aletler ve çok sayıda işlevsel nesne gibi çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Sanayi devrimi, bakır ve alaşımlarının üretim ve kullanımında önemli bir dönüşüme yol açmış olmasına rağmen günümüzde bakır, mühendislik uygulamalarında modern malzemelerin temel unsuru olmaya devam etmektedir (ASM, 2001). Bakırın 20-21. yüzyılların sanayi çağındaki yeri, diğer metallerle kolayca birleşebilme yeteneğiyle önemli hale gelmiştir. Çinko ve kalay ana alaşım elementlerdir fakat kadmiyum, berilyum, manganez, nikel, alüminyum, krom gibi pek çok başka element fiziksel, mekanik özelliklerin ve mükemmel korozyon, aşınma direncinin benzersiz kombinasyonlarına sahip alaşımlar oluşturur. Bu özellikler bakır ve alaşımlarını bina inşaatı için tercih edilen malzemeler haline getirmiştir, ancak aynı zamanda elektronik, kimya, otomotiv ve denizcilik endüstrileri gibi mühendislik alanlarında da yer bulmuştur. Süper iletkenlerin, elektrikli araçların, güneş enerjisiyle ısıtma sistemlerinin ve büyük ölçekli su tuzdan arındırma sistemlerinin geliştirilmesiyle bakırın önümüzdeki yıllarda önemli bir malzeme olmaya devam etmesi beklenmektedir (ASM, 2001). Bakır matrisine seramik parçacıkları eklenerek bakırın mukavemeti artırılabilir. Bu nedenle bakır matris içerisine farklı seramik parçacıkları dahil edilmiştir. Bu seramik toz örnekleri arasında B₄C, Al₂O₃, SiC, TiB₂, TiC ve WC bulunur (Xu, 2003). Kompozit sistemlerin özelliklerini anlamak, Maxwell ve Einstein gibi ünlü bilim insanlarının ilgisini çekmiş ve bu konu, bilim ve mühendislikte temel bir problem haline gelmiştir (Torquato, 2000). 20. yüzyılın ilk yarısında başlayan modern kompozitler üzerindeki

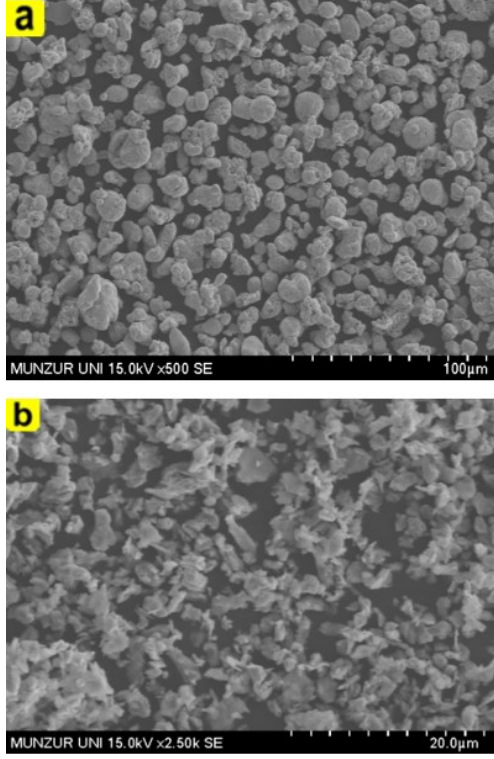
çalışmalar, geleneksel malzemelerin sunduğu özelliklerin yetersiz kalmasıyla artan teknoloji talepleri nedeniyle günümüze kadar sürekli büyümüştür ve teknolojinin gelişen ihtiyaçlarını karşılamak için günümüzde de hızla ilerlemektedir. Kompozit malzemeler, amaçlanan uygulama için istenen özelliklere sahip yeni bir malzeme üretmek üzere iki veya daha fazla malzemenin daha büyük ölçekte birleştirilmesiyle oluşturulur (Hiçyılmaz, 1999). Makro yapısal düzeyde oluşturulan tanıma göre kompozit malzemeler iki temel özelliğe sahiptir. Kompozit malzemeyi oluşturan çeşitli elementler sıklıkla farklı kimyasal bileşimlere sahiptir. Kompozit malzemeleri oluşturan elemanlar esasen birbirleri içinde çözünemezler. Kompozit malzemeyi oluşturan elemanlar, yapı içindeki özelliklerini koruyarak, bunların tanımlanmasına ve bileşenler arasındaki arayüzün gözlemlenmesine olanak sağlar (şahin, 1999). Bir kompozit malzeme çeşidi olan metal matrisli kompozitlerin oluşturulması için metalik matrisler gereklidir. Matris malzemesinin seçimi öncelikle amaçlanan uygulamalar için sıcaklık, mukavemet, yoğunluk ve maliyet hususlarından etkilenir. Elektrik iletkenliği, süneklik, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi diğer etkenler tercih edilen metal malzemeye bağlıdır. Bu aşamada en önemli faktörlerden biri matris malzemesi ile donatı arasındaki uyumdur. Uyumluluk, matris ile takviye arasındaki sınırda istenmeyen kimyasal reaksiyonların bulunmaması anlamına gelir. Bazen reaksiyon, arayüzeyde intermetalik bileşiklerin oluşmasına neden olabilir, bu da yükün donatılara aktarılması nedeniyle istenmeyen ve tehlikeli sonuçlara yol açabilir. Ayrıca reaksiyon ürünleri çatlak oluşumu için başlangıç noktası görevi görebilir (Pandey, 2001). Metal matrisli kompozitler, mukavemet, iyi aşınma direnci, yüksek

sertlik ve korozyon dayanımı gibi hayati önem taşıyan özelliklere sahiptirler. Sünek metal ve sert seramik takviyesinin birleşiminden dolayı da havacılık, uzay, savunma ve imalat gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılırlar. Bu kompozitleri üretmek için geleneksel döküm ve toz metalurjisi yöntemleri yaygın olarak kullanılırken, bileşenler arasındaki kimyasal reaksiyon gerçekleşen yöntemler de tercih edilmektedir. Geleneksel tekniklerin aksine kompozit üretimi, bileşenlerin ayrı ayrı karıştırılması (Ex-situ) ihtiyacını ortadan kaldırarak kimyasal reaksiyonlar yoluyla (In-situ) gerçekleştirilebilir. Her iki yaklaşım da sürekli ve süreksiz pekiştirme dönemleriyle sonuçlanabilir. Takviye malzemeleri fiber, kısa fiber veya parçacık formunda olabilir (Koçyiğit, 2023). In-situ yöntemiyle metal matrisli kompozit üretimi, Ex-situ üretim yöntemlerine göre bazı avantajlar sunar. Yerinde takviye oluşumu, matris ve takviye arasında temiz arayüzleri, matris içinde takviye fazının eşit dağılımını ve sonuç olarak gelişmiş mekanik mukavemet ve termal stabiliteyi garanti eder. Yerinde parçacık takviyesi, element sistemlerinin belirli oranlarda birleştirilmesi ve kontrollü sıcaklıklara tabi tutulmasıyla elde edilebilir. Bu nedenle üretimi diğer takviye türlerine göre hızlı ve uygun fiyatlı olabilir. Ancak tanelerin büyümesi ve istenmeyen fazların gelişmesi bu teknikte optimizasyon gerektiren faktörlerdir (Koçyiğit, 2023). Metal matrisli kompozitler (MMK) çeşitli teknikler kullanılarak üretilebilmektedir. Bunlardan birisi olan toz metalurjisi; metalleri ve metal alaşımlarını, belirli boyutlardaki parçacıklara bağlayıcılar ve yağlayıcılar eklemeyi içeren ısıl işleme tabi tutarak mukavemetini arttırmak için kullanılan bir tekniktir. İnce parçacıklı metalik parçacıkların üretilmesi, işlenmesi, elde edilmesi ve teknolojiye

kazandırılması işlemi, ince parçacıklı metalik parçacık üretimi olarak bilinir (Picken, 1981). Ana bileşen erime noktasının altındaki sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulduktan sonra istenilen malzeme oluşur. Toz parçacıklarının temas ettiği yüzeyler güçlü bir bağlantı kurarak istenilen özelliklerin elde edilmesini sağlar (Demirel, 2007). Bu çalışmada T/M tekniğiyle spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak saflık oranları yüksek olan toz elementlerle Cu matrisli C ve Cr takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Artan oranlarda C ve Cr tozu kullanarak üretilen Cu matrisli kompozit malzemeler; mekanik özellik, mikroyapı ve yoğunluk bakımından karakterize edilmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek için mikrosertlik ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Mikroyapısal incelemelerde ise SEM ve SEM/EDS incelemeleri ile XRD analizlerinden faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar benzer çalışmalarla karşılaştırılarak literatüre kazandırılacaktır.

Materyal ve Yöntem

Deneylede Sigma-aldrich'in firmasından temin edilmiş %99 saflığa sahip Cu tozu kullanılmıştır. Bu tozun parçacık boyutu 14 ila 25 μm arasında değişmektedir. Şekil 1.a'da verilen SEM görüntüsünden Cu tozunun küresel şekilli olduğu görülmektedir. Cr tozu Atlantic Equipment Engineers firmasından temin edilmiştir. Şekil 1.b'de Cr tozunun SEM görüntüsü verilmiştir. Cr tozu %99,8 saflıkta olup parçacık boyutu 1 ila 5 μm aralığındadır. Kullanılan grafit tozunun parçacık boyutu ise 20 μm 'nin altındadır.



Şekil 1: Deneylerde kullanılan Bakır ve Krom tozunun SEM görüntüleri; a) Bakır tozu, b) Krom tozu

Tablo 1’de belirtilen toz karışımlarını elde edebilmek için saf Cu, Cr ve C tozları 0,0001 gr hassasiyetli terazide tartılmıştır. Sonrasında tartılan tozlar homojen karışım elde edilebilmek ve topaklanmaması için çelik bilyelerle falkon tüplere doldurularak 120 dakika boyunca sabit devir altında turbulada karıştırılmıştır.

*Tablo 1: Başlıklar tümce düzeninde italik ve 12 punto olmalıdır.
Time New Roman ve ortalı*

Numune Adı	Cu	Cr	C
CuCr10C1,5	88,5	10	1,5
CuCr20C3	77	20	3
CuCr30C4,5	65,5	30	4,5

Homojen karıştırılan tozlar, argon gazı atmosferinde 900 oC sıcaklık ve 35 MPa basınç altında Şekil 2’de gösterilen grafit kalıplar kullanılarak 4 dakika boyunca Şekil 3’deki SPS makinesinde üretilmiştir.

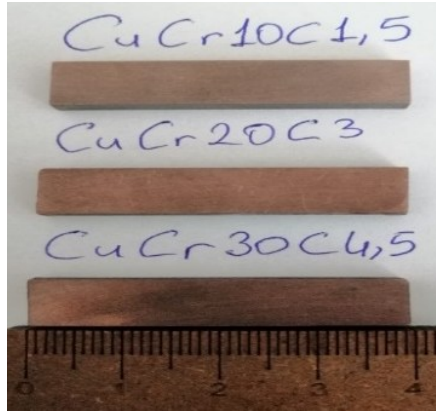


Şekil 2: Grafit kalıp



Şekil 3: SPS makinesi

Şekil 4'de gösterilen 40x10x4 mm ölçülerinde SPS yöntemiyle hazırlanan malzemelerin mikroyapılarını incelemek üzere zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işlemi her bir numune için sırasıyla 120-240-400-600-1000-1200 gritlik SiC zımpara kağıtları kullanılarak sulu ortamda zımparalanmış ve 1 µm'lık elmas süspansiyonla parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4: SPS'de 40x10x4 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler

Yüzey zımparalama ve parlatma işleminden sonra malzemelerin mikroyapısını inceleyebilmek için numuneler %36 saf su, %36 amonyum hidroksit, %21 nitrik asit, %7 hidrojen peroksit ile hazırlanan çözeltide 45 saniye bekletilerek dağlama işlemi yapılmıştır. SEM ve SEM/EDS incelemeleri JEOL JSM 6510 SEM mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS cihazı ile yapılmıştır. X ışını difraksiyonu (XRD) bilinmeyen bir malzemeyi tanımlamak veya bilinen malzemenin atomik boyutlardaki yapısını tayin etmek için kullanılır. XRD analizi, Munzur Üniversitesinde 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızı ile Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405$)

kullanılarak Rigaku marka Miniflex 600 cihazında yapılmıştır. Üç Nokta eğme testi Şekil 5’de gösterilen Shimadzu marka 50 kN’luk test cihazında 1 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5: Üç nokta eğme test cihazı

Yüzeyleri daha önce zımparalanmış ve parlatılmış numuneler AOB marka cihazda Vickers mikrosertlik ölçüm yöntemiyle 300 gr yükün 10 sn uygulanması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Her numune için 9 farklı noktadan 0,5 mm aralıklarla ölçüm yapılarak ortalama değer esas alınmıştır.

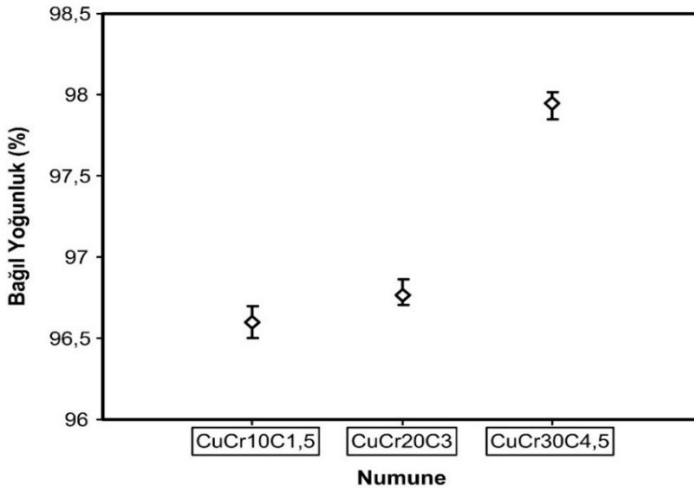
Sonuçlar ve Tartışma

Üretilen malzemelerin yoğunlukları, yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin teorik yoğunlukları ve Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Hesaplanan bağıl yoğunluk değerleri Şekil 6’de grafik halinde verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde Cr miktarındaki artışla birlikte elde edilen bağıl yoğunluk değerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek bağıl yoğunluk değerine ağırlıkça %30 Cr içeren kompozitte ulaşılmış olup, bu değer ortalama %97,947 olmuştur. Özgür ve Erçetin

tarafından geleneksel sinterleme ile üretilen Cu matrisli Cr ve C takviyeli kompozitlerde de artan Cr ve C oranına bağlı olarak bağlı yoğunluk değerlerinin arttığı bildirilmiştir (Özgün&Erçetin, 2017). Söz konusu çalışmada ağırlıkça %40 Cr ve %4 C takviye edilen kompozitte %95,1 bağlı yoğunluğa ulaşıldığı belirtilmiştir. Tez çalışmasında spark plazma sinterleme yöntemi sayesinde daha düşük Cr-C ilavelerinde bile daha yüksek bağlı yoğunluklara ulaşılmıştır.

Tablo 2: Üretilen kompozitlerin teorik ve ölçülen yoğunluk değerleri

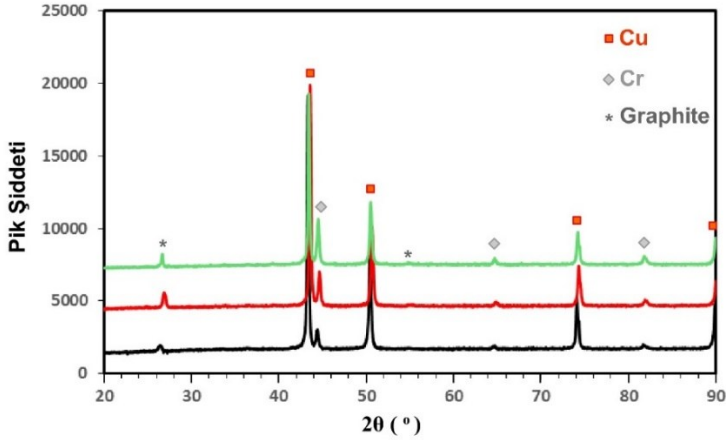
Numune	Teorik Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Ölçülen Yoğunluk (g.cm ⁻³)
Cu-Cr10-C1,5	8,2784	7,9969
Cu-Cr20-C3	7,708	7,45883
Cu-Cr30-C4,5	7,2111	7,06306



Şekil 6: Üretilen kompozitlerde elde edilen bağlı yoğunluk değerleri

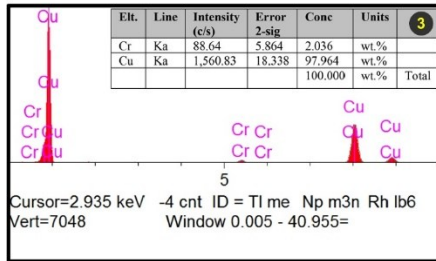
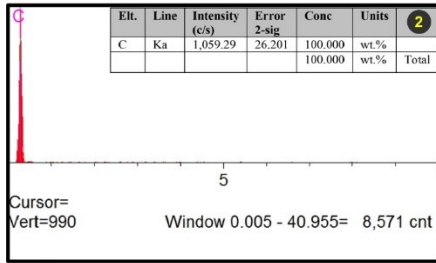
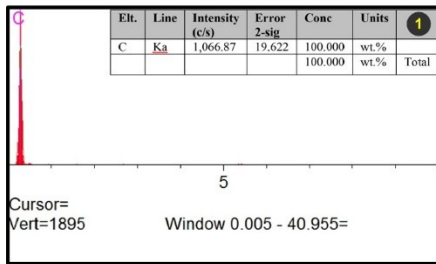
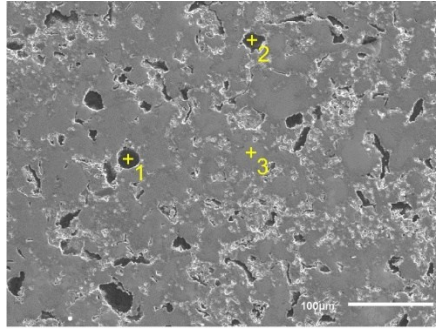
Şekil 7’de üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde her üç numunenin de kırınım desenlerinde Cu, Cr ve grafit olmak üzere sadece üç faz bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada her ne kadar Cu içerisine Cr ile birlikte C ilave edilerek mikroyapıda karbür bileşikleri oluşturmak ve bu sayede sertliği ve mukavemeti artırmak amaçlanmış olsa da kırınım desenlerinde Cr ve C tarafından oluşturulmuş karbürlere ait pikler bulunmamaktadır. İlave edilen C, Cr ile reaksiyona girmemiş ve grafit halinde kalmıştır. (Özgün&Erçetin, 2017), aynı amaçla geleneksel sinterleme ile ürettikleri Cu-Cr-C kompozitlerin XRD analizinde Cr ve C tarafından oluşturulmuş karbürlere ek olarak sinterleme işleminin azot atmosferinde gerçekleştirilmesine bağlı olarak Cr tarafından oluşturulmuş nitrür bileşiklerine ait pikler de bulunduğunu rapor etmişlerdir (Özgün & Erçetin, 2017). Söz konusu çalışmaya kıyasla tez çalışmasında numune üretimi hem 900oC gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta hem de 35,42 MPa gibi yüksek bir basınç uygulanarak gerçekleştirildiği için Cr ve C elementlerinin difüzyonunun reaksiyona girmelerine yetecek düzeyde olmadığı ve buna bağlı olarak karbür bileşikleri oluşturamadıkları düşünülmektedir. Kırınım desenleri incelendiğinde grafit fazına ait piklerin şiddetinin artan C oranıyla birlikte artış sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte ilave edilen Cr oranındaki artış Cu fazına ait piklerin şiddeti azalırken Cr fazına ait piklerin şiddeti ise doğal olarak artmıştır. Cr içeren farklı malzeme gruplarının toz metalürjisi teknikleri ile üretiminde yüksek saflıktaki soy gazlar kullanılarak gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde Cr’un oksit bileşikleri oluşturduğu bildirilmektedir (Özgün&ark., 2012; Özgün&ark., 2013). tez çalışmasında yüksek saflıktaki argon

atmosferinde gerçekleştirilen spark plazma sinterleme işlemi esnasında böyle bir oksit oluşumu söz konusu olmamıştır.



Şekil 7: Üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenleri

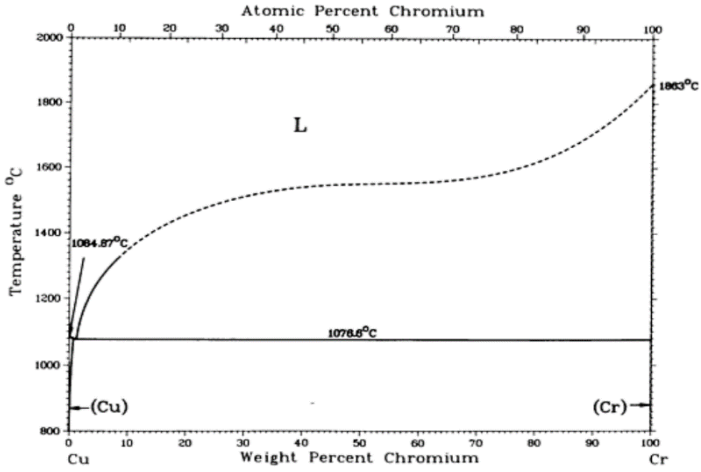
Şekil 8'de %30 Cr ve %4,5 C ilave edilmiş numuneden dağlama işlemi yapılmadan alınan SEM/EDS nokta analizine ait görüntüler verilmiştir. Gözenek gibi görünen 1 ve 2 numaralı bölgelerden alınan nokta analizleri, bu bölgelerde C elementi dışında başka bir element bulunmadığını göstermiştir. Bu durum, yukarıda XRD analizi ile ilgili açıklamalarda da belirtildiği gibi SPS işlemi esnasında Cr ve C elementleri arasında herhangi bir reaksiyon oluşmadığını ve ilave edilen C'un grafit halinde mikroyapıda dağılmış olduğunu göstermektedir. Grafit fazı, her yerde aynı boyut ve morfolojiye sahip değildir. Bazı bölgelerde lamel bazı bölgelerde ise disk şeklinde oluşmuş olduğu görülen bu faz, birkaç μm 'den 40 μm 'ye kadar bir boyut dağılımı sergilemektedir. 3 numaralı nokta analizi bakır matristen alınmış olup, beklendiği gibi çok az miktarda Cr dışında %97,964 Cu içermektedir.



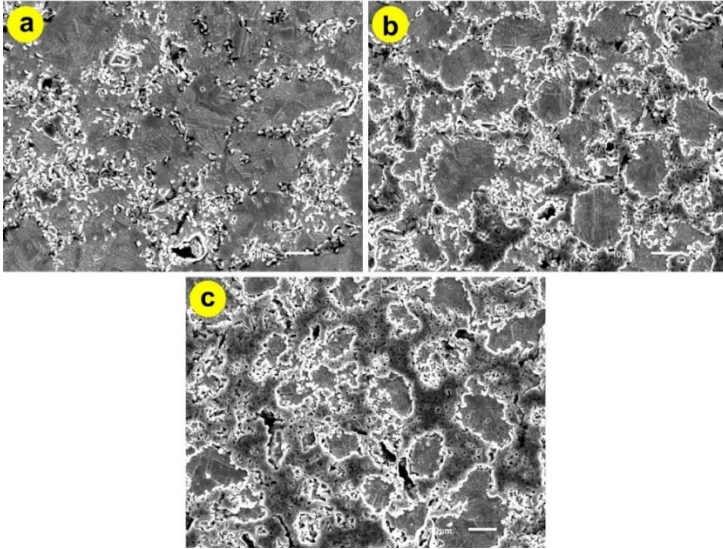
Şekil 8: CuCr30C4,5 numunesinden dağlama işlemi öncesi alınmış SEM/EDS nokta analizi

Şekil 9’da Cu-Cr faz diyagramı, Şekil 10’da ise üretilen kompozitlerden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Cu-Cr faz diyagramına göre (Chakrabarti&Laughlin, 1984) gerek SPS işleminin uygulandığı 900 oC’de gerekse oda sıcaklığında Cr’un Cu içerisinde hiç çözünemediği görülmektedir. Bu nedenle ilave edilen tüm Cr’un tane sınırlarında bulunduğu görülmektedir. %10 Cr ilave edilen numuneye ait SEM görüntüsünden tane sınırlarındaki Cr fazının bazı bölgelerde ayrık parçacıklar halinde, bazı bölgelerde ise kümelenmiş parçacıklar halinde bir dağılım sergilediği görülmektedir. İlave edilen Cr miktarındaki artış, Cr fazının matris tanelerini çevreleyen ve birbiriyle bağlantılı olan sürekli bir ağ oluşturmasına neden olmuştur. Bu durum özellikle %30 Cr içeren numunenin SEM görüntüsünde çok daha belirgindir. Takviye fazının tüm numunelerde homojen bir dağılım sergilediğinden söz etmek mümkündür. T/M teknikleri ile üretilen çoğu metal matrisli kompozit sisteminde matris-takviye elemanı arayüzeylerinde yetersiz bağlanmanın üretilen kompozitlerin özelliklerini olumsuz yönde etkilediği rapor edilmektedir (Uddin &ark., 2010), (Efe&ark., 2011), (Prosviryakov, 2015). Matris-takviye elemanı ara yüzeyindeki yetersiz ıslatma hem üretimde zorluklara yol açmakta hem de servis şartlarında kompozitin bu ara yüzeylerden hasara uğramasına neden olmaktadır (Zhan&Zhang, 2003). Bu problemin üstesinden gelmek amacıyla çoğu kompozit sisteminde ara yüzey bağını geliştirecek tedbirlerin alınması gerekmektedir (Ning&ark., 2005). SEM görüntüleri incelendiğinde şimdiki çalışmada Cu matris ile Cr tarafından oluşturulan fazların ara yüzeyinde herhangi özel bir tedbir uygulanmadan iyi bir bağlanmanın meydana gelmiş olduğu görülmektedir. Tüm numunelerin SEM görüntülerinde YMK

yapıdaki Cu matriste bol miktarda tavlama ikizi oluşmuş olduğu görülmektedir.

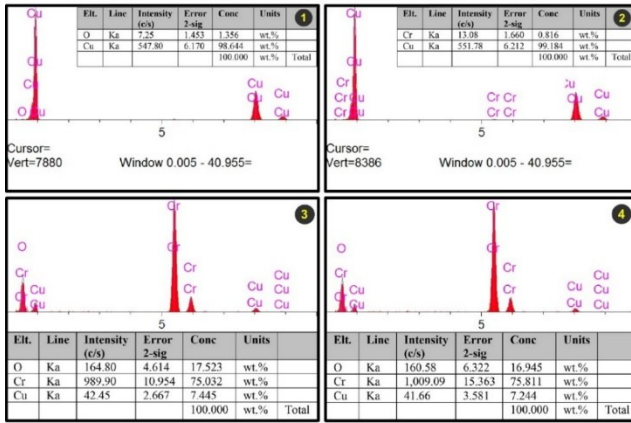
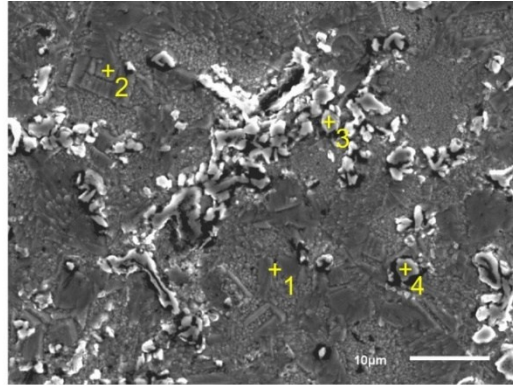


Şekil 9: Cu Cr faz diyagramı (Chakrabarti & Laughlin, 1984)



Şekil 10: Numunelerin SEM görüntüleri; a) CuCr10Cr1,5, b) CuCr20Cr3, c) CuCr30Cr4,5

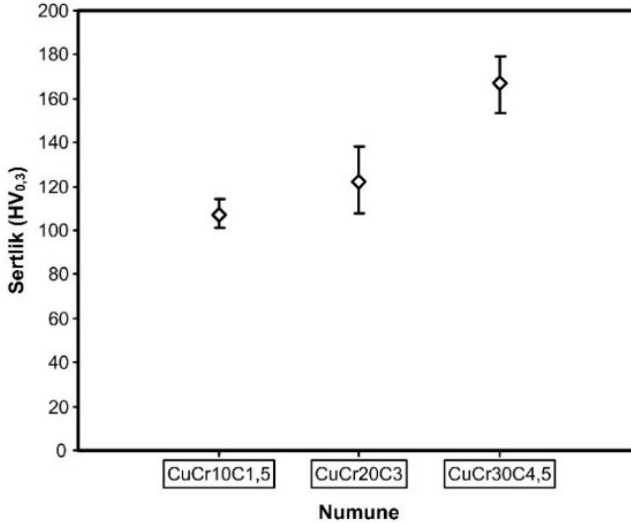
Şekil 11’de CuCr10C1,5 numunesinden alınmış SEM/EDS analizine ait görüntüler verilmiştir. Cu matriste bulunan 1 numaralı bölgede ağırlıkça %98,644 Cu ve %1,356 oksijen bulunmaktadır. Üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenlerinde herhangi bir oksit bileşiğine ait pike rastlanmamış olmasına rağmen bu bölgede oksijen bulunmasının dağlama işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu düşünceyi dağlanmamış numuneden alınan SEM/EDS nokta analizi sonuçları da desteklemektedir. Cu matrisin başka bir bölgesinden alınan 2 numaralı nokta analizi, Cu matris içinde çok düşük miktarda Cr bulunduğunu göstermiştir (%99,184 Cu ve %0,816 Cr). Faz diyagramına göre Cr’un Cu içerisinde hiç çözünemediği göz önünde bulundurulduğunda bu bölgede bir katı çözeltilinin varlığından söz edilemez. Bu bölgede bulunan düşük miktardaki Cr’un matris içerisinde hapsolmuş küçük boyutlu Cr parçacıkları halinde bulunduğu düşünülmektedir. 3 ve 4 numaralı bölgelerden alınan EDS nokta analizleri, buradaki çökeltilerin ana bileşenin Cr olduğunu göstermiştir. Her iki noktada da nerdeyse aynı kimyasal bileşim söz konusu olup yaklaşık %75 Cr bulunmaktadır. Cr’la birlikte düşük miktarda Cu ve yaklaşık %17 oksijen bulunmaktadır. Yukarıda Cu matris içerisindeki oksijenle ilgili yapılan açıklama bu noktalar için de geçerli olup, XRD analizinde herhangi bir oksit bileşiğine rastlanmadığı halde burada oksijen bulunmasının dağlama işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 11: CuCr10C1,5 numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler

Şekil 12’de üretilen kompozitlerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Cr takviye oranındaki artışa bağlı olarak daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek sertlik değeri CuCr30C4,5 numunesinde elde edilmiş olup ortalama 166,96 HV’dir. Bu değer, (Özgün&Erçetin, 2017) tarafından geleneksel sinterleme ile üretilmiş CuCr30C3 kompozitinin sertliğine (223 HV) göre oldukça düşüktür. Söz konusu çalışmada 1070 oC’de ve yüksek saflıktaki N2 atmosferinde gerçekleştirilen geleneksel sinterleme sonucu Cr

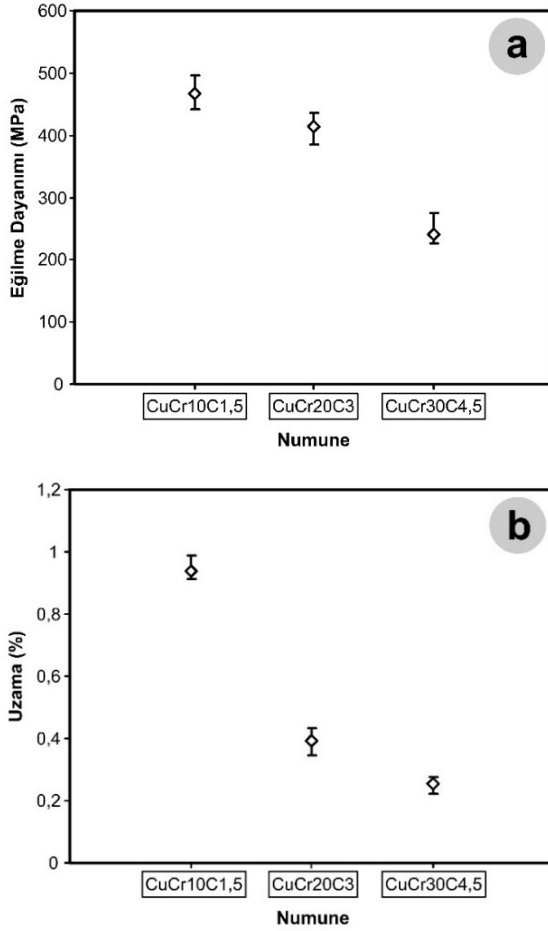
tarafından oluşturulmuş karbür ve nitrür bileşikleri olduğu bildirilmiştir (Özgün&Erçetin, 2017). Şimdiki çalışmada da karbür bileşikleri oluşturularak sertlik ve mukavemetin artırılması hedeflenmiştir. Fakat 900oC’de ve 35 MPa basınç altında gerçekleştirilen SPS işlemi sonucu böyle bir bileşik oluşturulamamıştır. Dolayısıyla sertlik değerleri daha düşük olmuştur. (Balalan&Özgün, 2018), geleneksel sinterleme ile ürettikleri saf bakırın sertliğinin 39,95 HV, ağırlıkça %25 SiC partikül takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğinin ise 149,6 HV olduğunu bildirmişlerdir (Balalan&Özgün, 2018). Tez çalışmasında üretilen tüm kompozitlerde saf bakıra kıyasla oldukça yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında CuCr30C4,5 numunesinde ağırlıkça %25 SiC takviyeli kompozitin sertliğinden daha yüksek sertlik değerine ulaşılmıştır. (Chang&ark., 1999) 600oC’de 300 MPa basınç uygulayarak sıcak presleme ile ürettikleri saf bakırın sertliğinin 70 HV olduğunu bildirmişlerdir. Aynı koşullarda ürettikleri hacimsel olarak %11,6 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 120 HV, hacimsel olarak %19,8 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 156 HV, hacimsel olarak %30,3 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 193 HV, hacimsel olarak %40 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 235 HV olarak rapor etmişlerdir (Chang&ark., 1999).



Şekil 12: Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri

Üretilen kompozitlerin 3 nokta eğme deneyi sonucu elde edilen eğilme mukavemetleri Şekil 13.a'da, %uzama değerleri ise Şekil 13.b'de verilmiştir. Şekil 13.a incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımının 466,774 MPa olarak CuCr10C1,5 numunesinde elde edildiği görülmektedir. Artan Cr ve C takviye oranı, eğilme dayanımını düşürmüştür. Benzer düşüş %uzama değerleri için de geçerlidir. Literatürde farklı takviye elemanları kullanılarak farklı yöntemlerle üretilmiş Cu matrisli kompozitlerin eğilme dayanımları ile ilgili çok veri bulunmaktadır. (Balalan&Özgün 2018), geleneksel sinterleme ile ürettikleri ağırlıkça %5 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetinin 202,7 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Artan SiC takviye oranının eğilme mukavemetini düşürdüğünü ve ağırlıkça %25 SiC partikül takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetinin 88,2 MPa olduğunu rapor etmişlerdir (Balalan&Özgün, 2018). (Wang&ark., 2013) Geleneksel

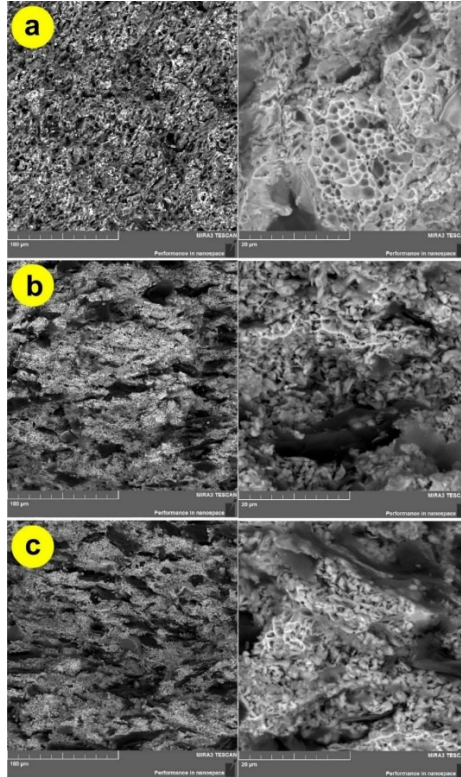
sinterleme yöntemiyle ürettikleri grafit takviyeli Cu matrisli kompozitlerde en yüksek eğilme mukavemetinin 223 MPa olarak %3 grafit takviye edilen kompozitte elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Artan grafit takviye oranının eğilme mukavemetini azalttığını bildirmişlerdir (Wang&ark., 2013). (Chang&ark., 1999) 600oC'de 300 MPa basınç uygulayarak sıcak presleme ile ürettikleri saf bakırın eğilme mukavemetinin 260 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Aynı koşullarda ürettikleri hacimsel olarak %11,6 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 555 MPa, hacimsel olarak %19,8 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 739 MPa, hacimsel olarak %30,3 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 536 MPa, hacimsel olarak %40 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 499 MPa olarak rapor etmişlerdir (Chang&ark., 1999). (Ngai&ark., 2013), 950oC'de 50 MPa basınç uygulayarak SPS yöntemiyle Ti₃SiC₂ takviyeli Cu matrisli kompozitler üretilmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitlerden ağırlıkça %5Ti₃SiC₂ takviyeli Cu matrisli kompozitte 410 MPa eğilme mukavemeti elde etmişlerdir. Artan Ti₃SiC₂ takviye oranının eğilme mukavemetini azalttığını ve %35 takviyeli kompozitte yaklaşık 105 MPa'a düştüğünü bildirmişlerdir (Ngai&ark., 2013). Literatürdeki bu verilerle kıyaslandığında tez çalışmasında üretilen CuCr₁₀C_{1,5} kompozitinin eğilme dayanımının oldukça iyi olduğu söylenebilir. Genel olarak takviye fazının artışı literatürde de %uzama değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 13: Üretilen kompozit numunelerin; a) eğilme dayanımları, b) % uzama değerleri

Şekil 14'de 3 nokta eğme deneyi sonrasında kırık yüzeylerinden alınmış farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. 1000x büyütme ile alınmış görüntüler (soldaki) incelendiğinde özellikle %3-4,5C ilave edilen numunelerin görüntülerinde daha belirgin ve iri olmak üzere siyah renkli grafit

fazı görülmektedir. Grafit fazı bazı bölgelerde lamellere benzemekle birlikte genel olarak karmaşık bir morfoloji sergilemektedir. Şekil 14.a'daki CuCr10C1,5 numunesinin 5000x ile alınan görüntüsünde (sağdaki) kırılma yüzeyinde sünek kırılmaya işaret eden yüksek miktarda gamze şeklinde çukurcuk (dimple) oluşumu görülmektedir. Daha yüksek Cr ve C ilave edilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinde gamze şeklinde çukurcuk oluşumu azalmıştır. Cr ve C oranlarındaki artışla Cr ve grafit fazlarının miktarı ve boyutları artmakta ve daha gevrek bir kırılma yüzeyi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 14: Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri; a) CuCr10C1,5, b) CuCr20C3, c) CuCr30C4,5

Sonuçlar

1) SPS tekniği üretilen kompozitler, genel olarak %96'nın üzerinde bağıl yoğunluk değerlerine ulaşmıştır. SPS işleminde uygulanan 900 oC sıcaklık, 35 MPa basınç ve 4 dakika bekleme süresi parametrelerinin bu kompozisyonlar için uygun olduğu görülmüştür. İlave edilen Cr ve C oranlarındaki artışla birlikte elde edilen bağıl yoğunluk değerleri de artmıştır. En yüksek bağıl yoğunluk değeri %97,947 olarak CuCr30C4,5 kompozitinde elde edilmiştir.

2) XRD analizi, Cu matris içerisine ilave edilen Cr ve C'nun herhangi bir bileşik oluşturmadığını göstermiştir. İlave edilen Cr tane sınırlarında Cr fazı olarak C ise grafit olarak mikroyapıda yer almıştır. Yüksek saflıkta argon atmosferinde gerçekleştirilen SPS işleminde üretilen kompozitlerde herhangi bir oksit bileşiği oluşturmamıştır.

3) SEM incelemelerinde üretilen kompozitlerde Cu matris ve Cr tarafından oluşturulan fazlar ayırt edilebilmektedir. Cr fazı genellikle tane sınırlarında bulunmakla birlikte CuCr10C1,5 numunesinde daha çok ayırık parçacıklar halinde mikroyapıya dağılmışken %20 ve %30 Cr ilave edilen numunelerde kümelenerek ve birleşerek matrisin tane sınırlarını kuşatan sürekli bir ağa dönüşmüştür. Grafit fazı belirgin bir morfolojiye sahip olmayıp özellikle %3 ve %4,5 C eklenen numunelerde tüm mikroyapıya yayılmış halde bulunmaktadır.

4) Üretilen kompozitlerde Cr ve C oranındaki artışla birlikte daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir (CuCr30C4,5 numunesinde 166,96 HV). Literatürle kıyaslandığında saf bakıra ve

birçok Cu matrisli kompozite göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmıştır. Sertlik değerlerinin yüksek olması özellikle aşınma direnci bakımından önemlidir.

5) Uygulanan 3 nokta eğme testi sonucu en yüksek eğilme dayanımı ve %uzama değeri sırasıyla 466,774 MPa ve %0,94 ile CuCr10C1,5 kompozitinde elde edilmiştir. Artan Cr ve C oranıyla birlikte hem eğilme dayanımlarında hem de %uzama değerlerinde düşüş olmuştur. Hem en yüksek eğilme dayanımının hem de en yüksek %uzama değerinin CuCr10C1,5 numunesinde elde edilmesi Cr fazının mikroyapıda sürekli bir ağ şeklinde değil, ayrık parçacıklar halinde oluşmuş olmasına bağlanmaktadır. Sürekli bir ağ oluşumu dayanım ve sünekliği azalmaktadır.

6) Kırılma yüzeyleri kıyaslandığında CuCr10C1,5 numunesinin daha sünek bir kırılma sergilediği anlaşılmaktadır.

Kaynakça

- ASM Handbook, (2001). Composites, 21, pp.1-20.
- Balalan, Z. & Ozgun, O. (2018). Effect of production route on the microstructure and mechanical properties of Cu-SiCp composites, Arab. J. Sci. Eng. 43, 4889.
- Chakrabarti, D. J. & Laughlin, D. E. (1984). Cr-Cu (Chromium-Copper), in ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.
- Chang S. Y. & Lin J. H. & Lin S. J. & Theo Z. K. (1999). Processing Copper and Silver Matrix composites by Electroless Plating and Hot Pressing, Metallurgical and Materials Transactions A, 30, 1136.
- Demirel, M. (2007). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni₃Al Metaller Arası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Efe, G.C. & Yener T. & Altınoy, I. & Ipek M. & Zeytin, S. & Bindal, C. (2011). The Effect of Sintering Temperature on Some Properties of Cu-SiC Composite, J Alloy Compd 509: 6036-6042.
- Hiçyılmaz, N. (1999). Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli 118 Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Koçyiğit, M. (2023). In-Situ Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ngai, T.L. & Zheng, W. & Li, Y. (2013). Effect of Sintering Temperature on the Preparation of Cu–Ti₃SiC₂ Metal Matrix Composite, *Progress in Natural Science: Materials International*, 23(1), 70-76.

Ning, Y. & Patnaik, P.C. & Liu, R. & Yao, M. X. & Wu, X. J. (2005). Effects of Fabrication Process and Coating of Reinforcements on The Microstructure and Wear Performance of Stellite Alloy Composites, *Materials Science and Engineering A* 391 (2005) 313-324.

Pandey, A. B. (2001). *ASM International Handbook. Metallic Matrices*, 380-382.

Picken, J. R. (1981). Aluminium Powder Metallurgy Technology for High-Strength Applications, *Journal of Materials Science*, 16(6), 1437-1457.

Prosviryakov, A. S. (2015). SiC Content Effect on The Properties of Cu–SiC Composites Produced by Mechanical Alloying, *J Alloy Compd* 632: 707-710.

Özgün, Ö. & Erçetin, A. (2017). Microstructural and Mechanical Properties of CrC Reinforced Cu Matrix Composites Produced Through Powder Metallurgy Method, *Turkish Journal of Nature and Science*, 6, 1 .

Ozgün, Ö. & Gülsoy, H. Ö. & Findik, F. & Yilmaz, R. (2012). Microstructure and Mechanical Properties of Injection Moulded Nimonic-90 Superalloy Parts, *Powder Metall.* 55 405-414.

Özgün, Ö. & Gülsoy, H. Ö. & Yilmaz, R. & Findik, F. (2013). Injection Molding of Nickel Based 625 Superalloy: Sintering, Heat

Treatment, Microstructure And Mechanical Properties, J. Alloys Comp. 546 192-207.

Şahin, Y. (1999). Kompozit Malzemelere Giriş, Ankara, Gazi Kitabevi.

Torquato, S. (2000). Modeling of Physical Properties of Composite Materials, International Journal of Solids and Structures, (37), 411-422.

Uddin, S. M. & Mahmud, T. & Wolf, C. & Glanz, C. & Kolaric, I. & Volkmer, C. & Fecht, H. J. (2010). Effect of Size and Shape of Metal Particles to Improve Hardness and Electrical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Copper and Copper Alloy Composites, Compos Sci Technol, 70(16), 2253-2257.

Wang, J. & Zhang, R. & Xu, J. & Wu, C. & Chen, P. (2013). Effect of the Content of Ball-Milled Expanded Graphite on the Bending and Tribological Properties of Copper–Graphite Composites. Materials and Design 47, 667-671.

Xu, Q. & Zhang, X. & Han, J. & He, X. & Kvanin, V. L. (2003). Combustion Synthesis and Densification of Titanium Diboride-Copper Matrix Composite. Materials letters, 57(28), 4439-4444.

Zhan, Y. & Zhang, G. (2003). The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiCp/Cu composites. Materials Letters, 57(29), 4583-4591.

BÖLÜM III

Kompozit Malzemelerde Yaşlandırma İşlemleri ve Güncel Yaşlandırma İşlemi Uygulamaları

Ersan KIRAR¹

1.Giriş

Son yıllarda, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemeler giderek daha fazla kabul görerek birçok alanda daha geniş uygulama alanı bulmuştur. FRP kompozit malzemeler; cam, karbon, aramid ve bazalt lifler ile epoksi, vinil ester ve polyester gibi çeşitli reçine malzemelerinin bir araya getirilmesiyle üretilebilir (Liu & ark., 2020). Polimerik kompozitler, kullanım ömürleri esnasında uzun süreler boyunca belirli çevre koşullarına maruz kalmaları sebebiyle bozunurlar. Bu bozunma aşamasında genellikle kompozit malzemenin performanslarında ve özelliklerinde, önceden tahmin

¹ Öğr. Gör. Dr. Ersan KIRAR, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, Şanlıurfa/Türkiye, Orcid: 0000-0002-7980-4815, ekirar@harran.edu.tr

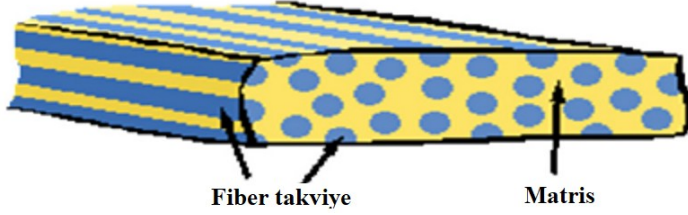
edilebilmesi yararlı olacak, neredeyse her zaman geri döndürülemez değişikliklere yol açmaktadır (Frigione & ark., 2021).

Literatür araştırmasında kompozit malzemelerin çevresel şartlar nedeniyle bozulmalarını inceleyen oldukça çalışmaya rastlanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda yapay ya da doğal yaşlandırma işlemlerini tercih ettikleri görülmüştür. Kompozit malzemelerin yaşlandırma mekanizmasını açıklamak, yaşlandırma çeşitlerine değinmek ve literatürde bulunan son beş yılda yapılan çalışmaları değerlendirmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

2.Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, kendini oluşturan malzemelerden daha iyi performans gösteren iki ya da daha fazla malzemedен oluşmaktadır (Karataş & ark., 2018; Khan & ark., 2024). Mezopotamyalılar ve Mısırlılar bu malzemeyi ilk olarak MÖ 1500'de çamur ve bir karışımla tuğla yapımında kullanmışlardır. Ancak Moğollar MS 1200'de ilk olarak yay yapmak için kompozit malzemeleri kullanmışlardır. Böylece, bu malzemeler ilk olarak askeri uygulamalarda yüksek performans için kullanılmış oldu (Khan & ark., 2024).

Kompozit malzemelerin iç yapısı iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler matris ve takviyedir. Bu iki bileşen arasındaki belirli özelliklere sahip olan üç boyutlu bölge, ara faz bölgesi olarak bilinmektedir. Takviye fazının matris fazıyla çevrili olduğu kompozit malzemelerin iki fazlı yapısı, her iki malzemenin üstün özelliklerinin kullanılmasını sağlar (Karataş & ark., 2018)



Şekil 1. Kompozit malzemenin iç yapısı (Panwar & ark., 2018)

Kompozitlerin uygulaması; uçak, uzay aracı, otomobil ve gemilerin imalatında görülebilir. Hafif ve dayanımlı yapılara duyulan ihtiyaç nedeniyle birçok alanda uygulaması bulunmaktadır (Kushwaha & ark., 2020; Khan & ark., 2024).

3.Kompozit Malzemelerin Yaşlandırılması

Polimerik kompozit malzemeler (PMK) kullanım alanlarında buldukları iklim şartlarına bağlı olarak ışık radyasyonu, yağmur, kirlilik, oksijen, sıcaklık, nem vb. parametrelerden etkilenerek bozulmaya maruz kalırlar (Doğan, 2019). Polimerik kompozit malzemelerin ömrünün tahmini, felaketle sonuçlanan hasarların sonuçlarına karşı malzeme hasarını izole etme ve tanımlama avantajı sunmaktadır. Bu nedenle, bir malzemenin kullanım ömrünün doğru olarak tahmin edilmesi özellikle uygulamada güvenlik açısından çok önemlidir (Plota & ark., 2020).

Kompozit malzemelerin depolama, servis koşulları ve çeşitli çevre koşullarına maruz kalmaları sonucunda bu tür malzemeler daha savunmasız hale gelir ve bu da bozularak fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin değişmesine sebep olur. Bu durum malzemedeki uzun vadeli dayanım performanslarını büyük ölçüde azaltır ve mikroskobik ölçekte veya mikro çatlaklar kaynaklı hasara

sebepler olur (Raji & ark., 2019; Liu & ark., 2020). Polimerik kompozit malzemelerin özelliklerini en çok etkileyen çevresel faktörler; sıvı veya buhar su, sulu çözeltiler, oksijen, UV/güneş radyasyonları, sıcaklık değişimleri, kimyasallar, asitli veya alkali ortamlar, yakıtlar, kirleticilerdir (Frigione & ark., 2021; Liu & ark., 2020).

- **Kompozit malzemelerin doğal yaşlandırılması:** Polimerik kompozit malzemelerin dayanıklılık özellikleri, birçok doğal çevresel koşullarda yaşlandırılmış numunelerin testleri yapılarak tespit edilebilmektedir. Bu yaşlandırma işlemleri; (Raji & ark., 2019)

1. Kimyasal yaşlanma: Kimyasal yaşlanma, uzun bir yaşlanma sürecinden sonra oluşur ve PMK yapısındaki polimerin özelliklerinde, zincir kopması veya çapraz bağlanma gibi bazı kimyasal modifikasyon mekanizmalarını içeren geri döndürülemez ağ/zincir değişiklikleriyle birlikte bir bozunmayı ifade etmektedir.

- Termo oksidasyon yaşlanması
- Hidrolik yaşlanma
- Termal yaşlanma (Raji & ark., 2019)

2. Fiziksel yaşlanma: Fiziksel yaşlanma, PMK yapısındaki polimerin kimyasal yapısında kalıcı bir değişiklik meydana getirmeyen ve özelliklerinde geri dönüşümlü değişimler meydana getirir.

- Aşınma
- Hidrotermal yaşlanma

-Mikroorganizmalar tarafından biyolojik bozunma (Raji & ark., 2019)

3. Mekanik yaşlanma: Kompozit malzemenin mekanik etkilerden kaynaklı yaşlanmasını kapsamaktadır.

-Sürünme

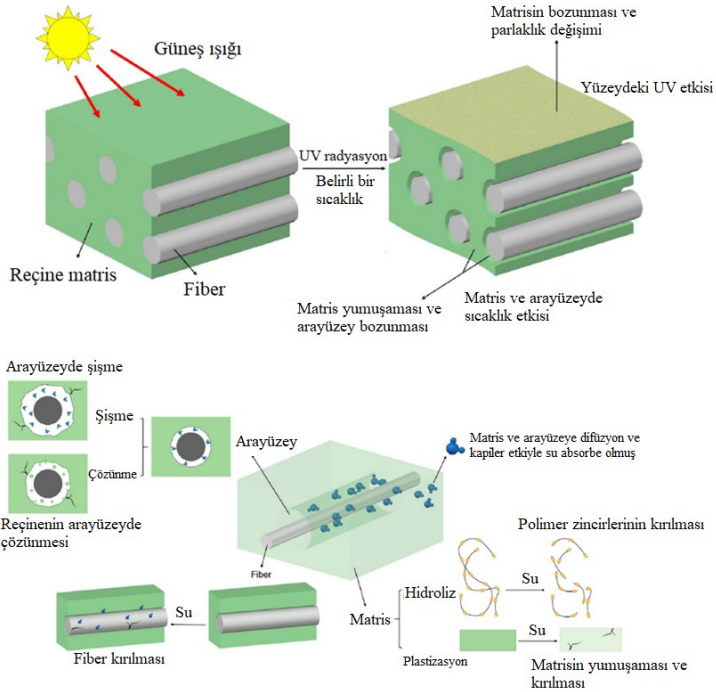
-Yorulma (Raji & ark., 2019)

- **Polimer kompozitlerin hızlandırılmış yaşlanması:** Polimerik kompozit malzemeler uzun hizmet ömürleri boyunca genel özelliklerinin bozulmasına yol açabilen çeşitli çevresel etkilere maruz kalırlar. Ancak polimerik kompozit malzemenin yaşlanması çok yavaş gerçekleşen bir işlemdir, bu sebeple hızlandırılmış yaşlanma testleri veya farklı tipte modelleme yöntemleri kullanılarak laboratuvarında hızlandırılması gerekmektedir (Raji & ark., 2019).

4.Kompozit Malzemelerin Yaşlandırma Mekanizması

Çevresel olarak yaşlandırma; kimyasal değişikliklere, matriste plastikleşmeye ve mekanik bozunmaya bağlı olarak arayüzeyin gerilme iletebilirliğinde azalmaya sebep olur. Kompozit malzemedeki kimyasal bozunma bağların hidrolizine sebep olurken, mekanik bozunma ise matris yapılarında şişme deformasyonu ile sonuçlanmaktadır. Yaşlandırma işlemindeki sıvı emme oranı ve mekanik bozunma arasındaki kuvvetli ilişki, polimerik kompozit malzemelerdeki mekanik bozulmayı analiz etmek, nem difüzyon işlemini anlamak ve PMK yapılarının servis ömrünü ve kalan dayanımını tahmin etmek için kullanılmasında büyük önem taşımaktadır (Kaya, 2019; Yıldırım, 2022).

Malzeme bozunması, uzun vadeli dış etkenlerin etkisi altında polimerik kompozit malzemelerde meydana gelen kimyasal ya da fiziksel dönüşümlerden kaynaklanabilen yapısal değişiklikler sürecidir. Bu durumda malzemenin kullanım özelliklerinin bozulmasına sebep olur. Uygulamada kompozit malzeme bozulmasına sebep olan çok daha karmaşık olan faktörler vardır ve bu durumda genellikle bu faktörlerden hangisinin baskın etkiye sahip olduğunu ayırt etmek zordur çünkü bu faktörler aynı anda hareket etmektedir (Plota & ark., 2020).



Şekil 2. Sıcaklık, UV radyasyon ve sıvı ortamında kompozit malzemelerin yaşlandırma mekanizması (Liu & ark., 2020)

5. Literatürde Rastlanan Son Beş Yıla Ait Çalışmaların İncelemesi

Literatürde çeşitli yöntemlerle yaşlandırılan kompozit malzemeleri inceleyen oldukça çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmada ise güncel çalışılan kompozit malzemelerdeki yaşlandırma işlemleri ve uygulamaları üzerinde durulmuştur. Bu sebeple son beş yılda rastlanan yayınlar incelenmiştir. Bu çalışmalara bakıldığında;

Ducouso & ark. (2019), çalışmalarında kompozit malzemeyi termal yaşlandırma işlemine maruz bırakarak mekanik dayanımını ve hasar modlarını incelemiştir.

Panaitescu & ark. (2019), cam fiber takviyeli poliüretan kompozit malzemeyi hızlandırılmış termal yaşlandırma işlemine tabi tutarak malzeme yapısını incelemiştir. Çalışma sonucunda malzemenin mekanik dayanımında düşüşler ve iç yapısında bozunmalar tespit etmişlerdir.

Park & ark. (2019), çalışmalarında karbon fiber takviyeli kompozit malzemeyi hızlandırılmış nem ortamındaki termal yaşlandırma işlemine bırakmışlardır. Yaşlandırılan malzemenin mekanik ve iç yapısını araştırmışlardır.

Mansouri & ark. (2019), tek yönlü/örgü cam fiber takviyeli polyester kompozit malzemeyi hidrotermal yaşlandırmışlardır. Yaşlandırılan numunelerin eğme testlerinin yaparak mekaniksel olarak incelemiştir.

Rocha & ark. (2019), çalışmalarında tek yönlü cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeyi hidrotermal yaşlandırma işlemine bırakmışlardır. Yaşlandırılan malzemenin kayma testlerini

yapmışlardır. Ayrıca deneysel verilerden elde ettikleri malzeme verilerine göre testin sonlu elemanlar analizi çalışmasını yaparak deneysel sonuçlara yakın veriler elde etmişlerdir.

Nachtane & ark. (2019), hidrotermal yaşlandırılan kompozit malzemenin yüksek hızlı basma dayanımlarını incelemişlerdir. Yaşlandırma kaynaklı dayanım düşüşleri ve iç yapıda bozunmalar tespit etmişlerdir.

Vina & ark. (2020), çeşitli reçine ve takviye malzemelerinden ürettikleri kompozit malzemeleri maksimum 20 yıla kadar ortam şartlarında yaşlandırmışlardır. İlk sekiz yıl sonunda malzeme dayanımının oldukça düşüşler elde etmişlerdir. Ancak ilerleyen süreçte dayanım düşüşlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Shetty & ark. (2019), çalışmalarında hidrotermal yaşlandırdıkları karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin kayma ve eğme dayanımını incelemişlerdir. Yaşlandırma kaynaklı malzemenin kayma ve eğme dayanımında oldukça düşüşler olduğunu belirlemişlerdir.

Robin & ark. (2023), deniz suyu ortamında yaşlandırdıkları karbon/epoksi kompozit malzemeye eğme ve kayma testleri uygulayarak malzemedeki yaşlandırmanın etkilerini incelemişlerdir.

El-baky (2019), saf ve deniz suyu ortamlarında yaşlandırılan cam fiber takviyeli polipropilen kompozit malzemenin darbe dayanımını incelemiştir. Saf suyun yaşlandırma işleminde daha etkili olduğunu tespit etmiştir.

Wang & ark. (2019), çalışmalarında hidrotermal yaşlandırılan fiber takviyeli kompozit malzemenin sürünme davranışını incelemişlerdir.

Basso & ark. (2019), termal olarak yaşlandırılan cam fiber/polipropilen kompozit malzemenin çekme yükü altındaki sürünme davranışını araştırmışlardır.

Pattanaik & ark. (2020), toprak altı ortamında yaşlandırdıkları kül takviyeli epoksi kompozit malzemenin yaşlandırma işlemi sonrası mekanik özelliklerini ve iç yapısını incelemişlerdir. Yüzde 10 katkıının en iyi sonuç verdiğini belirlemişlerdir.

Ma & ark. (2019), çalışmalarında hidrotermal ve termal olarak yaşlandırdıkları karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testlerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda yaşlandırma kaynaklı hasar modlarında değişim gözlemlenirken, termal yaşlandırmanın mekanik dayanıma en çok etkilediğini tespit etmişlerdir.

Feng & ark. (2019), yapıştırma bağlantılı kompozit malzemelerin hidrotermal yaşlandırma işleminden etkilenmesini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda uçaklarda kullanılan kompozit malzemenin tamir sonrası mekanik yapısını belirlemişlerdir.

Liu & ark. (2019), çalışmalarında askeri uygulamalarda kullanılan T700/TDE-85 kompozit malzemeyi hidrotermal yaşlandırma işlemi sonrası balistik ve tabakalar arası kayma testlerini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda yaşlandırılmayana kıyasla yaşlandırma süresi arttıkça hasar bölgesinin alanı arttığını ve malzeme dayanımının düştüğünü tespit etmişlerdir.

Jose'-Trujillo & ark. (2019), beş çeşit takviye malzemesi ve 3 çeşit reçinenin ayrı ayrı kullandıkları kompozit malzemeleri yapay deniz suyu ortamında yaşlandırmışlardır. Çalışmada çekme, basma, eğme ve kayma testlerini uygulayarak yaşlandırmanın etkilerini araştırmışlardır.

Wang ve ark. (2019), çalışmalarında hidrotermal yaşlandırılan keten lifi takviyeli kompozit malzemenin (Yüzey işlemlili/işlemsiz) mekanik davranışını araştırmışlardır. Malzemede yüzey işleminin olumlu etkilerini belirtmişlerdir.

García-Moreno & ark. (2019), karbon/epoksi kompozit malzemeyi camsı geçiş sıcaklığının altında ve üstünde yaşlandırmıştır. Yaşlandırılan kompozit malzemenin darbe ve eğme testlerini yapmışlardır. Çalışma sonucunda camsı geçiş sıcaklığının altında dayanımda artış ve yüksek sıcaklıklarda dayanımda düşüşler elde etmişlerdir.

Dogan & Arman (2019), UV ve/veya hidrotermal yaşlandırılan cam fiber takviyeli kompozit malzemeye çekme, basma, darbe ve tabakalar arası kayma testlerini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda UV ortamını malzemeye en çok etkisinin olduğunu ve sıcaklık parametresinin yaşlandırma işleminde çok etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Literatür araştırması sonucunda son beş yılda güncel çalışılan yaşlandırma işlemleri içinde hidrotermal ve termal yaşlandırmanın ağırlıkta olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin doğal yaşlandırılmasıyla çalışma yapanların sayısının yapay yaşlandırma çalışanlara kıyasla oldukça az olduğu belirlenmiştir. Bu durumun

sebebinin doğal yaşlandırma işlemindeki sürenin uzun olmasından kaynaklı olduğu gözlemlenmiştir.

6.Sonuçlar

Bu çalışmada kompozit malzemelere uygulanan yaşlandırma işleminin çeşitleri, yaşlandırmanın malzemedeki etkileri özetlenmiştir. Bu sayede yaşlandırma işlemi üzerine literatürde güncel kaynak oluşturulmuştur. Ayrıca son beş yılda en çok çalışılan yaşlandırma yöntemleri tespit edilerek yeni yapılacak çalışmalara yön verilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda;

-Yapay yaşlandırma işlemlerinin sürenin kısa olması nedeniyle sıklıkla tercih edildiği belirlenmiştir.

-Termal ve hidrotermal yaşlandırma işlemlerinin sıklıkla kullanıldığı literatür incelemesinde tespit edilmiştir.

Kaynaklar

Liu, T., Liu, X. & Feng, P. (2020) A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects, *Composites Part B*, 191, 107958. Doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107958

Frigione, M. & Rodríguez-Prieto, A. (2021) Can Accelerated Aging Procedures Predict the Long Term Behavior of Polymers Exposed to Different Environments?. *Polymers*, 13, 2688. Doi: 10.3390/polym13162688

Altın Karataş, M. & Gökkaya, H. (2018) A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*. Doi: 10.1016/j.dt.2018.02.001

Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Maksudur Rahman, SM., Jayed Iqbal Mostakim Billah, Md. & Asaduzzaman Chowdhury, M. (2024) Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research*, ISSN 2307-1877. Doi: 10.1016/j.jer.2024.02.017

Panwar, V., Gupta, P., K Bagha, A. & Chauhan, N. (2018) A Review on studies of finite element model updating and updating of composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 5 27912–27918. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.030

Kushwaha, S. and Kumar Bagha, A. (2020) Application of composite materials for vibroacoustic – A review, *Materials Today: Proceedings* 26 1567–1571. Doi:10.1016/j.matpr.2020.02.321

DOĞAN, M., (2019) Cam Fiber Takviyeli ve Takviyesiz Polikarbonat Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Doğal ve Hızlandırılmış Yaşlandırma ve Geri dönüşümün Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

Plota A. & Masek A. (2020) Lifetime Prediction Methods for Degradable Polymeric Materials—A Short Review. *Materials*, 13, 4507. Doi:10.3390/ma13204507

Raji, M., Zari, N., Bouhfid R. & Qaiss, A. (2019) Durability of composite materials during hydrothermal and environmental aging. *Durability and Life Prediction in Bio-, Fibre-Reinforced, and Hybrid Composites*. Doi:10.1016/B978-0-08-102290-0.00005-2

Kaya, A. İ. (2019) Doğal Yaşlandırma Koşullarının Dokunmuş Aramid ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Dinamik Davranışına Etkisi, Doktora Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

Yıldırım, F. F. (2022) Seçilmiş Polimerik Otomotiv Dış Malzemeleri Bazında Hızlı Yaşlandırmalar ve Türkiye’de Doğal Yaşlandırma Arasındaki Korelasyonun Araştırılması, Doktora Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

Ducoussoa, M., Dalodièrea, A. & Baillardb, A. (2019) Evaluation of the thermal aging of aeronautical composite materials using Lamb waves. *Ultrasonics*, 94, 174–182. Doi: 10.1016/j.ultras.2018.09.014

Panaiteacu, I., Koch, T. & Archodoulaki, V. (2019) Accelerated aging of a glass fiber/polyurethane composite for automotive applications. *Polymer Testing*, 74, 245–256. Doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.01.008

Parka, S. Y., Choib, W. J., Choia, C. H. & Choi, H. S. (2019) An experimental study into aging unidirectional carbon fiber epoxy composite under thermal cycling and moisture absorption. *Composite Structures*, 207, 81–92. Doi: 10.1016/j.compstruct.2018.08.069

Mansouria, L., Djebbara, A., Khatirb, S. & Wahab, M. A. (2019) Effect of hygrothermal aging in distilled and saline water on the mechanical behaviour of mixed short fibre/woven composites. *Composite Structures*, 207, 816–825. Doi: 10.1016/j.compstruct.2018.09.067

Rocha, I.B.C.M., Van der Meer, F.P., Raijmaekers, S., Lahuerta, F., Nijssen, R.P.L., Mikkelsen, L.P. & Sluys, L.J. (2019) A combined experimental/numerical investigation on hygrothermal aging of fiber-reinforced composites. *European Journal of Mechanics/A Solids*, 73, 407–419. Doi: 10.1016/j.euromechsol.2018.10.003

Nachtane, M., Tarfaoui, M., Sassi, S., A. Moumen, El & Saifaoui, D. (2019) An investigation of hygrothermal aging effects on high strain rate behaviour of adhesively bonded composite joints. *Composites Part B*, 172, 111–120. Doi:10.1016/j.compositesb.2019.05.030

Vina, J., Bonhomme, J., Moll'on, V., Vina, I. & Argüelles, A. (2020) Mechanical properties of fibreglass and carbon-fibre

reinforced polyetherimide after twenty years of outdoor environmental aging in the city of Gijón (Spain). *Composites Communications*, 22, 100522. Doi: 10.1016/j.coco.2020.100522.

Shettya, K., Sriharia, S. & Manjunathaa, C. (2019) Effect of hygrothermal aging on the interlaminar shear strength of a carbon fibre composite. *Procedia Structural Integrity*, 14, 849–854. Doi: 10.1016/j.prostr.2019.07.063

Robin, A., Arhant, M., Davies, P., Sa, L., Lolive, E., Bonnemains T. & Habert B. (2023) Effect of aging on the in-plane and out-of-plane mechanical properties of composites for design of marine structures, *Composites Part C: Open Access* 11, 100354. Doi: 10.1016/j.jcomc.2023.100354

A. Abd El-baky, M. (2019). Experimental investigation on impact performance of glass–polypropylene hybrid composites: Effect of water aging. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32, Issue 5, 657-672. Doi: 10.1177/0892705718772876

Wang, X., Petru, M. & Yu, H. (2019) The effect of surface treatment on the creep behavior of flax fiber reinforced composites under hygrothermal aging conditions. *Construction and Building Materials*, 208, 220–227. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.001

Basso, M., Pupurec, L., Simonato, M., Furlanetto, R., De Nardo, L. & Joffe, R. (2019) Nonlinear creep behaviour of glass fiber reinforced polypropylene: Impact of aging on stiffness degradation. *Composites Part B*, 163, 702–709. Doi: 10.1016/j.compositesb.2019.01.052

Pattanaik, A., Mukharjee, M. & Mishra S.C. (2020) Effect of environmental aging conditions on the properties of fly ash filled epoxy composites. *Advanced CompositeMaterials*, 29:1, 1-30. Doi: 10.1080/09243046.2019.1610930

Ma, S., He, Y., Hui L. & Xu, L. (2020) Effects of hygrothermal and thermal aging on the low-velocity impact properties of carbon fiber composites. *Advanced Composite Materials*, 29:1, 55-72. Doi: 10.1080/09243046.2019.1630054

Feng, W., Xu, F., Xie, W., Zang, Y. & Zhang, X. (2020) Hygrothermal aging effects on the mechanical behavior of scarf-repaired composite laminates. *The Journal of Adhesion*, 96:14, 1233-1257. Doi: 10.1080/00218464.2019.1589457

Liu, L., Zhao, Z, Chen, W, Xue, M. & Shuang, C. (2020) Interlaminar shear property and high-velocity impact resistance of CFRP laminates after cyclic hygrothermal aging, *International Journal of Crashworthiness*, 25:3, 307-320, Doi:10.1080/13588265.2019.1590905

José-Trujillo, E., Rubio-González, C. & Rodríguez-González, J. A. (2019) Seawater ageing effect on the mechanical properties of composites with different fiber and matrix types. *ournal of Composite Materials*, 53, 23, 3229-3241. Doi: 10.1177/0021998318811514

Wang, X. & Petru, M. (2019) Effect of hygrothermal aging and surface treatment on the dynamic mechanical behavior of flax fiber reinforced composites. *Materials*, 12, 2376. Doi:10.3390/ma12152376

García-Moreno, I., Caminero, M. Á., Rodríguez, G. P. & López-Cela, J. J. (2019) Effect of Thermal Ageing on the Impact and Flexural Damage Behaviour of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers*, 11, 80. Doi:10.3390/polym11010080

Dogan, A. & Arman, Y. (2019) The effect of hygrothermal aging and UV radiation on the low-velocity impact behavior of the glass fiber-reinforced epoxy composites. *Iranian Polymer Journal*, 28:193–201. Doi:10.1007/s13726-019-00690-x

BÖLÜM IV

Park Fren Kolu Dişli Elemanının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi Ve Topoloji Optimizasyonu

Funda KAHRAMAN¹
Mehmet KÜÇÜK²

1. Giriş

Üreticiler, yeni araç teknolojilerinin performansını, verimliliğini ve dayanıklılığını sürekli olarak geliştirmektedir. Bu nedenle bileşenlerin optimizasyonu otomotiv mühendisliğinde önemli bir odak noktası haline gelmiştir.

Tasarımda performans kaybı olmadan yapısal bütünlüğü koruyan ve maliyet etkinliği sağlayan bileşenlerinin tasarımı ve üretimi kritik öneme sahiptir.

¹ Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus-Mersin, Türkiye, Orcid: 0000-0002-1661-3376, fkahraman@tarsus.edu.tr

² Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği ABD, Tarsus-Mersin, Türkiye, Orcid: 0000-0001-9196-0784, mehmetkucuk1985@gmail.com

Performanstan ödün vermeden ağırlığı azaltmak önemli bir mühendislik stratejisidir.

Analitik, deneysel ve sayısal yöntemler mühendislik çalışmalarında problemlerin çözümünde uygulanan üç yaklaşımdır.

Sonlu elemanlar analizi (SEA) karmaşık geometriye sahip olan tasarım modelindeki yükleri-kuvvetleri, yer değiştirmeyi (deformasyonları), gerilme ve gerinim değerlerini tahmin etmek için matematiksel denklem sistemleri kullanan hesaplama tekniğidir. SEA, bileşenlerin üretimi ve kullanım ömrü süresince sınır ve yük koşulları altında oluşan gerilme ve gerinim değerlerini belirlemek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. SEA programları makine, inşaat, havacılık ve biyomedikal mühendisliği gibi birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yapısal optimizasyon, yenilikçi tasarımlar için temel bir araç haline gelmiştir. Genel olarak boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olarak üç türe ayrılabilir.

1.1. Park Freni

Mekanik park freni, taşıtlarda güvenlik sistemin alt sistemidir. Temel işlevi, düz veya eğimli yolda park edilen bir taşıtı bulunduğu noktada sabit tutmak ve istenmeyen hareketi önlemektir. Tasarımı basit ve üretim maliyeti elektrikli park freni (EPB:electric parking brake) ve elektromekanik park freni (EMPB:electro-mechanical parking brake)'ne göre daha ucuz olmasına karşı geleneksel mekanik park freninin de avantajı ve dezavantajı mevcuttur (Rozaini ve ark., 2014; Tamilselvan, Prakash ve Sathyamurthy 2023). Bir park freni sistemini oluşturan üç temel bileşen; freni teli, ekolayzır ve fren koludur (Lunia ve ark., 2015). Freni teli, bir ucu ekolayzır ile park

fren kolu birincil teline bağlı iken diğer taraftan kampana veya diske bağlanmaktadır (Dalfidan ve Erol, 2020).

1.2. Topoloji Optimizasyonu

Yapısal optimizasyon, son yıllarda yoğun çalışılan mühendislik araştırma konularından biridir. Yapısal optimizasyonun bir türü olan topoloji optimizasyonu da çalışılan güncel bir konu haline geldi (Lg ve Ismail, 2020).

Güçlü ve güvenilir bir hesaplama metodolojisi olan topoloji optimizasyonu, mühendislik alanında kapsamlı araştırma ve geliştirmelere konu olmuştur. Gelişmiş yapısal bütünlüğe, azaltılmış ağırlığa ve optimize edilmiş işlevselliğe sahip bileşenin tasarımında kullanılan bir tekniktir. Topoloji optimizasyonu, tasarımları değiştirebilen ve performansını geliştirebilen etkili bir tasarım aracıdır. Tasarım değişkenlerine göre en uygun ve verimli malzeme dağılım çözümleri sağlar. Bileşen ağırlığında düşüş sağlarken performansı iyileştirecek malzeme dağılımını optimize etmektedir.

1.3. Literatür araştırması

Çalışma, sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanımı ile park frenini da içeren otomobil bileşenlerinin tasarımı ve analizi ile ilgili literatürün gözden geçirilmesiyle başlamıştır. Literatürde erişilen çalışmalar değerlendirilmiş ve özetlenerek sunulmuştur.

Rozaini ve ark. (2013) otomobillerde kullanılan tipik park fren sisteminin performansını incelemeyi amaçlamıştır. Kampanalı fren sistemi için teorik model oluşturmuş ve fren test sisteminden ulaştığı test verileri ile modeli doğrulamıştır.

Rozaini ve ark. (2014) mevcut elektronik park frenine göre daha iyi performansa sahip yeni elektromekanik park freni modeli geliştirmiştir. Yeni model FMVSS 135 gerekliliklerine (mevzuatına) uygundur.

Anonim, (t.y.) Malzeya'da üretilen bir otomobilde kullanılan park freni için yapısal analizi gerçekleştirmiştir. Mevcut çelik malzeme yerine doğal elyaf polimer malzeme kullanmıştır.

Patel, Sarawade ve Gawande (2017) park fren kolu tasarımında kütle azaltmak amacıyla topoloji optimizasyon gerçekleştirmiştir.

Patel ve Sarawade (2017) park fren kolun tasarımı için sonlu elemanlar analizi ve deneysel testleri gerçekleştirmiştir. S235 malzemeyi A356 ile değiştirmiştir. Tasarımda %65 kütle azalması sağlamıştır.

Top ve ark. (2019) SLS yöntemi ile üretmek için park freni braketinin topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmiş ve ideal tasarıma ulaşmayı hedeflemiştir.

Dalfidan ve Erol (2020) park freni kablolarında kullanılan bağlantı elemanının yorulma davranışı altında tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.

İşitan, Eroğlu ve Binici (2020) hafif hizmet araçlarında kullanılabilir bir el freni sisteminin topoloji optimizasyonu çalışmasını paylaşmıştır. Park frenine 450 N yük uygulamıştır. Optimizasyon sonrasında %36,18 iyileşme sağlamıştır. Malzeme için AISI 4340 çelik seçmiştir. Sistemde toplamda %43,82 azalma sağlamıştır.

Baydur (2022) çalışmasında mekanik el (park) freni mekanizmasını yük altında 3D modeli üzerinde sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Yer değiştirme değerinde %10 oranında iyileşme sağlamıştır.

Kahraman ve Küçük (2024) topoloji optimizasyonu yardımıyla bir park freni kolu ve dişlisinin tasarımında ağırlık azalması sağlamayı amaçlamıştır. Park freni kolunda %18,48 ve dişlide (cırcırda) %34,85 ağırlık azalması elde etmiştir.

Tamilselvan, Prakash ve Sathyamurthy (2023) çeşitli park fren sistemi tasarımlarının kapsamlı bir incelemesini gerçekleştirmiştir. Elektronik park freni sistemi, mekanik ve elektro-mekanik park freni sistemlerinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Çalışmada, elektro-mekanik park freni ve elektronik park freni ile karşılaştırıldığında, mekanik park freni sisteminin oldukça ucuz olduğu belirtmiştir. Geleneksel park freni sisteminin üreticiler tarafından hâlen tercih edilme nedenini, tasarımı basit ve maliyetinin düşük olması ile ilişkilendirmiştir.

Lunia ve ark. (2015) otomobillerde kullanılan kampanalı arka frenlerin tasarımı ve geliştirilmesi için ürün geliştirme sürecine uygulanabilecek yeni bir yaklaşım önermektedir.

Ishak ve ark., (2016, 2018) çalışmada bir boyutlu (1D) önden çekişli kampana tipi park freni modeli geliştirilmiştir. Modeli test sistemi ile gerçekleştirdiği deneyler ile doğrulamıştır. Deney verileri ile model tahminleri uyumludur.

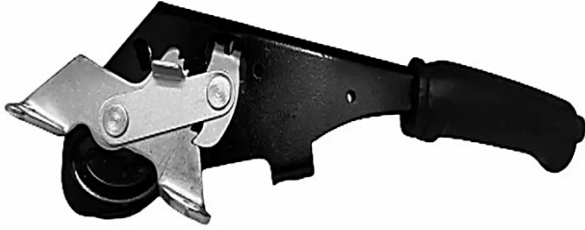
Kahraman ve Küçük (2020) topoloji optimizasyonu kapsamında otomotiv alanında uygulamaları ve ağırlık azaltılması konularını araştırmıştır.

Nazlı ve Özsoy (2024) otomobillerde kullanılan bir salıncağa topoloji optimizasyonu uygulamış ve bileşenin ağırlığında 4,917 kg (%57) azalma sağlamıştır.

Bu araştırma çalışmasında, park fren kolunun bileşeni olan dişlinin davranışını incelemek için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma; dişlinin tasarım ve malzeme özellikleri ile AISI 4340 ve AISI 1020 için karşılaştırmalı performansına odaklanarak tanımlanmıştır.

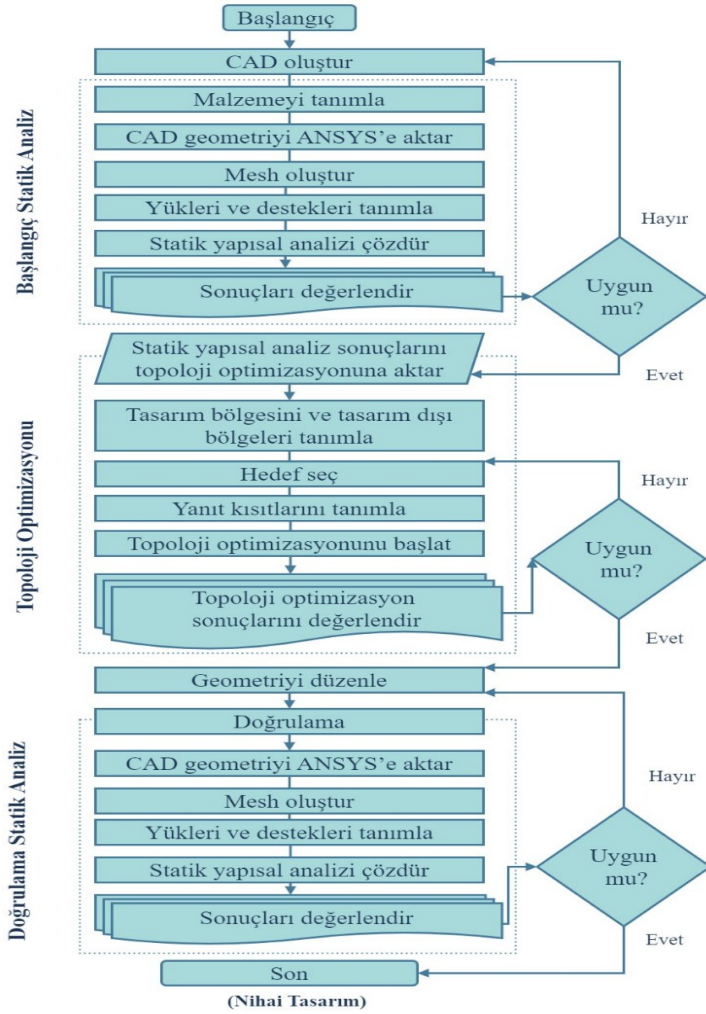
2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada mekanik kumandalı bir park fren kolunun dişli (cırcır) elemanı seçilmiştir. Statik yapısal analizler ve topoloji optimizasyonu Ansys programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik park fren kolu Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Park freni kol mekanizması.

Çalışmada izlenen üç adımı (başlangıçta uygulanan statik analiz, topoloji optimizasyonu, doğrulama için uygulanan statik analiz) içeren iş akış şeması Şekil 2’de gösterilmiştir.

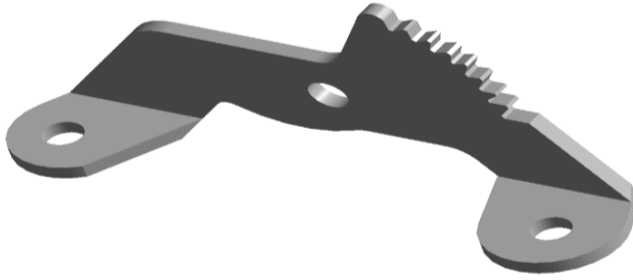


Şekil 2: İş akış şeması.

Elemanın gerilme dağılımını ve deformasyon özelliklerini incelemek için sonlu elemanlar analiz yazılımı Ansys kullanılmıştır. Belirlenen yük ve destek noktalarına göre statik analizler uygulanmıştır. Statik analizlerden elde edilen gerilme sonuçlarına

göre topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonrasında oluşan geometri dikkate alınarak başlangıç modeli üzerinde değişiklikler yapılmıştır. 3D modelin belirli bölgelerinde malzeme çıkartılarak boşaltım işlemi yapılmıştır.

Eleman ölçüleri dikkate alınarak Ansys programının tasarım aracı olan SpaceClaim yardımıyla 3D katı modeli oluşturulmuştur. Dişli eleman için oluşturulan 3D model Şekil 3'te gösterilmiştir. Modelleme işleminde parçanın kalınlığı $t=4$ mm'dir.



Şekil 3: Dişli CAD modeli.

Yürütülen çalışmada AISI 1020 ve AISI 4340 seçilmiş ve Ansys malzeme kütüphanesine eklenmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Malzemelerin özellikleri.

Malzeme	Birim	AISI 1020	AISI 4340
Çekme Dayanımı	MPa	420	745
Akma Dayanımı	MPa	350	470
Elastisite Modülü	GPa	180-210	190-210
Kayma Modülü	GPa	72-80	80
Yoğunluk	g/cm^3	7,87	7,85

Mesh işleminde oluşturulan eleman boyutu 1,28 mm olarak seçilmiştir. Mesh yapısında eleman sayısının 46715 ve düğüm sayısının 75929 olduğu görülmüştür. Parçanın mesh modeli Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Mesh yapısı.

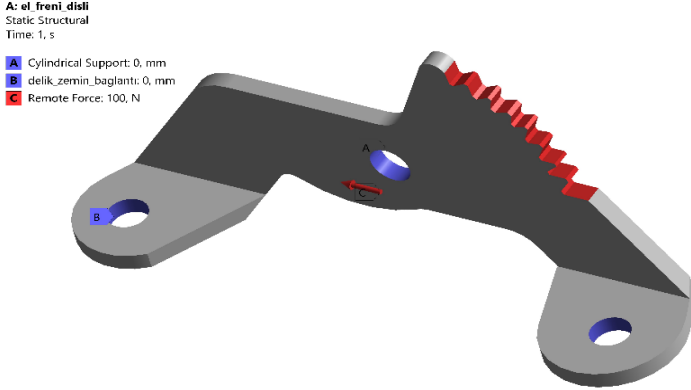
Sonlu elemanlar analizinde oluşturulan mesh yapısının kalitesini değerlendirmek için yaygın olarak bakılan mesh metrikleri; Element Quality, Aspect Ratio, Skewness, Orthogonal Quality'dir.

Çalışmada oluşturulan mesh yapısı için metriklerin min ve maks değerleri ile ortalama değeri Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 2'de gösterilen mesh metriklerine bakıldığında elde edilen mesh yapısının kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmüştür.

Tablo 2: Mesh metrikleri.

Mesh Metrik	Min. Değer	Ortalama	Maks. Değer
Element Quality	0,5177	0,8247	0,9999
Aspect Ratio	1,1737	1,8813	4,4479
Skewness	0,00064	0,2485	0,8067
Orthogonal Quality	0,1933	0,7498	0,98

Statik yapısal analizler, 100, 150, 200, 250, 300, 350 N kuvvetler ayrı ayrı uygulanmıştır. Dişli elemanın bağlantı noktalarında silindirik destek tanımlanarak sabitlenmiştir. Yük ve desteklerin uygulama noktaları Şekil 5’te gösterilmiştir.

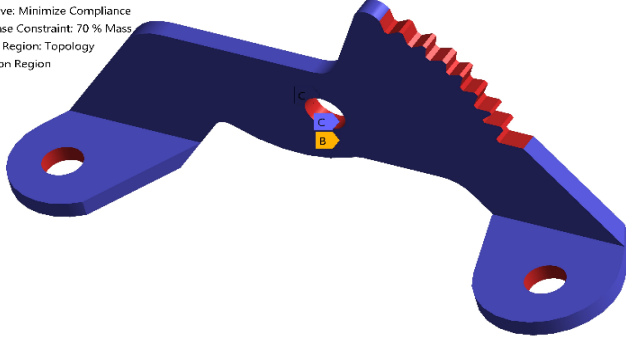


Şekil 5: Dişli statik analiz yük ve kuvvet uygulama noktaları.

Statik analiz sonrasında (ikinci adımda) dişli elemanı için topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonu uygulanan tasarım bölgesi ve uygulanmayan tasarım dışı bölgeler Şekil 6’da gösterilmiştir. Yanıt kısıtı olarak elemanın ağırlık azaltımı için kütle seçilmiştir.

B: Topology Optimization
Topology Optimization
Iteration Number: N/A

- A** Objective: Minimize Compliance
- B** Response Constraint: 70 % Mass
- C** Design Region: Topology
- C** Exclusion Region



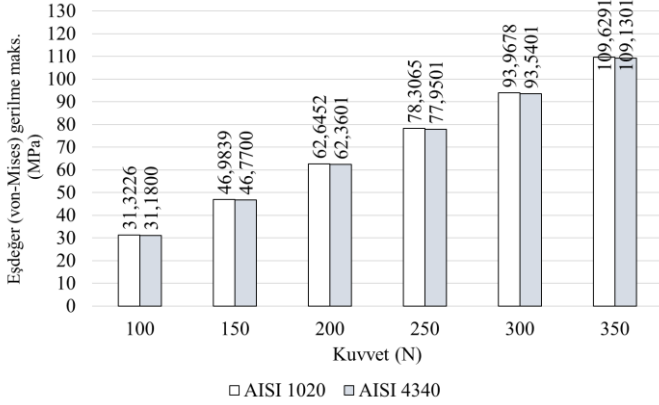
Şekil 6: Topoloji optimizasyonu kısıtları.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada park fren kolunun dişli elemanının mekanik davranışları 100, 150, 200, 250, 300, 350 N kuvvetler altında AISI 1020 ve AISI 4340 malzemelere için Ansys programı kullanılarak incelenmiştir.

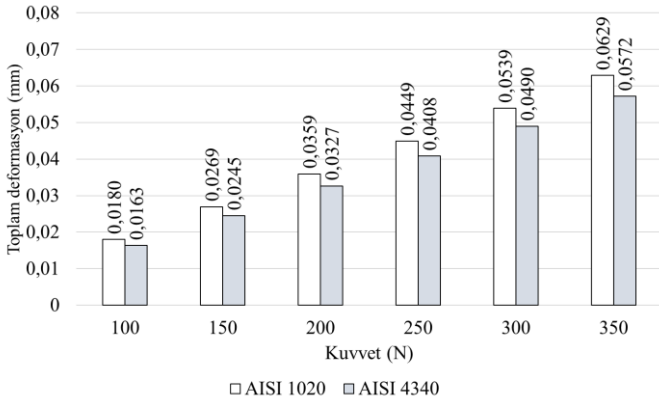
3.1. Başlangıç Statik Analiz

Grafik 1’de Eşdeğer (von-Mises) gerilme, Grafik 2’de toplam deformasyon ve Grafik 3’te güvenlik faktörü sunulmuştur.



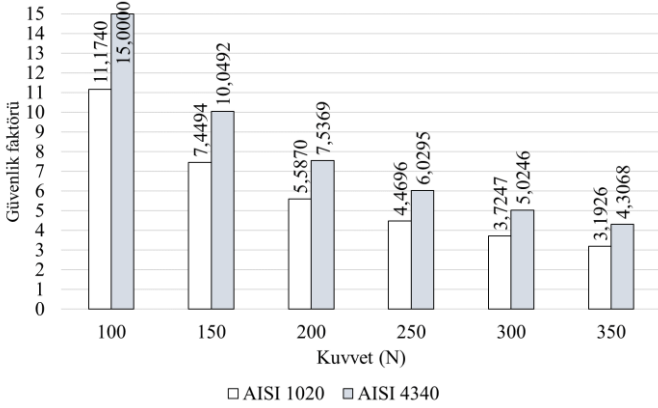
Grafik 1: Eşdeğer (von-Mises) gerilme

Grafik 1 incelendiğinde AISI 1020 ve AISI 4340 için eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Grafik 2: Toplam deformasyon

Grafik 2 incelendiğinde AISI 1020 toplam deformasyon değerleri AISI 4340'e göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Grafik 3: Güvenlik faktörü

Grafik 3 incelendiğinde AISI 4340 güvenlik faktörü değerleri AISI 1020'ye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Her iki malzeme içinde güvenlik faktörü değerleri birden büyüktür.

Statik yapısal analiz sonuçları topoloji optimizasyonu için girdi verisi olarak kullanılmıştır. Topoloji optimizasyonu sonrası ulaşılan geometri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7: Topoloji optimizasyonu sonucu.

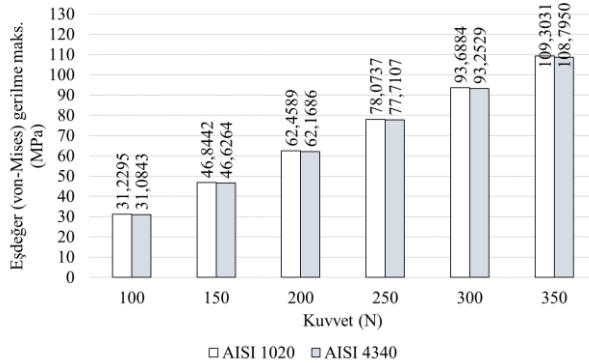
Topoloji optimizasyonu sonrasında elde edilen sonuç değerlendirilmiştir. İlk CAD model üzerinde gerekli değişiklikler yapılmıştır. Modelde kalınlık sabit tutulmuştur. Son model Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8: Son CAD model.

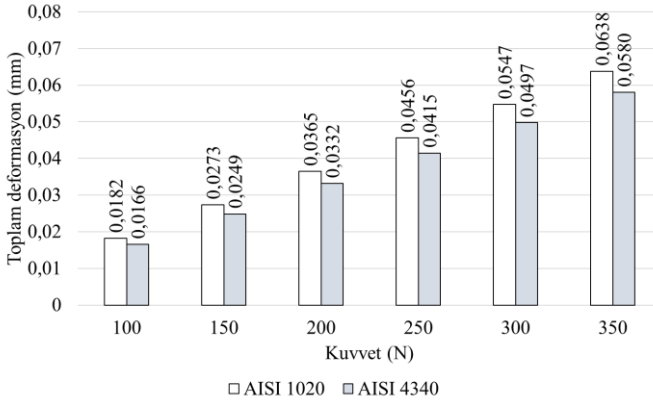
3.2. Doğrulama Statik Analiz

Oluşturulan son model için statik analizler başlangıçtaki şartlar altında yinelenmiş ve doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen doğrulama statik analiz sonuçları; Grafik 4’te Eşdeğer (von-Mises) gerilme, Grafik 5’te toplam deformasyon ve Grafik 6’da güvenlik faktörü sunulmuştur.



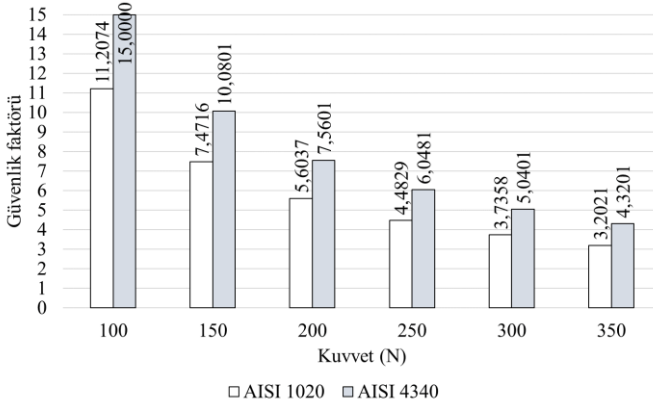
Grafik 4: Eşdeğer (von-Mises) gerilme.

Grafik 4 incelendiğinde AISI 1020 ve AISI 4340 için eşdeğer (von-Mises) gerilmedeğerleri birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Grafik 5: Toplam deformasyon.

Grafik 5 incelendiğinde AISI 1020 toplam deformasyon değerleri AISI 4340'ye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Grafik 6: Güvenlik faktörü.

Grafik 6 incelendiğinde AISI 4340 güvenlik faktörü değerleri AISI 1020'ye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma dişli tasarımı ve AISI 1020 ve AISI 4340 çeliğinin malzeme özelliklerine göre karşılaştırmalı performansına odaklanarak tanımlanmıştır. Tablo 3'te 350 N için elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 3: Sonuçların karşılaştırması.

	AISI 1020		AISI 4340	
Statik yapısal analiz	Başlangıçta	Doğrulama	Başlangıçta	Doğrulama
Eşdeğer (von-Mises) gerilme (MPa)	109,6291	109,3031	109,1301	108,7950
Toplam deformasyon (mm)	0,0629	0,0638	0,0572	0,0580
Güvenlik faktörü	3,1926	3,2021	4,3068	4,3201
Ağırlık (kg)	0,15097	0,11845	0,15058	0,11815

Eşdeğer (von-Mises) gerilme değerlerinde (%) değişimi AISI 1020'da %0,2974 azalma, AISI 4340'da %0,3071 azalma görülmüştür.

Toplam deformasyon için AISI 1020'da %1,4308 artış, AISI 4340'da %1,3986 artış tespit edilmiştir.

Güvenlik faktörü AISI 1020'da %0,2976 artış, AISI 4340'da %0,3088 artış olduğu belirlenmiştir.

Ağırlığında yüzde değişim AISI 1020 için %21,5407 azalma, AISI 4340 için %21,5367 azalma olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada otomobillerde kullanılan mekanik bir park fren kol bileşeni olan dişli incelenmiştir. Çalışmada Ansys programı ile sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dişli elemana topoloji optimizasyonu uygulanmış ve eleman ağırlığında azalma hedeflenmiştir.

Eşdeğer (von-Mises) gerilme değerlerinde başlangıç ve doğrulama yakın olmakla birlikte yüzde değişimi AISI 4340, AISI 1020'ye göre fazladır.

Toplam deformasyon başlangıç ve doğrulama değerleri yüzde değişimi AISI 1020, AISI 4340'a göre yüksektir.

Güvenlik faktörü başlangıç ve doğrulama için yüzde değişimi AISI 4340, AISI 1020'ye göre fazladır. Ancak AISI 4340'ın AISI 1020'ye daha güvenli olduğu grlmştir.

Kaynaklar

Anonim, (t.y.). Preliminary structural analysis of a center lever light passenger vehicleparking brake component AISI-1000 series low carbon steel using finite element analysis. *BMCG 3333: Mechanical Design Chapter 2 FEA Case Study Sample Report* (16.05.2022 tarihinde) <https://www.academia.edu/35617250/> adresinden erişilmiştir.

Baydur, E. (2022). *Mekanik el fren sistemi sonlu elemanlar analiz modelinin deformasyon testleri ile doğrulanması ve tasarım iyileştirme çalışması [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Dalfidan, S. and Erol, H. (2020). Fatigue behavior for design optimization of parking brake bracket connections. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 9 (3), 161-170. <https://doi.org/10.18245/ijaet.674557>

Ishak, M. R., Abu Bakar, A. R., Belhocine, A., Taib, J. M., & Omar, W. Z. W. (2016). Brake torque analysis of fully mechanical parking brake system: Theoretical and experimental approach. *Measurement*, 94, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.08.026>

Ishak, M.R., Abu Bakar, A.R., Belhocine, A., Taib, J.M., & Omar, W.Z.W (2018). Brake torque analysis of fully mechanical parking brake system: Theoretical and experimental approach. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 19(1), 37–49. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2018.19n1.004>

Işıtan, A., Eroğlu, S. B. ve Binici, M. R. (2020). Topology optimization of an automobile handbrake parts. *M., Dalkılıç (Ed.), Recent advances in science and technology içinde (s. 61-72)*. Gece Kitaplığı.

Kahraman, F. ve Kck, M. (2020). Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltma uygulaması üzerine bir araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20)*, 623-631. <https://doi.org/10.31590/ejosat.789424>

Kahraman, F., & Kck, M. (2024). Finite elements analysis and topology optimization of parking brake lever and ratchet. *Politeknik Dergisi 1-1*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1325468>

Lg, J., & Ismail, H. (2020). Milestones in the 150-year history of topology optimization: a review. *Computer Assisted Methods In Engineering And Science, 27(2-3)*, 97-132. <http://dx.doi.org/10.24423/comes.296>.

Lunia, P., Prajapati, M., Jayashankar, V., Parakh, V. & Rawte, S. (2015). Systematic approach to design hand controlled parking brake system for passenger car (No. 2015-26-0078). *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2015-26-0078>.

Nazlı, A., & zsoy, N. (2024). Bir otomobil salıncağının topoloji optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 29(2)*, 607-622. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1431634>

Patel, M. V., Sarawade, S. S. (2017). Desing and weight optimization of parking brake lever. *International Journal of Advence Research in Science and Engineering, 6(7)*, 1146-1153.

Patel, M. V., Sarawade, S. S. ve Gawande, S. H. (2017). Topology optimization and stress validation of the hand brake lever. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 11(7), 442-447.

Rozaini, A.H., Ishak, M.R., Bakar, A.R., & Mohd Zain, M.Z. (2013). Performance of a fully mechanical parking brake system for passenger cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 50, 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER 2013) 1–4 July 2013, Kuantan, Pahang, Malaysia*

Rozaini, A.H., Ishak, M.R., Quettier, N., Abu Bakar, A.R., & Mohd Zain, M.Z. (2014). Performance of an electro-mechanical parking brake (EMPB) system. *Applied Mechanics and Materials*, 465-466, 1267-1271. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1267

Tamilselvan, S., Prakash, N., Sathyamurthy, R. (2023). Review of comprehensive survey on recent trends in parking brake system. In: *Sethuraman, B., Jain, P., Gupta, M. (eds) Recent Advances in Mechanical Engineering. STAAAR 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2349-6_19

Top, N., Gökçe, H. ve Şahin, İ. (2019). Eklemeli imalat için topoloji optimizasyonu: el freni mekanizması uygulaması. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 18(1), 1-13. <https://sujes.selcuk.edu.tr/sujes/article/view/467> adresinden erişilmiştir.

BÖLÜM V

Denizcilik Endüstrisinde Kullanılan İleri Kaynak Teknikleri ve Uygulama Alanları

Şakir ALTINSOY¹
Nuray BEKÖZ ÜLLEN²

1.Giriş

Denizcilik endüstrisinde kaynak teknolojileri gemi inşa alanında önemli bir yere sahiptir. Gemi inşasında binlerce parça kaynak tekniği ile birleştirilir. Kaynak kalitesi ve kaynak hatalarının önlenmesi maliyet açısından çok önemlidir. Kaynak işleminde ortaya çıkabilecek kaynak süreksizlikleri ve hataları tersane maliyetlerini ciddi oranda arttırmaktadır. Kaynak hatalarının neden olduğu kazalar, oldukça büyük kazalara neden olabilir hem can

¹ Dr. Öğr. Üyesi, TC İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0002-1893-2266. sakir.altinsoy@yeniyuzyil.edu.tr

² Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0003-2705-2559. nbekoz@iuc.edu.tr

kayıbı hem de mali kayıplar yaşanabilir. Bunu önlemenin en iyi yolu doğru kaynak teknolojisinin kapsadığı uygun kaynak makinesi, kaynak tekniği ve doğru kaynak parametreleri kullanımı ile mümkündür. Denizcilik endüstrisi, teknolojik yenilikler ve ileri malzeme bilimlerinin sürekli gelişimi sayesinde hızla değişmektedir. Bu endüstrinin temel yapıtaşlarından biri olan kaynak teknolojileri, özellikle gemi inşası, deniz altı yapıları ve petrol platformları gibi kritik yapıların üretiminde merkezi bir role sahiptir. Günümüzde kaynak teknikleri, yalnızca bu yapıların inşası ve onarımı için değil, aynı zamanda denizcilik endüstrisinin karşılaştığı zorlu çevresel şartlar altında dayanıklılık ve güvenilirlik sağlamak amacıyla da sürekli olarak geliştirilmektedir.

Denizcilik endüstrisinde kullanılan ileri kaynak teknikleri, bu tekniklerin uygulama alanları ve karşılaşılan zorluklar, bu zorluklara sunulan çözümler detaylı olarak araştırılmalı ve geliştirilmelidir. İleri tekniklerden olan robotik kaynak sistemleri, su altı kaynağı, lazer kaynağı gibi modern kaynak yöntemlerinin yanı sıra, sürtünme karıştırma kaynağı gibi yeni nesil kaynak tekniklerinin avantajları ve uygulama alanları da denizcilik endüstrisinde önemli yer oluşturmaktadır.

Denizcilik endüstrisinde kaynak işlemlerinin önemi, bu işlemlerin yapısal bütünlük ve maliyet etkinliği açısından sağladığı avantajlar ile daha da belirginleşmektedir. İleri kaynak tekniklerinin endüstriyel uygulamalardaki rolü ve bu tekniklerin potansiyel zorluklar karşısında nasıl bir çözüm sunduğunu belirlenmelidir. Endüstriyel boyutta karşılaşılan temel zorluklar biri olan su altı kaynak işlemlerinde karşılaşılan teknik problemler ve bu problemlere yönelik inovatif çözümlerde araştırmacıların dikkatini

çekmektedir. Denizcilik endüstrisinde kaynak tekniklerinin kapsamını ve bu tekniklerin endüstriyel uygulamalardaki stratejik önemi anlamak, kaynaklı birleştirmelerin önemini vurgulamak açıdan önemlidir. İleri kaynak tekniklerinin endüstri üzerindeki etkilerini anlamak ve bu tekniklerin gelecekteki potansiyellerini tanımlamakla mümkün olmaktadır.

2.Kaynak Teknolojisinin Tarihçesi

Kaynak teknolojileri, insanlık tarihi boyunca metal işçiliğinin temel taşlarından biri olmuştur. Başlangıçta, daha ilkel biçimlerde olan bu teknikler, zamanla gelişerek modern endüstrilerin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu bölümde, kaynak teknolojisinin geçmişten günümüze kadar olan değişimi üzerinde durulacak ve denizcilik endüstrisinde bu teknolojilerin yeri anlatılacaktır (Majeed & ark., 2018).

2.1. Eski çağlardan endüstri devrimine kaynak teknolojileri

Metal işleme tekniklerinin ilk örnekleri, Mısır ve Mezopotamya'da görülmektedir. Bu dönemlerde, altın gibi yumuşak metaller dövülerek şekil verilmiş ve basit soğuk kaynak yöntemleri kullanılmıştır. Ancak, demir ve çelik gibi daha sert metallerin işlenmesi, Antik Yunan ve Roma dönemlerinde demircilik tekniklerinin gelişmesiyle mümkün olmuştur. Orta Çağ Avrupa'sında, demircilerin zırh ve silah yapımında gösterdiği ustalık, kaynak tekniklerinin ne kadar ileri bir seviyeye ulaştığının bir göstergesidir. Bu dönemde, alev kullanarak metalleri birleştirme teknikleri ve dövme kaynak yöntemleri yaygın olarak kullanılmıştır (Bala & ark., 2024; Majeed & ark., 2018).

2.2. Endüstri devrimi ve modern kaynak teknolojilerinin doğuşu

18. ve 19. yüzyıllarda yaşanan Endüstri Devrimi ile birlikte kaynak teknolojilerinde büyük bir dönüşüm yaşanmıştır. Bu dönemde, buhar gücünün keşfi ve makineleşmenin artması ile metal işleme teknikleri önemli ölçüde gelişmiştir. 1800'lerin sonlarında, elektriğin keşfi kaynak tekniklerinde yeni bir çağın başlangıcı olmuştur (Wahidi & ark., 2024). 20. yüzyılın başlarında, otomasyonun ve endüstriyel üretimin artması ile kaynak teknolojileri daha da modernize olmuştur. Özellikle I. ve II. Dünya Savaşları sırasında, askeri gereksinimler kaynak tekniklerinin hızla gelişmesine yol açmıştır. Bu dönemde, elektrik ark kaynağı ve oksisasetilen kaynağı gibi yöntemler geliştirilmiştir (Delzendehrooy & ark., 2022).

2.3. Çağdaş kaynak teknolojileri ve denizcilik endüstrisi

Çağdaş kaynak teknolojileri, özellikle denizcilik endüstrisinde, gemi inşaatından petrol platformlarına kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmuştur. Lazer kaynağı, robotik kaynak ve sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) gibi modern teknikler, daha yüksek mukavemet ve verimlilik sağlayarak deniz yapılarının daha güvenli ve ekonomik bir şekilde üretilmesine olanak tanımıştır.

Denizcilik endüstrisinde kaynak teknolojilerinin gelişimi, sadece üretim süreçlerini değil, aynı zamanda tasarım ve mühendislik yaklaşımlarını da dönüştürmüştür. Bu teknolojik ilerlemeler, endüstriyel kaynak uygulamalarının sınırlarını zorlamakta ve sürekli olarak yeni malzeme ve yöntemlerin keşfedilmesine yol açmaktadır.

Sonuç olarak, kaynak teknolojilerinin tarihçesi, basit araçların üretiminden karmaşık deniz yapılarının inşasına kadar uzanan geniş

bir evrimi kapsamaktadır. Bu teknolojiler, denizcilik endüstrisinin temel taşlarını oluşturmakta ve bu alandaki yeniliklerin önünü açmaktadır (American Welding Society, 2018; Delzendehrooy & ark., 2022).

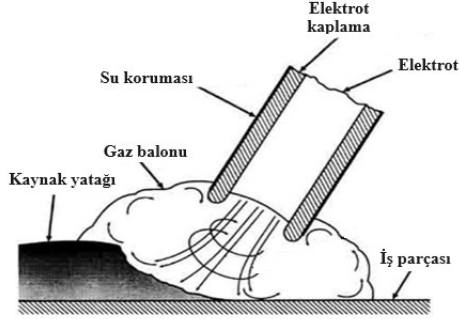
3.İleri Kaynak Teknikleri

3.1.Su altı lazer kaynağı

Su altı lazer kaynağı, gemilerde, yüzer cisimlerin onarım ve bakımda, modern petrol platformlarında ve boru hatlarında özel bir rol oynamaktadır. Bu bölümde su altı kaynağının bir sınıflandırması yapılmaktadır ve çeşitli su altı kaynağının avantajları ile dezavantajları anlatılmaktadır. Su altı lazer kaynağı, özellikle denizcilik endüstrisinde hasar görmüş metal malzemelerin onarımında kullanılan yenilikçi ve etkili bir yöntemdir. Bu teknoloji, özellikle kuru havuz olanaklarının olmadığı durumlarda su altında doğrudan onarım yapılmasına imkan tanır. Gelişmiş lazer teknolojileri ve bu teknolojilerin su altı uygulamaları, marine mühendislik ekipmanlarının performansını yerinde ve etkin bir şekilde restore etmek için hayati öneme sahiptir.

3.1.1.Su altı lazer kaynağı teknolojisinin temelleri

Su altı lazer kaynağı, yüksek enerjili lazer ışınlarının kullanıldığı bir süreçtir. Lazer ışını, metal yüzeyler arasında hızlı ve odaklanmış bir şekilde enerji sağlayarak, metalin eriyip birleşmesini sağlar. Bu işlem, suyun soğutma etkisi altında gerçekleştiği için, kaynak bölgesindeki ısı etkileşimleri ve metallürjik değişimler kritik öneme sahiptir (Anand & Khajuria, 2015). Şekil 1’de su altı kaynak sisteminin şematik görseli verilmiştir.



Şekil 1: Su altı lazer kaynağı şematik görüntüsü.

Kaynak: Sun & ark., 2022

3.1.2. Teknik uygulamalar ve mikro yapısal davranışlar

Su altı lazer kaynak işlemi sırasında, suyun varlığı lazer ışınının etkinliğini doğrudan etkiler. Eğer lazer kaynak bölgesindeki su tabakası 3 mm'den az ise, suyun lazer performansı üzerinde sadece hafif bir etkisi olur. Ancak su tabakası 7 mm'den kalın olduğunda, su, lazer ışınının metal yüzeye ulaşmasını önemli ölçüde engeller. Bu nedenle, optimum kaynak kalitesi ve verimliliği sağlamak için genellikle suyun kaynak bölgesinden uzaklaştırılması veya bölgenin kuru tutulması gerekmektedir (Cavaliere & ark., 2008).

3.1.3. Zorluklar ve gelecek yönelimler

Su altı lazer kaynağı teknolojisinin uygulanabilirliği, bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. Bu zorluklar arasında, lazer ışınının su altı ortamında stabil bir şekilde iletilmesi, kaynak bölgesindeki suyun etkili bir şekilde yönetilmesi ve kaynak metali üzerindeki termal etkilerin optimize edilmesi bulunmaktadır. Ayrıca, su altı lazer

kaynağının endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artırmak için teknolojik gelişmeler ve iyileştirmeler gerekmektedir.

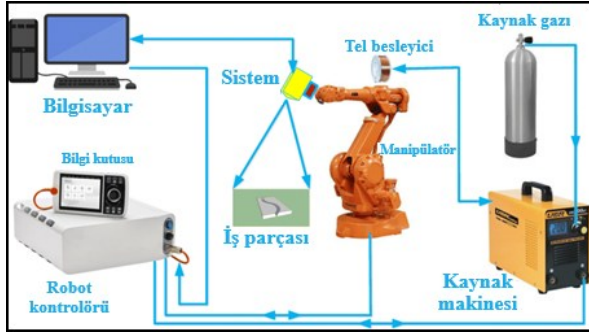
Su altı lazer kaynağı, özellikle denizcilik endüstrisinde, onarım ve bakım işlemleri için büyük potansiyele sahiptir. Bu teknoloji, geleneksel su altı kaynak yöntemlerine kıyasla daha az ısı etkisi ve daha yüksek kaynak kalitesi sunarak, marine yapıların onarımında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Gelecekte, bu teknolojinin daha da geliştirilmesi ve yeni lazer türlerinin entegrasyonu ile su altı kaynak uygulamaları daha da geniş bir kullanım alanına sahip olabilir (Dickerson & Przydatek, 2003).

3.2. Robotik kaynak teknikleri

Robotik kaynak teknikleri, özellikle denizcilik endüstrisinde, üretim süreçlerini optimize etmek ve yapı kalitesini artırmak amacıyla giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu tekniklerin uygulama alanları genişleyerek, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek verimlilik ve kalite sunma potansiyeline sahiptir.

3.2.1. Robotik kaynak tekniklerinin temel özellikleri ve uygulamaları

Robotik kaynak, programlanabilir otomatik araçlar kullanılarak gerçekleştirilen bir kaynak işlemidir. Bu teknoloji, özellikle gemi inşaatı ve deniz yapılarının üretim süreçlerinde büyük potansiyel sunmaktadır. Robotik kaynak sistemleri, yüksek düzeyde hassasiyet ve tutarlılıkla kaynak işlemlerini gerçekleştirerek yapısal bütünlüğü ve uzun ömürlülüğü garantiler. Şekil 2’de robotik kaynak sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2: Robotik kaynağın şematik görüntüsü.

Kaynak: Yang & ark., 2020

3.2.2. Gelişmiş robotik kaynak teknolojileri

Robotik kaynak teknikleri arasında gaz metal ark kaynağı (GMAW), tel ark katkılı imalat (WAAM), lazer kaynağı ve hibrit lazer ark kaynağı gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu teknikler, karbon çeliği, alüminyum, nikel-alüminyum bronz gibi çeşitli malzemeler üzerinde etkili olup, özellikle yüksek mukavemetli alaşımların işlenmesinde yeni olanaklar sunmaktadır (Wahidi & ark., 2024).

3.2.3. Robotik kaynak sistemlerinin avantajları

Robotik kaynak sistemleri, üretim süreçlerinde verimliliği artırarak, daha az insan gücüne bağlı kalarak ve üretim sürelerini kısaltarak maliyetleri düşürme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, bu sistemler, yüksek kaliteli kaynaklar yapma kapasitesine sahip olup, yapısal bütünlüğü artırarak yeniden işleme ihtiyacını azaltır (Wahidi & ark., 2024).

3.2.4.Zorluklar ve geleceğe yönelik ihtiyaçlar

Robotik kaynak tekniklerinin uygulanmasında karşılaşılan zorluklar arasında, yüksek başlangıç yatırımı ve bakım maliyetleri bulunmaktadır. Ayrıca, bu teknolojilerin geniş çapta benimsenmesini engelleyen teknik engeller ve eğitim gereksinimleri gibi faktörler de mevcuttur. Gelecek alışmalar, maliyet etkin ve güvenilir robotik kaynak sistemlerinin geliştirilmesine odaklanmalıdır. Bu genel bakış, robotik kaynak tekniklerinin denizcilik endüstrisindeki uygulamalarını ve bu tekniklerin karşılaştığı zorlukları detaylı bir şekilde ele almakta ve gelecekte bu alanda yapılacak araştırmalara yön vermektedir (Sun & ark., 2022; Wahidi & ark., 2024).

3.3.Sürtünme karıştırma kaynağı

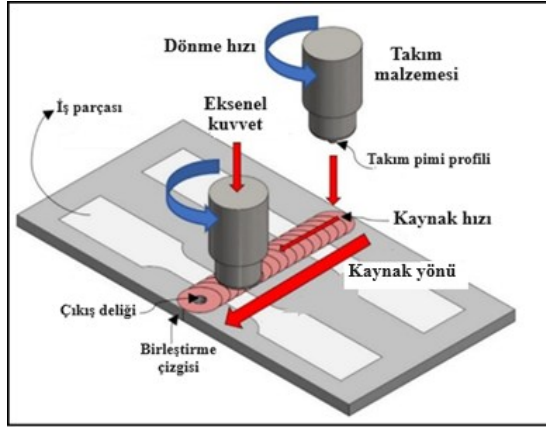
Sürtünme karıştırma kaynağı özellikle yüksek mukavemetli alaşımların birleştirilmesi için geliştirilmiş bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu proses, kaynak yapılacak malzemelerin eritilmeden birleştirilmesine olanak tanır, böylece malzemenin özelliklerinin bozulmasını minimuma indirir. Denizcilik endüstrisinde, özellikle alüminyum ve titanyum gibi hafif metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.3.1.Sürtünme karıştırma kaynağı tekniğinin temelleri

Sürtünme karıştırma kaynağı özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının levha, ekstrüzyon ürünlerin, döküm alüminyum parçaların yaygın kullanıldığı denizcilik endüstrisinde kullanım alanlarına sahiptir. Diğer kullanım alanları raylı taşıt yapımı, havacılık ve uzay, otomotiv endüstrisi, kimya ve petrokimya endüstrileri, nükleer endüstrisidir. Tüm bu alanlarda birçok parça ve

ve ekipmanın üretimi gerçekleştirilmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yumuşak metal ve alaşımlarının kullanıldığı bu endüstrilerde takım aşınması olmaksızın uzunca kaynak dikişleri gerçekleştirilmektedir.

Bu kaynak tekniği, döner bir alet kullanarak, sürtünme ve deformasyon yoluyla kaynak yapılacak malzemelerin plastikleşmesini sağlar. Bu alet, genellikle bir omuz ve bir pimden oluşur; pim, malzemenin içine daldırılır ve dönerek malzemenin plastikleşmesine neden olur (Wahidi & ark., 2024). Şekil 3'te sürtünme karıştırma kaynağının şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3: Sürtünme karıştırma kaynağının şematik görüntüsü

Kaynak: (Srichok & ark., 2020).

3.3.2.Sürtünme karıştırma kaynağının teknik uygulamaları

Birleştirilecek yüzeyler arasında yüksek kaliteli ve düşük gözeneklilikte kaynaklar oluşturur. Bu yöntemle yapılan kaynaklar, yorulma dayanımı ve korozyon direnci gibi mekanik özellikler açısından üstün performans gösterir. Alüminyum alaşımları, FSW

kullanılarak etkin bir şekilde birleştirilebilir ve bu süreç gemi yapımı gibi uygulamalarda maliyetleri düşürürken üretim hızını artırır (Wahidi & ark., 2024).

3.3.3.Sürtünme karıştırma kaynağının zorlukları ve gelişim alanları

Uygulama sırasında özellikle kaynak aletinin tasarımı ve parametrelerinin doğru ayarlanması konusunda dikkatli olmayı gerektirir. Sürtünme ve ısı yönetimi, kaynağın kalitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Ayrıca, FSW süreci yüksek başlangıç yatırımı gerektirir çünkü özel tasarlanmış makineler ve aletler kullanılır. Fakat, bu yüksek başlangıç maliyeti, üretilen birleşimlerin yüksek kalitesi ile dengelenmektedir (Wahidi & ark., 2024).

3.3.4.Geleceğe yönelik uygulamaları

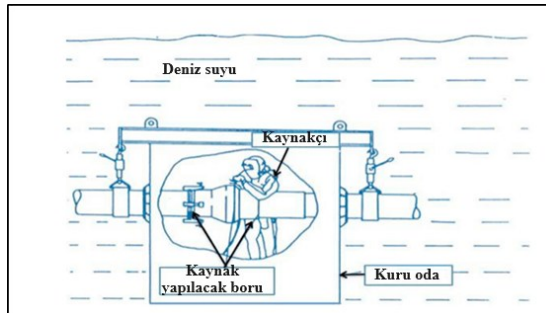
Denizcilik endüstrisindeki potansiyeli, özellikle hafif malzemelerin kullanımının arttığı gemi ve deniz yapılarının inşası alanında devam eden araştırmalarla daha da genişlemektedir. Sürekli gelişen bu teknoloji, malzeme bilimindeki yeniliklerle entegre edilerek, daha karmaşık ve çeşitli malzemelerin etkin bir şekilde birleştirilmesini sağlayacak Şekilde evrilmektedir. Bu detaylar, Sürtünme Karıştırma Kaynağı teknolojisinin denizcilik endüstrisinde nasıl bir devrim yaratabileceğini ve bu teknolojinin gelecekteki uygulamalarını daha da genişletebileceğini göstermektedir. Yüksek mukavemetli kaynaklar ve malzeme tasarrufu sağlayarak endüstri için vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir (Wahidi & ark., 2024).

3.4.Su altında kuru kaynak

Su altında Kuru Kaynak (Dry Underwater Welding), denizcilik endüstrisinde önemli bir teknolojik gelişme sunarak, suyun neden olduğu birçok zorluğu bertaraf etmekte ve kaynak işlemlerinin su altında etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, suyu tamamen dışlayan özel bir kapsül içinde kaynak işlemini mümkün kılar, böylece kaynak bölgesi kuru kalır ve suyun olumsuz etkilerinden korunur (Sun & ark., 2022).

3.4.1.Su altında kuru kaynak yönteminin temelleri

Su altında kuru kaynak, özel olarak tasarlanmış bir basınç odasında gerçekleştirilir. Bu odada, dış basınç ne olursa olsun iç basınç yaklaşık bir atmosfer seviyesinde sabit tutulur. Bu yöntem, suyun kaynak alanından uzaklaştırıldığı ve kaynak işleminin kuru bir ortamda yapılmasını sağlayan bir fiziksel bariyerle (kaynak odası) mümkün olur. Bu odalar genellikle çelikten yapılırlar, ancak plywood, kauçukla kaplanmış tuval veya başka uygun malzemeler de kullanılabilir (Sun & ark., 2022). Şekil 4'te su altı kuru kaynak yönteminin şematik görseli verilmiştir.



Şekil 4: Su altında kuru kaynak yönteminin şematik gösterimi.

Kaynak: Yang & ark., 2020

3.4.2.Teknik uygulamalar ve süreç

Kuru kaynak odası, kaynak yapılan alanın boyutlarına ve geometrisine göre özelleştirilir. Bu odanın içinde aynı anda birden fazla kaynakçı çalışabilir. Kuru kaynak yapılırken, kaynak metalinin doğrudan suyla temas etmemesi sağlanır. Bu, kaynak operasyonunun stabilitesini artırır, hidrojen sorununu azaltır, kaynak ve ana metalin soğuma hızını düşürür ve kaynağın mukavemetini ve sünekliğini geri kazandırır (Sun & ark., 2022).

3.4.3.Zorluklar ve geleceğe yönelik yaklaşımlar

Su altında kuru kaynak teknolojisinin uygulanmasında karşılaşılan zorluklar arasında, odanın sızdırmazlık sorunları ve artan derinlikle birlikte artan basınç nedeniyle ortaya çıkan problemler bulunmaktadır. Bu problemler, hem kaynak kimyasını hem de mikroyapıları etkileyebilir. Bu zorluklara rağmen, su altında kuru kaynak yöntemi, denizcilik endüstrisinde onarım ve bakım işlemleri için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknolojinin daha da geliştirilmesi ve yeni lazer teknolojilerinin entegrasyonu ile su altı kaynak uygulamaları daha da geniş bir kullanım alanına sahip olabilir.

Bu derinlemesine analiz, su altında kuru kaynak tekniğinin denizcilik endüstrisinde nasıl bir devrim yaratabileceğini ve bu teknolojinin gelecekteki uygulamalarını daha da genişletebileceğini göstermektedir. Bu teknoloji, yüksek mukavemetli kaynaklar ve malzeme tasarrufu sağlayarak endüstri için vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir (Sun & ark., 2022; Surojo & ar., 2020).

4.Sonuç

İleri kaynak tekniklerinden olan su altı lazer kaynağı, robotik kaynak ve sürtünme karıştırma kaynağından her biri, özel zorlukları ve uygulama gereksinimlerini karşılamakta farklı yönlerden katkı sağlamaktadır. Özellikle, su altı lazer kaynağının gelişimi, su altında yüksek kaliteli ve verimli onarım çalışmalarını mümkün kılmaktadır. Robotik kaynak, yüksek tekrarlanabilirlik ve düşük hata oranı ile üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ise özellikle hafif metallerin kaynağında gösterdiği üstün performans ile dikkat çekmektedir.

Bu tekniklerin uygulanması sırasında karşılaşılan başlıca zorluklar, yüksek başlangıç yatırım maliyetleri, teknik eğitim ihtiyaçları ve operasyonel karmaşıklıklar olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, her bir kaynak metodunun malzeme özelliklerine göre optimize edilmesi gerekmekte, bu da sürecin başarısını doğrudan etkilemektedir. Su altı kaynak işlemleri, özellikle su altı lazer kaynağı, sıkı güvenlik protokolleri ve dikkatli planlama gerektirmekte olup, bu işlemler sırasında suyun kaynak üzerindeki soğutma etkisi gibi faktörlerin doğru bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir.

Denizcilik endüstrisinde kullanılan ileri kaynak tekniklerinin incelenmesi, bu teknolojilerin endüstriyel uygulamalarda nasıl bir etki yaratabileceğini göstermiştir. İleri kaynak teknikleri denizcilik endüstrisinin karşılaştığı zorlukları aşmada ve daha etkin üretim süreçleri geliştirmede önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu tekniklerin entegrasyonu, maliyetleri düşürme, üretim sürelerini kısaltma ve yapısal bütünlüğü artırma gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu tekniklerin daha geniş bir kabul görmesi ve

uygulanması için, başlangıç maliyetlerinin azaltılması, operasyonel verimliliğin artırılması ve teknik personelin eğitime yönelik yatırımların artırılması gerekmektedir. Ayrıca, bu tekniklerin çeşitli malzeme türleri ve karmaşık yapılar üzerindeki uygulanabilirliğini artırmak amacıyla yapılan araştırmaların devam etmesi önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, ileri kaynak tekniklerinin denizcilik endüstrisindeki potansiyelini tam olarak ortaya koymak ve bu tekniklerin sunduğu fırsatlardan maksimum düzeyde yararlanmak için sürekli araştırma ve geliştirme faaliyetleri büyük önem taşımaktadır. İleri kaynak tekniklerinin denizcilik endüstrisinde sağlayacağı stratejik avantajlara bu teknolojilerin gelecekteki gelişim yollarını araştırarak ulaşılabilir.

Kaynaklar

American Welding Society, 2018. Influence of Horn Misalignment on Weld Quality in Ultrasonic Welding of Carbon Fiber/Polyamide 66 Composite. WJ 97, 133–143. <https://doi.org/10.29391/2018.97.012>

Anand, A., Khajuria, A., 2015. Welding processes in marine application: A review. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 2, 215–225.

Bala, Y.G., Santhi, B., Dinesh Kumar, R., 2024. Sustainability in Welding Industries, in: Moinuddin, S.Q., Saheb, S.H., Dewangan, A.K., Cheepu, M.M., Balamurugan, S. (Eds.), Automation in Welding Industry. Wiley, pp. 215–228. <https://doi.org/10.1002/9781394172948.ch12>

Cavaliere, P., Squillace, A., Panella, F., 2008. Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding. Journal of materials processing technology 200, 364–372.

Delzendehtrooy, F., Akhavan-Safar, A., Barbosa, A.Q., Beygi, R., Cardoso, D., Carbas, R.J.C., Marques, E.A.S., Da Silva, L.F.M., 2022. A comprehensive review on structural joining techniques in the marine industry. Composite Structures 289, 115490.

Dickerson, T.L., Przydatek, J., 2003. Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws. International Journal of Fatigue 25, 1399–1409. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00060-4)

Majeed, T., Wahid, M.A., Ali, F., 2018. Applications of Robotics in Welding. IJERMT 7, 30. <https://doi.org/10.23956/ijermt.v7i3.9>

Srichok, T., Pitakaso, R., Sethanan, K., Sirirak, W., Kwangmuang, P., 2020. Combined response surface method and modified differential evolution for parameter optimization of friction stir welding. Processes 8, 1080.

Sun, G., Wang, Z., Lu, Y., Chen, M., Yang, K., Ni, Z., 2022. Underwater Laser Welding/Cladding for High-performance Repair of Marine Metal Materials: A Review. Chin. J. Mech. Eng. 35, 5. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00674-0>

Surojo, E., Putri, E.D.W.S., Budiana, E.P., 2020. Recent developments on underwater welding of metallic material. Procedia Structural Integrity 27, 14–21.

Wahidi, S.I., Oterkus, S., Oterkus, E., 2024. Robotic welding techniques in marine structures and production processes: A systematic literature review. Marine Structures 95, 103608.

Yang, L., Liu, Y., Peng, J., 2020. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review. Int J Adv Manuf Technol 110, 1027–1046. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05524-2>

BÖLÜM VI

Hafifletilmiş Çelik Dişlilerde aktif taraf kavrama açısının ve rim kalınlığının tek diş rijitliğine etkilerinin incelenmesi

Tufan Gürkan YILMAZ¹

Giriş

Yüksek mukavemetli çelik dişlilerden tasarlanmış düz dişli çarklarda hafifletme genel olarak dişli gövdesinden malzeme boşaltarak yapılmaktadır. Bu boşaltma delik ve kanallar şeklinde olabildiği gibi inceltilmiş göbek kalınlığı kullanmak suretiyle de yapılabilir. Bu durum esasen dişli gövdesinde süreksizlik oluşturarak dişliyi gerilme ve dinamik davranış açısından kötüleştirebilmektedir. Bunun yanı sıra eklemeli imalat yöntemlerinin kullanıldığı optimize

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Orhangazi Yeniköy Asil Çelik MYO, Motorlu Araçalar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Bursa/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3772-7871, tufanyilmaz@uludag.edu.tr

edilmiş tasarımlarda mevcuttur. Bu alanda literatürdeki çalışmalar özetlenecek olursa;

Bibel ve ark. hafifletilmiş dişlilerde rim kalınlığının diş dibi gerilmelerine etkilerini SEM ile incelemişlerdir. Çalışmada çelik dişlilerde daha çok görülen üç diş modeli yerine rim in elastikiyetini daha iyi bir şekilde dahil etmek için beş diş modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre süren taraftaki diş dibi gerilmesi rim destek oranı 0,45 ten 2,55'e çıkarıldığında oldukça düşük bir miktarda azalırken rim yüzeyindeki gerilmeler neredeyse 10 kat artmaktadır. Rim destek oranı 1,3 ün üzerine çıktığında diş dibi ve rimde oluşan gerilmeler değişmemektedir (Bibel ve ark. 1994).

Li çalışmasında hafifletilmiş düşük rim kalınlığına sahip dişlilerde gövde destek parametrelerinin temas ve diş dibi gerilmelerine etkisini SEM ile incelemişlerdir. Gövde destek açısı arttıkça temas ve gövde gerilmelerinin arttığını destek konumunun simetri ekseninin sağında olması durumunda orta ve sol tarafta olmasına göre daha düşük gerilmelerin elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Elde edilen diğer sonuca göre destek açısı arttıkça süren taraftaki diş dibi gerilmeleri düşmektedir (Li 2012).

Toso ve ark. düz dişlilerde hafifletilmiş gövde konstrüksiyon tipinin dişlinin dinamik davranışına etkilerini incelemişlerdir. Tek diş rijitliği ve kavrama rijitliği açısından ince gövde kalınlığına sahip dişlinin gövde üzerine kanallar açılmış dişliye göre daha iyi olduğu görülmüştür. Maksimum dinamik kuvvetlerde önemli bir fark görülmezken, iletim hatalarında kanallı tasarımın daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür (Toso ve Heirman 2017).

Shweiki ve ark. çalışmalarında dört farklı dişli mekanizması konfigürasyonu kullanmışlardır. Bunlarda ikisi ince gövde destek kalınlığına sahipken diğer ikisi gövdede delik ve kanal şeklinde boşaltılmıştır. Bunlardan ikisi aynı ağırlığa sahiptir. Statik iletim hatası bakımından kanal şeklinde gövdesi boşaltılmış dişlinin en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. En düşük iletim hatası ortalama kavrama rijitliği en yüksek olan ince gövde kalınlığına sahip dişlide görülmüştür (Shweiki ve ark. 2017).

Ramadani ve ark. titanyum alaşımından imal edilmiş eklemeli imalat yöntemi ile oluşturulmuş hafifletilmiş düz dişli çarkların ses davranışı üzerine deneysel araştırmalar yürütmüşlerdir. Elde edilen sonuçlara göre hafifletilmiş tasarımda maksimum ses basıncının yarı yarıya düştüğü görülmüştür. Hafifletilmiş gövdeye polimer malzeme eklenmesi durumunda ses basıncı bir miktar daha düşmektedir. Bunun yanı sıra titreşim verilerinin de benzer bir eğilim gösterdiği görülmüştür (Ramadani ve ark. 2018)

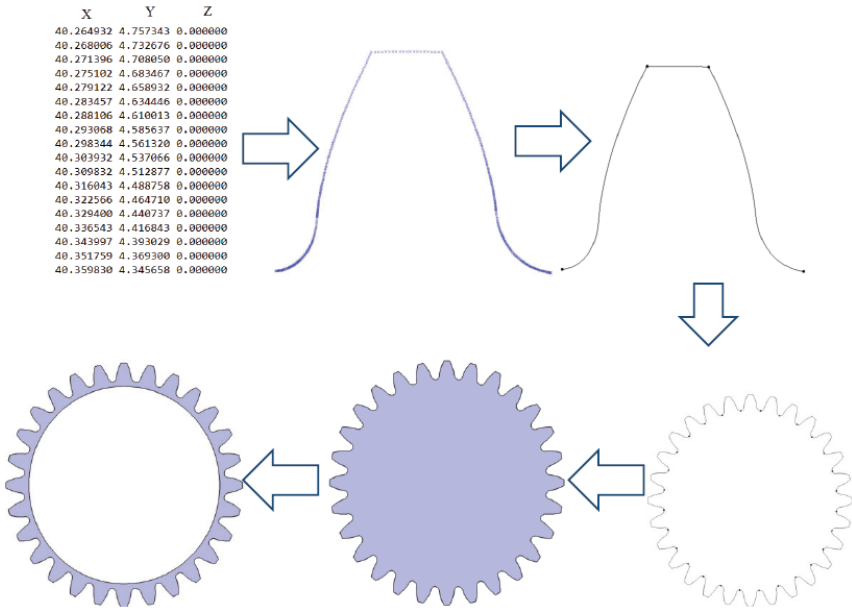
Mura ve ark. gövdeye delikler açılarak hafifletilmiş düz dişli çark tasarımına alternatif bir eklemeli imalat metodu ile tasarlanmış dişli önermişlerdir. Elde edilen tasarımla diş dibi gerilmesi bir miktar artmasına rağmen statik iletim hataları neredeyse aynı kalmıştır. Bunun yanı sıra ağırlıktan tasarruf sağlanmış ve birinci rezonans bölgesi daha ileri devir sayılarına ötelenmiştir (Mura ve ark. 2018).

Hou ve ark. elektrikli araçların dişli kutularındaki düz dişliye çarklarda hafifletmenin statik ve dinamik davranışa etkilerini SEM-analitik hibrit bir metotla incelemişlerdir. Öncelikle farklı rim ve gövde kalınlıklarında statik iletim hatalarını incelemişlerdir. Rim kalınlığı 5 mm den 25 mm ye çıkarıldığında iletim hataları ortalama

%15 düşerken bu azalış gövde kalınlığının aynı miktarda değişiminde %30' a varmaktadır. Tek diş ve çift diş temas bölgelerindeki maksimum iletim hataları arasındaki farkta artan web ve rim kalınlığında düşmektedir. Dinamik kuvvetlerde ise rim kalınlığının etkisi gövde kalınlığına göre daha yüksektir (Hou ve ark. 2020).

Materyal Metot

Sonlu elemanlar analizleri için çelik, hafifletilmiş çelik dişlilere ait üç boyutlu tasarımlar daha önceki çalışmalarda verilen eşitliklerin MATLAB ortamında programlanması ile elde edilmiştir. Şekil 1' de dişli çark tasarım aşamaları gösterilmiştir.

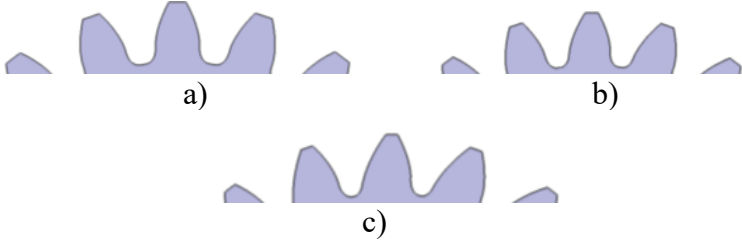


Şekil 1: Dişli çark tasarım aşamaları

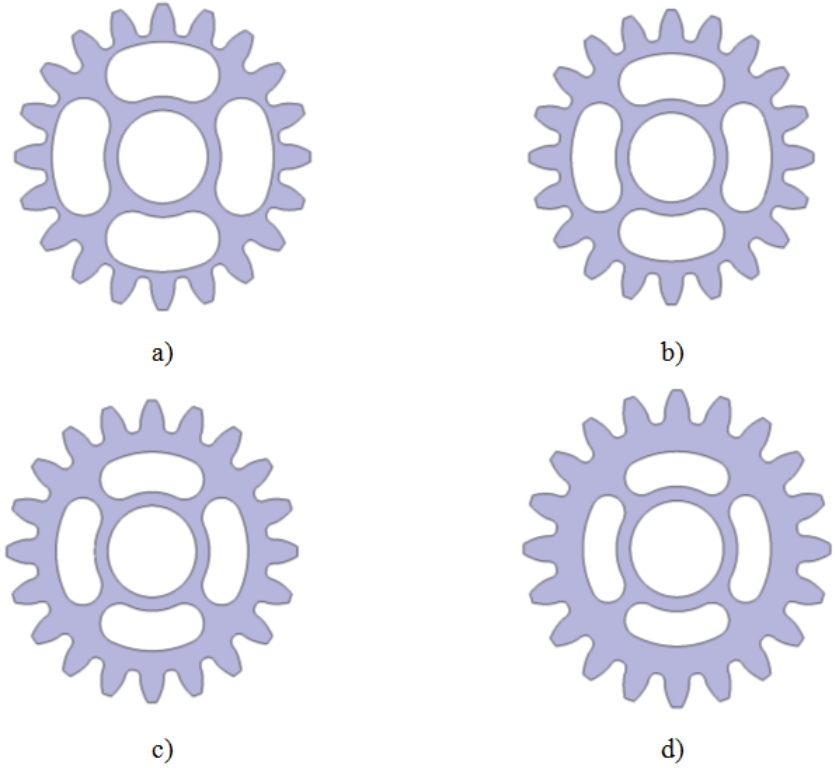
Esasen elde edilen dişli çarkın bir dişine ait noktaların koordinatlarıdır. Bu koordinatlar .asc uzantılı bir notepad dosyası olup bu dosya CATIA V5R20 programında “Digitized Shape Editor” modülünün okuyabileceği formdadır. Okuma neticesinde elde edilen bir nokta bulutu verisidir. Bu nokta bulutu yine aynı modülün içindeki ilgili komut ile standart noktalara dönüştürülmüştür. Bu noktalardan “Generative Shape Design” modülündeki ilgili komut ile diş profilleri oluşturulmuştur. Oluşturan bu diş profili diş sayısı kadar taksimat dairesi çapı üzerinde eşit aralıklarla yine ilgili komut ile çoğaltılmış ve sonra “Part Design” modülündeki ilgili komut ile dişlilerin 3B tasarımları tamamlanmıştır. Çalışmamızda kullanılan dişli çarkların tasarım parametreleri Tablo 1 de verilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3’ te ise dişli tasarımları verilmiştir.

Tablo 1: Dişli çark tasarım parametreleri

Tasarım Parametreleri	Değer
Modül (x_m)	3
Diş sayısı z	20
Süren taraf kavrama açısı α_d	20°-25°-30°
Sürülen taraf kavrama açısı α_c	20°
Diş başı yüksekliği h_a (x_m)	1
Diş dibi yüksekliği h_f (x_m)	1.25
Kesici takım uç radyüsü $\rho_{1,2}$ (x_m)	0.3
Dişli çark genişliği b (mm)	24
Rim kalınlığı (x_m)	0.5-1-1.5-2
Göbek kalınlığı (x_m)	-
Mil deliği çapı (mm)	20
Kavrama oranı i	1
Diş-rim ve göbek bölgesi malzemesi	Dişli Çeliği
Gövde malzemesi	Dişli Çeliği

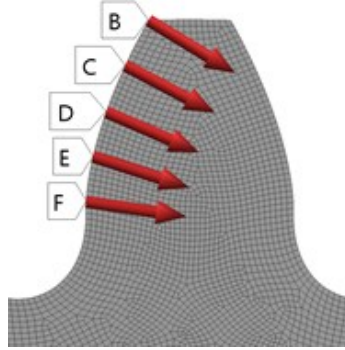


Şekil 2: Farklı süren taraf kavrama açısına sahip dişli çarklar: a) 20°, b) 25°, c) 30°



Şekil 3. Farklı rim kalınlıklarına sahip dişli çarklar: a) 0,5xm, b) 1xm, c) 1,5xm, d) 2xm

Oluşturulan tam dişli modelleri sonlu elemanlar deformasyon analizlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada kuvvetler diş yan yüzeyi boyunca 5 farklı çizgiden uygulanmıştır. Dişli göbeği dönme ve ötelenmeye fırsat vermeyecek şekilde mesnetlenmiştir. 0.15 mm ayırıt uzunluğuna sahip Hekzahedral ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 4’ te kuvvet uygulama noktaları ve ağ yapısı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4. Kuvvet uygulama noktaları ve ağ yapısı

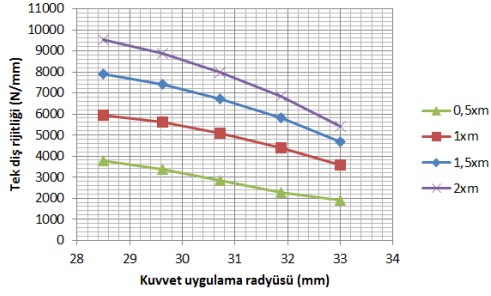
Neticede uygulanan kuvvet (100 N) elde edilen deformasyon değerlerine bölünerek tek diş rijitlikleri elde edilmiştir (Eş.1).

$$k=F/x \quad (1)$$

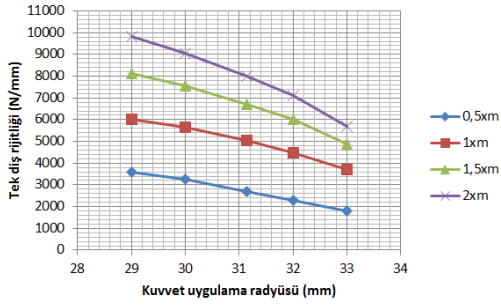
Burada x ANSYS den elde edilen toplam deformasyon değerini, F uygulanan kuvveti göstermektedir.

Bulgular ve Tartışma

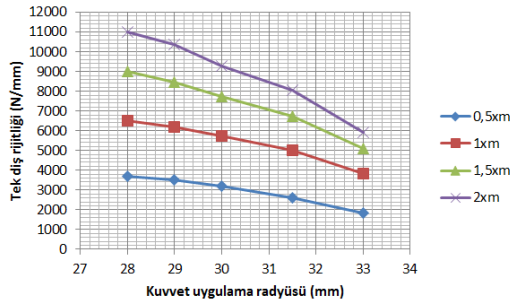
Bu kısımda hafifletilmiş çelik dişli çarkların tek diş rijitlikleri incelenmiştir. Grafik 1’ de farklı rim kalınlıkları için 20°,25° ve 30° süren taraf kavrama açısına sahip hafifletilmiş çelik dişlilerin tek diş rijitlikleri gösterilmektedir.



a)



b)



c)

Grafik 1. a)20°, b)25°, c)30° süren taraf kavrama açısına sahip hafifletilmiş dişlilerin tek dış rijitlikleri

Bulgular incelendiğinde rim kalınlıklarının tek diş rijitlikleri üzerinde önemli bir etkisi görülmektedir. Tüm aktif taraf kavrama açılarında rim kalınlığı 0.5xm den 2xm çıktığında ortalama rijitlik %60 artmaktadır. Süren taraf kavrama açısının değişiminde de benzer sonuçlar görülmektedir. 20° süren taraf kavrama açısı 30° ye çıkarıldığında bu oran yaklaşık %15 olmaktadır. Hafifletilmiş dişlilerde rim kalınlığının tek diş rijitliği üzerine etkisinin süren taraf kavrama açısına göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Sonuç

Bu çalışmada hafifletilmiş çelik dişliler farklı rim kalınlıkları ve süren taraf kavrama açılarında 3B olarak tasarlanmışlar ve sonlu elemanlar analizlerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen deformasyon değerlerini kullanarak bu parametreler için tek diş rijitlikleri elde edilmiştir. Buna göre;

- Rim kalınlığının tek diş rijitlikleri üzerinde oldukça yüksek bir etkisi bulunmaktadır.

- Süren taraf kavrama açısının artması ile tek diş rijitlikleri artmaktadır.

- İki parametre arasında rim kalınlığının etkisinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Kaynakça

Bibel, G. D., Reddy, S. K., Savage, M., Handschuh, R. F. (1994). Effects of rim thickness on spur gear bending stress. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 116(4). <https://doi.org/10.1115/1.2919500>

Li, S. (2012). Contact stress and root stress analyses of thin-rimmed spur gears with inclined webs. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 134(5). <https://doi.org/10.1115/1.4006324>

Toso, A., Heirman, G. (2017). On The Effect of Lightweight Gear Blank Topology on Transmission Dynamics. *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering*, 2-5 Ağustos 2015, ABD, pp. 1–7.

Shweiki, S., Palermo, A., Mundo, D. (2017). A Study on the Dynamic behaviour of Lightweight Gears. *Shock and Vibration*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7982170>.

Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., Pehan, S. (2018). Topology Optimization Based Design of Lightweight And Low Vibration Gear Bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92–104. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM17\(1\)419](https://doi.org/10.2507/IJSIMM17(1)419)

Mura, A., Curà, F., Pasculli, L. (2018). Optimisation methodology for lightweight gears to be produced by additive manufacturing techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(19). <https://doi.org/10.1177/0954406217737107>

Hou, L., Lei, Y., Fu, Y., Hu, J. (2020). Effects of lightweight gear blank on noise, vibration and harshness for electric drive system in electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 234(3). <https://doi.org/10.1177/1464419320915006>

BÖLÜM VII

Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin İşlenmesi

Yılmaz KÜÇÜK¹
Volkan KAYA²

Giriş

Kompozit, kimyasal olarak birbirinden farklı ve çözünemeyen birden fazla fazın makroskobik ölçekte bir araya getirilmesi sonucu ortaya çıkan, yapısal özellikleri ve performansı daha üstün olan yeni malzemeye verilen addır. Fiber (elyaf-lif) ile güçlendirilmiş bir kompozitte, yükün en önemli kısmını fiberler taşımaktadır. Matris ise yükün aktarımı görevini üstlenir. Matris; polimer, metal veya seramik olabilmektedir.

¹ Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Müh.Mim.veTasarım Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Bartın/Türkiye, Orcid: 0000-0002-7559-8794, yilmazkucuk75@gmail.com

² Öğrenci, Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Müh. A.B.D., Bartın/Türkiye, Orcid: 0009-0005-7479-4776, vkaya@rasat.com.tr

Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozitler iyi termal kararlılıkları, yüksek yorulma dayanımı, iyi korozyon direnci ve mükemmel mekanik özellikleriyle, havacılık (Hueber, Fischer, Schwingshandl, & Schledjewski, 2019), otomotiv (Khatkar, Behera, & Manjunath, 2020), inşaat (Kamble & Behera, 2021), tıp (Park, Lih, Park, Joung, & Han, 2017), yüksek hızlı demir yolu ve rüzgâr enerjisi ekipmanları gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir (Song, Wang, Pan, Li, & Yu, 2024).

Karbon fiber takviyeli kompozitler işleme esnasında iki veya daha çok fazlı yapısı nedeniyle bazı hasarlara uğrayabilmekte ve söz konusu hasarların en önemlileri geleneksel işleme yöntemleri kullanıldığında oluşmaktadır. Bunlardan bazıları; çatlaklar, tabakalar arası delaminasyon, kesme ve delme işlemi esnasında fiziksel temasın giriş ve çıkışında yüzeysel hatalar ve kırılmalar meydana gelmesidir. Bununla birlikte malzemelerin homojen olmayışı, kolay deforme olması, anizotropik (her yöne farklı özellik gösterme) yapı göstermesi, işlemede zorluklar, kalite düşüklüğü, malzeme hasarı sebebi ile hurda malzemelerin artışına sebep olmakta ve delaminasyon bölgesine bağlı olarak çekme mukavemetini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca geleneksel yöntemde oluşan aşırı takım aşınması sık sık kesici takım değiştirilmesini zorunlu kılmakta ve dolayısıyla üretim maliyetinde artışa sebep olmaktadır (Herzog, et al., 2015; Krishnaraj, et al., 2012).

Bu bölüm CFRP kompozitlerin işlenmesinde kullanılan geleneksel ve geleneksel olmayan işleme yöntemleri ve optimum işleme şartlarının belirlenmesine yönelik yapılmış çalışmaları içermektedir.

GELENEKSEL İŞLEME YÖNTEMLERİ

CFRP kompozitlerin geleneksel işleme yöntemleri en genel şekilde delme, çevre kesme ve kanal frezeleme olarak sayılabilir (Sheikh-Ahmad & Shinde, 2016). Özellikle delme işlemi en çok uygulanan yöntemlerinden biridir. Delme işleminde yüzey hassasiyeti, takım geometrisi, kesme kuvveti ve kesme parametrelerinin etkili olduğu bilinmektedir (Davim & Reis, 2003).

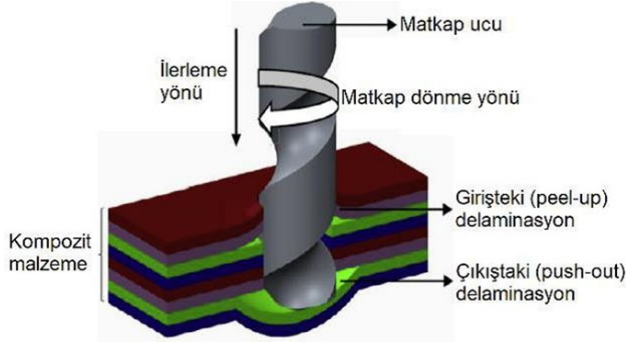
CFRP kompozitin geleneksel delme ile işlenmesi

Mühendislikte fiber takviyeli kompozitlerin parçaları genellikle cıvata ve perçin gibi mekanik bağlantılar kullanılarak birleştirilmektedir. Bu nedenle, delme işlemi kompozitlerin işlenmesinde yaygın ve önemli bir işlem haline gelmiştir. Ancak delme işlemi sonucu oluşacak hasarlar, parçalar arasındaki bağlantının sağlamlığını ve güvenilirliğini ciddi şekilde etkileyecektir (Fu & Yao, 2022). CFRP kompozitlerin delinmesi sonucu oluşan kusurlardan başlıcaları delaminasyon, elyaf ayrılması, yırtılma, mikro çatlaklar, çapaklar ve boyutsal hatalardır (Liu, Tang, & Cong, 2012). Delaminasyon, delme işlemi sırasında kompozit katmanlar arasındaki bağ mukavemetini aşan delme eksenel yükü nedeniyle bitişik katmanların ayrılması ve bağın kopması olgusunu ifade etmektedir. Yırtılma, kesme kenarının delme kuvvetinden etkilenmesi ve delme işlemi sırasında delik etrafındaki yüzey malzemesinin taban malzemesinden yırtılmasıyla oluşan kusurdur. Çapak ise delme işlemi sırasında delme kenarının ucu iş parçasının yüzeyinden ayrıldığında hala var olan malzeme çıkıntılarıdır. Delme işlemi sırasında çapak ve yırtılma her zaman deliğin çıkış tarafındaki yüzey tabakasında yoğunlaşmaktadır. En dıştaki elyaf yönünde uzanan yırtılma kusurları çapak kusurlarından

daha büyüktür (Xu, Li, Mi, An, & Chen, 2018). Delme çıkışı yırtılma kusurlarının oluşumunda, matkap ucundaki düz keski kenarı ve ana kesme kenarı etkilidir. Matkap ucu düz keski kenarı yırtılma oluşumunda daha baskındır ve yırtılmanın nihai yırtılma boyutunun %60'ından fazlasına ulaşmasına neden olabilmektedir (Cadorin & Zitoune, 2015). Yırtılma kusurlarının boyutu, ilerleme hızı ve mil dönme hızı ile ilgilidir. İlerleme hızı arttığında, delik çıkışındaki yırtılma artarken, mil hızı arttığında ise yırtılma azalmaktadır.

Kompozitlerin delme işleme kusurları arasında delaminasyon en önemli ve yaygın olanıdır. Delaminasyon kusurunun konumuna göre, giriş delaminasyonu ve çıkış delaminasyonu olarak ikiye ayrılabilir (Liu, Tang, & Cong, 2012). Girişteki delaminasyona soyulma delaminasyonu, çıkıştaki delaminasyona ise dışarı itme delaminasyonu denir (Şekil 1). Delme işlemi sırasında, malzeme desteğinin olmaması nedeniyle giriş ve çıkışta delaminasyon kusurları oluşmaya eğilimlidir (Hintze, Hartmann, & Schütte, 2011). Eksenel kesme kuvveti delaminasyon kusurlarıyla yakından ilişkilidir. Eksenel kesme kuvveti belirli kritik değere ulaştığında delaminasyon kusurları oluşur ve çıkıştaki delaminasyon giriştekenden daha ciddi olur. Giriş delaminasyon kusurunun oluşumu, matkap kesme kenarının kompozit laminatın üst yüzey lifine dokunduğu anda üst tabakaya çevresel bir kesme kuvvetinin etkimesiyle gerçekleşmektedir. Söz konusu çevresel kesme kuvveti, matkabın helis açısıyla karşılaştığında yukarı doğru eksenel bir bileşen üretir. Eksenel bileşen kuvveti, kompozit laminatın katmanlar arası bağ mukavemetini aştığında, üst yüzey tabakası matrisi soyup bir giriş delaminasyon kusuru oluşturacaktır (Davim & Rubio, 2007). Çıkış delaminasyon kusurunun oluşum

mekanizması, matkap ucunun delmesiyle, kompozit laminatın kesilmemiş kısmının kademeli olarak daha ince hale gelmesidir, bu da aksenal kesme kuvvetine direnme yeteneğinin bozulmasına yol açmaktadır. Çıkış itme delaminasyonu, aksenal kesme kuvveti bitişik katmanlar arasındaki bağ mukavemetini aştığında meydana gelmektedir (Hocheng & Tsao, 2005).



Şekil 1: Delme esnasında delaminasyon oluşumu

Kaynak: (Khawarizmi, Abdullah, Han, Kim, & Kwon, 2012)

CFRP kompozitlerin geleneksel delme işlemindeki delaminasyon analizi için yapılan bir çalışmada iş mili hızı, ilerleme hızı ve matkap çapı gibi delme parametrelerinin delaminasyona etkilerini modellemek için termo grafik tekniği ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır (Krishnamoorthy, Mercy, Vineeth, & Salugu, 2015). Çalışmada matkap uç açısının kompozitlerin delinmesinde ortaya çıkan delaminasyon hasarında en önemli etkiye sahip parametre olduğu ve ardından ilerleme hızının geldiği bildirilmiştir.

CFRP kompozitleri delmek için karot testere matkabi kullanılan bir çalışmada dönme hızı, ilerleme hızı ve çap oranının

ortalama itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkisini taguchi yöntemi ile incelenmiş olup, ilerleme hızı ve dönme hızının itme kuvveti ile delaminasyonu önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Tsao, 2008). Çalışmada, delme işleminde küçük ilerleme hızının düşük bir itme kuvveti ürettiği ve bunun da ortaya çıkan delaminasyonun derecesini azaltabileceği ifade edilmiştir.

Bir başka makalede, tek yönlü cam elyaf takviyeli plastik (UD-GFRP) laminatların delinmesi sırasında çevre kesme takımı geometrisinin itme ve tork üzerindeki etkisine ilişkin deneysel bir araştırmanın sonuçları sunulmaktadır. Elyaf takviyeli plastikleri (FRP'ler) delerken kaliteli delikler elde etmenin en etkili yolunun itme ve torku azaltmak olduğu vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular, çevre kesme takım performansının itme, tork ve delik kalitesi açısından geleneksel matkaplarından üstün olduğunu ortaya koymuştur (Mathew, N., & Naik, 1999).

Diğer bir çalışmada (Rahme, Moussa, Lachaud, & Landon, 2020), delik çıkışıındaki yüzey kırılmalarını (delaminasyonları) azaltmak maksadı ile deliğin çıkış kısmına cam dokuma kumaş katmanı eklemenin kritik itme kuvvetini artırdığını ve bu durumun hasarın azalmasını sağladığı belirtilmiştir. İtme kuvvetinin kritik değeri aşmayacak şekilde sınırlandırılmasının delaminasyonu azalttığı ayrıca, artan delme sıcaklığının da kritik itme kuvvetini azalttığına yönelik deneysel, analitik ve termo-mekanik tahmin modeli çalışmaları yapılmıştır (İsmail, Ojo, & Dhakal, 2017; Jia, Chen, Wang, & Zhang, 2020).

Delik delmede farklı dönme hızı, ilerleme ve matkap uç açılarının delaminasyon ve itme kuvveti üzerinde etkilerini araştıran

bir çalışmada ise en fazla etkiye sahip parametrelerin matkap uç açısı ve ilerleme olduğu bildirilmiştir (Yardımeden, Kılıçkap, & Çelik, 2014).

CFRP kompozitin delme işlemi üzerine yapılan bir çalışmada, ilerleme hızı ve uç açısının itme kuvveti üzerinde en fazla etkiye sahip faktörler olduğu bildirilmiştir. Takım yeni olduğunda uç açısı en etkili parametredir. Aşınma nedeniyle geometri değişeceğinden delaminasyonu azaltmak için 90° – 108° aralığında düşük bir uç açısı seçimi önerilmiştir. Takım geometrisinin aşınma nedeniyle değişmesi halinde ise ilerleme hızının daha önemli hale geldiği belirtilmiştir (Feito, Milani, & Muñoz-Sánchez, 2016).

Bir diğer çalışmada, dokuma CFRP'nin delme işleminde takım geometrisi ve kesme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır (Mahdi, Makhfi, Habak, Turki, & Bouaziz, 2023). İlerleme hızının, kullanılan delme takımından bağımsız olarak itme kuvvetini ve torku en çok etkileyen faktör olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, dokuma CFRP'de delme işleminin, tek yönlü CFRP'ye kıyasla hassas olduğu, çünkü CFRP yapısının karmaşıklığı nedeniyle delaminasyonun nasıl oluştuğunu tahmin etmenin güçlüğüne vurgu yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgularda, gözlemlenen kusurun ortaya çıkması, ilerleme hızı artışıyla artmaktadır. Bu nedenle, itme kuvveti ve torkun artması daha fazla delme kusuru oluşturmuştur.

CFRP kompozitin geleneksel talaşlı imalat yöntemi ile işlenmesi

Mühendislik uygulamaları için üretilen kompozitlerin kalıplandıktan sonra, istenen şekil ve boyutlara getirmek için işlenmeleri kaçınılmazdır. Tipik anizotropik ve tekdüze olmayan

malzeme olarak kompozitlerin üretimi sırasında gözeneklilik, delaminasyon, yabancı cisim varlığı, elyaf kusuru gibi olumsuzluklar oluşabilirken (Fu & Yao, 2022), işleme süreci sırasında da delaminasyon, çapak oluşumu, yırtılma ve diğer üretim kusurları meydana gelebilmektedir. Bu durum da erken delaminasyon ve kompozit yapılarda kısalan ömür gibi birçok mühendislik uygulama sorununa yol açmaktadır. Bu nedenle, birçok araştırmacı fiber takviyeli kompozitlerin işleme kusurlarına daha fazla önem vermiştir (Kecik & Ciecicelag, 2025).

İşleme esnasında ortaya çıkan kusurlar, kesici takım ve iş parçası malzemelerinin türü, kesici takım geometrisi ve değişken işleme parametreleri dâhil olmak üzere çeşitli faktörler nedeniyle oluşmaktadır. Kompozit malzemelerdeki kusurların varlığı, dayanıklılıklarını ve uzun vadeli performanslarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. İşleme ve etkileri, kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü gibi işlenebilirlik göstergeleri ile karakterize edilmektedir (Mouralova, et al., 2020; Guleria, Kumar, & Singh, 2022).

Polimer kompozitler gibi heterojen malzemelerin işlenmesi sırasında, kesme sıcaklığı ve ilişkili termal genleşme meydana gelmektedir. Sıcaklığa ek olarak, işleme sırasında takımların mekanik, adeziv, difüziv, termal ve kimyasal aşınması da kaçınılmaz şekilde ortaya çıkmaktadır. Kesme işleminin fiziksel unsurları, malzemenin deforme olabilen katmanlarında meydana gelen iç sürtünmeyi, talaşın kesici talaş yüzeyindeki dış sürtünmesini ve iş parçasının yan yüzeyindeki sürtünmeyi de içermektedir (Alarifi, 2023). İşleme süreçlerinde, sıcaklık, aşınma, sürtünme ve kuvvet olayları birbirine bağlıdır, birbirlerini etkiler ve yüksek hızlarda, dar

alanlarda ve zorlu koşullar altında meydana gelmektedir (Raj, Dhas, & Jesuthanam, 2021).

Kesme ile işleme süreci kompozitlerin yzey topografisini değiştirir ve bzylece işlenmiş yzeyde kusurlar oluşturur. Farklı ynelimlere sahip kompozit laminatlar üzerinde yapılan ortogonal kesme testlerinde, 90° ynelimdeki elyafın kesme kenarı ileri doğru hareket ederken bükylerek kırıldığı saptanmıştır. Aynı zamanda, elyafın kırılmamış kısmı eğilme momentine maruz kalmış ve yzeyde çatlaklar oluşmuştur. 0° ynündeki elyaflar bükylmüş ve bağımsız olarak talaş oluşturmuş ancak, işlenmiş yzeyde çatlak oluşturmamıştır. Bu nedenle, 0° ynündeki elyafların yzey kalitesi 90° ynündeki elyaflardan daha iyi olduğu bildirilmiştir (Koplev, Lystrup, & Vorm, 1983). Bu temelde, bir diğer çalışmada (Wang, Ramulu, & Arola, 1995), elyaf ynu 0°~180°'ye kadar aralıktta incelenmiş ve benzer ortogonal kesme deneyleri geręekleřtirilerek elyaf ynelimine dayalı ayrıntılı ortogonal kesme modeli oluşturulmuştur. Diğer bir çalışmada ise farklı elyaf ynelimlerine sahip kompozitlerin kesme kusurları ve morfolojileri sistematik olarak özetlenmiştir (El-Hofy, et al., 2011).

Kompozitlerin işleme kusurları (fiber çekilmesi, reçine kaplama, kenar kırılması, çapak, yırtılma, delaminasyon, vb.) arasında delaminasyon en ciddi kesme kusurudur. Bir çalışmada fiber kesme açıları delaminasyon kusurlarıyla ilişkilendirilmiştir (Hintze & Hartmann, 2013). Çalışmada, fiber hangi yönde olursa olsun, fiber kesme açısı 90°~180° aralığında olduğunda delaminasyon kusuru oluşmasının kolay olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir araştırmada, fiber bükylme kırılma modeli, kesme açısı

0°~90° aralığında olduğunda fiberin iş parçası düzlemine dik olarak büküleceğini, açı 90°~180° aralığında olduğunda ise bükülme kırığının oluşacağı saptanmıştır (He, Qing, Zhang, Wang, & Zhu, 2017). Bir başka çalışmada (Colligan & Ramulu, 1992), kompozit yüzeyin delaminasyon kusuru üst ve alt katmanlardaki destek eksikliğine bağlanmıştır.

Kompozit malzemenin anizotropisi ve heterojenliğinin işleme sırasında çeşitli kusurlara yol açmasına ek olarak, kesici takımın keskinliğinin kompozitlerin kesme delaminasyon kusurları üzerindeki etkisi de incelenmiştir (Azmi, Lin, & Bhattacharyya, 2013). Faraz ve arkadaşları (Faraz, Biermann, & Weinert, 2009), kesme kenarı yarıçapı modelini önermişler ve bunu kompozit işlemede kesme kuvveti ve işleme delaminasyonu ile ilişkilendirmişlerdir. Kenar yarıçapının, işleme kesme kuvvetini ve delaminasyon kusurlarını etkileyen ana faktör olduğu belirtilmiştir. Kompozit malzeme kanal frezeleme işleme sürecinin analiz edildiği bir çalışmada ise daha büyük kesme kenarı yarıçapına sahip bir kesici kullanmanın yüzey çapağını, delaminasyonu ve diğer kusurları önemli ölçüde artırdığı ifade edilmiştir (Hintze & Hartmann, 2013).

Soğutma sıvısı olmadan DLC (Elmas Benzeri Karbon) kaplamalı karbür uç frezelerin CFRP'nin kenar frezelemede kullanıldığı bir çalışmada ise işlem sonrası yüzey bütünlüğü; işlenmiş yüzeyin 3B profili, tüylenme oluşumu, delaminasyon ve karbon fiberin çekilmesi açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, elyaf yönelimine göre kesme kuvveti ve takım aşınması da incelenmiştir (Hosokawa, Hirose, Ueda, & Furumoto, 2014). Çalışmada daha yüksek helis açılı parmak freze takımı ile teğetsel ve normal kesme

kuvvetlerinin önemli ölçüde azaldığı ve bununla birlikte kompozit malzemenin en dış katmanında belirgin delaminasyon ve/veya çekilme olmadan pürüzsüz bir yüzey elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, yüksek helis açılı freze takımı ile eğimli frezelemede oluşan kesme kuvvetinin iş parçası yüzeyine paralel etki etmesi sayesinde takım aşınmasının azaldığı, daha az delaminasyon ve tüylenme ile yüzey bütünlüğünün iyileştiği belirtilmiştir.

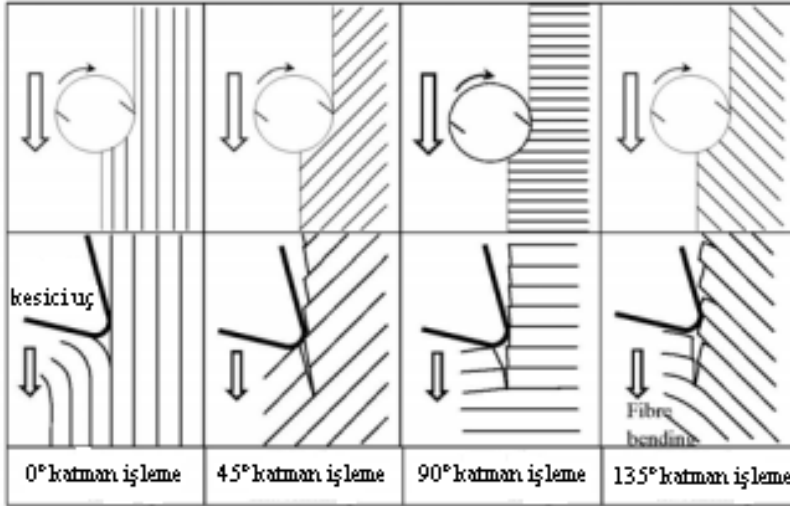
Diğer bir çalışmada, CFRP kompozit malzemenin çapak alma takımı ile yukarı frezeleme konfigürasyonunda frezelenmesi (kenar kesme işlemi) gerçekleştirilmiş ve işleme kalitesi, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon tipi ve derinliği açısından incelenmiştir (Sheikh-Ahmad, Urban, & Cheraghi, 2012). Çalışmada, kenar kesme işlemi sırasında CFRP kompozitlerin işleme kalitesi üzerinde mil hızı, ilerleme oranı ve takım durumunun etkisini belirlemek için deneysel bir araştırma yürütülmüştür. İşleme kalitesi, ortalama delaminasyon derinliği ve yüzey pürüzlülüğü açısından niceliksel olarak belirlenmiştir. Delaminasyonlar ayrıca, türleri ve meydana gelme sıklıklarına göre de karakterize edilmiştir. Ortalama delaminasyon derinliği ve yüzey pürüzlülüğünün, ilerleme oranındaki ve kesme mesafesindeki artışla arttığı, mil hızındaki artışla azaldığı bulunmuştur. Delaminasyon hasarı ve etkin talaş kalınlığı arasında güçlü bir ilişki olduğu belirtilmiştir. En iyi işleme kalitesi için kesme koşullarının küçük talaş kalınlığı, yüksek mil hızı ve düşük ilerleme oranında elde edildiği bildirilmiştir.

CFRP'nin kenar kesme işlemi sırasında kullanılan işleme parametrelerinin oluşan sıcaklığa etkisinin incelendiği bir çalışmada, takım geometrisi ve kesme koşullarının yüzey kusurları ve kırılma sırasında oluşan toz üzerindeki etkisi de araştırılmıştır (Haddad,

Zitoune, Eyma, & Castaine, 2014). Bu kusurların ağırlıklı olarak kesme koşulları ve takım geometrisi nedeniyle oluştuğu gözlemlenmiştir. Çapak alma takımı kullanıldığı durumda ortaya çıkan kusurların, ilerleme hızındaki artışla veya kesme hızındaki azalmayla arttığı gözlemlenmiştir. Kenar kesme sırasında oluşan tozun takım geometrisine, kesme koşullarına ve kesme hızı aralığına bağlı olduğu belirtilmiştir. Yüksek hızlı kenar kesme işlemi sırasında işlenmiş yüzeylere toz yapışması gözlemlendiği, bu durumun cam geçiş sıcaklığı civarındaki yüksek kesme sıcaklıklarına bağlanabileceği ifade edilmiştir.

CFRP kompozitin kenar kesme işleminde kesme sıcaklığının takım aşınmasına etkisini inceleyen bir çalışmada ise sıcaklık, takım aşınması ve takım kaplamasının yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmış kesme sıcaklığının reçinenin camsı geçiş sıcaklığının altında olduğunda reçine bozulması ve fiber çekme hasarının en aza indirildiği görülmüştür (Rangasamy, Vijayan, Tarun, Vijayagopal, & Kumar, 2014).

Diğer bir çalışmada, CFRP kompozitin kenar kesme işleminde elyaf yönünün işlenmiş yüzey kalitesine etkileri incelenmiştir (Chatelain, Zaghbani, & Joseph, 2012). Yapılan çalışmada, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin kesme hızından daha fazla olduğu ve yüksek kesme hızlarının yüzey kalitesini olumlu yönde etkilediği ifade edilmiştir.



Şekil 2: Farklı katman açılarında kenar kesme işlemi

Kaynak: (Chatelain, Zaghbani, & Joseph, 2012)

CFRP kompozitin geleneksel talaşlı imalat yöntemi ile işlenmesinde takım aşınması etkisi

Karbon fiberin dayanımının yüksek olması işleme sürecinde kullanılan takımlarda aşınmaya sebebiyet vermektedir. Bu başlıkta kesme hızı, kesme derinliği, elyaf yönlenmesi dâhil takım aşınmasına sebebiyet verebilecek unsurlar değerlendirilmiştir.

İşlenmiş parçada boyutsal doğruluk ve gerekli yüzey kalitesi elde edilemediğinde takım aşınması meydana gelmiş demektir. Bu durum, takım aşınmasının takım malzemesi seçiminde öncelikli bir kriter olduğunu göstermektedir. Takım aşınması, işleme sırasındaki kullanılan ilerleme ve kesme hızlarına ve dolayısıyla ortaya çıkan kesme kuvvetlerine ve kesme sıcaklığına bağlıdır (Seo, Kim, Park, Kang, & Park, 2024). Takımların aşınması, katmanların ayrılmasını

ve yanmasını kolaylaştırabilmekte, bu da takım kuvvetlerinin ve iş parçasında sıcaklık artışına sebep olabilmektedir.

CFRP kompozitin kenar işleminde karbür takımlarında ortaya çıkan aşınmanın aşındırıcı aşınma ile kesme kenarlarının yuvarlanmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Takım ömrünün ise kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı ile ters orantılı olduğu ifade edilmiştir (Devan, Almaskari, Sheikh-Ahmad, & Hafeez, 2022).

Khawarizmi ve arkadaşları CFRP kompozitin kenar işleme işlemi esnasında çeşitli karbon elyaf türlerinin takım aşınmasına etkisini araştırmışlardır (Khawarizmi, Bin Abdullah, Han, Kim, & Kwon, 2022). Kenar işlemeden kaynaklı takım aşınmasının elyafın çekme dayanımı ve elyafın mikro yapısına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Dört fiber yönünden en büyük takım aşınması 45 derecelik açıdan elde edilirken, en düşük takım aşınması 0 derecelik açıdan meydana gelmiştir. 90° fiber yönü ise kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sebebiyle en büyük aşınmaya neden olmuş ve böylece daha büyük kenar yuvarlama yarıçaplarına sebebiyet vermiştir.

CFRP kompozitin kenar işleminin gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada çok dişli tip parmak freze kesici takımlarının takım malzemesi, kaplama türü, takım geometrisi ve kesme şartlarının işlemeye etkisi incelenmiştir (López de Lacalle, Lamikiz, Campa, Valdivielso, & Etxeberria, 2009). TiAlN kaplı çok dişli parmak freze takımının en iyi takım ömrü gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, PCD takımların yüksek maliyetinden dolayı CFRP kompozitin ekonomik şekilde işlenmesinde uygun/verimli olmadığı bildirilmiştir.

GELENEKSEL OLMAYAN İŞLEME YÖNTEMLERİ

CFRP kompozitlerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi malzemenin aşındırıcı yapısı nedeniyle genellikle yüksek mekanik kuvvetler ve düşük takım ömrü ile sonuçlanır ve dolayısıyla düşük verimlidir; bu durum, iş parçası yüzey kalitesi, mekanik özellikler, boyut doğruluğu ve sonuç olarak işlevsel performans üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu nedenle geleneksel olmayan işleme yöntemleri geliştirilmiştir. CFRP kompozitlerin işleminde kullanılan geleneksel olmayan işleme yöntemleri, lazerle işleme (LBM), aşındırıcılı su jeti ile işleme (AWJM), ultrasonik işleme (USM) ve tel erozyon ile işleme (WEDM) olarak sıralanabilir.

Lazer ışını ile işleme

Lazer ışını ile işleme (LBM), kenar düzeltme(kesme) işlemlerinde geleneksel olmayan işleme yöntemleri arasında birincil olarak tercih edilen yöntemlerdendir. Geleneksel yöntemlerden en önemli farkı kesici ile malzeme temasının olmamasıdır (Seo, Kim, Park, Kang, & Park, 2024). Dolayısıyla LBM gibi temassız işleme, kesme kuvvetinden ve takım aşınmasından kaçınma avantajına sahiptir; bunların her ikisi de sıklıkla yüzey hatalarına ve takım değiştirmeye ilgili yüksek maliyetlere yol açmaktadır (Dubey & Yadava, 2008). Ancak, LBM, termal işlemin ve talaş kaldırma mekanizmalarının karmaşıklığı nedeniyle kusurlar oluşturabilmektedir. LBM için başlıca kusur faktörleri arasında kerf (kesik) derinliği, genişliği ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) sayılabilir (Seo, Kim, Park, Kang, & Park, 2024). LBM işlem parametreleri, lazer kaynağını, güç yoğunluğunu ve dalga boyunu

kapsayan lazer ışınının türünü içerir. Bunun yanı sıra diğer parametreler ise geçiş hızı ve malzeme özellikleridir.

CFRP kompozitin kenar kesme işleminde Yb:YAG fiber lazer kullanılan bir çalışmada (Leone, Papa, Tagliaferri, & Lopresto, 2013), hangi işlem parametrelerinin lazer ışını-malzeme etkileşimini nasıl etkilediğinin tespiti ve işlem parametrelerinin talaş kaldırma mekanizmaları ve HAZ oluşumu üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Malzeme uzaklaştırmanın ablasyon (keserek çıkarma), yakma ve mekanik etki gibi mekanizmaları kapsadığı belirtilmiştir. Genel olarak, ablasyonla çıkarılan malzeme miktarının serbest bırakılan enerjiyle ilgili olduğu saptanmıştır. Düşük frekans (yani yüksek darbe gücünün) kullanımının yüksek malzeme ablasyon miktarı için uygun bir seçim olabileceği ifade edilmiştir.

CFRP ve GFRP kompozitlerinin CO2 lazerle kesilmesi üzerine yapılan bir çalışmada, malzeme uzaklaştırma hızı (MRR), giriş/çıkış kesik (kerf) genişliği (kerf açısı) ve yüzey pürüzlülüğü gibi temel çıktılar üzerindeki işlem değişkenlerinin etkisi araştırılmıştır (Shyha, 2013). Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, yüzey kalitesini ve hacimsel malzeme çıkarma hızını etkileyen ana faktörün kesme hızı olduğu belirtilmiştir.

Rahman ve diğerleri, CFRP kompozitin lazer ile kesimi işleminde HAZ ve kerf genişliği için odak uzaklığının önemini araştırdıkları çalışmalarında, bir Nd:YAG lazeri kullanıldığında 0,2 mm'lik bir odak noktası mesafesinin en uygun olduğunu ortaya koymuşlardır (Rahman, Saidin, Rahim, & Mohid, 2013).

Leone ve diğerleri, CFRP kompozit malzemeleri kesmek için fiber lazerle çoklu geçişli taramalar gerçekleştirdikleri

araştırmalarında, düşük güçlü, 30 W MOPA Q-anahtarlı darbeli Yb:YAG fiber lazer kullanarak işlem parametrelerini optimize etmeyi amaçlamışlardır (Leone, Genna, & Tagliaferri, 2014). Çalışmanın uygulanabilirliğinin yüzey kalitesiyle ilişkinin incelenmesine izin veren ince iş parçalarında küçük bir ışın noktası boyutu kullanılarak sağlandığı belirtilmiştir.

Onuseit ve diğerleri CFRP kompozitin kesimi işlemi için çeşitli lazer kaynaklarının işleme yeteneklerini karşılaştırmışlardır (Onuseit, et al., 2015). Değerlendirilen kaynaklar arasında 6 kW'a kadar yüksek ortalama güce sahip sürekli dalga lazerler ve 30 W ila 1 kW ortalama güç aralığına sahip pikosaniye lazerler yer almaktadır. Bu karşılaştırma, geniş bir uygulama yelpazesini göz önünde bulundurarak üretkenlik ve kalite gibi yönlere odaklanmıştır. Lazerle işlenmiş CFRP parçalarının kalitesini düşüren ana sorunun, malzemeye ısı iletimi sonucu oluşan ısıdan etkilenen bölge olduğu ve bu HAZ'in CFRP bileşenlerinin mekanik mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak, sürekli dalga lazerlerle 10m/dk'dan daha yüksek hızlarda CFRP'nin yüksek hızlı lazer kesimi, özellikle çekme dayanımı testlerindeki etkisi oldukça düşük olduğundan, belirli miktarda termal hasarın kabul edilebilir olduğu durumlarda, konvansiyonel kesme teknolojilerine bir alternatif olabileceği ifade edilmiştir.

Bluemel ve diğerleri, fiber kılavuzlu 1,5 kW güç seviyesine sahip nanosaniye düzeyinde, çok kısa darbeli bir lazer kullanarak kumaş ve çift eksen yönelimli CFRP malzemelerin kesme işlemini gerçekleştirmişlerdir (Bluemel, et al., 2015). İşlem sonunda elde edilen ortalama HAZ genişliği değerinin 40 μ m'un altında olduğu ve

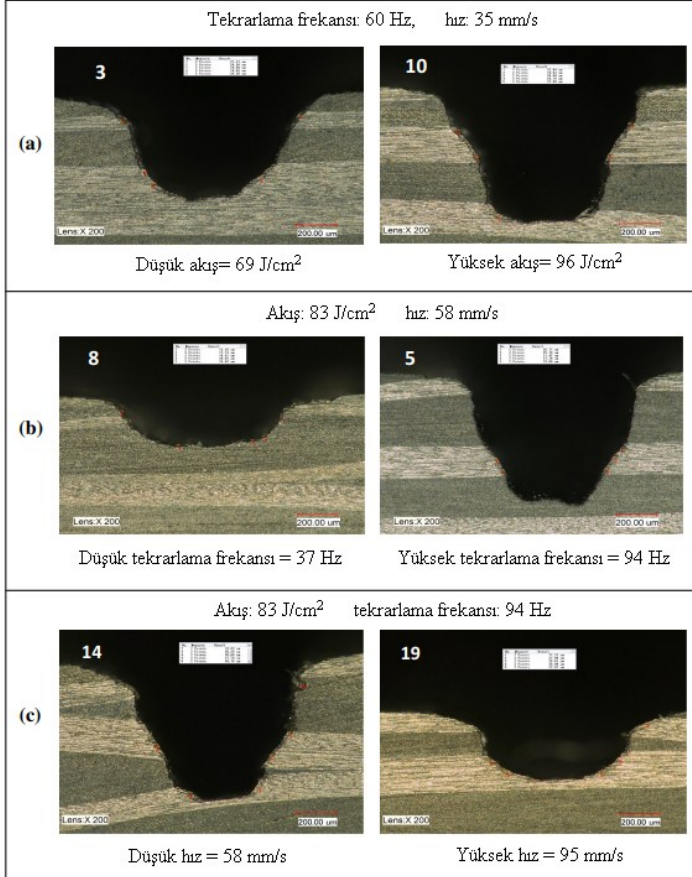
iyi bir yüzey kalitesi gösterdiği, ayrıca kesme hızının 1,8 m/dak gibi oldukça yüksek bir değere ulaştığı kaydedilmiştir.

Herzog ve diğerleri, 6 mm den daha kalın CFRP kompozit kesiminde yeni bir yaklaşım üzerine bir çalışma yapmışlardır (Herzog, et al., 2016). Çalışma kapsamında uzaktan kesme yaklaşımına dayalı olarak, yüksek işlem hızları oluşturmak ve ısıdan etkilenen bölgeleri yaklaşık 200 µm'ye düşürmek için deneyler yapılmıştır. Lazer kesiminin odak noktasının boyutunda kesim genişliğini koruyarak yaklaşık 6 mm kalınlıklara sahip CFRP kompozit kesimi yapılabileceği görülmüştür. Daha kalın laminatların kesilmesi gerektiğinde, kesimi genişletmek ve lazer odağının kesim kerfini takip etmesini sağlamak için paralel geçişler kullanılabileceği ve böylece, 13 mm'ye kadar kalınlığa sahip CFRP kesiminin yapılabildiği ifade edilmiştir.

CFRP kompozitin kısa darbeli lazer ile frezeleme işlemine dair yapılan bir çalışmada, nanosaniye düzeyindeki kısa darbeli lazerlerin hızlı ve tekrarlanan ısıtma ve soğutma dizisi gibi özelliklerinin, malzeme üzerinde minimum termal etkiye sahip olduğu ve üstün mekanik kesme kabiliyeti gösterdiği belirtilmiştir (Hebing & Jun, 2017).

Salama ve diğerleri, CFRP kompozitin işlenmesinde kısa darbeli (8 µs) enine uyarılmış atmosferik basınçlı CO2 lazerinin kullanımına yönelik bir çalışma yapmışlardır (Salama, Li, Mativenga, & Whitehead, 2016). Kenar kesme (kırpma) işleminin kapsamlı bir incelemesini sunulduğu çalışmada, mikro saniye düzeyinde kısa darbeli ve CO2 lazerleri kullanan işleme süreçleri araştırılmıştır. Kesme yüzeyi kalitesinin değerlendirilmesi, lazer

akışı [J/cm^2], tekrarlama oranı [Hz] ve kesme hızı [mm/s] dâhil olmak üzere önemli lazer parametrelerine ve 250 kW'lık bir lazer çıkışı gücüne göre yapılmıştır.



Şekil 3: CO₂ lazer kesme işlemi sonrası işlem parametrelerinin enine kesit HAZ üzerindeki etkisi; a) akıcılık etkisi, b) tekrarlama oranı etkisi, c) hız etkisi. Her bir görüntü üzerindeki sayı, geçiş sayısını göstermektedir.

Kaynak: (Salama, Li, Mativenga, & Whitehead, 2016)

Diğer geleneksel olmayan yöntemler ile kesme

Metalik ve kompozit malzeme kesme işlemine uygulanan alışılmadık işlemler arasında aşındırıcılı su jeti ile işleme (AWJM), ultrasonik işleme (USM) ve elektro erozyon ile işleme (EDM) bulunmaktadır. Her işlemin, geleneksel işleme işlemlerine göre kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Genel metalik malzemelere ve kesilmesi zor malzemelere alışılmadık işleme işlemlerinin uygulanmasıyla ilgili birçok çalışma yürütülmüştür. Ancak, az sayıda çalışma CFRP kesme işlemine odaklanmıştır (Seo, Kim, Park, Kang, & Park, 2024).

Tel erozyon (WEDM), iletken tellerle kıvılcım deşarjları kullanılarak çeşitli malzemelere uygulanan bir EDM işlemidir. WEDM, sertliği veya mukavemeti ne olursa olsun malzemeyi kesebilmektedir. Ancak işlenmiş yüzeydeki düşük MRR ve HAZ nedeniyle sınırlamaları vardır.

Abdallah ve diğerleri, kesme koşullarına dayalı olarak bir plakanın üst ve alt yüzeylerinin MRR ve kerf genişliğini araştıran bir dizi deneysel çalışma yürütmüşlerdir (Abdallah, Soo, & Hood, 2018). Çalışma sonunda 5 A'lık bir ateşleme akımı, 1 ms'lik bir darbe süresi, 120 V'luk bir açık aralık voltajı ve 4 ms'lik bir darbe kapalı süresiyle 2,41 mm³/dakikalık bir MRR elde edildiği belirtilmiştir.

Dutta ve diğerleri, WEDM ile CFRP işlemeye yönelik, kıvılcım başlatmada yardımcı elektrotlar olarak metalik plakaların kullanımını içeren bir yöntem önermişlerdir (Dutta, Debnath, & Sarma, 2021). Testler, darbe açık süresi, darbe kapalı süresi ve giriş akımı gibi işleme parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Akımdaki artışla kesme süresinde azalan bir eğilim gözlenmiştir.

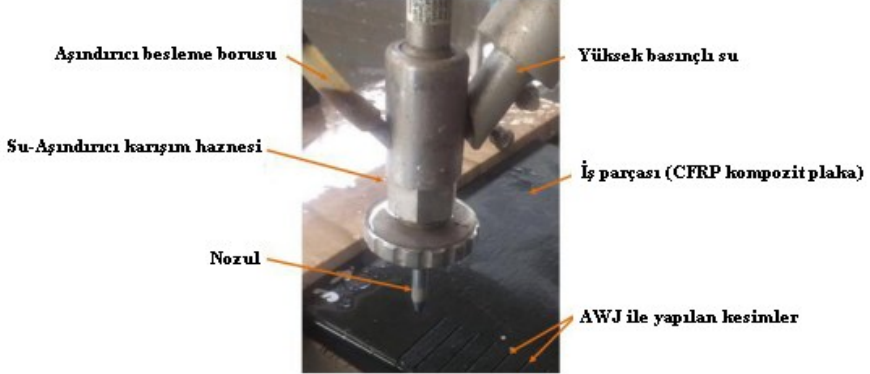
Ayrıca kesme süresinin başlangıçta darbe açık süresiyle (10 ila 30 μ s) arttığı ve daha sonra darbe açık süresindeki daha fazla artışla (40 ila 60 μ s) azalmaya başladığı ifade edilmiştir. Kesme süresinin, 90 V voltaj seviyesinde 70 V'dakine göre önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Sandviç yardımcı elektrot kullanılarak CFRP'nin WEDM' ile kesilmesini içeren bu çalışmada, işlenmiş yüzey morfolojisinin mikroskobik analizi de kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Araştırma sonucunda kesilmiş yüzeyde, karbon liflerinin kırılması, lif-matris ayrılması ve matris çatlaması gibi hasarlar gözlemlenmiştir.

Ablyaz ve diğerleri ayrıca, işleme parametreleri olarak voltaj, darbe açık süresi ve darbe kapalı süresi ile yardımcı elektrot olarak titanyum plakalar kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirdiler (Ablyaz, Shlykov, Muratov, & Sidhu, 2021). Sonuçlar, voltaj ve darbe süresinin PCM'nin kesme genişliği doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Abdallah ve diğerleri, işleme parametreleri olarak ateşleme akımı ve darbe-kapalı süresini seçerek iki farklı tel elektrotun kullanımını içeren deneysel bir çalışma yapmışlardır (Abdallah, Hood, & Soo, 2022). Topas teli kullanarak en yüksek MRR'yi 14,82 mm³/dak olarak elde etmişlerdir. Çalışma, ateşleme akımının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

AWJM, hem endüstriyel hem de araştırma ortamlarında polimer kompozit kesimi için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Thakur & Singh, 2020; Zhu, Sun, Lu, & Ko, 2023; Wang, et al., 2023). Su jeti işleme (WJM) ve aşındırıcılı su jeti ile işleme (AWJM), LBM ve EDM'nin sonuçlarına benzer termal hasara neden olmayan etkili işlemlerdir. Su jeti işleme, malzemeleri kesmek için

yüksek hızlı su jeti kullanmaktadır. İdeal olarak, AWJM aşındırıcı parçacıkların ivmelenmesiyle ilgili termal hasara veya bozulmaya neden olmadan herhangi bir malzemeyi kesebilmektedir.



Şekil 4: AWJ ile kesme düzeni

Kaynak: (El-Hofy, et al., 2018)

AWJM işlem parametreleri olarak hidrolik faktörler (örneğin, su jeti basıncı ve akış hızı), aşındırıcı parametreler (örneğin, parçacık boyutu, şekli ve malzeme) ve kesme parametreleri (örneğin, hareket hızı, durma mesafesi ve eğim açısı) sayılabilir. Kesme işlemi sonrası çıktı sonuçları arasında kerf geometrisi, yüzey bütünlüğü, delaminasyon, kesme derinliği ve MRR bulunmaktadır.

El-Hofy ve diğerleri, işleme parametrelerinin işlenmiş çok boyutlu CFRP kompozit laminatların yüzey bütünlüğünü nasıl etkilediğini araştırmışlardır (El-Hofy, et al., 2018). İnceledikleri başlıca işleme parametreleri arasında, kerf konikliği ve yüzey topografisiyle ilişkili olarak çalışma basıncı (MPa), ilerleme hızı (mm/dak) ve ara mesafesi (mm) yer almaktadır. Çalışmadan elde edilen bulgular ise şu şekilde özetlenmiştir: Kesimin üst ve alt

kısımındaki kerf genişliği artan basınç ve ara mesafe ile artarken, artan ilerleme hızı ile azalmıştır. Daha küçük kerf konikliği için yüksek basınç, küçük ara mesafe ve yüksek ilerleme hızı kullanılmalıdır. Daha iyi yüzey kalitesi için yüksek çalışma basıncı, düşük ilerleme hızı ve küçük ara mesafe önerilmiştir. CFRP'nin AWJM yöntemi ile kesilmesinin, frezeleme yöntemine kıyasla daha ucuz bir seçenek olabileceği sonucuna varılmıştır.

Ming ve diğerleri, AWJM ile CFRP/GFRP hibrit kompozitin kesim işlemi sonrası SEM görüntüleri kullanarak ayrıntılı yüzey bütünlüğünün deneysel analizlerini gerçekleştirmişlerdir (Ming, Azmi, & Mansor, 2018). Çalışmada çeşitli işleme parametrelerini karşılaştırarak, hibrit karbon/cam elyaf takviyeli kompozitlerin üst, orta ve alt katmanları için yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmişlerdir. Aşındırıcı akış hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu, bunu mesafe, geçiş hızı ve hidrolik basıncın takip ettiği bildirilmiştir. Aşındırıcı akış hızı = 600 g/dak, hidrolik basınç = 3200 Bar, mesafe = 2 mm ve geçiş hızı = 1000 mm/dak değerlerinin minimum yüzey pürüzlülüğünü (Ra) veren optimum AWJ işlem parametreleri olduğu tespit edilmiştir.

Yang ve diğerleri hidrolik basınç, kesme hızı ve mesafe gibi çeşitli işlem parametrelerinin yüzey bütünlüğü ve kerf özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde inceleyen deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir (Yang, Lin, Li, & Jiang, 2020). Yapılan istatistiksel analiz, daha yüksek kesme hızının kerf genişliğinin azalmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına yol açtığını ortaya koymuştur. Ayrıca, CFRP laminatı kesmede hem yüksek verimlilik hem de üstün yüzey kalitesi elde etmek için AWJ ve CNC frezeleme süreçlerini entegre eden bir hibrit işleme stratejisi önerilmiştir.

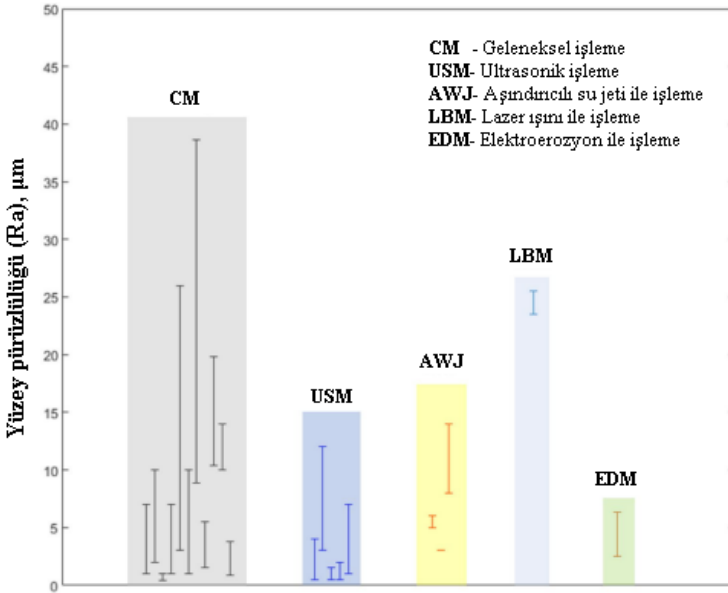
Ultrasonik destekli işleme (UAM), geleneksel kesme tekniklerinin performansını artırmak için tasarlanmış yenilikçi bir işlemdir (Maeng, Ito, Kakinuma, & Min, 2023). Bu yöntemle işlemede ultrasonik frekanslarda titreşen ve mikro talaş ve aşınmaya neden olan bir kesme aleti kullanılmaktadır (Singh & Singhal, 2016). UAM ile ilgili araştırmaların çoğu delme işlemine odaklansa da, birkaç çalışma bunu CFRP kompozit laminatların frezeleme ve kesme işlemlerinde de kullanmıştır.

Huda ve diğerleri, CFRP kompozit plakalara geleneksel işleme (CM) ve UAM yöntemleri ile kesme deneyleri yapmışlardır (Huda, Ascroft, & Barnes, 2016). Takım ömrü ve iş parçası kalitesi açısından UAM ile CM'yi karşılaştıran deneysel çalışmalar yapılmıştır. İşleme uzunluğuna göre alet çapı değişimini, pürüzlülüğü ve kesme kuvvetini ölçmüşlerdir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, CFRP işlemede UAM yöntemi kullanılmasının CM yöntemine kıyasla takım ömrünü artırdığı, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği ve işleme kuvvetlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Wang ve diğerleri, geleneksel işleme süreçlerindeki sorunları azaltmak için döner ultrasonik işleme (RUM) ile CFRP kompozitlerin kenar düzeltmesi işlemini önermişler ve bir takım deneyler gerçekleştirmişlerdir (Wang, Hu, Li, Wang, & Cong, 2018). RUM kenar düzeltme süreçlerinde, iki farklı takım yönü (takım uç yüzüyle RUM kenar düzeltme ve takım yan yüzüyle RUM kenar düzeltme) gerçekleştirilebileceği ifade edilmiştir. Bu iki farklı RUM kenar düzeltme süreci arasındaki işleme performansı ve işlenmiş yüzey kalitesi karşılaştırmaları yapılmıştır. Takım uç yüzü kullanılarak RUM'da daha küçük ultrasonik titreşim genliği veya

takım yan yüzü kullanılarak RUM'da daha büyük ultrasonik titreşim genliği daha küçük yüzey pürüzlülüğü üretmiştir. Takım yan yüzü kullanılarak yapılan işlemden daha düşük ilerleme yönlü kesme kuvveti, daha düşük normal kesme kuvveti ve daha düşük son kuvvet üretildiği tespit edilmiştir. Takım uç yüzü kullanılarak yapılan RUM işleminde, işlenmiş CFRP yüzeylerde daha küçük yüzey pürüzlülüğü, daha küçük döküntü genişliği, mikro çatlaklar, akan matris vb. ürettiği saptanmıştır.

CFRP kompozitlerin kenar kesme işlemlerinde elde edilen yüzey kalitesi bakımından karşılaştırmalı bir gösterim Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5: CFRP kompozitin kenar kesme işleminde yüzey kalitesinin işleme yöntemine göre değişimi

Kaynak: (Seo, Kim, Park, Kang, & Park, 2024)

Sonuç ve Öneriler

Bu bölümde CFRP kompozitlerin geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemlerle işlenmesine yönelik literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular incelenmiştir.

Geleneksel işleme yöntemlerinden;

- Delme yönteminde işleme sonrası karşılaşılan işleme kusurları arasında delaminasyon en önemli ve yaygın olanıdır. Matkap uç açısının kompozitlerin delinmesinde ortaya çıkan delaminasyon hasarında en önemli etkiye sahip parametre olduğu ve ardından ilerleme hızının geldiği bildirilmiştir.
- Kenar kesme ve frezeleme işlemlerinde, işleme süreci sırasında delaminasyon, çapak oluşumu ve yırtılma gibi üretim kusurları meydana gelebilmektedir. Sayılan bu kusurlar; kesici takım ve iş parçası malzemelerinin türü, kesici takım geometrisi ve değişken işleme parametreleri dâhil olmak üzere çeşitli faktörler nedeniyle oluşmaktadır. İşleme ve etkileri, kesme kuvveti, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü gibi işlenebilirlik göstergeleri ile karakterize edilmektedir. En iyi işleme kalitesi için kesme koşullarının küçük talaş kalınlığı, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme oranında elde edildiği bildirilmiştir.

Geleneksel olmayan işleme yöntemlerinden;

- Lazer ile işlemede (LBM) temassız işleme ve dolayısıyla takım aşınması gibi olumsuzluklar ortadan

kalkmaktadır. Ancak, LBM işleminin bazı sınırlayıcı yönleri mevcuttur. LBM için başlıca kusur faktörleri arasında kerf (kesik) derinliği, genişliği ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) sayılabilir. LBM işlem parametreleri, lazer kaynağını, güç yoğunluğunu ve dalga boyunu kapsayan lazer ışınının türünü içerir. Bunun yanı sıra diğer parametreler ise geçiş hızı ve malzeme özellikleridir. Malzeme uzaklaştırmanın ablyasyon (keserek çıkarma), yakma ve mekanik etki gibi mekanizmaları kapsadığı belirtilmiştir. Genel olarak, ablyasyonla çıkarılan malzeme miktarının serbest bırakılan enerjiyle ilgili olduğu saptanmıştır. Düşük frekans (yani yüksek darbe gücünün) kullanımının yüksek malzeme ablyasyon miktarı için uygun bir seçim olabileceği ifade edilmiştir. CFRP kompozitin kısa darbeleri lazer ile frezeleme işleminde nanosaniye düzeyindeki kısa darbeleri lazerlerin malzeme üzerinde minimum termal etkiye sahip olduğu ve üstün mekanik kesme kabiliyeti gösterdiği belirtilmiştir.

- Tel erozyon (WEDM) ile işleminin işlenmiş yüzeydeki düşük malzeme uzaklaştırma oranı (MRR) ve HAZ nedeniyle sınırlamaları vardır. CFRP kompozitin WEDM ile işlenmesi sonucu kesilmiş yüzeyde, karbon liflerinin kırılması, lif-matris ayrılması ve matris çatlaması gibi hasarlar gözlemlenmiştir. WEDM de uygulanan voltaj ve darbe

süresi kesme genişliğini, ateşleme akımı ise yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir.

- Aşındırıcılı su jeti ile işleme (AWJM), LBM ve EDM'nin sonuçlarına benzer termal hasara neden olmamaktadır. AWJM işlem parametreleri olarak hidrolik faktörler (örneğin, su jeti basıncı ve akış hızı), aşındırıcı parametreler (örneğin, parçacık boyutu, şekli ve malzeme) ve kesme parametreleri (örneğin, hareket hızı, durma mesafesi ve eğim açısı) sayılabilir. Kesme işlemi sonrası çıktı sonuçları arasında kerf geometrisi, yüzey bütünlüğü, delaminasyon, kesme derinliği ve MRR bulunmaktadır. AWJM işlemi sonunda kesik (kerf) genişliği artan basınç ve ara mesafe ile artarken, artan ilerleme hızı ile azalmaktadır. Daha küçük kerf konikliği için yüksek basınç, küçük ara mesafe ve yüksek ilerleme hızı kullanılmalıdır. Daha iyi yüzey kalitesi için yüksek çalışma basıncı, düşük ilerleme hızı ve küçük ara mesafe önerilmiştir. CFRP'nin AWJM yöntemi ile kesilmesinin, frezeleme yöntemine kıyasla daha ucuz bir seçenek olabileceği bildirilmiştir. Aşındırıcı akış hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir, bunu mesafe, geçiş hızı ve hidrolik basınç takip etmektedir.
- CFRP işlemede ultrasonik destekli işleme (UAM) yöntemi kullanılmasının geleneksel işleme (CM) yöntemine kıyasla takım ömrünü artırdığı, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği ve işleme kuvvetlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Kaynakça

Abdallah, R., Hood, R., & Soo, S. (2022). The Machinability Characteristics of Multidirectional CFRP Composites Using High-Performance Wire EDM Electrodes. *Journal of Composites Science*, 6(6), 159.

Abdallah, R., Soo, S., & Hood, R. (2018). A feasibility study on wire electrical discharge machining of carbon fibre reinforced plastic composites . *Procedia CIRP*, 77, 195–198.

Abyaz, T., Shlykov, E., Muratov, K., & Sidhu, S. (2021). Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials. *Micromachines*, 12, 571.

Alarifi, I. (2023). A review on factors affecting machinability and properties of fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2154304.

Azmi, A., Lin, R., & Bhattacharyya, D. (2013). Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 247-261.

Bluemel, S., Angrick, V., Bastick, S., Jaeschke, P., Suttman, O., & Overmeyer, L. (2015). Remote laser cutting of composites with a fiber-guided thin-disk nanosecond high power laser. *Lasers in Manufacturing Conference 2015* (s. 1-9). München: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V.

Cadorin, N., & Zitoune, R. (2015). Wear signature on hole defects as a function of cutting tool material for drilling 3D interlock composite. *Wear*, 332-333, 742-751.

Chatelain, J.-F., Zaghbani, I., & Joseph, M. (2012). Effect of Ply Orientation on Roughness for the Trimming Process of CFRP Laminates. *World Academy of Science, Engineering & Technology*, 6(8), 988-994.

Colligan, K., & Ramulu, M. (1992). The effect of edge trimming on composite surface plies. *Manufacturing Review*, 5(4), 274-283.

Davim, J., & Reis, P. (2003). Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave - experimental and statistical study. *Materials and Design*, 24, 315-324.

Davim, J., & Rubio, J. A. (2007). A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*, 67(9), 1939-1945.

Devan, D., Almaskari, F., Sheikh-Ahmad, J., & Hafeez, F. (2022). A study on tool wear of tungsten carbide cutters in edge trimming of CFRP. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36, 2499-2510.

Dubey, A., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6), 609-628.

Dutta, H., Debnath, K., & Sarma, D. (2021). Investigation on cutting of thin carbon fiber-reinforced polymer composite plate using sandwich electrode-assisted wire electrical-discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*,

Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235(5), 1628-1638.

El-Hofy, M., Helmy, M., Escobar-Palafox, G., Kerrigan, K., Scaife, R., & El-Hofy, H. (2018). Abrasive Water Jet Machining of Multidirectional CFRP Laminates. *Procedia CIRP*, 68, 535-540.

El-Hofy, M., Soo, S., Aspinwall, D., Sim, W., Pearson, D., & Harden, P. (2011). Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. *Procedia Engineering*, 19, 94-99.

Faraz, A., Biermann, D., & Weinert, K. (2009). Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(15), 1185-1196.

Feito, N., Milani, A., & Muñoz-Sánchez, A. (2016). Drilling optimization of woven CFRP laminates under different tool wear conditions: a multi-objective design of experiments approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53, 239-251.

Fu, Y., & Yao, X. (2022). A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites. *Composites C*, 8, 100276.

Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., & Castaine, B. (2014). Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 66, 142-154.

He, Y., Qing, H., Zhang, S., Wang, D., & Zhu, S. (2017). The cutting force and defect analysis in milling of carbon fiber-

reinforced polymer (CFRP) composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 1829-1842.

Hebing, X., & Jun, H. (2017). Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing. *Applied Mathematical Modelling*, 46, 354-364.

Herzog, D., Schmidt-Lehr, M., Canisius, M., Oberlander, M., Tasche, J.-P., & Emmelman, C. (2015). Laser cutting of carbon fiber reinforced plastic using a 30 kW fiber laser. *Journal of Laser Applications*, S28001-7.

Herzog, D., Schmidt-Lehr, M., Oberlander, M., Canisius, M., Radek, M., & Emmelmann, C. (2016). Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness. *Materials and Design*, 92, 742-749.

Hintze, W., & Hartmann, D. (2013). Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP. *Procedia CIRP*, 8, 444-449.

Hintze, W., Hartmann, D., & Schütte, C. (2011). Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. *Composites Science and Technology*, 71(15), 1719-1726.

Hocheng, H., & Tsao, C. (2005). The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3), 251-264.

Hosokawa, A., Hirose, N., Ueda, T., & Furumoto, T. (2014). High-quality machining of CFRP with high helix end mill. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, 89-92.

Huda, A., Ascroft, H., & Barnes, S. (2016). Machinability Study of Ultrasonic Assisted Machining (UAM) of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP) with Multifaceted Tool. *Procedia CIRP*, 46, 488-491.

Ismail, S., Ojo, S., & Dhakal, H. (2017). Thermo-mechanical modelling of FRP cross-ply composite laminates drilling: Delamination damage analysis. *Composites Part B: Engineering*, 108, 45-52.

Jia, Z., Chen, C., Wang, F., & Zhang, C. (2020). Analytical study of delamination damage and delamination-free drilling method of CFRP composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 282, 116665.

Kecik, K., & Ciecieląg, K. (2025). The effect of cutting parameters on defect detection based on recurrence analysis of cutting force signals obtained from GFRP composite milling. *Measurement*, 239, 115406.

Khatkar, V., Behera, B., & Manjunath, R. (2020). Textile structural composites for automotive leaf spring application. *Composites Part B*, 182, 107662.

Khawarizmi, R., Abdullah, M., Han, Y., Kim, D., & Kwon, P. (2012). Effect of ply orientation on roughness for the trimming process of CFRP laminates. *World Academy of Science, Engineering & Technology*, 6(8), 988-994.

Khawarizmi, R., Bin Abdullah, M., Han, Y., Kim, D., & Kwon, P. (2022). The Effect of Carbon Fiber Types on Tool Wear During Edge Trimming of 0 deg, 45 deg, 90 deg, and 135 deg Carbon

Fiber-Reinforced Plastic Laminates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 144(6), 061005.

Koplev, A., Lystrup, A., & Vorm, T. (1983). The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites*, 14(4), 371-376.

Krishnamoorthy, A., Mercy, J., Vineeth, K., & Salugu, M. (2015). Delamination Analysis of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composite plates by Thermo graphic technique. *Materials Today: Proceedings*, 2, 3132-3139.

Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Kumar, M., Zitoune, R., & Davim, J. (2012). Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. *Composites: Part B*, 1791-1799.

Leone, C., Genna, S., & Tagliaferri, V. (2014). Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 53, 43-50.

Leone, C., Papa, I., Tagliaferri, F., & Lopresto, V. (2013). Investigation of CFRP laser milling using a 30 W Q-switched Yb:YAG fiber laser: Effect of process parameters on removal mechanisms and HAZ formation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 55, 129-142.

Liu, D., Tang, Y., & Cong, W. (2012). A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite Structures*, 94(4), 1265-1279.

López de Lacalle, N., Lamikiz, A., Campa, F., Valdivielso, A., & Etxeberria, I. (2009). Design and Test of a Multitooth Tool for CFRP Milling. *Journal of Composite Materials*, 43(26), 3275-3290.

Maeng, S., Ito, H., Kakinuma, Y., & Min, S. (2023). Study on Cutting Force and Tool Wear in Machining of Die Materials with Textured PCD Tools Under Ultrasonic Elliptical Vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10, 35-44.

Mahdi, A., Makhfi, S., Habak, M., Turki, Y., & Bouaziz, Z. (2023). Analysis and optimization of machining parameters in drilling woven carbon fiber reinforced polymer CFRP. *Materials Today Communications*, 35, 105885.

Mathew, J., N., R., & Naik, N. (1999). Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 1-11.

Ming, I., Azmi, A. C., & Mansor, A. (2018). Experimental study and empirical analyses of abrasive waterjet machining for hybrid carbon/glass fiber-reinforced composites for improved surface quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 3809-3822.

Mouralova, K. M., Benes, L., Zahradnicek, R., Bednar, J., Zadera, A., Fries, J., & Kana, V. (2020). WEDM used for machining high entropy alloys. *Materials*, 13(21), 4823.

Onuseit, V., Prieß, T., Wiedenmann, M., Freitag, C., Faisst, B., Giedl-Wagner, R., . . . Graf, T. (2015). Productive Laser Processing

of CFRP. *Lasers in Manufacturing Conference* (s. 1-9). München: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik.

Rahman, N., Saidin, W., Rahim, E., & Mohid, Z. (2013). The effect of laser focal point distance on carbon fiber reinforced plastics (CFRP) cutting performance. *Applied Mechanics and Materials*, 315, 778-782.

Rahme, P., Moussa, P., Lachaud, F., & Landon, Y. (2020). Effect of adding a woven glass ply at the exit of the hole of CFRP laminates on delamination during drilling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 129, 105731.

Raj, S., Dhas, J., & Jesuthanam, C. (2021). Challenges on machining characteristics of natural fiber-reinforced composites – a review. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 40(1-2), 41-69.

Rangasamy, P., Vijayan, K., Tarun, G., Vijayagopal, M., & Kumar, G. (2014). Experimental Study on Temperature Effect and Tool Wear on Edge Trimming of Carbon Fiber Reinforced Plastics. *Applied Mechanics and Materials*, 592-594, 333-338.

Salama, A., Li, L., Mativenga, P., & Whitehead, D. (2016). TEA CO2 laser machining of CFRP composite. *Applied Physics A*, 122, 497.

Seo, J., Kim, D., Park, H., Kang, Y., & Park, H. (2024). Advancements and Challenges in the Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Trimming Process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 11, 1341-1360.

Sheikh-Ahmad, J., & Shinde, S. (2016). Machinability of carbon/epoxy composites by electrical discharge machining. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 18(1), 3-17.

Sheikh-Ahmad, J., Urban, N., & Cheraghi, H. (2012). Machining Damage in Edge Trimming of CFRP. *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 802–808.

Shyha, I. (2013). An Investigation into CO2 Laser Trimming of CFRP and GFRP Composites. *Procedia Engineering*, 63, 931-937.

Singh, R., & Singhal, S. (2016). Rotary ultrasonic machining: A review. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(14), 1795-1824.

Song, Y., Wang, S., Pan, Y., Li, Z., & Yu, L. (2024). Current research status of laser cleaning of carbon fiber reinforced polymers. *Materials Today Communications*, 39, 109312.

Thakur, R., & Singh, K. (2020). Abrasive waterjet machining of fiber-reinforced composites: A state-of-the-art review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 1-25.

Wang, D. L. (2018). Extrusion–calendering process of single-polymer composites based on polyethylene. *Polymer Engineering and Science*, 2156-2165.

Wang, D., Ramulu, M., & Arola, D. (1995). Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I:

unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(12), 1623-1638.

Wang, H., Hu, Y., Li, Y., Wang, X., & Cong, W. (2018). Edge trimming of carbon fiber-reinforced plastic composites using rotary ultrasonic machining: effects of tool orientations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 1641-1653.

Wang, Z., Yang, Y., Zhang, Z., Pang, M., Liang, M., Ma, L., & Su, J. (2023). A Novel Technique for Dressing Fixed Abrasive Lapping Pad with Abrasive Water Jet. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10, 1351-1373.

Xu, J., Li, C., Mi, S., An, Q., & Chen, M. (2018). Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria. *Composite Structures*, 201, 1076-1087.

Yang, X., Lin, X., Li, M., & Jiang, X. (2020). Experimental Study on Surface Integrity and Kerf Characteristics During Abrasive Waterjet and Hybrid Machining of CFRP Laminates. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 2209-2221.

Yardımeden, A., Kılıçkap, E., & Çelik, Y. (2014). Effects of Cutting Parameters and Point Angle on Thrust Force and Delamination in Drilling of CFRP. *Materials Testing*, 56(11-12), 1042-1048.

Zhu, Y., Sun, D., Lu, W., & Ko, T. (2023). Development of Coating Removing from GFRP Surface by Abrasive Air Jet Using Amino Thermoset Plastic Abrasive. *International Journal of*

Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 10,
495-508.

BÖLÜM VIII

S960ql Çeliklerde Kaynak Boyunun Çekme Mukavemetine Etkisi

Eda BÜYÜKKAYA¹

Giriş

Günümüz çelik endüstrisinde, yapı çelikleri, inşaat sektöründe, köprülerde, endüstriyel yapılarda ve altyapı projelerinde, hizmet araçlarında yaygın olarak kullanılan önemli malzemelerdir. Çelik, yüksek mukavemeti, dayanıklılığı ve şekil alabilirliği gibi avantajlarıyla inşaat sektörünün, imalat sektörünün temel yapı taşlarından biridir. Yapı çelikleri, farklı sınıflarda ve alaşımlarda üretilir ve her biri belirli uygulamalar için optimize edilmiştir.

¹ Ar-Ge Uzmanı, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., Ar-Ge Müdürlüğü, Mersin/Türkiye, Orcid: 0000-0002-7216-6240, eda.buyukkaya@koluman.com

Yapı çelikleri genellikle iki ana kategoride değerlendirilir: karbon çelikleri ve alaşımlı çelikler. Karbon çelikleri, genellikle düşük ve orta karbon içerikli olup, genel inşaat ve imalat amaçları için uygundur. Alaşımlı çelikler ise daha yüksek mekanik özellikler ve direnç gerektiren durumlar için kullanılır.

İmalat yapılırken kaynaklı birleştirme sırasında yüksek karbonlu çeliklerde çatlama oluşabilir. Karbon oranını azaltmak, bu çatlama sorununu minimize eder. Çatlama önlemek için düşük karbonlu, ince ferrit boyutlu çelikler geliştirilir. Yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı çeliklerin üstün özellikler göstermesi için karbon oranı düşürülür, alaşım elementleri minimumda tutulur ve termomekanik işlemler uygulanır. Termomekanik işlem, ısı ve deformasyonun bir arada kullanılmasıyla mikroyapı ve tane boyutunu değiştirmeyi amaçlar. Sıcak deformasyon, çelik üretiminde önemli bir termomekanik işlemdir (Aytan, 2015).

Bu çalışmada, düşük alaşımlı yüksek mukavemetli bir yapı çeliği olan S960QL malzemesi üzerine farklı parametrelerde kaynaklı uygulamalar yapılmıştır. Farklı açılarda kaynakları yapılan S960QL çeliklerin, bu açılardan ötürü oluşan kaynak boyları incelenmiş olup, malzemeye çekme testi uygulanarak oluşabilecek gerilmelerin mukavemet analizi ve kopma uzamaları irdelenmiştir.

S960QL Yapı Çeliği

S960QL, yüksek dayanıklılığa sahip yapısal çelik sınıfıdır ve özellikle inşaat, otomotiv ve ağır sanayi alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 960 MPa çekme dayanımının olması ile yüksek mukavemetli yapısal uygulamalarda kullanılabilir. Hızlı ısınma ve hızlı soğuma uygulamalarından kaçınarak düşük hızlarda

kaynak yapılması gereken bu çelikler için dikkatli kaynak yapıldığı takdirde olumlu sonuçlar alınabilmektedir (Alakuş, 2024).

"S960" adı, çeliğin akma gerilmesinin 960 MPa dayanıma kadar çıkabildiğini ifade eder. "QL" ise çeliğin, soğuk şekillendirmeye uygun ve yüksek dayanıklılık sağlamak amacıyla 960 MPa'dan daha yüksek gerilme kuvvetine sahip olduğunu gösteren bir ek'tir. Düşük sıcaklık koşullarında da mekanik özelliklerini kaybetmeden dayanıklılığını koruyarak, soğuk iklim koşullarında kullanım için uygundur. Ağır yük taşıyan yapılar için son derece güvenli ve dayanıklı bir malzeme olup yüksek gerilme mukavemeti, dayanıklılığı ve esnekliği ile özellikle zorlu yapı uygulamaları için tasarlanmıştır. Yüksek mukavemeti nedeniyle daha ince ve hafif yapılar tasarlanmasına imkan tanırken, aynı zamanda yüksek güvenlik seviyesi sağlar. Şekil 1'de S960QL çeliğin içeriğinde yer alan elementlerin oranları verilmiştir.

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	B (max %)	P (max %)	S (max %)	Cu (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)
0,20	0,50	1,60	0,005	0,020	0,010	0,3	0,80	2,0	0,70

Şekil 1: S960QL çeliğin içerik değerleri.

Kaynak: (SSAB, 2024).

Kaynak işlemlerine uygun olan S960QL, kaynak sonrası mekanik özelliklerini kaybetmeden uzun ömürlü ve güvenli yapılar oluşturmaya olanak tanır. Bu özellikleri sayesinde, S960QL çeliği, inşaat sektöründe büyük altyapı projelerinde, köprü inşaatlarında, otomotiv sektöründe, endüstriyel yapılar ve ağır taşıma-yük

sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Diğer geleneksel yapı çeliklerine göre daha az malzeme ile aynı yapısal dayanıklılığı sunarak enerji verimliliği sağlar ve çevresel etkileri azaltır. Dayanıklılığı ve düşük bakım gereksinimi ile uzun ömürlü projelerde de uygun bir seçimdir.

Şekil 2’de S960QL çeliğinin akma-çekme referans dayanımları ve uzama yüzdesi verilmiştir.

Akma dayanımı $R_{p0.2}$ (MPa)	960
Çekme dayanımı R_m (MPa)	980-1150
Germe A_5 (min %)	12

Şekil 2: S960QL çeliğinin mekanik özellikleri.

Kaynak: (SSAB, 2024).

S960QL Çeliği Kaynaklanabilirliği

Bir malzemenin kaynağa uygunluğu, beklenen talepleri karşılayacak kaliteye sahip olduğunda kabul edilir. Bir konstrüksiyon, belirli malzeme ve imalat yöntemleriyle, önceden belirlenen şartlar altında fonksiyonlarını yerine getirebiliyorsa kaynak emniyetine sahip olur. Bir kaynaklı imalat ise, uygun malzemelerle ve belirli imalat koşullarında kolayca üretilebiliyorsa kaynak yapılabilirliğe sahiptir (Vural & ark., 2003).

S960QL çeliği, yüksek mukavemetine rağmen kaynaklanabilirlik açısından oldukça uygundur. Bu çelik, özellikle yüksek gerilme dayanımına sahip olmasına karşın, kaynak işlemleri sırasında mekanik özelliklerini kaybetmeden güçlü ve dayanıklı bağlantılar oluşturulmasına olanak tanır. Kaynak işleminden sonra

çeliğın yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı korunur, bu da mühendislik projelerinde önemli bir avantaj sağlar. S960QL, kaynak sırasında düşük ısı etkisi alan bölgelere sahip olması sayesinde, kaynak sonrası çatlama ve deformasyon risklerini en aza indirir. Ayrıca, bu çelik türü, uygun kaynak yöntemleri ve ön ısıtma teknikleriyle kaynaklanabilir, böylece kaynaklı birleşimlerin güvenliği ve performansı yüksek kalır (Uç, 2022).

S960QL çeliği, MIG (Metal Inert Gas) ve MAG (Metal Active Gas) kaynak yöntemleri ile başarılı bir şekilde kaynatılabilir. Her iki kaynak yöntemi de, bu çeliğın yüksek mukavemetini ve dayanıklılığını koruyarak sağlam kaynak dikişleri oluşturulmasını sağlar. MIG kaynağında, koruyucu gaz olarak genellikle argon veya argon-CO₂ karışımları kullanılır, bu da kaynağın temiz ve düzgün olmasına yardımcı olur. S960QL çeliği, MIG kaynağında iyi akışkanlık ve düşük ısı girişi ile birleşimlerin yüksek kaliteli ve estetik olmasını sağlar. MAG kaynağında ise, aktif gaz karışımları (örneğin, CO₂) kullanılarak kaynak dikişi sağlanlaştırılır ve köprüleme sorunları engellenir. Bu yöntemler, özellikle çeliğın yüksek mukavemetine zarar vermeden kaynak yapılmasına olanak tanır. Ancak, her iki kaynak yönteminde de doğru kaynak parametrelerinin kullanılması önemlidir; aşırı ısı girişi ve uygun olmayan kaynak hızları, çeliğın mekanik özelliklerinde bozulmalara neden olabilir. Dolayısıyla S960QL çeliği ile MIG ve MAG kaynak yöntemlerinin uygulanmasında, doğru kaynak parametreleri, uygun ön ısıtma ya da ön ısıtmasız ve kaynak sonrası işlemler gibi dikkat edilmesi gereken faktörler bulunmaktadır (Anık, Dikicioğlu & Vural, 2006).

MIG kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli çelikler için yaygın bir kaynak yöntemi olmakla birlikte iki S960QL çeliğinin birbirine bu yöntemle kaynatılması, doğru kaynak parametrelerinin kullanılmasıyla yüksek kaliteli ve dayanıklı kaynak dikişleri elde edilebilir. Kaynak akımı, voltaj, kaynak hızı ve tel besleme hızı gibi parametrelerin doğru ayarlanması, kaynak dikişinin kalitesini ve dayanıklılığını etkilerken kullanılan koruyucu gaz da kaynak işleminin kalitesini önemli ölçüde doğrudan etkiler. Bu parametreler, çeliğin yüksek mukavemetini bozmadan düzgün bir kaynak dikişi sağlar. S960QL çeliği için genellikle argon, argon-CO₂ karışımları veya saf argon gibi inert gazlar kullanılır. Bu gazlar, kaynağın temiz ve oksidasyon riski olmadan yapılmasına yardımcı olur. Karbon dioksit (CO₂) eklenmesi, daha güçlü kaynak dikişleri elde edilmesine yardımcı olabilir, ancak doğru oranın bulunması gerekir. Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynağında aşırı ısı girişi, çeliğin mekanik özelliklerinde bozulmalara yol açabilir. Bu nedenle, kaynak sırasında ısı girişinin kontrollü olması gerekir. Gerektiğinde, ön ısıtma yapılması, kaynak sırasında çatlama riskini azaltabilir. Ön ısıtma, çeliğin kaynak bölgesindeki termal gerilmeleri azaltarak çatlama olasılığını minimize ederken bazı durumlarda ön ısıtma yapma gereksinimi duyulmaz. S960QL çeliğin birbirine MIG yöntemiyle kaynatılması, doğru teknikler ve parametrelerle son derece başarılı ve dayanıklı kaynak dikişleri elde edilmesini sağlar. Kaynak sırasında ısı kontrolü, doğru gaz seçimi ve kaynak sonrası işlemler, kaynak kalitesini artıran ve çeliğin yüksek mukavemetini koruyan faktörlerdir (Topçu, 2019).

Yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklı birleşiminde kullanılan MAG yönteminde; gaz kompozisyonundaki Argon ve

CO₂'nin içerikteki yüzde oranı, uygun kaynak akımı değeri, kaynak nüfuziyetini, mikroyapıda oluşan tane boyutlarını etkilemesinden ötürü büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda daha kararlı ve düşük ark ısısı elde edebilmek için koruyucu gazın bileşimi dikkatli seçilmelidir. Koruyucu gazdaki CO₂ oranı ve kaynak akımının artması ile birlikte kaynak metalinin nüfuziyetini artırırken, kaynak bölgesindeki mikroyapıda bazı olumsuz durumlar meydana getirir. Bu bölgede temperlenmiş martenzitin beynite oranında azalma ve tane irileşmesinin gözlemlenmesi, artan kaynak akımından ötürü soğuma hızına bağlı olarak yavaşlaması ile kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgelerde sertlik düşüşlerine sebebiyet vermektedir. Akım şiddeti ve CO₂ oranındaki artış, akma dayanımı, çekme dayanımı ve çentik darbe tokluğunda azalmalar meydana getirmektedir (Barlas & ark., 2021., Ormanlı, 2021).

Bazı imalat uygulamalarında malzemeler birbirine her zaman 90° açıyla dik bir biçimde kaynatılamaz. Uygulama alanları gereği malzemelerin birbirine açılı kaynatılması söz konusu olabilir. Bu durumlarda birleştirilen iki malzemenin arasında oluşacak kaynak dikiş mesafesinin artışı ile malzeme üzerine yüklenecek gerilmelerin sönümlenmesi ve bu gerilme karşısındaki malzemedeki uzama miktarı değişkenlik gösterecektir.

İki S960QL çeliğinin birbirine açılı biçimde kaynatılması, doğru kaynak parametrelerinin ve uygun tekniklerin kullanılması ile başarılı bir kaynak dikişi oluşturulabilir. Açılı kaynak, genellikle fillet kaynak (köşe kaynağı) veya butt kaynak (düz kaynak) yöntemleriyle yapılır ve bu tür kaynaklar, özellikle birleşim yüzeyinin açılı olduğu durumlarda kullanılır. Bu işlemde dikkat edilmesi gereken birkaç önemli faktör bulunmaktadır:

□ Fillet Kaynakları: Fillet kaynakları, özellikle dik açıyla yapılan köşe kaynaklarında kullanılır. Bu tür kaynaklar, özellikle küçük yük taşıyan uygulamalar için uygundur ancak yüksek mukavemetli çeliklerle kullanıldığında dikkatli yapılmalıdır çünkü bu tür kaynaklar çekme mukavemetini sınırlayabilir.

□ Butt Kaynakları: Butt kaynakları, malzemelerin birbirine paralel şekilde birleştirildiği düz kaynak türüdür. Bu kaynak, genellikle daha yüksek çekme mukavemeti sağlar çünkü kaynak bölgesi daha geniştir ve genellikle iyi penetrasyon sağlar. Bu tür kaynaklarda kaynak açısının doğru ayarlanması, yüksek çekme mukavemetinin elde edilmesinde kritik rol oynar.

Kaynak Bölgesi ve ITAB

Kaynaklı bir yapıda kaynak bölgesi, kaynak metali (KM) ve ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) olmak üzere iki kısımdan oluşur. Kaynak işlemi sonrasında kaynak metali, iri taneli ve sütunsal bir yapıya sahip olur. Kaynakla birleştirilen parçadaki süreksizlikler, homojenliği bozan unsurlardır, ancak her süreksizlik kaynak hatası olarak kabul edilmez. Eğer süreksizlik, kaynağın kullanım amacına engel oluşturuyorsa, hata olarak kabul edilir. Süreksizlikler; inklüzyon, porozite, yetersiz doldurma, çatlaklar gibi çeşitli türlerde olabilir ve tespitlerinde tahribatsız muayene yöntemleri kullanılır (Kökdemir, 2007).

Kaynak Açısı

Açılı kaynaklarda, iki parça arasındaki açı (genellikle 45° veya daha az) kaynağın düzgünlüğü ve çekme mukavemeti üzerinde belirleyici bir rol oynar. Açılı kaynak uygulamaları özellikle bağlantı bölgelerinde iyi penetrasyon sağlayarak, yüksek mukavemetli

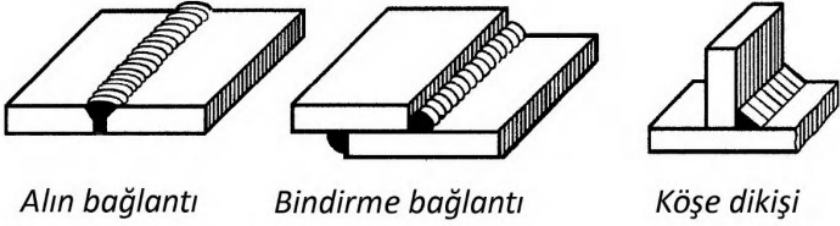
dikişler oluşturulmasına yardımcı olabilir. Açılı kaynak yaparken, iki malzeme arasındaki yatayla yaptığı açı ne kadar küçük olursa kaynaklı bölgenin uzunluğu artacağı için kaynak dikişinin çekme mukavemeti o kadar yüksek olabilir.

45° Açı: Bu açı, genellikle optimum penetrasyon ve kaynağın her iki tarafına da iyi bir yayılma sağlamak için kullanılır. S960QL gibi yüksek mukavemetli çelikler için, bu açı ya da daha az miktarda açı ile yapılan kaynaklar genellikle iyi bir sonuç verir.

Daha Yüksek Açılar: Daha büyük açılar (örneğin, 60° ve üstü) kaynak bölgesinde daha az penetrasyon oluşturabilir, bu da çekme mukavemetini olumsuz etkileyebilir. Kaynakta distorsiyonlara sebep olabilir ve kaynaklı bağlantının rijitliği bozulabilir.

Açılı kaynaklarda, kaynak dikişi tasarımı da çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dikişin şekli, boyutu ve konumu, malzemenin gerilmelere karşı direnç göstermesinde kritik rol oynar. Açılı kaynaklarda V şekli veya X şekli dikişler genellikle tercih edilir. Bu tür dikişler, daha iyi penetrasyon sağlarken, aynı zamanda yüksek çekme mukavemeti sağlar.

Kaynaklar genel bağlamda alın kaynağı, bindirme kaynağı, köşe kaynağı olarak kaynatılabilir. Şekil 3'te kaynak uygulamalarında bağlantı çeşitlerine yer verilmiştir: alın kaynağı, bindirme kaynağı, köşe dikişi kaynağı olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3: Kaynakta bağlantı eşitleri.

Kaynak: (İstanbul Teknik Üniversitesi, Kaynak Bağlantıları).

Yüksek mukavemetli S960QL eliği için, kaynak akımı ve voltajı doğru ayarlanmalıdır. Fazla akım ve voltaj, çeliğin aşırı ısınmasına ve bu da deformasyon veya çatlama riskine yol açabilir. DŐuk akım ise yetersiz penetrasyona neden olabilir.

Kaynak teli, çeliğin kimyasal ve mekanik özelliklerine uygun olmalıdır. S960QL için yüksek dayanım sağlayan uygun tel seçimleri yapılmalıdır.

Yöntem ve Bulgular

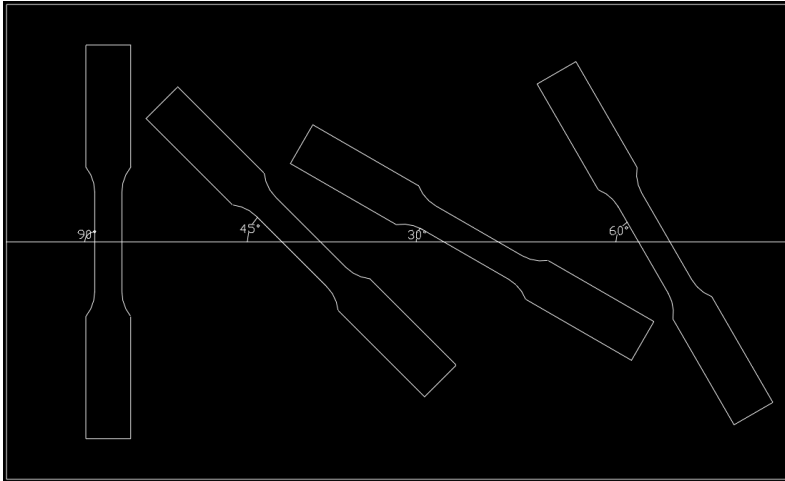
Tablo 1’de 10 mm S960QL malzemeye yapılan 3 deney için kaynak parametrelerine yer verilmiştir. Kök akım değeri tüm deneylerde sabit 165A, kaynak teli sabit ER120 tel, kaynak ağzı sabit V 50° olarak belirlenmiştir. Birinci deneyde ön ısıtma yapılmış ardından ikinci deneyde yine ön ısıtma yapılarak kök pasoda akım değeri sabit tutulup kapak pasoda akım değeri yükseltilerek 205A değerde çalışılmıştır. nc deneyde ise kök ve kapak pasolarda akım değeri sabit tutulup ön ısıtma yapılmayarak, kapak akım değeri 205 A’da malzemeler birbirine kaynatılmıştır. Her deney parametresinde 30°, 45°, 60°, 90° derecelerde 4 adet numune

çalışılarak üç deney için toplamda 12 adet deney numunesi incelenmiştir.

Tablo 1: Numunelerin farklı parametrelerdeki kaynak bilgileri.

Deney No	Malzeme	Kök Değer	Kapak Değer	Kaynak Teli	Kaynak Ağızı	Kaynak Ağızı Açısı	Ön Isıtma
1.Deney	S960QL	165A	185A	ER120	V	50°	Var
2.Deney	S960QL	165A	205A	ER120	V	50°	Var
3.Deney	S960QL	165A	205A	ER120	V	50°	Yok

Şekil 4'te farklı açılarda kaynak yapılmış S960QL malzeme gösterilmiştir. Soldan sağa doğru birinci numune 90°, ikinci numune 45°, üçüncü numune 30°, dördüncü numune 60° açı ile kaynatılmıştır. Verilen açılar karşıt parça ile aralarında oluşan açıyı ifade etmektedir.



Şekil 4: Çekme numunelerinin farklı açılarda kaynatılması.

Tablo 2’de 10mm kalınlığındaki S960QL malzemenin farklı açılarda kaynak yapılan numunelerinin kaynak boyları gösterilmiştir. Bu tabloya göre birbiri ile 90° açıda kaynak yapılan numunenin aradaki kaynak boyu 20 mm, 60° kaynak yapılan numunenin kaynak boyu 23 mm, 45° kaynak yapılan numunenin kaynak boyu 28 mm, 30° kaynak yapılan numunenin kaynak boyu 40 mm olarak ölçülmüştür.

Tablo 2: Farklı açılardaki kaynak boyları.

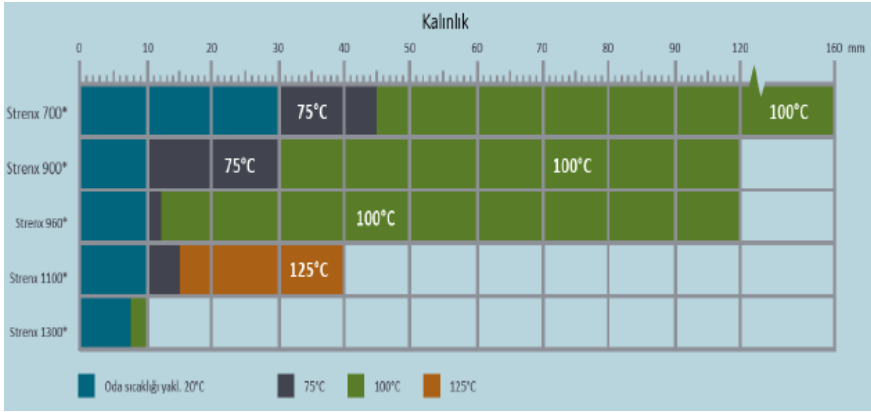
Kaynak Açılıarı	90°	60°	45°	30°
Kaynak Boyları	20 mm	23 mm	28 mm	40 mm

İki çelik malzemenin birbirine açılı biçimde kaynatılması ile aralarında oluşan kaynak mesafesinin artmasına bağlı olarak kaynak bölgesine nüfuz eden yüklerin dağılımı sağlandığı için daha iyi çekme mukavemeti elde edilebilmektedir.

Kaynakta Ön Isıtmanın Etkisi

S960QL malzemesi, yüksek dayanımlı ve düşük alaşımlı bir çelik türü olmasından ötürü bu tür çeliklerin kaynak işlemlerinde ön ısıtma büyük önem taşır. Ön ısıtma, malzemenin kimyasal bileşimi, yüksek dayanımı ve soğuma hızı nedeniyle kaynak sırasında oluşabilecek çatlama riskini azaltmak için gereklidir. Özellikle hızlı soğuma sonucu kaynak bölgesinde hidrojen çatlakları oluşabileceği için ön ısıtma, soğuma hızını yavaşlatarak hidrojenin uzaklaşmasını

sağlar. Ayrıca, kaynak sırasında oluşan ani sıcaklık değişimlerinin neden olduğu kalıntı gerilimleri minimize ederek çatlama riskini düşürür. Ön ısıtma aynı zamanda mikroyapı kontrolü sağlayarak martensit gibi gevrek yapıların oluşmasını önler ve daha sünek, dayanıklı bir kaynak dikişi elde edilmesine yardımcı olur. Böylece malzemenin kaynaklanabilirliği iyileşir ve mekanik özellikleri korunur. Sonuç olarak, S960QL gibi yüksek dayanımlı çeliklerde ön ısıtma, kaynak sırasında oluşabilecek çatlama, gerilim ve mikroyapı sorunlarını önlemek için kritik bir adımdır. Uygun ön ısıtma sıcaklığı, malzemenin kalınlığına, ısı girdisine ve çevresel koşullara bağlı olarak belirlenmelidir. Şekil 5’de yüksek mukavemetli çelikler için malzeme kalınlığına göre önerilen, öntav yani ön ısıtma sıcaklıkları yer almaktadır.



Şekil 5: Yüksek mukavemetli çelikler için önerilen öntav sıcaklıkları.

Kaynak: (SSAB, Strenx'in Kaynaklanması).

Çekme Test Yöntemi ve Standardı

TS EN ISO 4136, her türlü üründe kaynaklı alın bağlantısına sahip metalik malzemeler için geçerli olan bir standart olup, kaynaklı alın bağlantılarının çekme mukavemetini ve kırılma yerini belirlemek amacıyla test numunesi boyutlarını ve enine çekme testlerinin uygulanma prosedürünü açıklar. (ISO 4136:2022. Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test.)

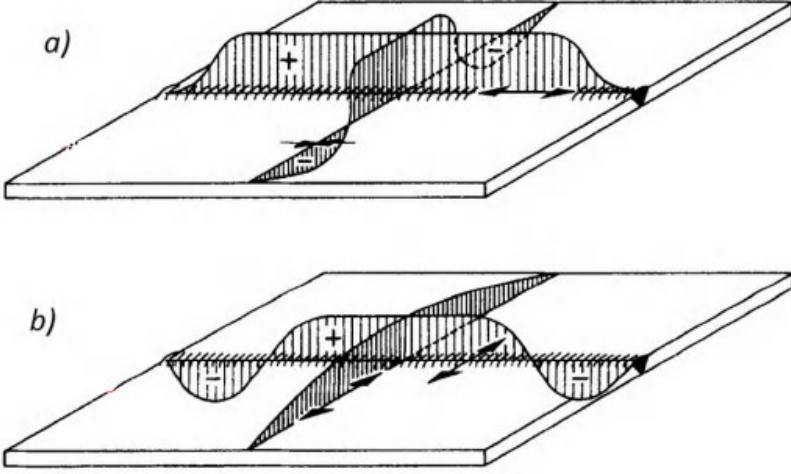
TS EN ISO 6892-1 metalik malzemelerin oda sıcaklığında test edilmesi yöntemine dayanarak, numunelere bu şartlar altında testler gerçekleştirilerek; çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması gibi mekanik özellikler belirlenir. (TS EN ISO 6892-1: 2019. Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature.)

Bu deneyler malzemenin performansını değerlendirmek adına endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynar. S960QL çeliklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için bu standartlardaki prosedürler uygulanarak tayin edilebilecek malzemelerin kırılma, uzama, elastikiyet modülü, mukavemet gibi özellikleri elde edilmiştir.

Kaynakta İç Gerilmeler

Kaynak işleminde kaynak telinin ergimesi, kaynak boşluğunu doldurup esas metalle birleşik bir kaynak bölgesi oluşturması esnasında iç yapıda bir dizi gerilme meydana gelir. Kaynak bölgesinin ergiyip, katılma sonrasında kaynak edilen malzeme içinde oluşan artık gerilmeler malzemenin kararsız davranmasına sebebiyet verebilir. Bu artık gerilmeler hem dikiş doğrultusunda

(boyuna) hem de dikeye dik yönde (enine) iki eksenli bir gerilme hali meydana getirir. Şekil 6'da a görselinde gerilmelerin kaynak dikişi doğrultusunda boyuna olduğu, b görselinde dikeye dik yönde enine olduğu gösterilmiştir.



Şekil 6: Kaynakta meydana gelen a) dikiş doğrultusunda (boyuna) ve b) dikeye dik yönde (enine) gerilmeler.

Kaynak: (İstanbul Teknik Üniversitesi, Kaynak Bağlantıları).

Bu çalışmada aynı kaynak yöntemi kullanılarak 2 farklı amper değerinde, ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız kaynak işlemleri yapılmış olup 3 farklı durumda her açılı numuneden 3'er adet deney elde edilmiştir.

İlk durumda yapılan kaynaklı numunelere ön ısıtma işlemi uygulanmış olup kök amper değeri 165A, kapak amper değeri 185A olacak şekilde hazırlanmıştır. İkinci durumda akımın kaynak nüfuziyeti ve mukavemeti üzerine etkisini görebilmek adına kök

değer 165A, kapak değer 205A olacak şekilde kaynak yapılmıştır. Üçüncü durumda ise kök amper ve kapak amper değerleri ikinci deney gibi sabit tutulmuş olup ön ısıtmayı ortadan kaldırarak sonuçlar üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te farklı açılardaki kaynakların belirli kaynak parametrelerindeki sonuçları yer almaktadır.

Yapılan birinci deney sonuçları Tablo 3'te yer almaktadır. Dik açı ile kaynak yapılan numune (90°) için 851 N/mm^2 mukavemet değeri elde edilirken yüzdece kopma uzaması 16,6 olarak ölçülmüştür. Birbiri ile 30° açı ile kaynak yapılan numunenin çekme testi sonuçlarına bakıldığında 835 N/mm^2 mukavemet ve yüzde 21 uzama ölçülmüştür. 45° açı ile kaynak yapılan numunenin mukavemeti 818 N/mm^2 ve kopma uzaması 17,2'dir. 60° açılı kaynak yapılan numunenin ise 802 N/mm^2 değer ile en düşük çekme mukavemeti elde edilmiştir. Kopma uzaması yüzde 17,3'tür. Birinci deneyin sonuçlarına bakıldığında 30° açıda kaynak mesafesinin en uzun olması, bu akım değerinde en yüksek çekme mukavemeti gösteren dik açılı kaynaktan sonra iyi değerler göstermiştir. Bu grupta en fazla kopma uzaması 30° açılı kaynakta görülmüştür. 90° dik açılı kaynakta mukavemet değeri yüksek olsa da kopma uzaması bu deney sınırları içinde en az bu numunede görülmüştür. En düşük mukavemet değeri 60° açılı kaynakta gözlemlenmiştir. Burdan yola çıkarak numunelerin bu sınırlar içinde yatayla yaptığı açı azaldıkça kopma uzamasının arttığı ve genel olarak da mukavemetinin iyileştiği sonucuna varılabilir.

Tablo 3: 1. Deney kaynak parametreleri.

1.Deney	90°	30°	45°	60°
Mukavemet (N/mm ²)	851	835	818	802
Uzama (%)	16,6	21	17,2	17,3

Yapılan ikinci deney sonuçları Tablo 4'te yer almaktadır. Dik açı ile kaynak yapılan numune (90°) için 846 N/mm² mukavemet değeri elde edilirken yüzde kopma uzaması 16,2 olarak ölçülmüştür. Birbiri ile 30° açı ile kaynak yapılan numunenin çekme testi sonuçlarına bakıldığında 878 N/mm² mukavemet ve yüzde 20,9 uzama ölçülmüştür. 45° açı ile kaynak yapılan numunenin mukavemeti 845 N/mm² ve kopma uzaması 18,2'dir. 60° açılı kaynak yapılan numunenin ise 842 N/mm² çekme mukavemeti ve yüzde 17,6 kopma uzaması ölçülmüştür. İkinci deneyin sonuçlarına bakıldığında 30° açıda kaynak mesafesinin en uzun olması ve malzemenin kaynaktan kopması sonucundan yola çıkarak bu akım değerinde kaynağın en yüksek çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Diğer açılardaki kaynakların mukavemetleri ise genel bağlamda S960QL malzemenin çekme değerlerine ulaşamamış ve birbirine yakın değerlerde seyretmişlerdir. 30° açıda 20,9 en yüksek kopma uzamasından sonra 45°, 60°, 90° açılarda kopma uzamaları da bu açılarının mukavemet

değerleri gibi birbirine çok yakın ve 30° açılı numuneden düşük sonuçlar vermiştir.

Tablo 4: 2. Deney kaynak parametreleri.

2.Deney	90°	30°	45°	60°
Mukavemet (N/mm ²)	846	878	845	842
Uzama (%)	16,2	20,9	18,2	17,6

Yapılan üçüncü deney sonuçları Tablo 5’de yer almaktadır. Dik açı ile kaynak yapılan numune (90°) için 956 N/mm² mukavemet değeri elde edilirken yüzde kopma uzaması 19,7 olarak ölçülmüştür. Birbiri ile 30° açı ile kaynak yapılan numunenin çekme testi sonuçlarına bakıldığında 983 N/mm² mukavemet ve yüzde 19 kopma uzaması ölçülmüştür. 45° açı ile kaynak yapılan numunenin mukavemeti 961,5 N/mm² ve kopma uzaması 16,6’dır. 60° açılı kaynak yapılan numunenin ise 981 N/mm² kopma uzaması yüzde 18,3’tür. Üçüncü deneyin sonuçlarına bakıldığında 30° açıda kaynak mesafesinin en uzun olması ile bu akım değerinde 983 N/mm² ile en yüksek çekme mukavemetini sağladığı gözlemlenmiştir. Kopma uzamaları kıyaslandığında 30° ve 90° açılı kaynakta en yüksek değerler gözlemlenirken, 45° ve 60° açılı kaynakta en düşük kopma uzamaları elde edilmiştir. En düşük mukavemet 90° dik açılı numunede gözlemlenmiş ve bunun

sebebinin dik yüklerin kaynak üzerinde yayılmadan kesmeye uğradığı üzerine olduğu düşünülmüştür.

Tablo 5: 3. Deney kaynak parametreleri.

3.Deney	90°	30°	45°	60°
Mukavemet (N/mm ²)	956	983	961,5	981
Uzama (%)	19,7	19	16,6	18,3

Sonuç

S960QL çeliği ile yapılan kaynak işlemleri, özel teknikler ve hassas parametre yönetimi gerektirir. Bu tür çeliklerin kaynaklanması sırasında malzemenin özelliklerini kaybetmemek için doğru kaynak yöntemi, sıcaklık kontrolü ve kaynak sonrası işlemler kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, S960QL çeliğinin kaynaklanabilirliği, 10 mm kalınlığındaki iki S960QL malzemenin birbirine V 50° alın kaynağı, MAG yöntemi kullanılarak kaynaklanması ve bu birleşimlerde kaynak boyunun incelenmesi, kaynak boylarının mukavemete etkisi, kaynak sonrası mekanik özellikleri ve karşılaşılan zorluklar ele alınmıştır. Numuneler kaynak dikişine dik ekseninde belirli açılarda olacak şekilde (30°, 45°, 60° ve 90°) hazırlanıp kaynaklanması sonucu birleşimdeki aralarında oluşan kaynak boyları hesaplanmış

ve her birine çekme testi yapılarak açısal yük uygulaması ile sonuçlar gözlemlenmiştir. Açısal yüke maruz kalan kaynak dikişinin kaynak boyunun artması sonucu malzeme üzerine binen yükler daha iyi tölere edilebilmiş ve daha iyi akma-çekme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Kaynak bölgesinin artışı ve gerilmelerin açılı biçimde yayılması sayesinde bu bölgeye nüfuz eden yüklerin dağılımının sağlanmasıyla kopma uzamaları daha iyi sonuçlarda çıkmıştır.

Deneyler kapsamında ilk kaynak işlemlerinde S960QL malzemenin sağladığı mukavemet değerlerinin altında çekme sonuçlarının vermesi üzerine kapak amper değerinin yetersiz kaldığı ve ön ısıtmanın 75°C olmasından ötürü kaynak bölgesindeki mikroyapı düzensizliklerine sebebiyet vermesi ve kaynaktan kopmalar görülmüştür. İkinci denemede kapak amper değeri 205A' ya çıkarılmış ve ön ısıtma kontrollü biçimde gerçekleştirilmiştir. İkinci denemede değerlerin istenilen oranlara yaklaştığı ancak verimin istenilen düzeyde olmaması üzerine üçüncü bir kaynak çalışması ile ön ısıtmanın kaldırılarak sonuçların irdelenmesi sağlanmıştır. Ön ısıtmanın azalarak ortadan kaldırıldığı bu deneylerde açılı kaynağın etkisi de göz önüne alındığında 30° açıdaki kaynaklı işlemlerin optimum seviyede verim sağladığı ve iyi kopma uzaması değerleri verdiği gözlemlenmiştir.

Kaynakça

Vural, M., Piroğlu, F., ağlayan, . B., & Uzgider, E. (2003). Yapı eliklerinin kaynaklanabilirliği.

Kökdemir, E. (2007). Alaşımsız yapı çeliği levhalarında kaynak dikişlerinin ultrasonik muayenesi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).

Topçu, İ. (2019). TIG ve MIG kaynağı ile işlem gören 304 ve 1040 eliklerin ITAB bölgesindeki mekanik özelliklerin incelenmesi. ukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3), 171-182.

Aytan, G. (2015). Farklı Kalitedeki Galvanizli eliklerde Fırın Sertleştirmesi Parametrelerinin Mekanik zelliklere Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Uç, Y, H. (2022). S960QL kalite yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklı birleşiminin incelenmesi. *GSI SLV*. (05.10.2024 tarihinde <https://gsi.com.tr/uploads//etkinlikler/yunus-halim-uc-s960ql-kaynagi-668.pdf> adresinden ulaşılmıştır.)

Anık, S., Dikicioğlu, A., & Vural., M. (2006). İmal Usulleri. (1. Baskı), *İstanbul: Birsen Yayınevi*.

SSAB. Strenx'in kaynaklanması. (20.11.2024 tarihinde <https://www.scribd.com/document/572958488/Strenx-Welding-TR-PRINT> adresinden ulaşılmıştır.)

ISO 4136: 2022 (2022). Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test. (16.12.2024 tarihinde <https://www.iso.org/standard/81123.html> adresinden ulaşılmıştır.)

TS EN ISO 6892-1: 2019 (2019). Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. (16.12.2024 tarihinde <https://www.iso.org/standard/78322.html> adresinden ulaşılmıştır.)

Alakuş, H. (2024). S700MC eliklerin zlu tel ile robotik MAG kaynak yöntemiyle birleştirilmesi ve mekanik özelliklerin incelenmesi. (Yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir. (882783).

Barlas, Z., Ormanlı, E., zsara, U., Orhan, A., & alıgl, U. (2021). HSS S960QL eliğinin MAG kaynağında kaynak akımı ve gaz kompozisyonundaki CO₂ oranının birleştirme özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), 1430-1443. (Barlas & ark., 2021)

Ormanlı, E. (2021). Ultra yüksek mukavemetli S960QL eliğinin MAG kaynağında gaz kompozisyonu ve kaynak akımının birleştirme özelliklerine etkisi. (Yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir. (669089).

İstanbul Teknik Üniversitesi. Kaynak Bağlantıları. (08.12.2024 tarihinde <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Kaynak.pdf> adresinden ulaşılmıştır.)

BÖLÜM IX

Standart Sürüş Çevrimlerinin Karşılaştırılarak Performanslarının Değerlendirilmesi

Tevfik ATAMAN¹
Müslüm GÜR²

1.Giriş

Taşıtların çevresel etkileri ve enerji verimliliği, otomotiv endüstrisinin ve düzenleyici otoritelerin uzun süredir öncelik verdiği konular arasında yer almaktadır. Küresel ısınma, hava kirliliği ve sınırlı fosil yakıt kaynakları gibi faktörler, araç emisyonlarının doğru bir şekilde ölçülmesini ve daha çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu doğrultuda, sürüş çevrimleri, araçların emisyon ve yakıt tüketimini laboratuvar

¹ Öğr. Gör. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1346-5651, tevfikataman@karatekin.edu.tr

² Öğr. Gör., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4842-5345, muslumgur@karatekin.edu.tr

ortamında standartlaştırılmış bir şekilde ölçmek için geliştirilmiş kritik yöntemlerdir (Karamangil & Tekin, 2022).

Uzun yıllar boyunca Avrupa'da Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (New European Driving Cycle-NEDC) kullanılmaktaydı (Tsiakmakis et al., 2017). Ancak NEDC'nin sabit hız profilleri ve gerçek sürüş koşullarını yeterince yansıtmaması, emisyonların ve yakıt tüketiminin laboratuvar sonuçlarıyla gerçek dünyadaki performansı arasında ciddi farklar yaratmaktaydı. Bu durum, test prosedürlerinin güvenilirliği konusunda tartışmalara yol açmış ve daha gerçekçi bir test yöntemi olan Dünya Harmonize Hafif Araç Test Prosedürü (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure-WLTP) 2017 yılında uygulamaya konulmuştur (WLTPfacts.eu, 2017).

WLTP, araçların daha dinamik bir hız profili ve daha çeşitli sürüş koşullarını içerecek şekilde test edilmesini sağlamaktadır. Bu prosedür, yalnızca hız ve ivmelenme farklılıklarını değil, aynı zamanda test sıcaklığı, araç yükü ve aerodinamik etkiler gibi gerçek dünya faktörlerini de dikkate alarak, ölçümlerin doğruluğunu artırmayı hedeflemektedir (Dimaratos et al., 2016).

Her ne kadar WLTP, gerçek dünya sürüş koşullarını daha iyi yansıtsa da çevresel faktörler ve bireysel kullanım alışkanlıkları, üreticilerin belirttiği yakıt tüketimi ve menzil değerlerinde bir miktar sapmaya neden olabilmektedir. Fosil yakıtlı araçlarda bu sapmalar, kullanıcılar açısından genellikle ciddi bir endişe yaratmaz. Ancak, elektrikli araçlar için durum farklıdır; mevcut menzil kısıtlamaları ve fosil yakıt dolum sürelerine kıyasla oldukça uzun olan şarj süreleri, kullanıcılar üzerinde ek bir stres yaratmaktadır. Bu nedenle,

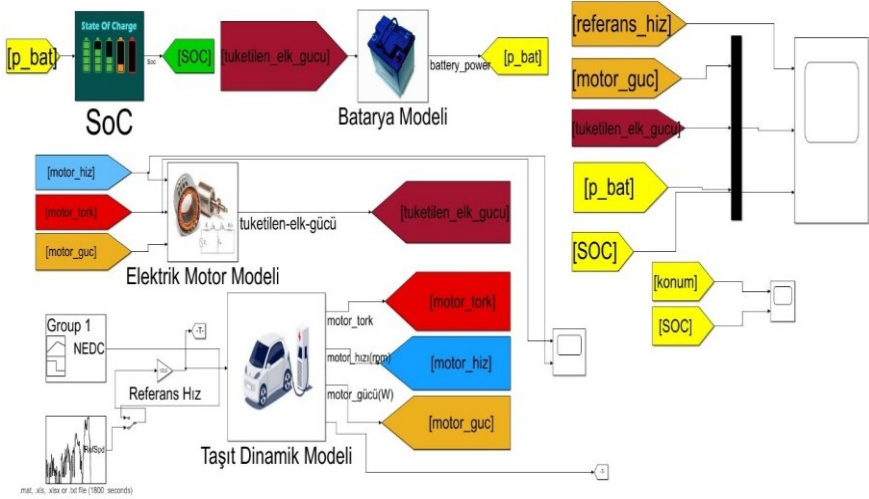
elektrikli araç üreticilerinin sunduğu menzil ve enerji tüketimi değerlerinin gerçek sürüş koşullarından sapması, kullanıcılar için daha büyük bir problem oluşturmaktadır.

Günümüzde piyasada bulunan bazı elektrikli araçların yakıt tüketimi ve menzil verileri hala NEDC'ye göre hazırlanırken, 2018 ve sonrasında üretilen araçlarda bu değerler WLTP test sonuçlarına dayalı olarak sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, tamamen elektrikli bir araç hem NEDC hem de WLTP koşullarında sanal ve fiziksel testlere tabi tutulmuş ve sonuçlar kilometre başına enerji tüketimi açısından analiz edilmiştir (S et al., 2017).

Bu bölümde, NEDC ve WLTP sürüş çevrimleri arasındaki farklar, grafiksel karşılaştırmalarla detaylı bir şekilde incelenecektir. Bu inceleme, her iki test prosedürünün avantaj ve dezavantajlarını anlamının yanı sıra, otomotiv endüstrisi ve çevre politikaları üzerindeki etkilerini değerlendirme fırsatı sunacaktır (Demuynek et al., 2012).

2. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde, NEDC ve WLTP sürüş çevrimlerinin karşılaştırılmasında kullanılan veri kaynakları, analiz yöntemleri ve grafiksel sunum teknikleri detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Amaç, her iki test prosedürünü objektif bir şekilde analiz ederek temel farklılıklarını ve performans üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Bu çalışmada; elektrikli araç modellemesi yapılarak, standart seyir çevrimlerinin simülasyonları ile enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun yanı sıra; taşıt parametrelerindeki değişiklikler ile sürüş çevrimleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Çalışmanın genel modeli şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Elektrikli araç modeli.

2.1. Veri Kaynakları

Karşılaştırmalar için bazı verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler; NEDC ve WLTP'nin teknik özellikleri ve test protokolleri, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ve bu alandaki uluslararası otoritelerin yayınlarından alınmıştır. Bunun yanı sıra; daha önceki bilimsel çalışmalar ve otomotiv endüstrisine yönelik raporlar incelenmiştir (A et al., 2022; J et al., 2016).

2.2. Kullanılan Parametreler

Karşılaştırma için seçilen anahtar parametreler tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: NEDC ve WLTP sürüş çevrim parametreleri.

Parametre	NEDC	WLTP	Fark
Toplam Zaman (s)	1180	1800	620
Mesafe (km)	11	23,3	12,3
Max. Hız (km/h)	120	131	11
Ortalama Hız (km/h)	34	47	13
Max. Hızlanma (m/s ²)	1,1	1,7	0,6
Max. Yavaşlama (m/s ²)	-1,4	-1,5	-0,1
Sabit Sürüş Zamanı(s)	475 (%40)	66 (%3.5)	-%37
Hızlanma Zamanı (s)	247 (%21)	789 (%44)	% 23
Yavaşlama Zamanı (s)	178 (%15)	719 (%40)	%25
Durma Zamanı (s)	280 (%24)	226 (%12,5)	-%12

Çevrim boyunca hız profili; zaman içindeki hız değişimleri, çevrimlerin dinamikliğini değerlendirmek için analiz edilmiştir. Enerji tüketimi ile ise; araçların farklı sürüş senaryolarında tükettikleri enerji miktarının incelenmesi hedeflenmiştir (Sileghem et al., 2014).

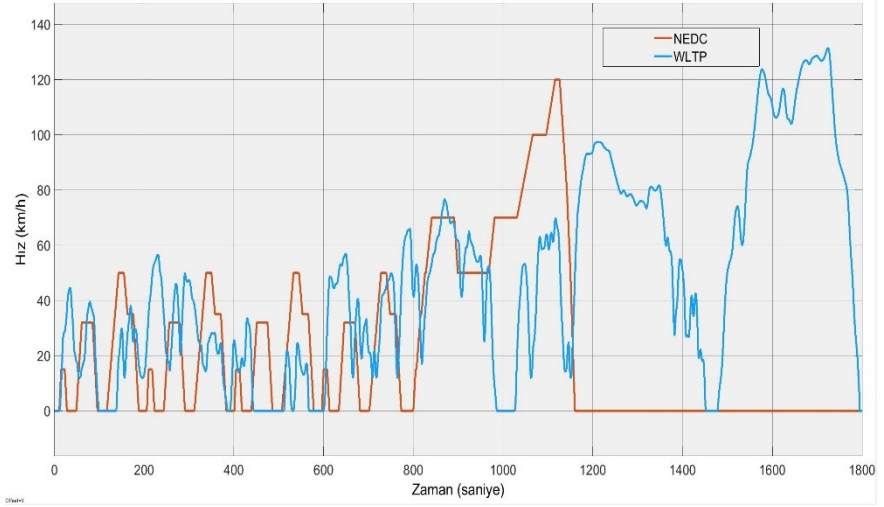
2.3. NEDC ve WLTP Arasındaki Farklar

Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC), 1970'lerde geliştirilmiş ve 1990'larda güncellenmiş bir test prosedürüdür (Schütz, 2016). Araçların emisyon ve yakıt tüketimini değerlendirmek için kullanılan bu çevrim, 20 dakikalık bir test süresine ve 11 kilometrelik bir mesafeye dayanmaktadır. Hız profili oldukça basittir; sabit hızlanma ve yavaşlama periyotları içerir ve maksimum hız 120 km/s ile sınırlıdır. Ancak NEDC, gerçek dünya sürüş koşullarını yeterince temsil etmediği için eleştirilmiştir. Özellikle modern trafik dinamiklerini ve çeşitli sürüş senaryolarını yansıtmadığı, bu nedenle laboratuvar sonuçları ile gerçek hayatta elde edilen veriler arasında büyük farklar olduğu belirtilmiştir (Ciuffo et al., 2015).

Dünya Harmonize Hafif Araç Test Prosedürü (WLTP), bu eksiklikleri gidermek amacıyla 2017 yılında uygulanmaya başlamıştır. WLTP, daha karmaşık ve dinamik bir hız profiline sahip olup, test süresini 30 dakikaya ve test mesafesini 23 kilometreye çıkarmıştır. Bu çevrim, hızlanma ve yavaşlama sürelerini daha gerçekçi bir şekilde yansıtarak, araçların farklı hız aralıklarındaki performansını daha doğru bir şekilde ölçmeyi hedefler. Ayrıca WLTP, test sıcaklığı, araç ağırlığı ve aerodinamik gibi faktörleri de göz önünde bulundurur, böylece elde edilen sonuçlar gerçek sürüş koşullarına daha yakın olur (Chen et al., 2018).

Sonuç olarak, NEDC daha basit ve statik bir yaklaşıma sahipken, WLTP, daha dinamik ve gerçek dünyayı yansıtan bir test prosedürü olarak otomotiv endüstrisinde daha geniş kabul

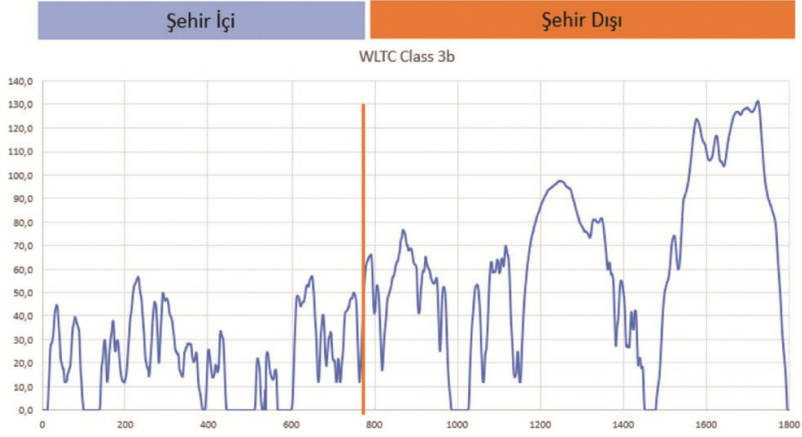
görmüştür. Bu karşılaştırma şekil 2’de görülmektedir (Tutuianu et al., 2015).



Şekil 2: WLTP-NEDC Hız-Zaman Karşılaştırması.

2.4. Sistem Tasarımı

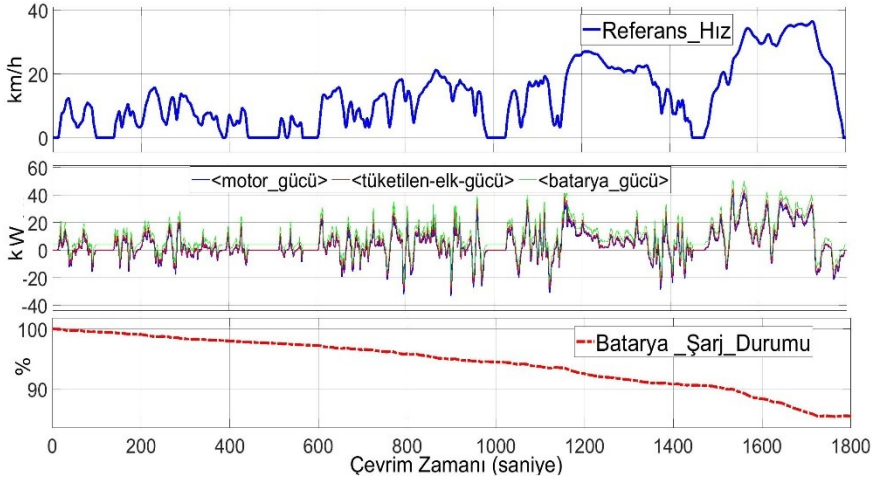
Bu çalışmada, bir matematiksel model kullanılarak elektrikli araç tasarlanmıştır. Tasarlanan bu araç, farklı sürüş çevrimleri ve senaryoları ile simüle edilerek farklı parametreler açısından değerlendirilebilir. Modelleme içeriğinde; elektrik motor modeli, batarya şarj durumu, batarya modeli ve araç dinamik modeli yer almaktadır. Analizde bizim için önemli olan araç dinamik modeli şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 4: WLTP şehir içi ve şehir dışı ilişkisi.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir elektrikli aracın enerji tüketiminin menzile olan etkisi; NEDC ve WLTP sürüş çevrimlerinde hem şehir içi hem de şehir dışı koşullarda, fiziksel testler ve MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilen sanal simülasyonlar yoluyla incelenmiştir. Şekil 5'te simülasyon sonuçları görülmektedir.



Şekil 5: Simülasyon sonuçları.

Kilometre başına tüketilen enerji değerleri açısından yapılan değerlendirmede, WLTP sonuçlarının NEDC'ye kıyasla %10 ila %12 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında ise bu farkın %7 ila %9 arasında olduğu belirlenmiştir. Şehir dışı sürüşlerde WLTP, kilometre başına enerji tüketimi açısından NEDC'ye göre %8 ila %10 oranında daha fazla enerji harcamaktadır. Şehir içi sürüşlerde ise bu fark %7 ila %9 oranındadır.

Simülasyon sırasında kullanılan araç modelinde ideal kabul edilen bazı parametrelerin daha ayrıntılı matematiksel ifadelerle tanımlanması, simülasyon sonuçlarını gerçek test verilerine daha da yaklaştırabilir. Bu tür iyileştirmelerin, ileride yapılacak başka bir çalışmada ele alınması planlanmaktadır. Küresel çapta farklı üreticilerin sağladığı referans değerlere bakıldığında, NEDC ile WLTP arasında kilometre başına ortalama enerji tüketimi açısından %8 ila %33 oranında değişikliklerin olduğu gözlemlenmiştir.

4. Kaynakça

A, C., J, P., M, K., D, K., & G, F. (2022). Evolution of European light-duty vehicle CO₂ emissions based on recent certification datasets. *TRANSPORTATION RESEARCH PART D-TRANSPORT AND ENVIRONMENT*, *107*, 103287. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103287> (online)

Ataman, T., Biberici, M. A., & Celik, M. B. (2024). Simulation of Advanced Driving Assistance Systems for a Dynamic Vehicle Model. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *14*(5), 16553–16558. <https://doi.org/10.48084/ETASR.8294>

Chen, H., Song, Z., Zhao, X., Zhang, T., Pei, P., & Liang, C. (2018). A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle. *Applied Energy*, *224*, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.050>

Ciuffo, B., Marotta, A., Tutuianu, M., Anagnostopoulos, K., Fontaras, G., Pavlovic, J., Serra, S., Tsiakmakis, S., & Zacharof, N. (2015). *The development of the World-Wide Harmonized Test Procedure for Light Duty Vehicles (WLTP) and the Pathway for its Implementation into the EU Legislation*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3175.8562>

Demuynck, J., Bosteels, D., De Paepe, M., Favre, C., May, J., & Verhelst, S. (2012). Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC. *Energy Policy*, *49*, 234–242. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.05.081>

Dimaratos, A., Tsokolis, D., Fontaras, G., Tsiakmakis, S., Ciuffo, B., & Samaras, Z. (2016). Comparative Evaluation of the Effect of Various Technologies on Light-duty Vehicle CO₂ Emissions over NEDC and WLTP. *Transportation Research Procedia*, 14, 3169–3178. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.05.257>

J, P., A, M., & B, C. (2016). CO₂ emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures. *APPLIED ENERGY*, 177, 661–670. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.110>

S, T., G, F., C, C., J, P., K, A., & B, C. (2017). *From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO₂ emissions of light-duty vehicles* (Issue KJ-NA-28724-EN-N (online), KJ-NA-28724-EN-C (print), KJ-NA-28724-EN-E (ePub)). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/93419> (online), 10.2760/35344 (print), 10.2760/685621 (ePub)

Schütz, T. (2016). WLTP -- On the increased importance of aerodynamics and impact on development procedures. In M. Bargende, H.-C. Reuss, & J. Wiedemann (Eds.), *16. Internationales Stuttgarter Symposium* (pp. 1–17). Springer Fachmedien Wiesbaden.

Sileghem, L., Bosteels, D., May, J., Favre, C., & Verhelst, S. (2014). Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 70–85. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2014.07.008>

Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., Pavlovic, J., & Steven, H. (2015). Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40, 61–75. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2015.07.011>

BÖLÜM X

Plastik Parçaların Üretiminde Tasarım İlkeleri ve Uygulamaları

Tuğçe TEZEL¹
Volkan KOVAN²

1. Giriş

Plastik parçaların üretiminde tasarımın önemi, günümüz mühendislik dünyasında her geçen gün artmaktadır. Plastikler; yüksek esneklik, düşük maliyet, şekil verme kolaylığı ve hafifliği gibi birçok avantaja sahip bir malzeme olarak, üretimde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv, elektronik, tıbbi cihazlar ve tüketici ürünleri gibi farklı endüstrilerde plastik parçalar, işlevsel ve estetik gereksinimleri karşılamak amacıyla tasarlanmaktadır. Plastik parçaların üretimi, tasarım aşamasından

¹ Doç. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya/Türkiye, Orcid 0000-0003-0139-442X, tugcetezel@akdeniz.edu.tr

² Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya/Türkiye, Orcid 0000-0002-0599-525X, kovan@akdeniz.edu.tr

başlayarak, uygun üretim yöntemlerinin seçilmesi, malzeme özelliklerinin optimize edilmesi ve son ürünün kalite standartlarına uygunluğu ile devam etmektedir.

Plastikler, çeşitli kimyasal yapılarından dolayı farklı özellikler sergileyebilirler. Bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretim sürecindeki tasarım kararlarını etkileyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Plastiklerin özellikleri, üretim sırasında kullanılan sıcaklık, basınç, enjeksiyon hızları ve diğer parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, plastiğin türü ve yapısı, son ürünün dayanıklılığı, esnekliği, şeffaflığı, sıcaklık dayanımı gibi çeşitli özelliklerini belirler. Bu nedenle, plastiklerin doğru şekilde seçilmesi, tasarım sürecindeki başarının anahtarıdır.

Plastik parçaların üretimi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın yöntemlerden biri enjeksiyon kalıplamadır. Enjeksiyon kalıplama, sıcak plastik malzemenin bir kalıba enjekte edilerek istenilen şeklin verilmesini sağlar. Bu yöntem, hızlı üretim, düşük maliyet ve yüksek hassasiyet gibi avantajlar sunar. Bunun dışında ekstrüzyon ve eklemeli imalat (3B yazdırma) gibi diğer üretim yöntemleri de bulunmaktadır. Her bir üretim yöntemi, plastik parçaların tasarımında dikkate alınması gereken belirli avantajlar ve kısıtlamalar sunar. Bu nedenle, tasarımcılar, kullanılacak üretim yöntemine bağlı olarak plastik malzemeleri ve süreçleri optimize etmek için dikkatlice seçim yapmalıdır.

Plastik parça üretiminde tasarımın önemi, yalnızca fonksiyonel gereksinimlerin karşılanmasıyla sınırlı değildir. Estetik ve ergonomik faktörler de tasarım sürecinde önemli bir yer

tutmaktadır. Plastik parçalar, genellikle belirli bir görsel ve dokusal kaliteye sahip olmalıdır. Özellikle otomotiv, tüketici elektroniği ve tıbbi cihazlar gibi sektörlerde, estetik açıdan hoş ve kullanıcı dostu tasarımlar büyük önem taşır. Bu bağlamda, plastik parça tasarımında kullanılan malzemelerin yüzey özellikleri, renk seçimleri, dokular ve form faktörleri, son kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyebilir.

Plastik parçaların üretimi sırasında tasarımın temel ilkeleri ve optimizasyonu, genellikle mühendislik bilimleriyle iç içe geçmiş bir süreçtir. Tasarım süreci, malzeme akışının doğru bir şekilde yönetilmesinden, ısı yönetimi ve soğutma tasarımına kadar pek çok faktörü içerir. Ayrıca, plastik parçalarda toleranslar ve boyut kontrolü gibi detaylar da üretim sürecinin verimli ve başarılı olmasında önemli bir rol oynar. Bu noktada, tasarımcılar ve mühendisler, üretim sürecinde karşılaşılan zorlukları aşmak ve en yüksek kaliteyi sağlamak için uygun mühendislik çözümleri sunmalıdır.

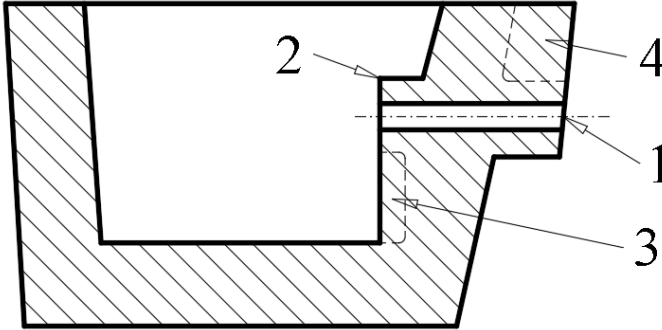
Bu çalışmanın amacı, plastik parçaların üretiminde tasarım ilkelerinin önemini vurgulamak ve bu süreçte dikkate alınması gereken temel unsurları ele almaktır. Plastik malzemelerin doğru seçimi, üretim yöntemlerinin optimize edilmesi ve tasarım aşamasında karşılaşılan zorlukların çözülmesi, kaliteli ve fonksiyonel ürünlerin elde edilmesinde kritik rol oynamaktadır. Çalışma, plastik parça tasarımının her aşamasında malzeme akışının optimizasyonu, ısı yönetimi ve soğutma tasarımı, metallerin plastik parçalara entegrasyonu gibi önemli faktörleri inceleyecek ve bu ilkelerin üretim sürecindeki etkilerini açıklayacaktır. Ayrıca, tasarımda karşılaşılan zorlukların nasıl aşılabileceği ve gelecekteki

gelişmelerin bu alandaki uygulamalara nasıl katkı sağlayabileceği de tartışılacaktır.

2. Plastiklere Uygun Tasarım

2.1. Ters Açılı Kesmeler

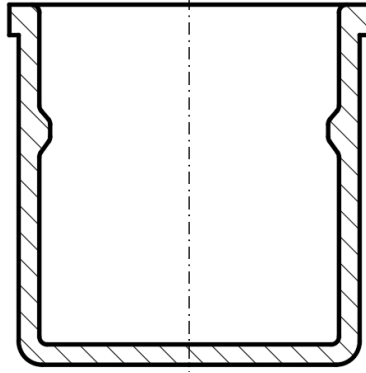
Çoğu zaman, bir nesne öyle bir şekilde tasarlanmalıdır ki, çıkıntılar veya girintiler içerir; bu da imal edilmiş parçanın kalıptan çıkarılmasını imkânsız hale getirir. Buna örnek olarak Şekil 1’de görülen parça verilebilir. Bu parçadaki dış ve iç çıkıntılar (1, 2) kalıptan çıkarılmayı engellediği için, doğrudan kalıptan çıkarılamaz. Ancak bu engel, kalıbın iç ve dış çekirdeklerle (3, 4) donatılmasıyla aşılabılır. Ancak, bu çözüm kalıbın maliyetini gereksiz yere artırır. Çekirdeklerin kullanılması yerine, parçanın yeniden tasarlanmasıyla bu durumdan kaçınılabılır. Çıkıntılar, parçanın tabanına kadar uzatılabilir ve böylece kapak, enjeksiyon işleminden sonra herhangi bir zorluk olmadan çıkarılabilir.



Şekil 1: Örnek bir parça tasarımı (1 Dış tarafta bulunan çıkıntı, 2 İç tarafta bulunan çıkıntı, 3 İç çekirdek, 4 Dış çekirdek).

Aynı prensip, Şekil 2’deki parça için de geçerlidir. Burada parça, içten takviye edilerek bir girinti oluşmuştur; bu da parçanın

kalıptan çıkarılmasını engellemektedir. Bu durumdan kaçınılabilmesi için, duvar kalınlığının dışa doğru esnemesine izin veren bir tasarım yapılması gereklidir. Şekilde görüldüğü üzere, kalıptan çıkarma sırasında, çekirdek ile duvar arasında belirli bir konik kuvvet oluşur. Bu kuvvet nedeniyle, duvar dışarı doğru itilir ve parça kalıptan çıkarılabilir.



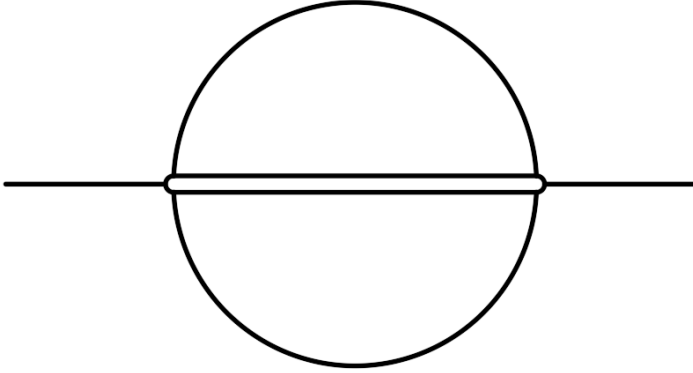
Şekil 84: İç çıkıntı içeren örnek parça.

Bu yöntemin uygulanabilmesi için, yüksek elastikiyet özelliklerine sahip bir plastik malzeme kullanılması ve küçük bir konik açı tercih edilmesi gereklidir. Çünkü, çıkarma kuvveti çok yüksek olursa, imal edilen parça zarar görebilir.

2.2. Kalıp Ayırmada Parça Sınırı

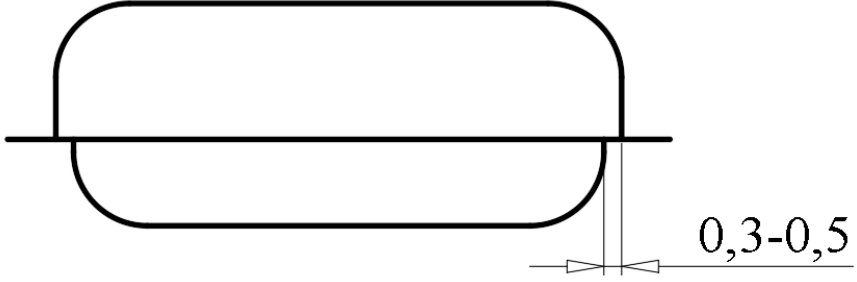
Tıpkı döküm işleminde olduğu gibi, plastik parça şekillendirme işlemi için kullanılan kalıp da en az iki parçadan oluşmalıdır ve bu parçalar birbirinden ayrılabilir olmalıdır. Bu şekilde, genellikle presleme yönüne dik bir konumda olan bir parça sınırı oluşur. Tasarımcıların en önemli görevlerinden biri, bu parça sınırının, şekillendirilen parçada nasıl görüneceğini ve onu nereye

yerleştireceklerini doğru bir şekilde belirlemektir. Çünkü parça sınırında her zaman bir kenar çapağı (burr) oluşur. Bu çapak, kalıptan çıkarken sıyrılan plastik malzemenin bir sonucudur. Bu çapak daha sonra çeşitli araçlarla (bıçaklar, zımparalar, döner keçe diskleri vb.) temizlenir. Bu da parça sınırının ve çıkıntının tasarlanırken, bu temizleme işlemlerinin herhangi bir şekilde şekillendirilen parçayı olumsuz etkilemeyecek şekilde yerleştirilmesi gerektiğini gösterir. Şekil 3’de, parça sınırında bir çapak bulunur. Bu durumda, çapak öyle bir biçimde yerleştirilmiştir ki, kolayca temizlenmesi mümkündür.



Şekil 3: Parça sınırında oluşturulan çapak.

Şekil 4’de ise, parça sınırındaki detayların nasıl tasarlanabileceği gösterilmiştir. Bu tür tasarımlar, çapakların daha düzgün ve temiz bir şekilde çıkartılmasına olanak tanır. Parça sınırındaki çıkıntı, çapakların temizlenmesini kolaylaştıran bir özellik sunar.

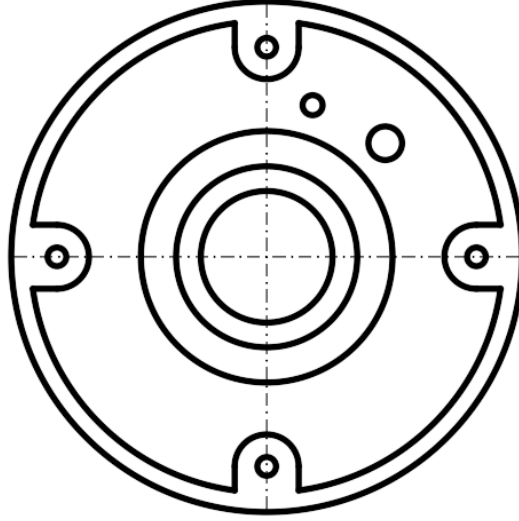


Şekil 4: Parça sınırındaki kaçık örtüşmede oluşturulan çapak.

2.3. İtici Pimler

Şekillendirilmiş parçayı, kalıptan ayırmak için genellikle çıkartma elemanları kullanılır. Bu elemanlar, genellikle dışarıdan kumanda edilen itici pimler şeklinde tasarlanır. Çoğunlukla bu işlem, kalıp yarımalarının açılması ile eş zamanlı olarak gerçekleşir. Ancak pimler, şekillendirilen parçada görünür izler bırakabilir. Bu izler, parça üzerinde belirgin olan çıkartma noktalarıdır. Aynı zamanda, çıkartma elemanları parça üzerinde bir kuvvet uygular ve bu nedenle, çıkartma pimlerinin yerleştirileceği noktaların, belirli bir çıkartma kuvvetini kaldırabilecek şekilde tasarlanması gerekir. Tasarımcı, bu pimlerin nerelere yerleştirileceğini iyi planlamalıdır. Çıkartma elemanlarının bıraktığı izler çoğu zaman istenen işaretlerin, reklam markalarının veya iş numaralarının yerleştirilmesi için de kullanılır. Elbette, bu işaretlerin, en az görünen noktalara yerleştirilmesi hedeflenir. Örneğin, Şekil 5'te görüldüğü gibi, çıkartma izleri, daha sonra deliklerin açılacağı yerlerde bulunur ve burada bir çukur oluşturulur. Bu çukur, işçi tarafından delik açma işlemi için referans olarak kullanılabilir. Ayrıca, diğer çıkartma izleri, iki bağlantı deliği arasındaki bölgelerde de bulunur. Bu izler, parçanın tanımlanması için kullanılır. Önemli bir detay da parçanın

dış kenarının, çıkartma elemanlarının oluşturduğu kuvvetleri daha iyi karşılayabilmesi için bir güçlendirme profiliyle takviye edilmesidir.



Şekil 5: Çıkartma elemanlarının izleri düzenlenmelidir.

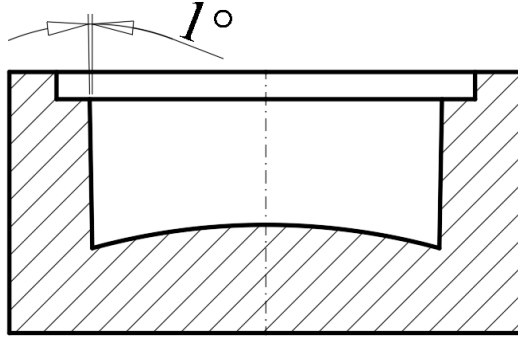
Parça üzerindeki çıkartma işaretlerinin düzenlenmesi, üretim sürecinde önemli bir rol oynar. Bu işaretler, parçaların tanımlanmasına ve işlem sırasına referans olarak kullanılabilir.

2.4. Cidar Kalınlıkları

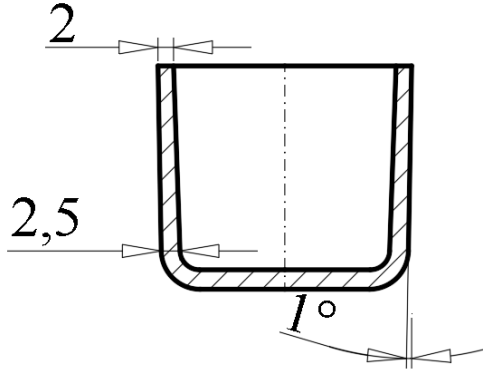
Cidar kalınlıkları, tamamen rastgele seçilemez. Bu değerlerin belirlenmesinde önemli olan faktörler arasında şekillendirilen parçanın kullanım amacı, maruz kalacağı yükler, kullanılan plastik malzemenin özellikleri, kalıp içerisindeki sıcaklık dağılımı ve çok sayıda başka parametre yer alır. Genel olarak, çok katmanlı malzemelerde cidar kalınlıkları, normal plastiklere göre daha ince olabilir. Plastik karışımına dolgu malzemeleri eklendiğinde, bu

durum, malzemenin kalıp şekline uyumunun daha düşük olmasına yol açar.

Termoplastik malzemelerde de farklı zorluklar söz konusu olabilir. Örneğin, içsel büzölmelerden kaynaklanan akış hatları, boşluklar veya parçaların şekil bozukluğu gibi problemlerle karşılaşılabilir. Bu nedenle, cidar kalınlıklarını mümkün olduğunca homojen tutmak önemlidir. Bununla birlikte, belirli bir parça için cidar kalınlığının alt ve üst sınırlarını belirtmek zordur. Bu değerler, parçanın şekline, büyüklüğüne ve özellikle kullanılan plastik türüne bağlı olarak değişir. Ancak genel bir kılavuz olarak, cidar kalınlığı seçimi, malzeme akışının kalitesine büyük ölçüde bağlıdır. Termoset plastikler için duvar kalınlıkları genellikle 1,5 mm ile 10 mm arasında değişirken, termoplastikler için bazı durumlarda 1 mm'nin altına inilebilir. Aşağıdaki şekillerde, cidar kalınlıklarıyla ilgili çeşitli uygulamalar örneklenmiştir. Şekil 6'da taban kısmı, kenar kısmına göre daha kalındır. Bu tür tasarımlar, özellikle yerçekimi etkisiyle malzeme akışının daha iyi dağılmasını sağlar. Şekil 7'deki parçada cidar kalınlığı, yukarıdan aşağıya doğru gidildikçe artar. Bu tür bir eğim, genellikle malzemenin kalıba düzgün şekilde akmasını sağlar.



Şekil 6: Taban kısmı, kenar kısmına göre daha kalın parça örneği.



Şekil 7: Cidar kalınlığı, yukarıdan aşağıya doğru gidildikçe artan parça örneği.

Düz yüzeyler, genellikle deforme olma eğilimindedir. Bu durumu engellemek için, yüzeylere hafif bir eğim verilmesi önerilir. Bu eğim, aynı zamanda parçanın kalıptan daha kolay çıkarılmasını sağlar. Örneğin, Şekil 6'daki gibi bir parçanın eğimi $0,5-1^\circ$ arasında olabilirken, daha küçük parçalar için bu eğim 4° 'ye kadar çıkabilir. Eğim açısının yanı sıra derinlik ve eğim uzunluğu da Tablo 1'den elde edilebilir. Örnek olması için şekilden eğim açısı 4° , derinlik 100

mm, eğim uzunluğu 7,2 mm ve eğim açısı 1°, derinlik 250 mm, eğim uzunluğu 4,3 mm olduğu okunmaktadır.

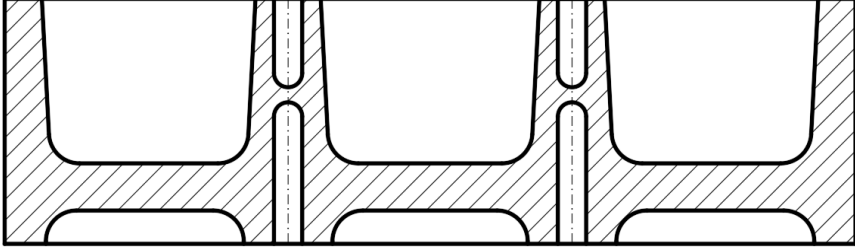
Tablo 1: Yan yüzey eğimlerine ilişkin tavsiye edilen değerler.

Derinlik (mm)	Eğim Açısı (°)						
	0,125	0,25	0,5	1	2	3	4
25	0,06	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,8
50	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	2,4	3,6
75	0,2	0,3	0,6	1,2	2,4	3,6	5,4
100	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	4,8	7,2
125	0,3	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	9,0
150	0,4	0,6	1,2	2,4	4,8	7,2	10,8
175	0,4	0,7	1,4	2,8	5,6	9,6	12,6
200	0,5	0,8	1,6	3,2	6,4	10,8	14,4
225	0,6	0,9	1,8	3,6	7,2	12,0	16,2
250	0,6	1,2	2,2	4,3	8,6	13,0	17,4

Malzemenin akış yönünde cidar kalınlıklarının azalması gerekmektedir. Bu yüzden, genellikle parçalarda taban kısmı en kalın yer olarak tasarlanır, dış kenar ise en ince olur. Bu tasarım, malzemenin tabandan yukarıya doğru düzgün bir şekilde akmasını sağlar (Şekil 6).

Kalıp içerisindeki köşe yönlendirmeleri ve yuvarlatmalar, döküm işlemleriyle benzer şekilde tasarlanmalıdır. Malzeme birikimlerinin önlenmesi için, genellikle kör delikler kullanılır (Şekil 8). Bu parçada, homojen duvar kalınlıkları elde etmek için kör delikler yerleştirilmiştir. Kör delikler, özellikle malzeme kalınlığını dengelemek amacıyla etkili bir yöntemdir. Ayrıca parçada bulunan iyi yuvarlatılmış köşeler, enjeksiyon baskı sürecinde gerekli olan baskı kuvvetini azaltarak parçanın düzgün şekilde üretilebilmesine yardımcı olur. Bu tür tasarım detayları, malzeme akışını dengelemeye yardımcı olur ve homojen duvar kalınlıklarının sağlanmasına olanak verir. Bu öneriler, plastik parça üretiminde

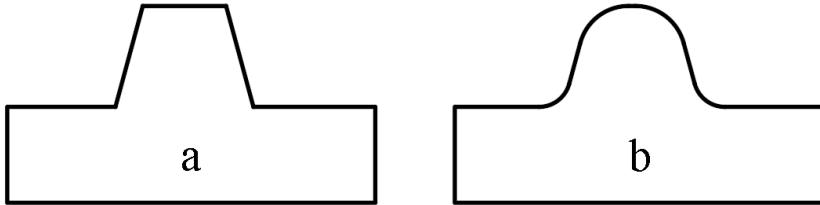
kaliteyi ve verimliliği artırırken, aynı zamanda üretim maliyetlerini düşürmeyi hedefler.



Şekil 8: Kör delikler ve yuvarlatılmış köşeler içeren parça tasarımı.

2.5. Köşeler

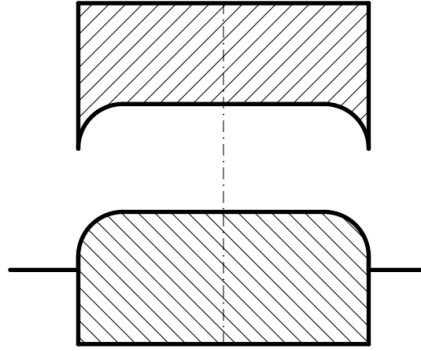
Dış köşeler, parçaların düzgün ve etkili şekilde imal edilebilmesi için dikkatle tasarlanmalıdır. Bu nedenle, dış köşeler son derece düzgün bir şekilde yuvarlatılmalıdır. Şekil 9a, köşe tasarımının uygun olmayan bir örneği göstermektedir. Burada kullanılan kalıp basit bir şekilde üretilebilir, ancak sivri köşelerin plastik akışla tamamen doldurulması zor olabilir. Öte yandan, Şekil 9b'deki köşe tasarımı, akışkanlık açısından ideal kabul edilmektedir çünkü burada akış engellenmeden devam edebilir.



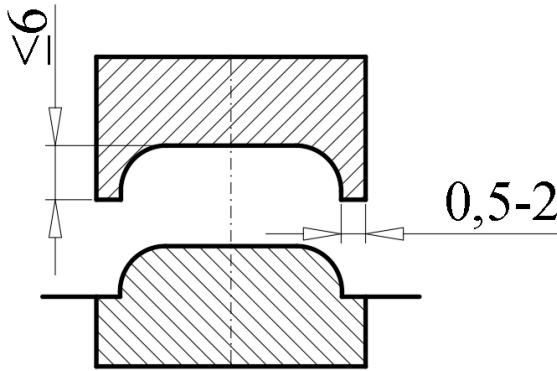
Şekil 9: Köşe tasarımı: (a) Sivri köşe, (b) akışa uygun tasarım.

Bununla birlikte, köşe yuvarlatmalarının kalıp ayırımına doğru geçiş yaptığı durumlarda, Şekil 10'daki tasarım uygun bir tercih

değildir. Çünkü bu tasarımda, üst ve alt kalıp arasında herhangi bir kayma meydana geldiğinde, bir çapak oluşma riski vardır. Bu sorunun önüne geçmek için, Şekil 11'deki tasarım daha uygun olacaktır; bu tasarımda, olası kaymalar hiçbir görünür olumsuz etki yaratmaz. Genel olarak, köşelerin hem dış hem de iç kısımlarının yuvarlatılması gerektiği unutulmamalıdır. Aksi takdirde, plastik akışında tıkanmalar meydana gelir ve bu da yerel gerilmelerin oluşmasına yol açar. Bu yerel gerilmeler, parçanın mekanik dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir.

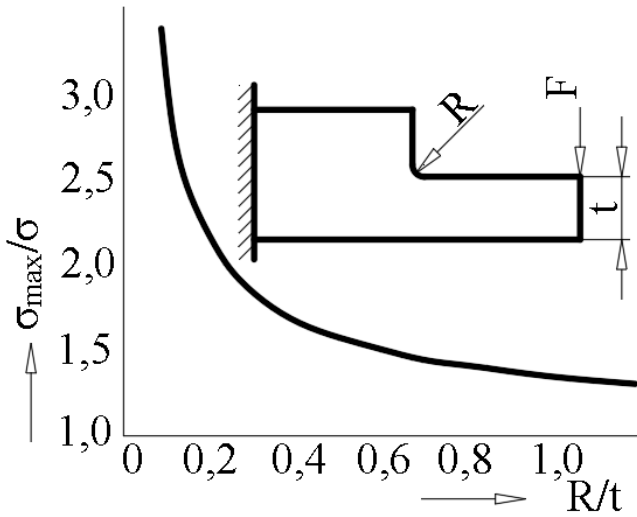


Şekil 10: Kalıp ayrımındaki köşe yuvarlatması.



Şekil 11: Yuvarlatmalar için kaydırılmış kapama tasarımı.

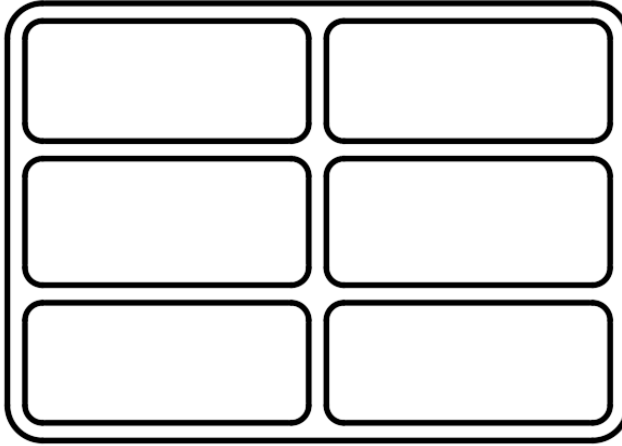
Köşelerdeki gerilmelerin nasıl dağıldığını Şekil 12’de görmek mümkündür. Şekilde görüldüğü gibi, gerilme hatlarının yoğunluğu, yuvarlatma yarıçapı küçüldükçe artar, büyüdüğü ise azalır. Ancak, şekli iyileştirmek için yuvarlatma işleminin aşırıya kaçmasına gerek yoktur; çünkü Şekil 12’deki diyagramda da görülebileceği gibi, yuvarlatma yarıçapı, duvar kalınlığının %75’inden fazlasına arttırıldığında, gerilme dağılımında önemli bir iyileşme görülmez. Bu nedenle, köşe yuvarlamalarında genellikle yuvarlatma yarıçapının duvar kalınlığının %75’i kadar olması yeterli olacaktır. Bu oran, gerilme dağılımını iyileştirmek için yeterli bir etki sağlar ve daha büyük yuvarlatmaların ek bir avantaj sağlamayacağı görülmüştür.



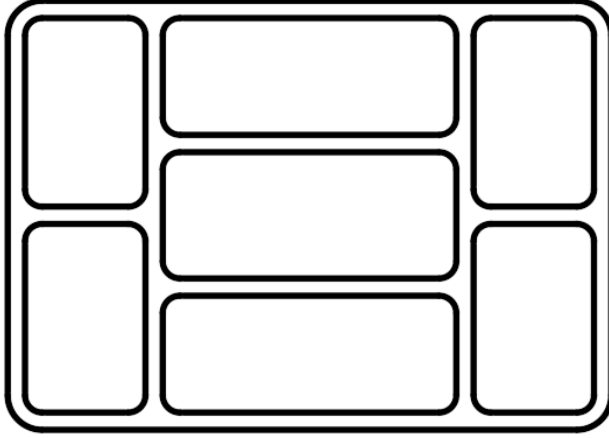
Şekil 12: Yük altındaki köşede gerilme dağılımı.

2.6. Kaburgalar ve Çıkıntılar

Düz yüzeyler ve cidarlar, genellikle kaburgalarla güçlendirilir. Bu kaburgalar yalnızca daha yüksek direnç veya atalet momenti sağlamakla kalmaz, aynı zamanda deforme olmalarını önlemeye de yardımcı olur. Ayrıca, kaburgalar plastik malzemenin daha sonra duvara basılacağı bir depolama alanı olarak işlev görür. Duvarların kaburgalarla güçlendirilmesi genellikle Şekil 13 veya Şekil 14'teki gibi yapılır. Düzenli kaburgalardan (Şekil 13) genellikle kaçınılır. Bunun yerine, bu kaburgaların konumları, Şekil 14'teki gibi kaydırılarak yerleştirilmesi tercih edilir.



Şekil 13: Düzenli kaburgaların tasarımı.

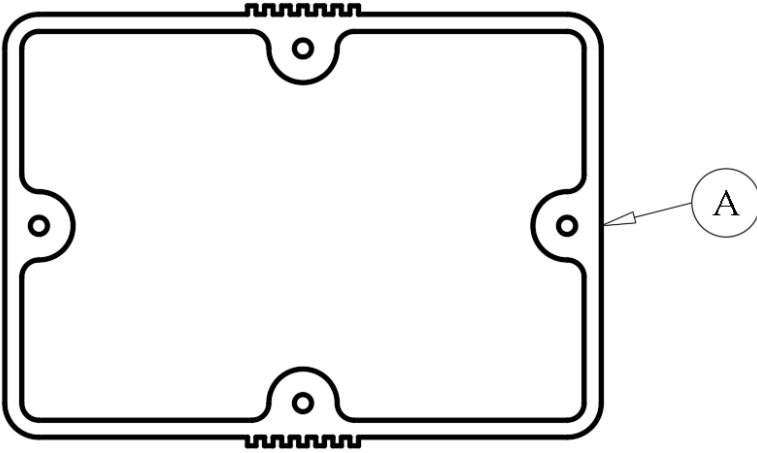


Şekil 14: Kaydırılmış kaburga tasarımı.

Çıkıntılar, genellikle vida veya benzeri elemanların yerleştirilmesi gerektiğinde kullanılır. Bu çıkıntılar, özellikle köşe bölgelerinde yerleştirilmelidir (Şekil 15). Ayrıca, gerilmeleri önlemek ve düzgün bir üretim sağlamak için, bu çıkıntılar, alt yüzeye kadar uzatılmalıdır. Örneğin, kapakların sabitlenmesi için vidalar gerekiyorsa ve bu vidalar ortada yer alacaksa, duvarların güçlendirilmesi gerekir. Bu güçlendirmeler, dikkat çekmeyecek şekilde yapılmalıdır. Aynı zamanda, bu güçlendirmeler, estetik bir unsur olarak da işlev görür (Şekil 16). Bu tür güçlendirmelerin olmadığı bölgelerde ise genellikle hoş olmayan akış hatları oluşur (A).



Şekil 15: Vida ve benzeri çıkıntuların yerleştirilmesi.



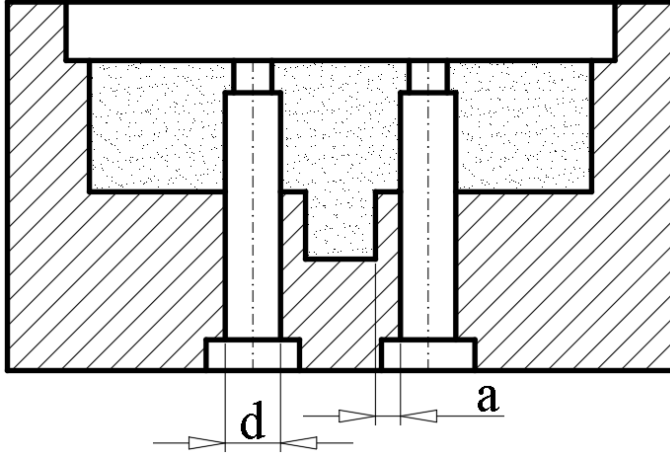
Şekil 16: Vida ve benzeri çıkıntuların yerleştirilmesinde kullanılan güçlendirmeler.

2.7. Delikler ve Açıklıklar

Küçük delikler genellikle helisel matkap ucu ile açılırken, daha büyük açıklıklar ve delikler frezeler ile oluşturulur. Ancak, şekillendirme işlemi yalnızca, bu delikler için gereken çekirdekler

yeterli boyutlarda üretilebiliyorsa ekonomik ve verimli olur. Yeterli mekanik direnç sağlayabilen çekirdekler, özellikle yan kuvvetlere karşı dayanıklıdır. Bu yan kuvvetler, şekil verme işlemlerinde en büyük zorlukları yaratırken, enjeksiyonla şekillendirmede daha küçüktür.

Delik yerleştirme işlemi ile ilgili dikkat edilmesi gereken birkaç önemli nokta vardır. Delikler ve açıklıklar mümkün olduğunca büyük yapılmalıdır. Bu hem üretim verimliliğini artırır hem de malzemenin akışını optimize eder. Kapalı delikler, yani kör delikler her zaman tam deliklere tercih edilmelidir. Bu tür delikler, konik yapılır ve sonradan rahatlıkla temizlenebilir. Ancak, delik imalatı için gerekli çekirdeğin malzeme akışını engelleyeceği de unutulmamalıdır. Çünkü bu engelleme, delik alt yüzeyinin kapalı olduğu durumlarda daha azdır. Yani, malzeme en az bir taraftan akmaya devam edebilir. Bu alt yüzey sonradan gerektiğinde kolayca çıkarılabilir. Dikdörtgen delikler, her zaman alt yüzeyi kapalı şekilde yapılmalıdır ve bu yüzey daha sonra çıkarılmalıdır. Eğer aynı işlemde birden fazla delik veya açıklık oluşturuluyorsa, çatlak oluşumunu engellemek için dikkat edilmelidir. Genellikle çatlaklar zamanla ortaya çıkar.

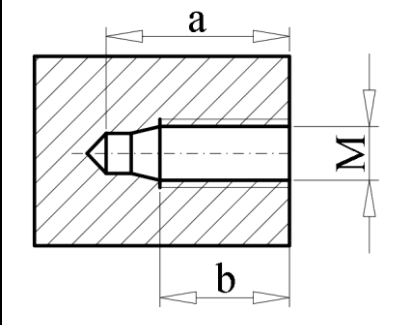


Şekil 17: Delik, dış kenar arasında tavsiye edilen mesafeler.

Eğer delikler veya açıklıklar, güçlendirme kaburgaları veya yerleştirilmiş çıkıntılar yakınında yer alıyorsa, dış kenardan belirli bir mesafenin korunması gereklidir. Örnek olarak, Şekil 17’de gösterilen mesafe, $a=0,35-0,5 d$ olarak belirlenmiştir.

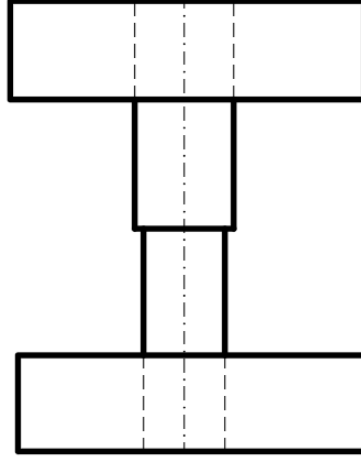
Vida yerleri için kör delikler, Tablo 2’ye göre yapılmalıdır. Çekirdek çapını çok küçük tutmaktan kaçınılmalıdır. Genellikle, matkap çapı, demir ve alüminyum gibi malzemelere göre %25 daha büyük seçilir.

Tablo 2: Vida için kör delik ölçüleri.



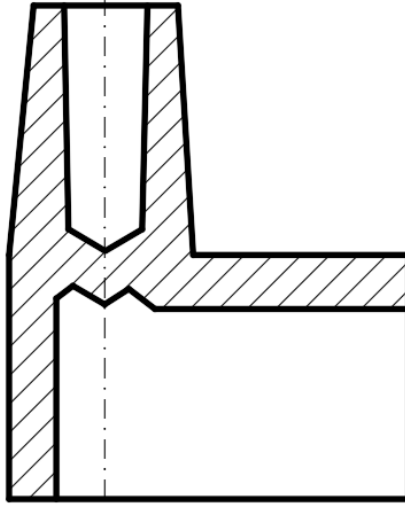
M	a	b
4	15	5
5	18	6
6	23	8
8	27	10
10	32	14
12	38	15
14	42	18
16	46	20
20	58	28
22	60	29
26	65	32
28	70	36

Uzun geçiş delikleri, her iki kalıp yarısında farklı çaplarda yapılmalıdır. Bu, olası yan kaymaları engelleyerek, delikte duvar kalınlığına zarar vermemektedir. Bu uygulama, ıkıntılıların oluşmasını engeller. Genellikle, bu çap farkı 1 mm olacak şekilde yapılır (şekil 18).



şekil 18: Uzun delikler için her iki kalıp yarısına yerleştirilen farklı çaptaki çekirdekler.

Çoğu durumda, delikler yalnızca kısmen şekillendirilir. Bu durumlarda, deliklerin doğru yere yönlendirilmesi için bir konik uç kullanılır. Duvarlar, matkap ile sürtünmeyi azaltmak için konik şeklinde yapılır (şekil 19).



Şekil 19: Şekillendirilmiş kör delikler daha sonra delme işlemi ile tamamlanmalıdır.

2.8. Diş Açma İşlemi

Diş açılmış delikler veya dişli pimler yeterince büyükse ve aynı zamanda büyük miktarda varsa, bu tür parçalar uygun bir plastik kullanılarak şekillendirilebilir. Ancak, diş açma işleminin plastikle yapılması, her zaman en ekonomik seçenek olmayabilir; bu nedenle, gerekli dişlerin kesilmesi veya metal insertlerin (gömme parça) kullanılması daha uygun olabilir. Dişin eğimi ne kadar büyükse, şekillendirme işlemi o kadar kolaylaşır. Bu işlem için kabul edilen minimum eğim değeri 0,8 mm'dir.

Dişli parçaların çıkartılması, genellikle dışarıya doğru itilerek yapılmaz. Bu tür parçalar, kalıptan vida ile çıkarılmalıdır. Bu nedenle, ilgili parçaların uygun bir şekilde şekillendirilmesi gerekmektedir, böylece bir araç (örneğin, tornavida için bir oluk veya iç anahtar için bir delik) parça üzerinde işlem yapabilir. Dişin

giriş ve çıkış bölgeleri de düzgün bir geçişle şekillendirilmelidir. Keskin köşeler ve geçişler mutlaka kaçınılması gereken durumlardır. Bu geçişlerin düzgün bir şekilde yuvarlatılması önemlidir.

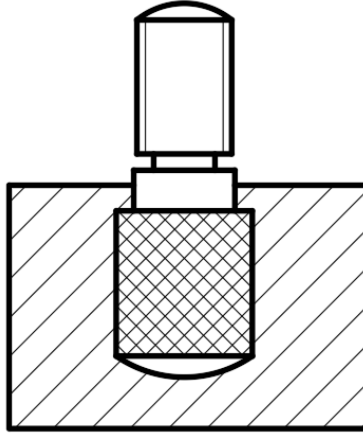
Diş profili olarak genellikle üçgen tercih edilir. Bu profil, mekanik açıdan son derece dayanıklıdır, ancak dolgu maddeleri içeren plastikler için uygun olmayabilir. Dişli parçaların daha kolay çıkarılabilmesi için, kalıbın bir tarafına dişli çekirdek yerleştirilirken, diğer taraf düz bırakılabilir.

Bazen dişler, yüzeyler boyunca kesilir ve dişler daha uzun yapılır. Bu yöntemle, kalıp yalnızca gevşek dişli çekirdeklerle donatılır. Bu çekirdekler, parça kalıptan çıkarılırken, ilk etapta kalıp ile birlikte hareket eder ve daha sonra yanlardan (radyal olarak) çekilebilir. Bu sayede, parçanın manuel olarak çıkarılmasına gerek kalmaz.

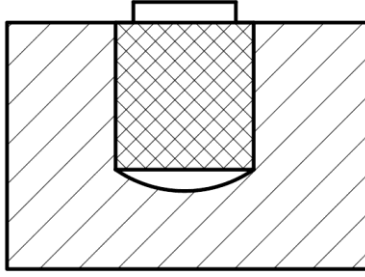
2.9. Metal Insertler

Metal insertler, özellikle elektrik endüstrisinde büyük bir rol oynamaktadır. Ancak, metal insertlerin kullanımı, bazı üretim zorluklarını da beraberinde getirir. Plastik ve metal, genellikle farklı şekilde büzülür ve ısıya karşı farklı tepkiler verirler çünkü her iki malzemenin ısı genleşme katsayıları birbirinden farklıdır. Bununla birlikte, plastik ve metalin birleşimi çok büyük avantajlar sağlar. Özellikle, bu birleşimle, mümkün olan en küçük boyutlarda yapı parçaları üretmek mümkündür. Metal insertlerin yerleştirilmesi, malzeme akışının hiçbir şekilde kesintiye uğramaması sağlanarak yapılmalıdır. Aksi takdirde, parçalar çatlayabilir ve preslenmiş parçaların ömrü oldukça kısa olabilir. Bu nedenle, metal insertlerin kenarları iyi bir şekilde yuvarlatılmalıdır. Ayrıca, aşağıdaki

yönergelere dikkat edilmesi gerekir (Şekil 20-21). Metal insertlerin iyi tutunabilmesi için, bunlar yeterince büyük bir plastik malzeme içine yerleştirilmelidir. Metal insertler, plastik malzemeyi asla delmemelidir. Yani, tamamen plastik malzeme içine gömülmüş olmalıdır. Metal insertler, boydan boya delikleri yerine yalnızca kör deliklere sahip olmalıdır. Eğer boydan boya delikler gerekiyorsa, bu delikler şekillendirmeden sonra açılmalıdır. Aynı durum vidalar için de geçerlidir. Vida delikleri olan metal insertler, plastik malzemenin deliklere girmesini engellemek için uygun bir çıkıntı ile donatılmalıdır. Bu çıkıntılar genellikle plastik parçanın üzerine yerleştirilir.



Şekil 20: Dış vidalı pinli metal insert



Şekil 21: İç vida dişini koruyan yükseltilmiş metal insert

3. Sonuçlar

Plastik parçaların üretiminde tasarım, malzeme seçimi, üretim süreçleri ve işlevsel gereksinimler arasında dikkatli bir denge kurmayı gerektirir. Bu kitap, plastik parçaların tasarımında dikkate alınması gereken temel ilkeleri ve üretim yöntemlerini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Plastiklerin özelliklerinin anlaşılması, doğru malzeme seçiminden doğru üretim yöntemlerine kadar geniş bir yelpazede tasarım süreçlerinin başarısını etkileyen faktörleri incelemektedir.

Plastik parçaların üretiminde, malzeme akışının optimize edilmesi, ısı yönetiminin düzgün sağlanması ve toleransların doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşır. Ayrıca, metallerin plastik parçalara entegrasyonu, genellikle zorluklar yaratmakla birlikte, doğru tasarım ve uygulamalarla büyük avantajlar sağlayabilir. Metal insertlerin yerleştirilmesi, özellikle elektriksel uygulamalarda önemli bir rol oynar ve bu insertlerin yerleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken birçok teknik detay bulunmaktadır. Metal insertler, doğru yerleştirilmedikleri takdirde üretim hatalarına yol açabileceği gibi, yaşam sürelerini de kısaltabilir.

Plastik parçaların tasarımında, kullanılan her malzemenin fiziksel özellikleri ve üretim süreçleri hakkında derin bir anlayış gereklidir. Malzeme seçiminden üretim yöntemlerine kadar tüm aşamalarda doğru kararlar verilmesi, ürünlerin dayanıklılığını, işlevselliğini ve maliyet etkinliğini artırır. Gelecekteki gelişmelerle birlikte, plastik parçaların üretiminde yenilikçi tasarımlar ve teknikler daha da önem kazanacak, bu alandaki bilgiler sürekli olarak genişleyecektir. Sonuç olarak, plastik parça üretiminde tasarım ilkelerinin doğru uygulanması, ürün kalitesini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir.

4. Kaynaklar

Bode, E. (1996). *Konstruktionsatlas* (6. Auflage). Braunschweig: Springer.

Braun-Feldweg, W. (1954). *Normen und Formen industrieller Produktion*. Ravensburg: Otto Maier.

Bucksch, W., Briefs, H. (1953). *Presswerkzeuge in der Kunststofftechnik*. Berlin: Springer-Verlag.

DIN-Taschenbuch 21 (1955). *Kunststoffnormen*. Berlin: Beuth-Vertrieb.

Draeger, H., Wobcken, W. (1960). *Pressen und Spritzpressen*. München: Carl Hanser-Verlag

Sandelowsky, S. (1955). *Bearbeitungswerkzeuge für Kunststoffe*. Ravensburg: Otto Maier.

BÖLÜM XI

Askeri Kara Araçlarında Güvenilirlik ve İdame Ettirilebilirlik Testinin Prototip Aşamasındaki Önemi

Yunus AYZAZSEVEN¹

Giriş

Askerî kara araçları, orduların lojistik destekten muharebe operasyonlarına kadar geniş bir yelpazede görevleri yerine getirmek için kullandığı temel araçlardır. Tarihsel olarak, askeri kara araçlarının evrimi savaş teknolojilerindeki gelişmelerle paralel ilerlemiş, günümüzde modern tanklardan taktik tekerlekli araçlara kadar çeşitli platformlar geliştirilmiştir (Ahmet Faruk, & Neslihan, 2023)

Bu araçların operasyonel başarı için dayanıklılık, güvenilirlik ve kolay bakım süreçlerine sahip olması gereklidir. Özellikle,

Tasarım Kalite Uzmanı, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., Mersin/TÜRKİYE, yunus.ayazseven@koluman.com, ORCID ID: 0009-0009-1908-3989¹

güvenilirlik ve idame ettirilebilirlik testleri, araçların teslimat öncesinde gerçek operasyonel koşullara uygun olup olmadığını değerlendiren önemli süreçlerdir. NATO standartlarına göre bu testler, araçların "zorlu arazi koşulları, yüksek sıcaklık, nem, aşırı yüklenme gibi çevresel stres faktörlerine dayanma kabiliyetini" belirlemek için kritik kabul edilmektedir (NATO Standardization Office, 2022).

Bu makale, özellikle taktik tekerlekli askeri araçların güvenilirlik ve idame ettirilebilirlik testlerine odaklanmakta ve bu testlerin önemini ortaya koymaktadır.

Yöntem

Bir askeri aracın gerçek operasyonel koşullara ne derece uygun olduğunu anlamak için yapılan testler, genellikle farklı yüzeylerde gerçekleştirilen yol testlerini içerir. Bu testlerde, araç, asfalt, çakıl ve arazi yollarında belirli mesafeler boyunca çeşitli yüklenme senaryolarında denir. Test süreçleri boyunca aracın performansı, dayanıklılığı ve titreşim etkilerine maruz kalma derecesi ölçülür.

Özellikle yol testleri, aracın maruz kaldığı titreşim etkilerini anlamada kritik bir rol oynar. Titreşim, askeri araçlarda mekanik bağlantıların gevşemesi, elektronik sistemlerde arızalar ve süspansiyon sisteminde deformasyon gibi sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, titreşim analizi, hem aracın güvenilirliğini hem de idame ettirilebilirliğini değerlendirmede önemli bir kriterdir (Defence Turkey. 2023).

Araç Test Senaryoları

Tablo-1'de görüldüğü üzere, testler dokuz farklı senaryo üzerinden gerçekleştirilmiştir. Her bir senaryoda araç, farklı yükleme durumlarında, üç ayrı yol tipi üzerinde toplamda 30.000 kilometrelik bir mesafede test edilmiştir.

Tablo-1 Araç Test Senaryoları

Senaryolar	Araç Yük Bilgileri	Asfalt (km)	Arazi (km)	Çakıl (km)
Senaryo 1	Araç	900	1200	900
Senaryo 2	Araç + 3000 Kg yük	900	1200	900
Senaryo 3	Araç + 13000 Kg yük	900	1200	900
Senaryo 4	Araç + 23000 Kg yük	900	1200	900
Senaryo 5	Araç + 2000 Kg yük	900	1200	900
Senaryo 6	Araç + 5000 Kg yük	900	1200	900
Senaryo 7	Araç + 15000 Kg yük	900	1200	900
Senaryo 8	Araç + 25000 Kg yük	1800	2400	1800
Senaryo 9	Araç + 4000 Kg yük	900	1200	900
Toplam		9000	12000	9000

Test Edilen Araç ve Koşullar:

Araç Tipi: 8x8 taktik tekerlekli yük taşıma aracı.

Test Süresi ve Koşulları: Araç, toplamda 30.000 km boyunca asfalt, arazi ve çakıl yüzeylerde test edilmiştir.

Yükleme Senaryoları: Araç, boş durumundan maksimum 25.000 kg yüklü hâline kadar dokuz farklı senaryoda denenmiştir.

Örnek Test Bulguları:

Mekanik Bağlantı Problemleri: Araç boş ağırlıkla kullanıldığında süspansiyon sertleşmesi nedeniyle mekanik bağlantılarda gevşemeler ve kırılmalar gözlemlendi.

Titreşim Kaynaklı Arızalar: Kapı içi titreşim ve amortisörlerde yağ kaçağı gibi sorunlar ortaya çıktı.

Yük Durumuna Göre Değişen Arızalar: Daha yüksek yüklerde ise süspansiyon sisteminin dayanıklılığı test edilmiş ve zayıflıklar belirlenmiştir.

MTTR ve MTBF Kavramlarının Önemi

MTTR (Mean Time to Repair) ve MTBF (Mean Time Between Failures), bir sistemin güvenilirliği ve idame ettirilebilirliği açısından kritik iki metriği ifade eder:

MTTR (Ortalama Onarım Süresi): Bir arızanın meydana gelmesinden sonra, bu arızanın giderilmesi için gereken ortalama süredir. MTTR, bakım süreçlerinin etkinliğini ve aracın operasyonel sürekliliğine katkısını belirlemek için önemlidir.

MTBF (Arızalar Arası Ortalama Süre): Bir sistemin iki arıza arasında çalışabildiği ortalama süredir. MTBF, bir aracın dayanıklılık ve güvenilirlik düzeyini ölçmek için kullanılır.

Yol Testlerinin MTTR'ye Katkıları

Yol testleri ve titreşim analizleri, MTTR'nin optimize edilmesine dolaylı ve doğrudan katkılar sağlar:

Hızlı Bakım ve Onarım Gereksinimlerinin Belirlenmesi: Testler sırasında ortaya çıkan mekanik ve elektronik arızalar detaylı bir şekilde analiz edilir. Bu analizler, bakım süreçlerinde hangi araç ve yöntemlerin kullanılabileceğini önceden belirleyerek onarım sürelerini kısaltır. Örneğin, mekanik bağlantıların sık gevşediği tespit edilirse, bakım prosedürlerinde bu bölgelere özel ekipmanların dahil edilmesi önerilebilir.

Modüler Tasarım Geliştirilmesi: Testler sırasında sık arızalanan parçaların modüler tasarımının önemi ortaya çıkar. Modüler tasarım, bir parçanın hızlıca değiştirilmesine olanak tanıyarak MTTR'yi düşürür.

Saha Bakım Simülasyonları: Gerçek operasyonel koşulları simüle eden yol testleri, bakım ekiplerinin belirli arızalara hızlıca müdahale edebilmesi için protokol geliştirmelerine olanak tanır.

Yedek Parça Yönetimi: Sık arızalanan parçaların test sırasında tespit edilmesi, bu parçaların saha stoklarında hazır bulundurulmasını sağlar. Bu da onarım için gereken sürenin minimuma indirilmesine katkıda bulunur.

Güvenilirlik ve İdame Edilebilirlik Testinin MTBF'ye Katkıları

Yol testleri, aracın dayanıklılık ve güvenilirlik düzeyini artırarak MTBF'nin yükseltilmesine yardımcı olur:

Araç üzerindeki titreşim kaynaklı sorunların detaylı analizi, özellikle süspansiyon, mekanik bağlantılar ve elektronik sistemler gibi kritik bileşenlerin dayanıklılığını artırmaya yönelik önlemler

alınmasını sağlar. Bu, arızaların daha seyrek gerçekleşmesine ve MTBF'nin artmasına yol açar.

Yol testleri sırasında belirlenen zayıf noktalar, prototip aşamasında düzeltilerek seri üretimde daha sağlam bir ürün geliştirilmesine olanak tanır. Örneğin, sık sık gevşeyen civataların daha yüksek tork değerlerine göre yeniden tasarlanması veya süspansiyon sisteminde dayanıklılık artırıcı iyileştirmeler yapılması, sistemin genel güvenilirliğini artırır.

Araç bileşenlerinin ekstrem koşullardaki performansını ölçen hızlandırılmış yaşlandırma testleri, araç üzerinde uzun vadede ortaya çıkabilecek zayıflıkları öngörür. Bu da sahada beklenmeyen arızaların önüne geçerek MTBF'yi artırır (<https://vidamms.com/mtbf>).

Yol testleri, askeri araçların MTTR ve MTBF değerlerini optimize etmek için hayati bir rol oynar. Bu testler sayesinde:

- MTTR, hızlı onarım süreçleri ve yedek parça yönetimi sayesinde minimize edilir.
- MTBF, araç bileşenlerinin dayanıklılığını artıracak tasarım iyileştirmeleriyle maksimize edilir.

Güvenilirlik Testi

Güvenilirlik testi, bir askeri aracın arızasız çalışma süresini belirlemek için tasarlanır. Test sürecinde, aracın farklı koşullarda dayanıklılığı ve uzun vadeli kullanım performansı incelenmiştir.

Uygulanan Yöntemler:

Ömür Testi, Araç bileşenlerinin belirli bir kullanım ömrü boyunca dayanıklılığı test edilmiştir. Bu süreçte motor, şanzıman, süspansiyon ve elektronik sistemler gibi kritik parçalar değerlendirilmiştir.

Hızlandırılmış Yaşlandırma Testi, Yüksek sıcaklık, nem ve titreşim gibi koşullarda hızlandırılmış testler uygulanarak aracın ekstrem koşullara dayanıklılığı ölçülmüştür (Aamr-Daya, E., Langlet, T., Benazzouk, A., & Quéneudec, M. 2008.)

Güvenilirlik testleri, prototip aşamasında araç üzerindeki zayıf bileşenlerin belirlenmesini sağlamış ve bu sorunların seri üretim öncesinde giderilmesine imkân tanımıştır. Bu da uzun vadede araçların sahadaki arıza oranını düşürmüştür.

İdame Ettirilebilirlik Testi

İdame ettirilebilirlik testleri, askeri araçların bakım süreçlerinin kolaylığını ve etkinliğini ölçmeyi hedefler. Bakım ve onarım süreçlerinin kısa sürede tamamlanması, operasyonel sürekliliği sağlamak için kritik bir öneme sahiptir (Anadolu.A, 2020).

Bakım Kolaylığı, Parçaların sökölüp takılma süreçleri ve bu süreçlerin zorluk derecesi analiz edilmiştir.

Yedek Parça Yönetimi, Test sırasında sık arıza yapan parçaların sahada bulunabilirliği değerlendirilmiş ve bu parçaların seri üretim öncesinde iyileştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bakım süresi arızaların giderilme süreleri analiz edilmiş ve sürecin hızlandırılması için öneriler geliştirilmiştir.

Güvenilirlik ve İdame Ettirilebilirlik Testlerinde Periyodik Temizlik ve Bakımın Rolü

Askerî araçların güvenilirlik (reliability) ve idame ettirilebilirlik (maintainability) testleri sırasında düzenli temizlik ve bakım faaliyetleri kritik bir öneme sahiptir. Bu faaliyetler, test sürecinin doğruluğunu sağlamak, arızaların kaynağını doğru şekilde tespit etmek ve aracın gerçek operasyonel koşullarda nasıl performans göstereceğini daha iyi anlamak için yapılır.

Periyodik Temizlik ve Bakımın Amaçları

Arıza Tespitinin Kolaylaştırılması:

Araç üzerinde biriken kir, toz, çamur ve diğer dış etkenler, özellikle mekanik parçalar ve elektronik sensörlerin performansını etkileyebilir. Periyodik temizlik, bu etkilerin gerçek arıza mı yoksa dış faktörlerden mi kaynaklandığını ayırt etmeyi kolaylaştırır.

Operasyonel Koşullara Uyum:

Araç, genellikle zorlu koşullarda (çamurlu, tozlu veya su dolu arazilerde) çalıştırıldığından, test sürecinde düzenli temizlik yapılması, operasyonel gerçekliği simüle ederken aşırı birikintilerin sistemlere zarar vermesini önler.

Bileşenlerin Durumunun Gözlemlenmesi:

Temizlik işlemi sırasında, özellikle mekanik bağlantılar, kaynaklı bölgeler, sızdırmazlık elemanları ve sıvı kaçaqları gibi kritik bileşenler detaylı bir şekilde gözlemlenebilir. Bu, arızaların erken tespiti ve kayıt altına alınması için önemlidir.

Doğru Verilerin Sağlanması:

Biriken kir ve artık maddeler, test verilerinin doğruluğunu etkileyebilir. Örneğin, bir sensör üzerindeki toz tabakası yanlış ölçümlere neden olabilir. Düzenli temizlik, verilerin güvenilirliğini artırır.

Periyodik Bakım ve Kontrol Faaliyetleri

Dış Temizlik: Araç gövdesinin, lastiklerin ve şasi altının düzenli olarak temizlenmesi. Bu, özellikle zorlu arazi testlerinde çamur ve taş birikintilerinin mekanik parçalara zarar vermesini önler.

İç Temizlik: Araç kabinindeki elektronik cihazların, kontrol panelinin ve bağlantı noktalarının temizliği yapılır.

Yağlama ve Sıvı Kontrolleri:

Süspansiyon, şanzıman ve hareketli bileşenlerde periyodik yağlama işlemleri yapılır. Motor yağı, hidrolik sıvılar ve soğutma sıvılarının seviyeleri ve durumları kontrol edilir. Test süresince sıvılarda oluşabilecek kirlenmeler ve bu kirlenmelerin performansa etkileri analiz edilir.

Tablo 2 Mekanik Kontrol Noktaları

Cıvata ve bağlantı elemanlarının sıklık kontrolleri yapılır.
Süspansiyon sisteminde herhangi bir gevşeme veya çatlak olup olmadığına bakılır.
Fren, direksiyon ve aks sistemleri kontrol edilir.
Sensörler, kablo bağlantıları ve devrelerin temizliği ve sağamlık kontrolleri yapılır.

Periyodik Temizlik ve Bakımın Güvenilirlik ve İdame Ettirilebilirliğe Katkısı

Güvenilirlik (Reliability):

Periyodik bakım ve temizlik, aracın tüm bileşenlerinin optimum koşullarda çalışmasını sağlayarak test sonuçlarının doğruluğunu artırır. Ayrıca, düzenli kontroller sayesinde arıza ihtimali azaltılır ve MTBF (Arızalar Arası Ortalama Süre) değerleri iyileştirilir.

İdame Ettirilebilirlik (Maintainability):

Bakım sırasında kullanılan araçlar, yöntemler ve süreler analiz edilerek onarım süreçlerinin optimize edilmesine olanak tanır. Örneğin, periyodik bakımlar sırasında sık sık zorluk çıkaran bileşenler tespit edilerek bu bileşenlerin modüler yapıda tasarlanması sağlanabilir. Bu da MTTR (Ortalama Onarım Süresi) değerlerini düşürür.

Örnek bir periyodik bakım ve temizlik sürecinden bahsedecek olursak;

- Şasi, lastik, süspansiyon ve gövde basınçlı su ile temizlenir.
- Motor bölmesi hafif çözücüler ve fırçalarla temizlenir.
- Sensörler ve elektronik elemanlar kuru ve tozsuz hâle getirilir.

yukarıda belirtilen maddeler periyodik bakım ve temizlik süreçlerine örnek olacaktır.

Periyodik temizlik ve bakım, güvenilirlik ve idame ettirilebilirlik testlerinde iki önemli rol oynar:

- Doğru Test Sonuçları Sağlama Araç üzerindeki dış etkilerin test sonuçlarını etkilemesini önler.
- Operasyonel Performans Artışı: Test sırasında tespit edilen zayıf noktalar ve iyileştirmeler sayesinde araç daha dayanıklı ve bakımı kolay bir hâle gelir.

Bu faaliyetler, sadece test sürecinin verimliliğini artırmakla kalmaz; aynı zamanda sahada kullanılacak araçların uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlar.

30.000 Km Yol Sonrası Tekrarlanan Testler ve Kontroller

Araç, uzun süreli testlerin ardından performans, dayanıklılık ve güvenilirlik açısından detaylı olarak yeniden değerlendirilir. 30.000 km yol kat eden bir askeri araç için gerçekleştirilen tekrarlanan testler şunlardır:

- **Araç Kabini Yağmur Testi**

Amaç, Araç kabininde su sızdırmazlık özelliklerinin korunup korunmadığını kontrol etmek.

Yöntem:

Araç, yapay yağmur ortamında belirli bir süre test edilir. Kapı contaları, pencere kenarları, tavan ve diğer olası sızdırmazlık noktaları gözlemlenir. Sızıntı tespit edilirse, kaynaklarının ve etkilerinin analizi yapılır.

- **%60 Diklikte Zorlu Eğim Tırmanma Testi**

Amaç: Motor performansını, tork üretimini ve aracın ağır yük altındaki tırmanma kapasitesini ölçmek.

Yöntem:

Araç, farklı ağırlık senaryoları altında (boş ve maksimum yüklü) %60 eğimli bir rampada test edilir. Test sırasında motor gücü, çekiş sistemi performansı ve lastik tutuşu analiz edilir. Isınma, güç kaybı veya mekanik zorlanma belirtileri gözlemlenir.

- **Fren Sistemi Testi**

Amaç, Frenleme performansının, özellikle yüksek hız ve ağır yük altındaki etkinliğini ölçmek.

Yöntem:

Araç, asfalt, çakıl ve arazi koşullarında farklı hızlardan ani duruş testlerine tabi tutulur. Fren mesafesi, balata aşınması ve fren sisteminde oluşan ısınma değerlendirilir. 4. Süspansiyon

- **Elektrik ve Elektronik Sistem Testleri**

Amaç, Araç üzerindeki sensörler, ışıklandırma ve diğer elektronik sistemlerin doğru çalıştığını doğrulamak.

Yöntem:

Araç çalışır durumda iken tüm elektronik sistemler tek tek test edilir. Kablo bağlantıları, voltaj değerleri ve sensör doğruluğu kontrol edilir.

- **Lastik ve Şasi Kontrolü**

Amaç, Lastiklerin ve şasi bileşenlerinin dayanıklılığını analiz etmek.

Yöntem:

Lastiklerde aşınma oranı ve yapısal deformasyon olup olmadığı gözlemlenir. Şasi üzerinde çatlak, korozyon veya gevşemiş bağlantı elemanları kontrol edilir.

- **Motor ve Şanzıman Performans Testi**

Amaç, Motorun tork üretimi, yakıt verimliliği ve şanzıman sisteminin sorunsuz çalıştığını değerlendirmek.

Yöntem:

Motor testi, yüksek yük altındaki performans ve yakıt tüketim analizi ile yapılır. Şanzımanın vites geçişleri, sürtünme kayıpları ve akıcılığı ölçülür.

- **Yük Denge ve Ağırlık Dağılım Testi**

Amaç, Araç yük taşıma kapasitesinin, ağırlık dağılımına göre stabilitesinin değerlendirilmesi.

Yöntem:

Araç farklı ağırlıklarla dolu iken sürüş ve manevra testlerine tabi tutulur. Aşırı yükleme durumlarında aracın kontrol kabiliyeti analiz edilir.

Sonuç ve Öneriler

Güvenilirlik ve idame ettirilebilirlik testleri, askeri kara araçlarının operasyonel başarısında ve toplam maliyet etkinliğinde kritik bir rol oynar. Bu çalışmada, özellikle 8x8 taktik tekerlekli bir yük taşıma aracı üzerinden yürütülen testlerin sonuçları, bu testlerin hem teslimat öncesi kalite güvencesi sağlama hem de sahadaki

operasyonel etkinliği artırma açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Test sürecinde, aracın farklı yük ve yol koşullarındaki performansı değerlendirilmiş, mekanik ve elektronik arızalar detaylı bir şekilde kayıt altına alınmıştır. Örneğin, araç boş yk ile çalıştırıldığında meydana gelen titreşim kaynaklı arızalar, özellikle süspansiyon sistemi ve mekanik bağlantı elemanlarında zayıflıkları ortaya çıkarmıştır. Yüklü durumlarda ise araç, farklı tipte arızalar sergilemiş, bu durum özellikle yüksek ağırlık altında bazı bileşenlerin dayanıklılığının artırılması gerektiğini göstermiştir (Gündoğdu, 2007.)

Bu tür testler, sadece bir aracın sahadaki dayanıklılığını artırmakla kalmaz; aynı zamanda seri üretim sürecinde gerekli iyileştirmeleri yapma fırsatı sunar. Örneğin, prototip süreçlerinde tespit edilen mekanik bağlantı gevşemeleri, cıvata tork kontrolleri gibi süreçlerin standart hâline getirilmesini sağlamış, böylece sonraki üretim aşamalarında bu tür sorunların tekrar etmesi nlenmiştir. Benzer şekilde, kaynaklı bölgelerde görülen çatlama ve yetersiz kaynak problemleri, kaynak tekniklerinin gözden geçirilmesi ve iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Bu testlerin ekonomik etkisi de oldukça önemlidir. Teslimat ncesi yapılan bu kapsamlı testler, sahada karşılaşılabilecek büyük arızaların ve bakım süreçlerinin maliyetini önemli lde azaltır. Örneğin, 50 aralık bir filo teslim edildikten sonra tespit edilecek yaygın bir arıza, hem lojistik maliyetleri artıracak hem de operasyonel aksamalara neden olacaktır. Ancak prototip aşamasında

yapılan bu testlerle, seri üretim öncesinde gerekli iyileştirmeler gerçekleştirilerek bu tür maliyetlerin önüne geçilebilmektedir.

Operasyonel açıdan bakıldığında, güvenilirlik testleri aracın sahada arızasız görev yapma süresini artırırken, idame ettirilebilirlik testleri bakım süreçlerinin hızlandırılmasını ve optimize edilmesini sağlar. Bu da ordular için lojistik yükü azaltır, sahada daha fazla aracın aktif olarak görev yapmasına olanak tanır ve birliklerin operasyonel kabiliyetlerini artırır

Tork Kontrolleri: Cıvata gevşemelerini önlemek için tork kontrollerinin sıklaştırılması.

Kaynak Kontrolleri: Kaynak bölgelerinin çatlamalara karşı önceden test edilmesi.

Sıvı Bakımları: Test öncesinde tüm sıvıların yenilenmesi, sıvı ömürlerinin belirlenmesi ve arıza risklerinin azaltılması.

Bu kontroller, aracın 30.000 km sonrası performansını tam olarak değerlendirmeye ve uzun vadeli dayanıklılık için gerekli iyileştirmeleri belirlemeye olanak sağlar. Testlerin sonuçları, aracın seri üretime hazır olup olmadığını ve hangi bileşenlerde ek geliştirme gerektiğini ortaya koyar.

Sonuç olarak, güvenilirlik ve idame ettirilebilirlik testleri, askeri kara araçlarının geliştirilmesi sürecinde vazgeçilmez bir unsurdur. Bu testlerin, sahada görev yapacak araçların performansını optimize etmek, uzun vadeli maliyetleri düşürmek ve operasyonel güvenliği artırmak gibi birçok avantajı vardır. Gelecekte, bu tür testlerin daha gelişmiş yöntemlerle ve dijital simülasyonlarla desteklenmesi, hem test süreçlerini daha verimli hâle getirecek hem

de araçların sahada üstün performans göstermesine katkı sağlayacaktır. Bu nedenle, askeri araç üreticilerinin bu testlere daha fazla kaynak ayırması ve bu alanda inovatif çözümler geliştirmesi hayati önem taşımaktadır.

Kaynakça

Ahmet Faruk, &Neslihan, (2023) Askeri Operasyonlarda Zırhlı Araçların Seçimi: Karar Verme Sürecinde Kullanılabilecek Analitik Yaklaşımlar”, Uluslararası Türk Dünyası Araştırmaları Dergisi, (6/3), 35-72.

Gündoğdu, Ö., 2007. Optimal Seat and Suspension Design for a Quarter Car with Driver Model Using Genetic Algorithms. Int. J. Ind. Ergon. 37, 327–332.

Defence Turkey. (2023). *Military Vehicle Reliability and Testing Standards*.

Hodges, A. (2016). *Military Land Vehicles: History and Development*.

Anadolu.A. (2020). *Impact of Reliability Testing on Modern Armored Vehicles*.

Aamr-Daya, E., Langlet, T., Benazzouk, A., ve Quéneudec, M. 2008. Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: Physico-mechanical properties. Cement & Concrete Composites, 30: 957–963.

NATO Standardization Office. (2022). *Operational Testing of Military Equipment*.

K. Brown. (2020). *Enhancing Military Vehicle Durability through Advanced Testing*.

<https://vidamms.com/mtbf>

BÖLÜM XII

Seryum ve Lantan Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozitlerin Eriyik Akış İndekslerinin Analizi

Yılmaz KISMET¹
Çağdaş GÜNEŞ²

Giriş

Termoplastikler, geleneksel üretim modellerinden uzaklaşarak döngüsel bir ekonomiyi destekleme yetenekleri ile her geçen gün ilgi kazanmaktadır. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan termosetlerin aksine termoplastik malzemeler, geri dönüştürülebilirlik sunarak çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği teşvik etmektedir (Mandolfino ve ark, 2024).

¹ Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3145-6214, ykismet@munzur.edu.tr

² Doktora Öğrencisi, Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları Anabilim Dalı, Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4040-5614, cgunes@munzur.edu.tr

Üretimde yaygın olarak kullanılan termoplastikler, farklı mekanik, kimyasal ve termal özellikler göstermekte olup ihtiyacı karşılayacak nitelikte seçim şansı vermektedir. Yüksek darbe direnci, sertliği ve mukavemeti ile bilinen yaygın olarak kullanılan bir mühendislik termoplastığı olan Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) bu özellikleri ile daha çok mekanik amaçlarla üretime dahil edilmektedir (Doner ve ark, 2023). Polimetil Metakrilat (PMMA), mikro akışkan cihazlar, biyomedikal sensörler ve optik bileşenler dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda saydamlığı, işlenebilirliği ve uyarlanabilirliği nedeniyle yaygın kullanılan polimerlerden biridir (Biswas ve ark, 2024). Polistiren (PS), dünyada en yaygın kullanılan sentetik plastik malzemelerdendir ve iyi mekanik özellikler, boyut kararlılığı, elektriksel yalıtım özellikleri, korozyon önleyici özellikleri, şeffaflık ve kolay işlenebilirlik özellikleri sunmaktadır (Khatun ve ark, 2023).

Termoplastik esaslı kompozit malzemelerde dolgu ve bağlayıcı maddelerin kullanımı malzeme özelliklerine olan katkısı ile araştırma konusudur. [Matris malzemelerinin fiziksel özelliklerini ve işlevselliklerini artırmak için, lifler, dolgu parçacıkları](#) veya bağlayıcı malzemeler kullanılarak [polimer matrisli kompozitler](#) elde edilmektedir (García ve ark, 2021). Nadir Toprak Elementleri (NTE), yüksek teknoloji ve günlük tüketici ürünlerinin önemli bir parçası olan 14 kritik mineral hammaddesinden biri olarak kabul edilmiştir. NTE'lere olan talep, yüksek performanslı mıknatıslar, şarj edilebilir piller ve düşük enerjili floresan lambalar gibi yüksek teknoloji ve sürdürülebilir teknolojilerde kullanıldıkları için son yıllarda hızla artmıştır (Artiushenko ve ark, 2023). Benzersiz özellikleri nedeniyle, NTE'ler enerji verimliliğinin

iyileştirilmesine, zararlı emisyonların azaltılmasına ve malzemelerin performansının artırılmasına önemli bir katkıda bulunur. Ayrıca mikro yapıyı etkili bir şekilde kontrol edebilir ve malzemelerin kalitesini ve performansını iyileştirebilir (Xiang ve ark, 2024).

Kompozit malzemelerde kullanılan dolgu maddeleri ile ürünlerde elde edilen üstün özelliklerin yanı sıra sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm gibi çevresel faktörlerde de katkı sağlanabilmektedir. Toz boyalar, reçine, sertleştirici, pigment, dolgu maddesi ve katkı maddelerinden meydana gelmektedir. Toz boyalarda reçine olarak termoplastik ve termoset polimerler kullanılır ve reçine malzemesinin adları ile adlandırılırlar (Du ve ark., 2016),

Toz kaplama işleminin temel avantajlarından biri, iş parçasına yapışmayan tüm aşırı püskürtülmüş malzemeyi toplayıp geri kazanılmış toz olarak geri dönüştürme potansiyelidir. Ancak aşırı püskürtülmüş tozların geri kazanılmasıyla tozun akış özellikleri her zaman bozulma eğilimindedir ve bu da geri kazanılmış tozun işlenmesini ve uygulanmasını daha zor hale getirir (Fu ve ark. 2011). Bu nedenle oluşan toz boya atıkları genellikle bertaraf edilmektedir. Bertaraf işleminin dışında bir de atıkların su ve alkol kullanılarak hidrolize edilmesi işlemi uygulanmaktadır. Hidroliz işlemi sonrası atıkların metal yüzeye yapışma özelliği giderilerek yüksek sıcaklıklarda çalışma özelliği kazandırılmaktadır. Bu şekilde toz boya atıkları dolgu maddesi olarak kullanılabilir (Kısmet ve ark., 2021).

Bu çalışmada hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atıkları, polioksümetilen (POM) ve nadir toprak elementleri ile bir takviye malzemesi hazırlanmış ve bu takviye malzemesi ağırlıkça farklı

oranlarda ABS, PMMA ve PS matrislerinde dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulan karışımların eriyik akış indeksleri ve yoğunluklarındaki değişimler tespit edilerek grafiklerle ortaya konmuştur.

Araştırma ve Bulgular

Bu çalışmada termoplastik malzemelerden İneos Styrolution firmasına ait 1007082 ürün kodu ile ABS, Solarene firmasına ait GPPS G-144 ürün kodu ile PMMA, Dongguan Liangsu Masterbatch firmasına ait olan LSM R6109 ürün kodu ile PS matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Dolgu maddesi olarak, Çin menşeli CNOOC Tianye markasına ait POM malzemesi, epoksi, hibrit (epoksi/polyester) poliüretan sistemlerine ait hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atıkları ve bağlayıcı ajan olarak %90 üzerinde saflıkta nadir toprak elementi olan oksit formda lantan ve seryum dolgu malzemesine eklenmiştir. POM çözücü olarak ise sentetik tiner kullanılmıştır.

Öncelikle 350 gr POM granül halde hacimce 1/1 oranında sentetik tiner ile “MTOPS MS300HS” ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda yaklaşık 170 °C ısıtılarak jel kıvamına getirilmiş ve sentetik tiner çözeltiden uzaklaşmaya kadar çözelti ısıtmaya devam edilmiştir. Visköz haldeki POM malzemesine 150 gr hidrolize toz boya atığı ilave edilerek karışım homojen hale gelene kadar karıştırılmış ve karışım 40 °C’ de 24 saat etüvde bekletilerek nemi alınmıştır. Daha sonra kırıcıdan geçirilerek 2-3 mm büyüklüğünde granüller elde edilmiştir. Elde edilen bu ilk ürün dolgu malzemesi-1 olarak adlandırılmıştır.

Daha sonra lantan ve seryum NTE'lerin her birinden 3'er gram saf suda çözümlenerek çözeltiler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözeltilerin içerisine 147'şer gram toz boya atığı ilave edilmiş ve çözeltiler manyetik karıştırıcıda sıcaklığı kademeli olarak 100 °C'ye kadar yükseltilerek karıştırılmıştır. Bu sayede toz boya atığı sulu çözelti içerisinde hidrolize edilmiş ve aynı zamanda nadir toprak elementi ile homojen birer karışım elde edilmiştir. Çözelti içerisindeki su buharlaşana kadar 100 °C'de karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Çözeltilere etüvde 24 saat boyunca 40 °C ısıtılarak kurutma işlemi yapılmış ve saf su çözeltilerden tamamen uzaklaştırılmıştır.

Elde edilen toz boya atığı ve NTE karışımı ilk dolgu malzemesinde gerçekleştirildiği gibi POM malzemesine ilave edilerek ikinci ve üçüncü dolgu maddeleri elde edilmiştir. Elde edilen dolgu malzemelerine ait içerikler oransal olarak Tablo 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Termoplastiklerde kullanılan dolgu maddelerinin içerikleri

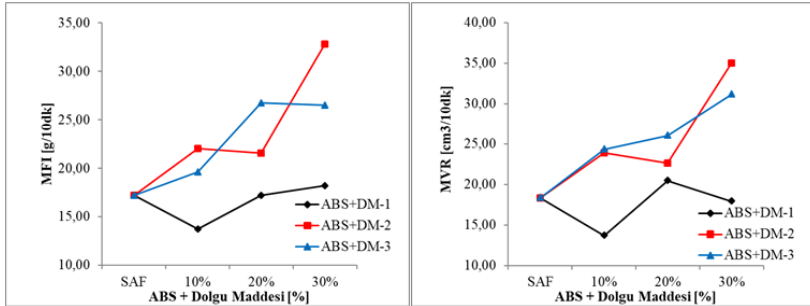
Dolgu Maddesi	Dolgu Maddesi İçeriği Ağırlıkça [%]		
Dolgu Maddesi -1 (DM-1)	%70 POM	%30 Hidrolize Toz Boya Atığı	
Dolgu Maddesi -2 (DM-2)	%70 POM	%29,4 Hidrolize Toz Boya Atığı	%0,6 Lantan
Dolgu Maddesi -3 (DM-3)	%70 POM	%29,4 Hidrolize Toz Boya Atığı	%0,6 Seryum

Elde edilen bu dolgu maddeleri ABS, PMMA ve PS ile ayrı ayrı ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında karıştırılarak karışımların Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Polimer Teknolojileri Laboratuvarında bulunan "JPT

EQUIPMANT-XRL-400A” marka model cihaz ile eriyik akış analizleri gerçekleştirilmiştir. ISO 1133 standartlarına uygun olarak ABS eriyik akış analizi için 220 °C sıcaklık ve 10,00 kg ağırlık, PMMA için 230 °C sıcaklık ve 3,80 kg ağırlık ve PS için 200 °C sıcaklık ve 5,00 kg ağırlık kullanılmıştır (Kısmet, 2015). Deneylede ön yüklemeye ağırlığı 0,325 gram uygulanmıştır.

Akışkan haldeki malzemeler cihazın meme kısmından 10 saniyede bir otomatik olarak kesilmiş ve elde edilen numuneler tartılarak ortalama ağırlıkları hesaplanmıştır. Ortalama ağırlık değerleri cihaza girilerek her bir karışıma ait kütsel ve hacimsel akış indeks değeri ve yoğunluk değeri bulunmuştur.

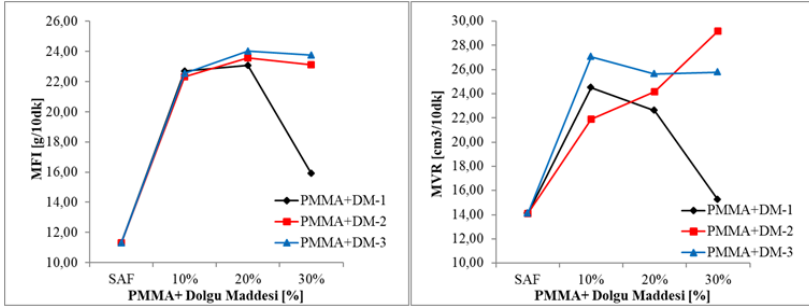
Yapılan deneyler ile matris malzemesi olarak kullanılan ABS, PMMA ve PS malzemeleri ile elde edilen dolgu maddelerinin farklı oranlarda karıştırılarak karışımların kütsel ve hacimsel akış indeks sonuçları Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’te grafikler halinde gösterilmiştir.



Şekil 1. ABS’in kütsel ve hacimsel eriyik akış indislerinin NTE ve hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağı olarak değışımi.

ABS, PMMA ve PS malzemelerinin farklı dolgu maddeleri ile farklı oranda karışımlarına bağlı olarak elde edilen kütleli eriyik akış indekslerindeki değişim Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

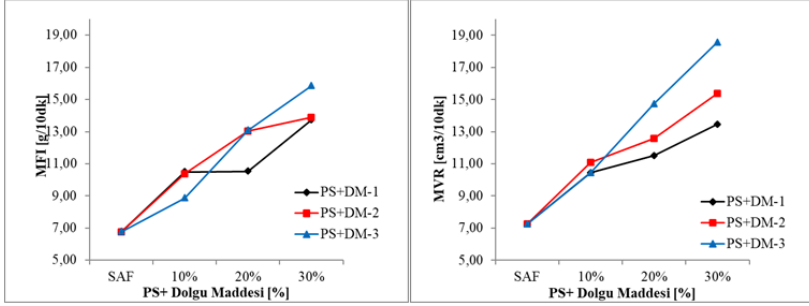
DM-1 dolgu maddesinin ABS matrisine %30 oranına kadar ilavesinin eriyik akış indeks değerlerinde 17,22 g/10 dk den 18,18 g/10 dk değerine kadar yükselttiği görülmüştür. Lantan ve seryum emdirilmiş DM-2 ve DM-3 dolgu maddelerinin ABS matrisine %30 oranına kadar ilavesinin ise eriyik akış indeks değerlerini belirgin şekilde 17,22 g/10 dk' den sırası ile 32,82 g/10 dk ve 26,76 g/10 dk değerine kadar yükselttiği görülmüştür.



Şekil 2. PMMA'nın kütleli ve hacimsel eriyik akış indekslerinin NTE ve hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağlı olarak değişimi.

PMMA matrisine DM-1 dolgu maddesinin %20 oranında ilavesine kadar 11,30 g/10 dk değerinden 23,06 g/10dk değerine ulaşıldığı fakat daha sonra dolgu oranı artırılarak %30 oranında ilavesi ile 15,92 g/10 dk değerine gerilediği görülmüştür. DM-2 ve DM-3 dolgularının %20 oranında ilavesine kadar sırası ile 17,22 g/10 dk den 23,56 g/10 dk ve 24,04 g/10 dk değerlerine ulaşıldığı,

dolgu oranı artırılarak %30 oranında ilavesi ile eriyik akış değerlerinde büyük bir değişim olmadığı görülmüştür.



Şekil 3. PS' nin kütsel ve hacimsel eriyik akış indislerinin NTE ve hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağı olarak değişimi.

PS matrisine her üç dolgu maddesinin %30 oranına kadar ilavesinin eriyik akış değerlerinde belirgin bir yükseliş sağladığı görülmüştür. Özellikle seryum emdirilmiş DM-2 dolgu maddesinin PS matrisine %30 oranına kadar ilavesinin eriyik akış indeks değerlerinde 6,78 g/10 dk den 15,84 g/10 dk değerine kadar yükselttiği görülmüştür.

Şekil 1'de ABS matrisine DM-1 dolgu maddesinin %30 oranına kadar ilavesinin hacimsel eriyik akış indeks değerlerinde belirgin bir değişim göstermediği görülmüştür. Fakat lantan ve seryum emdirilmiş DM-2 ve DM-3 dolgu maddelerinin ABS matrisine %30 oranına kadar ilavesinin eriyik akış indeks değerlerini belirgin şekilde 18,36 cm³/10 dk' den sırası ile 35,01 cm³/10 dk ve 31,17 cm³/10 dk değerine kadar yükselttiği görülmüştür.

PMMA matrisine her üç dolgu maddesinin %10 oranına kadar ilavesinin Şekil 2'de görüldüğü gibi hacimsel eriyik akış indeks

değerlerinde belirgin bir yükseliş gösterdiği, dolgu oranı arttıkça DM-1 ve DM-3 dolgulu karışımlarda düşüş görüldüğü fakat DM-2 dolgu maddesinin %30 oranına kadar ilavesinin hacimsel eriyik akış indeks değerlerinde belirgin olarak 14,09 cm³/10 dk' den 29,17 cm³/10 dk değerine kadar yükselttiği görülmüştür.

Şekil 3'te PS matrisli karışımlarda ise her üç dolgu maddesinin %30 oranına kadar ilavesi ile hacimsel eriyik akış indeks değerlerinde belirgin bir yükseliş görülmüştür. Özellikle seryum esaslı DM-3 dolgu maddesinin %30 oranına kadar ilavesinin hacimsel eriyik akış indeks değerlerinde 7,25 cm³/10dk' den 18,57 cm³/10 dk değerine kadar yükselttiği görülmüştür.

Sonuçlar

Bu çalışmada Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS), Polimetil Metakrilat (PMMA) ve Polistiren (PS) olmak üzere üç farklı termoplastiğin, nadir toprak elementi (NTE) içerikli dolgu maddelerinin takviyesi ile eriyik akış indekslerindeki değişimler incelenmiştir.

Üç farklı dolgu maddesi geliştirilmiş olup bütün dolgu maddelerinin ana malzemesi geri dönüştürülmüş toz boya atığı olup, hazırlanan dolgu maddelerinden DM-1 dolgu maddesi NTE siz geliştirilirken DM-2 ve DM-3 dolgu maddelerinde oksit formdaki lantan ve seryum NTE' leri bağlayıcı ajan olarak ilave edilmiştir. Bu şekilde lantan ve seryum NTE' lerin ABS, PMMA ve PS matrisli karışımların kütleli ve hacimsel eriyik değerlerine olan etkisi tespit edilebilmiştir.

Geliştirilen her üç dolgu maddesi ayrı ayrı ABS, PMMA ve PS ile ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında mekanik olarak

karıştırılarak uygun sıcaklık ve ağırlık etkisi altında eriyik akış indeks değerlerinin belirlenebilmesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. NTE takviyeli dolgu maddeleri ile ABS, PMMA ve PS' nin NTE içermeyen dolgu maddesine göre özellikle ağırlıkça %20 ve üzeri oranlarda ilavelerinin akışkanlıklarında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Kaynaklar

Mandolino, C., Cassettari, L., Pizzorni, M., Benvenuto, L., & Lertora, E.A., (2024). Comprehensive Techno-Economic and Environmental Comparison of Plasma-Treated Adhesive-Bonded. *Thermoplastic Composites*. Ssrn 4922226. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100268>

Doner, S., Paswan, R., & Das, S. (2023). The influence of metallic particulate inclusions on the mechanical and thermal performance of 3D printable acrylonitrile-butadiene-styrene/thermoplastic polyurethane fused polymer blends. *Materials Today Communications*, 35, 106111. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106111>

Biswas, S., Sen, A., Pramanik, D., Roy, N., Biswas, R., & Kuar, A. S. (2024). A parametric evaluation of fiber laser micro-channelling performance on thick PMMA in water medium. *Materials Science and Engineering*. B, 311, 117776. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117776>

Khatun, M. A., Sultana, S., Kabir, M. S., Hossain, M. S., Nur, H. P., & Chowdhury, A. S. (2023). Preparation and characterization of short date palm mat (DPM) fiber reinforced polystyrene composites: Effect of gamma radiation. *Heliyon*, 9(11). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21373>

García, E., Louvier-Hernández, J. F., Cervantes-Vallejo, F. J., Flores-Martínez, M., Hernández, R., Alcaraz-Caracheo, L. A., & Hernández-Navarro, C. (2021). Mechanical, dynamic and tribological characterization of HDPE/peanut shell composites.

Polymer Testing, 98, 107075. Doi:
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107075>

Artiushenko, O., da Silva, R. F., & Zaitsev, V. (2023). Recent advances in functional materials for rare earth recovery: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 37, e00681. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00681>

Xiang, D., Wang, D., Zheng, T., & Chen, Y. (2024). Effects of rare earths on microstructure and wear resistance in metal additive manufacturing: A review. *Coatings*, 14(1), 139. Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14010139>

Du, Z., Wen, S., Wang, J., Yin, C., Yu, D., & Luo, J. (2016). The review of powder coatings. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4(3), 54-59. Doi: <https://doi.org/10.4236/msce.2016.43007>

Fu, J., Krantz, M., Zhang, H., Zhu, J., Kuo, H., Wang, Y. M., & Lis, K. (2011). Investigation of the recyclability of powder coatings. *Powder Technology*, 211(1), 38-45. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.03.016>

Kısmet, Y., Dogan, A., & Wagner, M. H. (2021). Thermoset powder coating wastes as filler in LDPE—Characterization of mechanical, thermal and morphological properties. *Polymer Testing*, 93, 106897. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106897>

Kısmet, Y. (2015). Hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağlı olarak poliamid 6 (PA6) ve polioksümetilenin (POM) eriyik akış indeksleri ve yoğunluklarındaki değişimlerin

incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*,
22(4), 241-245.

BÖLÜM XIII

Kompozit Malzemeler

Fevzi KELEN¹

1. Giriş

İnsanlık tarihinden bu yana günlük hayatın bir parçası olan malzemeler belirli fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahip maddeler olarak tanımlanmaktadır. Metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler şeklinde dört ana grupta sınıflandırılan malzemeler genel olarak saf halde kullanılmamaktadır. Monolitik malzemeler veya alaşımları endüstriyel uygulamaların düşük yoğunluk, yüksek dayanım, iyi sertlik, yüksek kırılma tokluğu ve düşük termal genleşme gibi modern gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. İlk uygulamaları saman içerikli kerpiçli yapılara kadar uzanan kompozitler en az iki farklı malzeme türünün belirli miktar

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

veya oranlarda birleştirilmesi ile elde edilen üstün karakteristiklere sahip kompozisyonlar olarak tanımlanmaktadır. Matris ve katkı fazlarından oluşan yeni kombinasyonda ağırlık veya hacimsel olarak daha fazla miktara haiz malzeme ana yapıyı diğeri ise güçlendiriciyi temsil etmektedir (Clyne & Hull, 2019). Temel malzeme yüksek gerilme konsantrasyonlarında yapıda yükü homojen dağıtarak takviye elemanına aktarımını sağlar iken katkı öğesi ise kompozite yüksek dayanım, iyi tokluk ve yüksek sıcaklıklarda yeterli mukavemet gibi özellikler kazandırmaktadır. Ayrıca matris faz deformasyon başlangıcında mikro yapıda çatlak teşekkülü ve ilerlemesini kısıtlayarak kompozitin plastik şekil değişim kabiliyetini iyileştirmektedir. Bu yaklaşımda, genellikle, temel materyalin zayıf yönleri fiziksel, kimyasal veya mekaniksel açıdan daha iyi diğeri bir malzeme ile geliştirilmektedir. Böylece endüstriyel alanların yüksek performans talepleri karşılanmaktadır. Geleneksel malzeme tiplerine kıyasla anizotropi, karmaşık geometrik yapılı malzeme eldesi, ara yüzeyde düzgün bağ teşekkülü, homojen morfoloji vb. gibi avantajlara sahip kompozitler asıl manada hafiflik, yüksek mukavemet, mükemmel sertlik, iyi kırılma tokluğu ve düşük termal genişleme özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Fakat yüksek maliyet, zayıf şekillendirilebilirlik, kötü darbe dayanımı ve artan sıcaklık değerlerinde yetersiz mekanik karakteristikler gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Bu malzemeler tıp, havacılık, uzay, otomotiv, tarım, inşaat, gıda, spor, makina, elektrik, elektronik vb. pek çok alanda yaygın olarak kullanılmasına karşın tüketim hacimleri istenilen seviyede değildir. Özellikle sarfiyat oranları geleneksel malzemelere kıyasla oldukça düşüktür. Bu bağlamda yapılan çalışmalar kapsamlı şekilde

devam etmektedir. Kompozitler genel olarak matris ve güçlendirici tipine göre sınıflandırılmaktadır. Polimer, seramik ve metalik esaslı olanlar matris, partikül, elyaf ve tabaka katmanlılar ise güçlendirici grubunu oluşturmaktadır. Diğer taraftan nihai malzeme nitelikleri üzerinde kritik tesire sahip proses süreçleri sıvı faz, katı faz ve biriktirme (kimyasal/fiziksel buhar biriktirme, vb.) olarak üç ana grupta incelenmektedir. Aşağıda kompozitlerin sınıflandırmaları, proses süreçleri ve endüstriyel tüketim alanları açıklanmıştır.

2. Kompozitlerin Sınıflandırılması

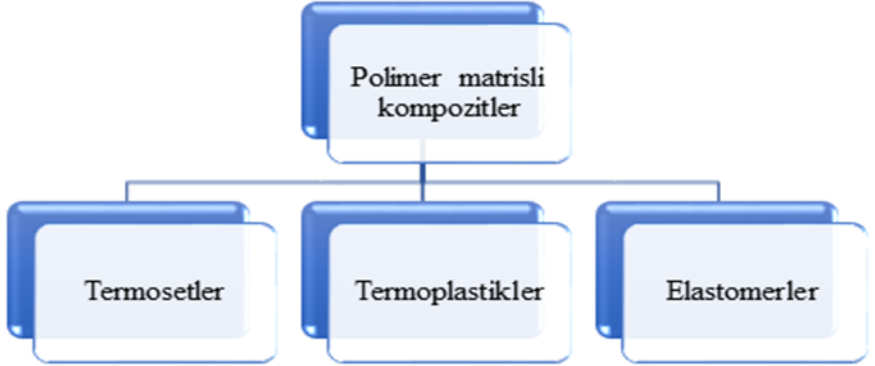
Kompozit malzemeler genel olarak matris ve güçlendirici tipine göre iki ana grupta incelenmektedir. Matris tipine göre polimer, seramik ve metalik esaslı, güçlendirici içeriğine bağlı olarak ise partikül, elyaf ve tabaka katmanlı olarak üç farklı başlıkta ele alınmaktadır.

2.1. Matris tipine göre kompozitler

2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Şekil 1'de verilen polimer esaslı kompozit malzemelerde matris materyali olarak çoğunlukla termoset, termoplastik veya elastomerler kullanılmaktadır. Düzgün atomik dizilişe sahip termosetler genellikle fenolik plastikler, poliimid ve poliüretandan oluşurken termoplastikler ise naylon, polipropilen, polikarbonat, selüloz asetat, polistiren, polietilen, polieter eter keton, akrilonitril butadiyen stiren ve polivinilklorürden meydana gelmektedir. Termoplastiklere kıyasla daha yüksek dayanıma sahip termosetler ısıya karşı mukavemetleri oldukça iyidir. Diğer taraftan mükemmel süneklik ve yüksek darbe dayanımlı termoplastikler kolay geri dönüşebilir özellik sergilemektedir. Doğal ve sentetik kauçuk

türlerinin en çok tercih edildiği elastomerler ise gerilmeler altında mükemmel uzama göstermektedir (Mazumdar, 2001, Barbero, 2010, Hsissou ve ark., 2021, Sajjan & Selvaraj, 2021).



Şekil 1: Polimer matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik esaslı kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklarda benzersiz karakteristik özelliklere sahiptir. Şekil 2'de verilen matris materyalleri arasında çoğunlukla karbür, nitrür ve oksitler tercih edilmektedir. Karbürlü temel yapılarda ise düşük yoğunluk, yüksek sıcaklıklarda iyi mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve iyi şekillendirilebilirlik özellikleri nedeni ile silisyum karbür en fazla ilgiyi çekmektedir (Tressler, 1999, Diaz ve ark., 2019, Wang ve ark., 2021). Öte taraftan endüstriyel uygulama alanlarında alümina, alüminosilikat, karbon, titanyum karbür ve tungsten karbür matrisli malzemelerde sarf edilmektedir. Hammadde rezervlerinin bol, kolay ulaşılabilir ve ekonomik olmaları gibi önemli avantajlara sahip olmalarına karşın seramik esaslı kompozitlerin darbe dayanımlarının oldukça kötü olması ve termal şoklara karşı düşük dirençleri ciddi

dezavantaj oluşturmaktadır (Donald & McMillan, 1976, Mukerji, 1993, Samal & Bal, 2008, Nieto ve ark., 2017, Karadimas & Salonitis, 2023).

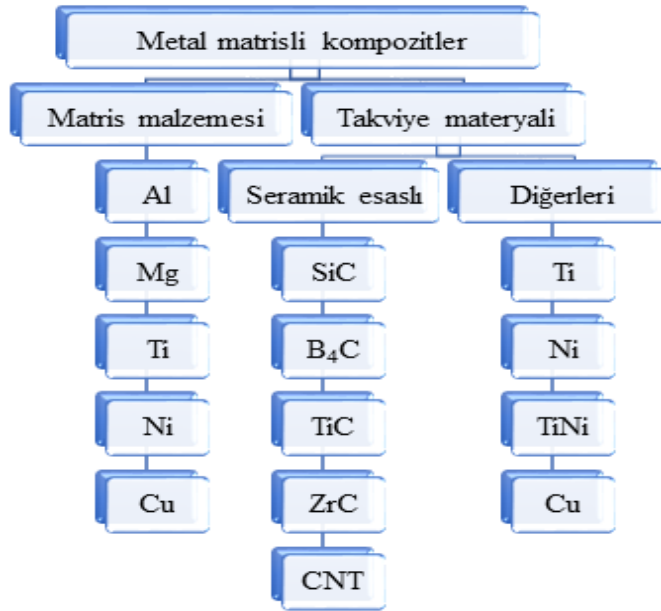


Şekil 2: Seramik matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Karadimas & Salonitis 2023)

2.1.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve mükemmel sertlik gibi üstün özellikleri ile dikkat çekmektedir. Şekil 3'te genel hatlarıyla verilen bu kompozisyon türünde matris olarak genellikle alüminyum, magnezyum, titanyum, nikel, bakır veya alaşımları kullanılmaktadır. Takviye olarak ise Al_2O_3 , AlN , BeO , B_4C , C , CeO_2 , HfC , MgO , $MoSi_2$, Mo_2C , NbC , Si , SiC , Si_3N_4 , SiO_2 , TaC , $TaSi_2$, TiB_2 , TiC , CNT , Gr , VC , WC ,

WSi₂, ZrB₂, ZrC, ZrO₂ gibi seramik esaslılar tercih edilmektedir. Bu güçlendiriciler diğerlerine kıyasla daha fazla tüketilmelerinin nedeni iyi mekanik özelliklerinin yanı sıra göreceli düşük yoğunlukları ve uygun maliyetleridir (İbrahim, Mohamed & Lavernia, 1991, Sharma, Mahant & Upadhyay, 2020, Velmurugan ve ark., 2022). Fakat zayıf şekillendirilebilirlik ciddi bir sakınca oluşturmaktadır. Metal matris ile seramik takviyeler arasındaki büyük fiziksel ve mekaniksel farklar ara yüzeyde ıslatılabilirliği kötüleştirerek güçlü ve temiz bağ teşekkülünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle dayanım ile birlikte süneklik üzerinde de olumlu etki meydana getirebilecek seramik dışı materyallerde takviye olarak sarf edilmektedir.



Şekil 3: Metal matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.2. Güçlendirici tipine göre kompozitler

Kompozit malzemelerin nihai karakteristik özellikleri ana unsur matrisin yanı sıra takviye elemanı olarak kullanılan materyalin bileşim miktarına/oranına, mikroyapı içerisindeki dağılımına, konsantrasyonuna, boyutuna, geometrik yapısına, ana öge ile oluşturduğu ara yüzey niteliklerine, kimyasal etkileşimine ve yönelimi gibi parametrelere de bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda kompozit imalatında matris malzemesi tercihi kadar güçlendirici materyalinde seçimi oldukça önemlidir. Takviye tipine göre kompozit malzemeler;

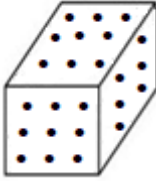
1. Partikül içerikli kompozitler
2. Elyaf içerikli kompozitler
3. Tabaka yapılı kompozitler
4. Hibrit (karma) kompozitler

şeklinde dört ana grupta incelenmektedir. Bunlar aşağıda kısaca izah edilmiştir (Clyne & Withers 1993, Nishida, 2013, Kreider, 2016, Lynch, 2018).

2.2.1. Partikül içerikli kompozitler

Bu kompozit türünde takviye elemanları parçacık şeklinde mikro veya nano boyutlarda matris faza ilave edilmektedir. Genel olarak temel malzemenin kalıtsal yetersizliklerini geliştirmek amacı ile daha üstün karakteristiklere sahip başka bir materyal türü partikül halinde güçlendirici olarak kullanılmaktadır. Parçacık yönteminde takviye elemanının morfolojideki homojen dağılımı hem düzgün bir

mikroyapı teşekkülünü hem de yüksek mekanik özelliklerin eldesini sağlamaktadır (Şekil 4). Tane sınırlarına konumlanan güçlendirici öğeler bir bariyer gibi hareket edip dislokasyon hareketini kısıtlayarak kompozit malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerini ciddi oranda iyileştirmektedir. Ancak kullanılan takviye çeşidine bağlı olarak zayıf kırılma tokluğu gözlenebilmektedir. Polimer matrisli kompozitlerde genellikle metalik parçacıklar, metal matrisli malzemelerde ise seramik partiküller katkı unsuru olarak tercih edilmektedir (German, 2016, Tsai, 2018, Goh ve ark., 2019).

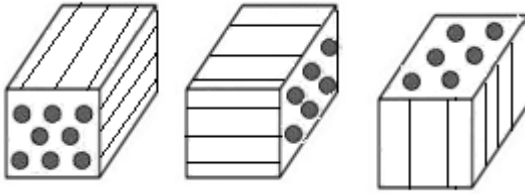


Şekil 4: Partikül içerikli matris yapı

2.2.2. Elyaf içerikli kompozitler

Yüksek çekme dayanımlı kompozitlerin imalatında takviye materyali olarak elyaflar kullanılmaktadır. Matris içerisindeki orana bağlı olarak mekanik özelliklerin değiştiği malzeme yapısında artan lif içeriği tam tersi bir etki meydana getirmektedir. Dolayısıyla azalan matris oranı ara yüzeyde zayıf bağ oluşumuna yol açmaktadır. Eğme ve darbe dayanımlarına karşı yüksek direnç sergileyen bu kompozitlerde mukavemeti etkileyen önemli diğer bir husus ise elyaf çapıdır. Küçük çaplar ıslatabilirliği geliştirirken büyükleri kötüleştirir. Ayrıca liflerin matris içerisindeki yönelimide dayanıma tesir etmektedir. Yüksek gerilme durumlarında yük ana malzemeden güçlendiriciye etkin bir biçimde iletilmektedir. Sürekli

ve süreksiz biçimde cam, asbest, karbon, bor, silisyum karbür lifleri ve çelik teller donatı olarak sarf edilmektedir. Yüksek yorulma ve korozyon mukavemetine sahip elyaf içerikli kompozit malzemelerde gerilimin güçlendiriciye paralel uygulandığı durumlarda iyi dayanım elde edilmesine rağmen dik olarak tatbikinde ise düşük mukavemet gözlenmektedir (Dilandro, Dibenedetto & Groeger, 1988, Hyer & White 2009, Prashanth ve ark., 2017, Raju & Shanmugaraja 2021). Şekil 5'te farklı elyaf yönelimli kompozit malzemeler verilmiştir.



Şekil 5: Elyaf takviyeli kompozitlerde donatının matris içerisindeki farklı yönelim biçimleri

2.2.3. Tabaka yapılı kompozitler

Tabakalı kompozit yapılar matris ve donatı materyallerin katmanlar halinde birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu yöntemde genellikle lif, çubuk, levha ve ağsı dokulu takviye elemanları ile yüksek mukavemet, iyi ısıl dayanımlı, mükemmel korozyon dirençli ve hafif kompozitler imal edilmektedir. Nem oluşumu ciddi oranda kısıtlayan bu kompozit türünde matris ile farklı geometrik biçimdeki katkı ögesi arasında meydana gelen güçlü ve temiz ara yüzey bağı ile iyi fiziksel ve mekaniksel karakteristikler sergileyen malzemeler geliştirilmektedir. Havacılık ve elektrik alanlarında yaygın tüketime sahip tabakalı kompozitlere sandviç yapılar ve iletken ile yalıtkan katmanların bir araya getirilmesi ile oluşturulan kondansatörler

örnek verilebilir (Gürdal, Haftka, & Hajela, 1999, Vasiliev & Morozov, 2001, Staab, 2015, Tan, 2017, Hwu, 2024). Şekil 6'da tabakalı kompozit malzemenin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 6: Tabakalı kompozit malzeme

2.2.4. Hibrit (karma) kompozitler

Bu kompozit tipi matris içerisine aynı veya farklı türdeki en az iki takviye elemanın ilave edilmesi ile oluşturulmaktadır. Yeni nesil kompozitler olarak adlandırılan karma yapılarda temel amaç tek güçlendirici çeşidi ile sağlanamayan fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerin ikinci donatı vasıtası ile elde edilmesidir. Hibrit yöntem ile çoğunlukla bir katkı ögesi kullanımı ile ulaşılması oldukça zor yüksek mukavemet ve iyi süneklik gibi nihai modern malzeme gereksinimleri karşılanabilmektedir. Dolayısıyla karma teknik ile yüksek performans gerektiren havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerin ihtiyaçları giderilebilir (Vasiliev & Morozov 2013).

3. Proses Süreçleri

Kompozit malzemelerin nihai karakteristiklerine kritik ölçekte tesir eden üretim teknikleri genel olarak sıvı faz, katı faz ve biriktirme yöntemleri şeklinde üç temel grupta incelenmektedir.

Şekil 7'de verilen bu metotlardan endüstride yaygın kullanılanlarına aşağıda değinilmiştir (Arunkumar, Sundaram & Vigneshwara 2020).



Şekil 7: Kompozit malzemelerin üretim teknikleri (Arunkumar, Sundaram & Vigneshwara 2020)

3.1. Toz metalürjisi

Bu yöntemde atomizasyon mekanik vb. teknikler ile imal edilmiş küresel ya da karmaşık geometrik yapıdaki tozlar belirli miktar veya oranlarda karıştırılarak çeşitli süre ve sıcaklıklarda sinterlenmektedir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen üretimler ana ve güçlendirici fazlar arasında güçlü ve temiz bağ oluşumu mümkün kılmaktadır. Böylece nihai kompozit özelliklerinde arzulanan üstün karakteristikler elde edilmektedir. Toz metalürjisi metotları ile son mamul formuna yakın şekiller sağlandığından ikincil proses ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Ayrıca geniş üretim yelpazesi ve karmaşık şekillerin kolay eldesi gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Diğer taraftan bu yöntemler ile yoğunluk kontrolü yapılabilmektedir. Fakat imalatta kullanılan tozların mikro veya nano boyutlara indirgenmesi işlemlerinde yüksek maliyetli teknolojilerin kullanımını ciddi bir dezavantaj teşkil etmektedir. Bunun yanı sıra parçacık mertebesine düşürülen temel ve katkı öğelerinin karıştırılması sırasında meydana gelebilecek deformasyon ve kirlenmelerde diğer kritik riskler olarak değerlendirilmektedir (Coleman, 1994, Hausner, 2012, El-Eskandarany 2015, Dobrzański, 2017, Novák, 2020, Thümmler & Oberacker 2024).

3.2. Difüzyonla bağlama

Katı faz üretim tekniklerinden difüzyonla bağlama kolay uygulanma özelliği ile dikkat çekmektedir. Bu proseste matris ve takviye fazlar ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda preslenerek (izostatik presleme veya haddeleme) ilk olarak birbirlerine temasları sağlanmakta akabinde bağlantı yüzeylerinde difüzyon bağı meydana getirilerek istiflenmiş şekildeki kompozisyonlar imal edilmektedir.

Yüksek paketleme özelliğine sahip bu kompozitler ile nispeten iyi mekanik özelliklere ulaşılabilmektedir (Mo ve ark., 2018, Aravinda ve ark., 2021). Difüzyonla bağlama yönteminde iki bileşen;

1-Yüksek sıcaklık (ergime sıcaklığına yakın) ve yüksek basınç altında veya

2-Sıcak veya soğuk haddeleme şeklinde birleştirilmektedir.

3.3. Sıvı metal infiltrasyon

Sıvı metal infiltrasyon tekniğinde önceden şekillendirilmiş bir kalıp içerisindeki takviye elemanlarına ergimiş haldeki matris faz nüfus ettirilmektedir. Bu metotta ilk aşamada donatı oranı saptanıp istenilen ön şekil verilmekte sonrasında sıvı metal kalıba emdirilerek soğumaya bırakılmaktadır. Matris ve katkı ögesi arasında iyi bir bağ yapısı elde etmek amacı ile bağlayıcı kullanılmaktadır. Preform olarak adlandırılan profildeki donatı içeriği sıvı metalin nüfusiyet kalitesini doğrudan etkilemektedir. Yüksek katkı miktarı takviye parçacıkları arasındaki boşluk hacimlerini küçülteceğinden dolayı sıvı haldeki ana malzemenin bunları doldurması ve donatıya teması zorlaşmaktadır. Güçlendirici materyalin küçük hacimli fraksiyon ilavelerinde ise eriyik matrisin donatı üzerinde meydana getirdiği deformasyon miktarı daha fazla olmaktadır. Sıvı metal infiltrasyon endüstriyel alanlarda oldukça sık tercih edilen bir teknik olup, seri üretime uygunluğu ve ikincil işlemlere az gereksinin duyulması ile ön plana çıkmaktadır (Zhang, Long & Flower, 1994, Blucher, 1992, Sree ve ark., 2016).

3.4. Basınçlı infiltrasyon

Bu infiltrasyon yönteminde ergimiş haldeki matris faz basınç yardımı ile gözenekli preform içerisine emdirilmektedir. Temel malzeme yüksek basınçlar altında çok kısa sürelerde ön şekilli takviye elemanlarına infiltre edilmektedir. Bu yöntemde uygulama basıncı, donatı miktarı, boyutu, geometrik yapısı, kalıp sıcaklığı, sıvı metal sıcaklığı, infiltrasyon süresi gibi hususlar üretim değişkenleri olarak değerlendirilmektedir. Basınçlı infiltrasyon yönteminde sıvı metalin katkı öğelerine hem tam temasını hem de preform olarak adlandırılan ön şekilli ve gözenekli profile nufusiyetini artırmak amacı ile kalıp alt kısmına gaz tahliye kanalları açılmıştır. Bu proses yüksek basınçlar altında gerçekleştirildiğinden takviye materyalinde deformasyona yol açmaktadır. Genel olarak üç aşamada oluşan infiltrasyonun ilk safhasında donatılar belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta akabinde ön basınç yardımı ile sıvı malzeme gözenekli preforma nüfus ettirilmekte ve son olarak yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır (Cook & Werner 1991).

3.5. Vakumlu infiltrasyon

Vakumlu infiltrasyon yönteminde matris ve takviye fazların kirlenmesine neden olabilecek oksitlenmeyi engellemek ve porozite teşekkülünü minimize etmek amacı ile üretim vakum atmosferinde gerçekleştirilmektedir. Eriyik haldeki esas malzeme vakum altında preforma emdirilerek katılaşımaya bırakılmaktadır. İşletme giderleri bakımından diğer infiltrasyon proseslerine göre daha ekonomiktir. Ayrıca yöntem basit ve uygulaması son derece kolaydır. Bu teknik farklı infiltrasyon metotları ile kombine halde uygulanmaktadır (Kopeliovich, 2018, Etemadi ve ark., 2018, S-de-la-Muela,

Cambroner & Ruiz-Román 2020). Sıvı faz imalat yöntemlerinden vakumlu infiltrasyon endüstriyel uygulama alanlarında pek yaygın kullanıma sahip değildir. Zira literatürdeki deneysel çalışmalarda imal edilen kompozit malzemelerde gözlenen yüksek porozite içeriği ve yetersiz mekanik özellikler başlıca sakıncaları olarak değerlendirilmektedir (Calin & Citak 2007, Pul, 2020, Yin ve ark., 2021).

3.6. Vortex yöntemi

Bu proseste parçacık şeklindeki güçlendirici elemanlar bir karıştırıcı vasıtası ile sıvı haldeki matris malzemeye ilave edilerek üretim gerçekleştirilmektedir. Takviye fazın sıvı metal içerisinde homojen dağılımını sağlamak amacı ile karıştırma işlemi belirli bir zamana kadar sürmektedir. Vortex tekniğinde karıştırma hızı, karıştırıcı özellikleri, işlem sıcaklığı ve donatı karakteristikleri nihai malzeme özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Genellikle zayıf ıslatılabilirlik ve yüksek segregasyon ciddi dezavantaja neden olmaktadır (Zhu, 1988, Kandpal, Kumar & Singh 2018, Baliarsingh ve ark., 2023). Sıvı metalin takviye partikülleri istenilen düzeyde ıslatamaması ara yüzeyde oluşan bağın kötüleşmesine yol açarak yetersiz mekanik özelliklere sebep olmaktadır. Katkı öğelerinin sıvı matristeki heterojen dağılımı ise hem gözenek teşekkülüne hem de elastik modül, akma mukavemeti, çekme ve basma dayanımları ve kırılma tokluğu gibi özelliklerin düşük olmasına meydan vermektedir (Seshan ve ark., 1996, Ejiiofor & Reddy 1997, Singh, Sarabjit & Tyagi 2011, Srivyas & Charoo 2018).

3.7. In-situ tekniği

Bu yöntemde güçlendirici materyaller matris faza dışarıdan ilave edilmenin dışında ekzotermik tepkimeler neticesinde yerinde kendiliğinden teşekkülü ile oluşturulmaktadır. In-situ yaklaşımında yerinde reaksiyonlarla meydana getirilen element veya bileşikler matris ile katkı arasında temiz bir yüzey, düzgün dağılımlı bir mikro yapı ve yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır. Ayrıca katkı öğelerinin termodinamik olarak kararlı olması, farklı fiziksel veya kimyasal karakteristiklere sahip donatıların yerinde reaksiyonlar ile elde edilebilmesi, takviye fazlarının geometrik yapı ve boyutsal özelliklerinin kontrolü, pek çok malzeme grubuna uygulanabilmesi, istenilen hacim ve oranlarda takviye ilavesi ve nihai ürünün yeniden şekillendirilebilir olması gibi önemli avantajları bulunmaktadır (Pramod, Bakshi & Murty 2015, Ayar & Sutaria 2021). Bunların yanı sıra in-situ teknikte imalatın basit, ekonomik ve mamulün tekrardan kullanılabilir özellikte olması diğer üstün niteliklerdir. Katkı materyallerinin katı veya sıvı matris içerisinde sentezlenerek (in-situ) elde edilmesi kompozit üretiminde henüz yeni bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

3.8. Ekzotermik dispersiyon metodu

Martin Marietta tarafından geliştirilen proseste reaktif bileşenler katı formda karıştırılmakta ve kompozisyonun farklı noktalarında kendiliğinden yayılan bir tepkime ortaya çıkmaktadır. Reaksiyonun sürdürülebilir olması için ısı salınımının devamlı olması gerekmektedir. Ekzotermik dispersiyon yönteminde sıvı form yapıdaki matris malzeme içerisine güçlendirici materyaller homojen bir şekilde dağıtılmaktadır. Böylece elde edilen düzgün

disperseli morfoloji ile temel ve donatı malzemeler arasında güçlü ve temiz bir ara yüzey sağlanmaktadır. Bu yöntemde ergimiş durumdaki matriste yer alan reaktant bileşenlerin yüksek difüzyon hızı tepkimeyi iyileştirmektedir. Ekzotermik dispersiyon tekniği diğer üretim teknikleri ile imalatı oldukça zor olan pek çok farklı malzeme grubuna tatbik edilmesi ve bu üretimlerin ticari uygunluğa haiz olması gibi önemli avantajlara sahiptir (Zhu ve ark., 2007, Borgonovo & Apelian 2011, Zhu ve ark., 2013).

4. Endüstriyel Tüketim Alanları

Kompozitler diğer malzeme grupları ile elde edilemeyen düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, mükemmel soğurma yeteneği, yüksek korozyon direnci, iyi yorulma ve aşınma dayanımı, yüksek elastik modül ve yeniden kullanabilme gibi son derece kritik niteliklere sahip olmaları nedeni ile tıp, havacılık, otomotiv, inşaat, tarım, kimya, deniz, uzay ve savunma sanayi gibi birçok farklı endüstride oldukça yaygın şekilde sarf edilmektedir. Zira sınırlı miktardaki hammadde rezervlerinin korunması ve yüksek enerji verimliliği açısından ciddi avantajlar sağlayan bu malzemelerin tüketimi geleneksel olanlara kıyasla sürekli olarak artmaktadır. Diğer taraftan yükselen imalat ve işletme maliyetleri üreticileri enerji etkinliği yüksek ergonomik tasarımlara kanalize etmiştir. Bu bağlamda yüksek performans uygulamalarında yeterli özellikleri sergileyebilecek yüksek dayanımlı ve iyi şekillendirilebilir gibi kompleks niteliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Kompozit malzemeler üstün karakteristikleri ile günümüz modern gereksinimleri karşılayabilecek yeterliliktedir. Bu malzemelerin kullanım alanları aşağıda verilmiştir.

4.1. Otomotiv sanayi

Otomotiv uygulamalarındaki kompozitler hafiflikleri ile dikkat çekmektedir. Bu malzemeler hem yakıt sarfiyatı hem de zararlı egzoz emsiyonların en aza indirgenmesinde önemli rol oynamaktadır. Genellikle koltuk çerçevesi, iç konsol, bağlantı braketleri, pedallar, torpido bileşenleri ve direksiyon mekanizması gibi aksamaların imalatında kullanılmaktadır. Alüminyum ve magnezyum metal matrisli kompozitlerin çoğunlukla tercih edildiği bu alanda geleneksel malzemelerin tüketim miktarı her geçen gün azalmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçaların yapımında seramik matrisliler, tampon vb. uygulamalarda ise polimer esaslılar sarf edilmektedir. Kompozitler yakıt sarfiyatı ve yanma sonucu açığa çıkan toksit özellikli bileşenleri minimize etmenin yanı sıra ivmelenme, frenleme, manevra kabiliyeti (Kaiser, 1978, Chase, 1980, Eliezer, Aghion & Froes, 1998) ve hibrit ve elektrikli araçlarda yüksek menzile ciddi katkı sağlamaktadır.

4.2. Havacılık sektörü

1900'lü yıllardan bu yana havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemeler yüksek spesifik mukavemetleri nedeni ile tercih edilmektedir. Bu alanda genellikle çelik, titanyum, alüminyum gibi malzemeler tüketilmektedir. Fakat bunlar zamanla yerini yüksek sertlik, mükemmel yorulma direnci ve yüksek korozyon dayanımı gibi üstün karakteristiklere sahip kompozitlere bırakmıştır. Son yıllarda kompozitlerin kullanım oranı giderek artmış ve en çok sarf edilen malzeme türüne dönüşmüştür. Gövde, kanat ve helikopter pervanesi gibi parçaların yapımında sık sarf edilen kompozitlerin on

dokuzunu yüzyıl sonlarında tüketimleri %6 düzeyinde iken bu değer kısa süre içerisinde artarak yirminci yüzyıl başlarında %27'lere kadar çıkmıştır. Bu oran ile çelik, titanyum ve diğer kullanılan malzeme türlerini geride bırakmıştır (Margolis & Bell 1987, Mangalgiri, 1999, Yılmaz & Evcı 2015, Jawaid & Sultan 2018, Tiwary, Kumar & Chohan 2022, Asyraf ve ark., 2022). Havacılık sektörünün yüksek gereksinimlerine cevap vermek amacı ile araştırma ve geliştirme çalışmaları hızla devam etmektedir. Bu kapsamda karma kompozit geliştirme çabaları hem üretici hem de tüketici talepleri açısından büyük umut vadetmektedir.

4.3. İnşaat endüstrisi

Kompozitlerin inşaat endüstrisindeki ilk uygulamaları ev yapımında kullanılan saman içerikli kerpiçlere kadar uzanmaktadır. Bu malzemeler genellikle yapı yükünü hafifletmek ve dayanımı iyileştirmek amacı ile yoğun olarak kullanılmaktadır. Sektörde metal matrisli, polimer esaslı, mineral kökenli ve ahşap bazlılar oldukça sık tercih edilmektedir. Metal esaslı kompozit malzemeler önyapım aşamasında sarf edilir iken diğerleri sırası ile hasar veya onarım, harç hazırlama veya yalıtım ve son olarak ise kaplama işlemlerinde tüketilmektedir. Böylece inşaat sürecinde ihtiyaç duyulan enerji, materyal ve su kullanımı en aza indirgenmektedir. Zira artan nüfus ile barınma, istihdam ve ekonomi üzerinde kritik faktör teşkil eden sektör küresel ısınma, iklim değişikliği ve diğer çevresel sorunlara yol açmaktadır (Horvath, 2004).

4.4. Savunma uygulamaları

Balistik panel ve zırh imalatında son derece yaygın kullanıma sahip kompozitler savunma sanayinde yüksek mukavemet ve düşük

yoğunlukları ile ön plana çıkmaktadır. Bu uygulamalarda ilk olarak metal matrisli kompozitler kullanılır iken bunlar yerini zamanla nispeten daha hafif ve yüksek dayançlı seramik esaslara bırakmıştır. Günümüzde ise savunma alanında çelikten daha hafif ve daha mukavemetli elyaf takviyeli polimer matrisliler yoğun olarak tercih edilmektedir. Bu malzemeler düşük yoğunluk ve yüksek dirençlerinin yanı sıra mükemmel hareket kabiliyetleriyle de dikkat çekmektedir. Ayrıca kevlar içerikliler yüksek elastik modül, yüksek çekme mukavemeti, yüksek kimyasal kararlılık, mükemmel ısı özellik, iyi boyutsal hassasiyet ve yanmaya karşı yüksek dayanım gibi nitelikleri ile kurşun geçirmez yelek ve zırh yapımı ile birlikte kask ve diğer stratejik ekipman imalatında da sarf edilmektedir. Tank, helikopter ve uçak gibi askeri araç üretiminde ise kompozit malzemeler gövde, rotor, pervane, kanat ve millerin yapımında kullanılmaktadır. Bilhassa geleneksel muadillerine nazaran ağırlık azaltımında önemli kazanımlar sağlamaktadır (Peters, 2013, Nurazzi ve ark., 2021, Harussani ve ark., 2022, Siengchin, 2023).

4.5. Biyomalzeme kullanımları

Teknoloji alanındaki yenilikler cerrahi cihazların gelişimine ciddi ivme kazandırmıştır. İnsan ve diğer canlılarda hasara uğramış doku veya organların fonksiyonel özelliklerini yeniden kazandırmak amacı ile kullanılan biyomalzemelerin imalatında önemli seviyede kompozit yaklaşımı benimsenmiştir. Zira kompozit malzemeler yüksek kimyasal kararlılık, iyi korozyon direnci, yüksek gerilme mukavemeti ve düşük yoğunluklarının yanı sıra iyi biyouyumluluk karakteristikte sergilemektedir. Kompozit esaslı biyomalzemeler ortopedi ve diş hekimliği alanlarında iyi dayanç ve düşük elastik modül gibi nitelikleri nedeni ile implant yapımında yaygın olarak

tercih edilmektedir (Lakes, 2007, Park & Lakes 2007, Yadav, Meena & Patnaik, 2022). Yukarıda ifade edilen alanların haricinde kompozitler gıda, tarım, uzay, denizcilik, elektrik, elektronik, robot, kimya ve spor gibi farklı endüstrilerde de yaygın kullanıma sahiptir.

5. Sonuç

Endüstriyel uygulamalarda tüketim miktarları her geçen gün artan kompozitler eşsiz karakteristikleri ile dikkat çekmektedir. Bu malzemeler günümüz modern gereksinimlerini pek çok farklı alanda kolaylık ile karşılayabilecek yeterliliktedir. Özellikle hammadde rezervlerinin korunması ve enerji verimliliğinin geliştirilmesi açısından geleneksellere kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır. Yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek elastik modül, geniş tasarım yelpazesi, yüksek boyutsal kararlılık, mükemmel dielektrik direnimsizlik, iyi korozyon direnci, yüksek yüzey kalitesi, zayıf ikincil işlem ihtiyacı, düşük yanma tehlikesi, yüksek soğurma kapasitesi, iyi yorulma mukavemeti ve kolay geri dönüşür olmaları gibi nitelikleri nedeni ile uzay, havacılık, tıp, otomotiv, inşaat, tarım, kimya, elektronik, spor, savunma vb. sektörlerde yaygın kullanıma sahiptir. Fakat ekonomiklikten uzak olmaları ciddi bir sakınca teşkil etmektedir. Bu sebeple üretim maliyetlerinin düşürülmesi büyük önem arz etmektedir. Nitekim imalat masrafları ve işletme giderlerini azaltma hususunda yapılan optimizasyon çalışmaları halen yoğun olarak devam etmektedir. Ayrıca proses süreçlerinde artan işlevsellik dezavantaj husulünün etkisini önemli ölçekte hafifletmektedir. Öte yandan zayıf şekillendirilebilirlik kompozit malzemelerde karşılaşılan diğer önemli bir sorundur. Bu husus matris ile takviye materyali arasında meydana gelen kötü ıslatabilirlikten kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda kompozit yapıyı

oluşturan unsurların karakteristik özelliklerinin birbirine nispeten yakın olması son derece kritiktir. Dolayısıyla matris ve katkı fazları arasındaki farklar mümkün mertebe azaltılarak malzemenin kırılma tokluğu geliştirilebilir. Dahası bu sakınca yeni nesil kompozitler olarak adlandırılan hibrit yöntemle de bertaraf edilebilir. Zira tek takviye elemanı kullanımı ile elde edilemeyen nihai malzeme nitelikleri ikinci donatı unsurunun matrise ilavesi ile sağlanabilir. Böylece havacılık ve otomotiv gibi ulaşım dallarının ihtiyaç duyduğu yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek elastik modül ve yüksek çekme ve basma dayanımlarının yanında iyi süneklik özellik sergileyen kompozit malzemeler imal edilebilir. Sonuç olarak farklı yaklaşım veya yöntemler ile kompozit malzemelerin sakıncaları ortadan kaldırılarak uygulama alanları çoğaltılmalıdır.

Kaynaklar

Aravinda, T., Niranjan, H. B., Babu, B. S., & Ravi, M. U. (2021). Solid state diffusion bonding process-a review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1013, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

Arunkumar, S., Sundaram, M. S., & Vigneshwara, S. (2020). A review on aluminium matrix composite with various reinforcement particles and their behaviour. *Materials Today: Proceedings*, 33, 484-490.

Asyraf, M. R. M., Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Harussani, M. M., Hariz, H. M., Aiman, J. M., ... & Asrofi, M. (2022). Advanced composite in aerospace applications: opportunities, challenges, and future perspective. *Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications*, 471-498.

Ayar, V. S., & Sutaria, M. P. (2021). Comparative evaluation of ex situ and in situ method of fabricating aluminum/TiB₂ composites. *International Journal of Metalcasting*, 15(3), 1047-1056.

Baliarsingh, S. S., Tripathy, A. G., Sahoo, B. P., Das, D., Behera, R. R., Satpathy, M. P., & Kumar, R. (2023). Comprehensive review on fabrication methods of metal matrix composites and a case study on squeeze casting. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-24.

Barbero, E. J. (2010). *Introduction to composite materials design*. CRC press.

Blucher, J. T. (1992). Discussion of a liquid metal pressure infiltration process to produce metal matrix composites. *Journal of materials processing technology*, 30(3), 381-390.

Borgonovo, C., & Apelian, D. (2011, April). Manufacture of aluminum nanocomposites: a critical review. In *Materials Science Forum* (Vol. 678, pp. 1-22). Trans Tech Publications Ltd.

Calin, R., & Citak, R. (2007, June). Effect of Mg content in matrix on infiltration height in producing MgO/Al composite by vacuum infiltration method. In *Materials science forum* (Vol. 546, pp. 611-614). Trans Tech Publications Ltd.

Chase, V. (1980). *Automotive applications of composite materials*. Daytona Beach Community College.

Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.

Clyne, T. W., & Withers, P. J. (1993). *An introduction to metal matrix composites*. Cambridge university press.

Coleman, D. (1994). Book Review: INTRODUCTION TO POWDER METALLURGY.

Cook, A. J., & Werner, P. S. (1991). Pressure infiltration casting of metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 144(1-2), 189-206.

Diaz, O. G., Luna, G. G., Liao, Z., & Axinte, D. (2019). The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 139, 24-36.

Dilandro, L., Dibenedetto, A. T., & Groeger, J. (1988). The effect of fiber-matrix stress transfer on the strength of fiber-reinforced composite materials. *Polymer Composites*, 9(3), 209-221.

Dobrzański, L. A. (Ed.). (2017). *Powder Metallurgy: Fundamentals and Case Studies*. BoD–Books on Demand.

Donald, I. W., & McMillan, P. W. (1976). Ceramic-matrix composites. *Journal of materials Science*, 11, 949-972.

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

El-Eskandarany, M. S. (2015). *Mechanical alloying: nanotechnology, materials science and powder metallurgy*. Elsevier.

Ejiofor, J. U., & Reddy, R. G. (1997). Developments in the processing and properties of particulate Al-Si composites. *Jom*, 49, 31-37.

Etemadi, R., Wang, B., Pillai, K. M., Niroumand, B., Omrani, E., & Rohatgi, P. (2018). Pressure infiltration processes to synthesize metal matrix composites—A review of metal matrix composites, the technology and process simulation. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(12), 1261-1290.

German, R. M. (2016). *Particulate composites* (pp. 198-200). New York: Springer.

Goh, K. L., Thomas, S., De Silva, R. T., & Aswathi, M. K. (Eds.). (2019). *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices*.

Gürdal, Z., Haftka, R. T., & Hajela, P. (1999). Design and optimization of laminated composite materials. John Wiley & Sons.

Harussani, M. M., Sapuan, S. M., Nadeem, G., Rafin, T., & Kirubaanand, W. (2022). Recent applications of carbon-based composites in defence industry: A review. *Defence Technology*, 18(8), 1281-1300.

Hausner, H. H. (2012). Modern developments in powder metallurgy: volume 1: fundamentals and methods. Springer Science & Business Media.

Horvath, A. (2004). Construction materials and the environment. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 29(1), 181-204.

Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, 262, 113640.

Hyer, M. W., & White, S. R. (2009). Stress analysis of fiber-reinforced composite materials. DEStech Publications, Inc.

Hwu, C. (2024). Mechanics of Laminated Composite Structures. CRC Press.

Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J. (1991). Particulate reinforced metal matrix composites—a review. *Journal of materials science*, 26, 1137-1156.

Jawaid, M., & Sultan, M. T. H. (Eds.). (2018). Sustainable composites for aerospace applications. Woodhead publishing.

Kaiser, R. (1978). Automotive Applications of Composite Materials. Final Report. National Technical Information Service.

Kandpal, B. C., Kumar, J., & Singh, H. (2018). Manufacturing and technological challenges in Stir casting of metal matrix composites—A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 5-10.

Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Ceramic matrix composites for aero engine applications—a review. *Applied Sciences*, 13(5), 3017.

Kreider, K. G. (Ed.). (2016). *Metallic Matrix Composites: Composite Materials*, Vol. 4 (Vol. 4). Elsevier.

Kopeliovich, D. (2018). Advances in manufacture of ceramic matrix composites by infiltration techniques. In *Advances in Ceramic Matrix Composites* (pp. 93-119). Woodhead Publishing.

Lakes, R. S. (2007). Composite biomaterials. In *Biomaterials* (pp. 4-1). CRC Press.

Lynch, C. T. (2018). *Metal matrix composites*. CRC press.

Mangalgiri, P. D. (1999). Composite materials for aerospace applications. *Bulletin of Materials Science*, 22, 657-664.

Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CrC press.

Mo, D. F., Song, T. F., Fang, Y. J., Jiang, X. S., Luo, C. Q., Simpson, M. D., & Luo, Z. P. (2018). A review on diffusion bonding between titanium alloys and stainless steels. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 8701890.

Margolis, J. M., & Bell, J. P. (1987). *Advanced thermoset composites: Industrial and commercial applications*.

Mukerji, J. (1993). Ceramic Matrix Composites. *Defence Science Journal*, 43(4), 385.

Nieto, A., Bisht, A., Lahiri, D., Zhang, C., & Agarwal, A. (2017). Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review. *International Materials Reviews*, 62(5), 241-302.

Nishida, Y. (2013). *Introduction to metal matrix composites: fabrication and recycling*. Springer Science & Business Media.

Novák, P. (2020). Advanced powder metallurgy technologies. *Materials*, 13(7), 1742.

Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H. A., Rafiqah, S. A., ... & Sapuan, S. M. (2021). A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. *Polymers*, 13(4), 646.

Park, J. B., & Lakes, R. S. (2007). Composites as biomaterials. *Biomaterials*, 207-224.

Peters, S. T. (Ed.). (2013). *Handbook of composites*. Springer Science & Business Media.

Pramod, S. L., Bakshi, S. R., & Murty, B. S. (2015). Aluminum-based cast in situ composites: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 2185-2207.

Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, 6(03), 2-6.

Pul, M. (2020). Vakumlu İnfiltrasyonu Üretilen AA 1050 Esaslı GNP+ TiB₂ Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Abrasif Aşınma

Davranışlarının İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 1100-1107.

Raju, A., & Shanmugaraja, M. (2021). Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9291-9296.

Sajan, S. S. P. S., & Selvaraj, D. P. (2021). A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5493-5498.

Samal, S. S., & Bal, S. (2008). Carbon nanotube reinforced ceramic matrix composites-a review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7(04), 355.

Seshan, S., Guruprasad, A., Prabha, M., & Sudhakar, A. (1996). Fibre-reinforced metal matrix composites--a review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 76(1), 1.

S-de-la-Muela, A. M., Cambroner, L. E. G., & Ruiz-Román, J. M. (2020). Molten metal infiltration methods to process metal matrix syntactic foams. *Metals*, 10(1), 149.

Sharma, D. K., Mahant, D., & Upadhyay, G. (2020). Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 506-519.

Siengchin, S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*, 24, 1-17.

Singh, H., Sarabjit, N. J., & Tyagi, A. K. (2011). An overview of metal matrix composite: processing and SiC based mechanical

properties. *Journal of Engineering Research and Studies*, 2(4), 72-78.

Sree Manu, K. M., Ajay Raag, L., Rajan, T. P. D., Gupta, M., & Pai, B. C. (2016). Liquid metal infiltration processing of metallic composites: a critical review. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47, 2799-2819.

Srivyas, P. D., & Charoo, M. S. (2018). Role of fabrication route on the mechanical and tribological behavior of aluminum metal matrix composites—a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20054-20069.

Staab, G. (2015). *Laminar composites*. Butterworth-Heinemann.

Tan, S. C. (2017). *Stress concentrations in laminated composites*. Routledge.

Thümmeler, F., & Oberacker, R. (2024). *An introduction to powder metallurgy*. CRC Press.

Tiwary, A., Kumar, R., & Chohan, J. S. (2022). A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications. *Materials Today: Proceedings*, 51, 865-870.

Tressler, R. E. (1999). Recent developments in fibers and interphases for high temperature ceramic matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(4), 429-437.

Tsai, S. (2018). *Introduction to composite materials*. Routledge.

Velmurugan, G., Perumal, A., Sekar, S., & Uthayakumar, M. (2022). Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: a review. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1022-1031.

Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2001). *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier.

Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2013). *Advanced mechanics of composite materials and structural elements*. Newnes.

Yadav, R., Meena, A., & Patnaik, A. (2022). Biomaterials for dental composite applications: A comprehensive review of physical, chemical, mechanical, thermal, tribological, and biological properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(6), 1762-1781.

Yılmaz, U., & Evci, C. (2015). Havacılık ve savunma sektöründe kompozit malzemelerin geleceği. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 14(2), 77-109.

Yin, H. L., Liu, S. Q., Zhao, L. C., Cui, C. X., & Wang, X. (2021). Vacuum infiltration molding and mechanical property of short carbon fiber reinforced Ti-based metallic glass matrix composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 295, 117151.

Zhu, H., Dong, K., Wang, H., Huang, J., Li, J., & Xie, Z. (2013). Reaction mechanisms of the TiC/Fe composite fabricated by exothermic dispersion from Fe–Ti–C element system. *Powder technology*, 246, 456-461.

Zhu, H. G., Wang, H. Z., Ge, L. Q., Shi, C. H. E. N., & Wu, S. Q. (2007). Formation of composites fabricated by exothermic

dispersion reaction in Al-TiO₂-B₂O₃ system. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17(3), 590-594.

Zhang, Z., Long, S., & Flower, H. M. (1994). Light alloy composite production by liquid metal infiltration. Composites, 25(5), 380-392.

Zhu, Z. (1988). A literature survey on fabrication methods of cast reinforced metal composites. ASM International USA, "Cast Reinforced Metal Composites", (1988.), 93-99.

Wang, X., Gao, X., Zhang, Z., Cheng, L., Ma, H., & Yang, W. (2021). Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review. Journal of the European Ceramic Society, 41(9), 4671-4688.

BÖLÜM XIV

AZ31B Magnezyum ve EN AW 7075-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağında Takım İlerleme Hızının Etkisi

**Zülküf BALALAN¹
Ömer EKİNCİ²**

Giriş

Farklı endüstri alanlarında yaygın bir şekilde kullanılan alüminyum ve magnezyum alaşımları mukavemeti yüksek ve hafif olması sebebiyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde taşıtların ağırlığını azaltarak ve buna bağlı olarak yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Bu alaşımlar kullanılarak üretilen parçaların ya da malzemelerin kaynak yapılması ya da montaj edilmesi kaçınılmazdır. Bu alaşımları birleştirilirken ya da kaynak yapılırken

¹ Doç. Dr., Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5808-6263, zbalalan@bingol.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği Bölümü, Sivas/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0179-6456, omerekinci@sivas.edu.tr

uygun kaynak teknolojisini kullanmak gerekmektedir. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarını geleneksek kaynak yöntemiyle birleştirmek oldukça güçtür. Çünkü birleşme malzemelerin ergimesiyle olduğu için kaynak kalitesini olumsuz yönde etkileyen kaynak bölgesindeki gözenekler, çatlaklar ve kalıntı gerilme gibi birleştirmenin zayıf almasını sebebiyet vermektedir. Eğer bu alaşımlar aynı tasarımda kullanılacak ise bu alaşımların kaynak yapılması kaçınılmazdır (Shah, Othman & Gerlich, 2018; Ahmed & Seleman., 2023). Ravikumar, Seshagiri Rao & Atish Ranjan (2013) AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmede takım uç geometrisini ve eğikliğini araştırmışlardır. En iyi sonucu konik silindirik dişli uç ile elde etmişlerdir. Ayrıca, takım eğiklik açısı sıfır derece ile yapılan birleştirmede kusurlar oluştuğu ve birleşme mukavemetini azaltığını ancak 1 veya 2 derecelik eğiklik daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Mohommadi & Behnamian., (2015) AZ31 ve AL 6061 levhalarını sürtünme karıştırma bindirme kaynağı işlemini uygulamışlardır. Bu levhalar 560-1400 dev/dak aralığında ve 16-20 mm/dakika ilerleme hızlarında birleştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Birleştirmenin sonucunda kaynak bölgesinde $Al_{12}Mg_{17}$ (γ) ve Al_3Mg_2 (β) içeren intermetalik fazlar oluştuğu gözlemlenmiştir. Devir ve ilerleme hızının artırılmasıyla birlikte çekme dayanımı ve sünekliğin arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek çekme dayanımının 40 mm/dakika ilerleme hızında ve 1400 devir/dakika takım dönme hızında gözlemlenmiştir. AA6022 T4 ve AM60B alaşımlarının sürtünme karıştırma bindirme kaynağıyla birleştirme işlemini yapmışlardır. Birleştirilecek levhaların Al alaşımı 1.5 mm kalınlığında Mg alaşımının kalınlığı ise 3 mm'dir.

Bu birleştirme işleminde ilerleme hızı olarak 75 mm/dakika dönme hızı olarak 1000 devir/dakika ve takım açısı 3° olarak seçmişlerdir. Kullanılan karıştırıcı uç ise üçgen profillidir. Bu birleştirmeler neticesinde yorulma ve hasar mekanizmaları incelenmiş ve incelemeler sonucunda arayüzeyinde iki farklı kırılma gözlemlenmiş yorulma çatlağı ve titreşim kalıntıları görölmüştür (Bilgin, 2019). Saraçoğlu (2007) Al 7075 alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle kaynak yapmıştır. Bu kaynak sonucunda malzemenin mikroskobik ve mekanik özelliklerini incelemiş ve bu numuneleri karşılaştırmıştır. 6 mm kalınlığındaki Al 7075 alaşımı levhaları alın altına kaynak yapmıştır. Bu kaynak işlemini gerçekleştirirken 6mm çapında karıştırıcı uç ile birleştirme sağlanmıştır. Birleştirmede (800, 1250, 1600 devir/dakika) parametreler kullanılmıştır. İlerleme hızı ise 100 ile 200 mm/dakika hızlarında numuneler birleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda 1600 devir/dakika devir sayısı ile 200 mm/dakika ilerleme hızıyla birleştirilen numunelerin en uygun kaynak koşullarını sağladığı gözlemlenmiştir. AA7075-T651 Alüminyum alaşımını sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle numuneleri birleştirmiştir. Birleştirme işlemini yaparken kaynak parametrelerinden olan dönme hızını sabit tutarak farklı takım ilerleme hızlarını kullanmıştır. Bu farklı ilerleme hızlarının kaynak işlemine olan etkilerini incelemiştir. Bu incelemeler sonucunda takım ilerleme hızının artmasıyla kaynak bölgesinde oyuk ve boşluk gibi kaynak hatalarının meydana geldiği ve kaynak ilerleme hızının yükseldikçe çekme özelliklerinin düştüğü gözlemlenmiştir (Emiraliöğlu, 2017). Bu çalışmada hafif, kolay şekillendirilebilen ve üstün mukavemet özelliklerine sahip olan farklı endüstri alanlarında (otomobil, uçak, deniz vb) kullanılan EN AW 7075-T651

alüminyum alaşımı ile oldukça hafif ve bunun yanında özgül rijitliği ve özgül dayanımı yüksek olan ve geri dönüşümü olan hava taşıtlarında, spor aletlerinde, elektronik cihazların imalatında ve otomotiv endüstrisinde kullanılan AZ31B magnezyum alaşımı levhaları sürtünme karıştırma bindirme kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu birleştirmede ilerleme hızının çekme kesme mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve konik uçlu takım geometrisine sahip olan karıştırıcı uç kullanılmıştır.

Materyal ve Yöntem

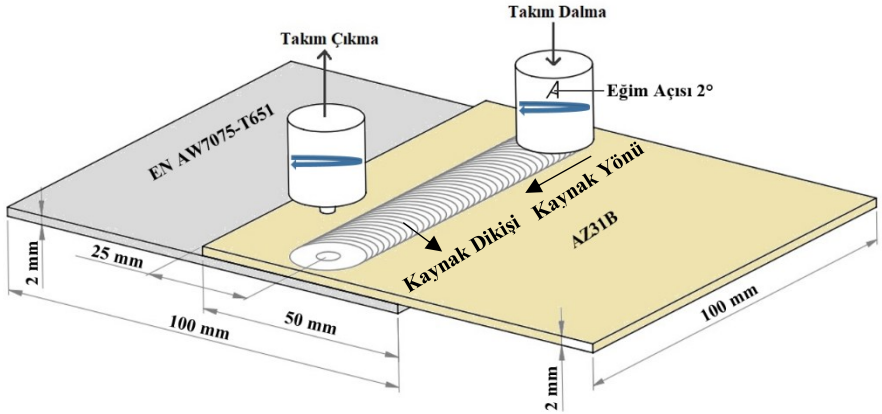
Yapılan bu çalışmada, 2 mm kalınlığında, 100x100 mm ebatlarında levha çiftleri (AZ31B magnezyum alaşımı levha, EN AW 7075-T651 alüminyum alaşımı levhanın üstünde) sürtünme karıştırma bindirme kaynağı (SKBK) ile birleştirilmiştir. Alaşımların kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. SKBK kaynakları, Şekil 1'de gösterildiği gibi, sabit saat yönünde 2° derecelik takım eğim açısı, saat yönünde 535 devir/dakika dönme hızı ve 3,8 mm dalma derinliği şartlarında 37 ve 51 mm/dakika takım ilerleme hızlarında konik uç kullanılarak üretilmiştir. Yapılan kaynakların kesit alanı incelenmesi ve çekme kesme testleri yapılmıştır. Çekme kesme testi için kaynaklı levhalar 25 mm genişliğinde olacak şekilde kesilerek numuneler hazırlandı (Şekil 2) ve 250 kN'lik bir SHIMADZU çekme test cihazında 1,5 mm/dakika sabit hızda gerçekleştirilmiştir.

Table 1: Kimyasal bileşim

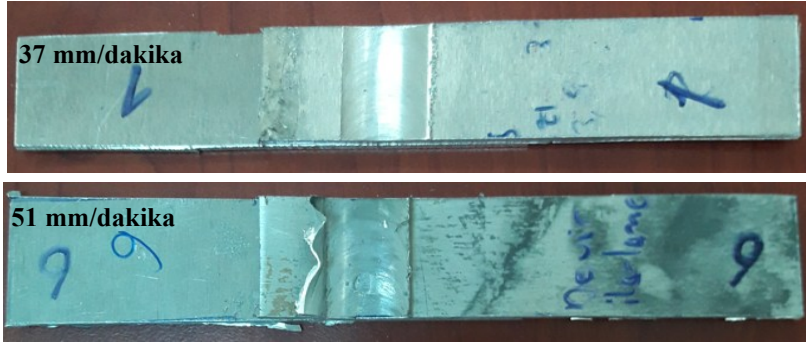
	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Ca	Zn	Al	Diğ.	Mg
AZ31 B	0,0 1	0,00 4	0,00 05	0,2 9	0,00 13	0,00 5	0,7 5	3, 3	0,3	Bal.
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+ Zr	Diğerl eri
EN AW 7075- T651	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1- 2,9	0,18 - 0,28	5,1 - 6,1	0, 2	0,25	0,15

Table 2: Mekanik özellikler

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Vickers Mikrosertlik (HV)
AZ31B	140	240	7	57
EN AW 7075-T651	460	530	11	174



Şekil 1: SKBK işlemi



Şekil 2: SKBK çekme kesme testi için numuneler

Sonuçlar ve Tartışma

Farklı takım ilerleme hızlarında üretilen SKBK kaynaklarının kesit alanı görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Takım ucunun alttaki EN AW 7075-T651 alüminyum alaşımına dalmasıyla bu alaşımın malzemesi sağa ve yukarıya doğru kıvrılarak hareket ettiği görülmektedir. Bu kıvrılmış malzemeye kanca adı verilmekte ve bu kanca üstte bulunan plakanın içerisine girdiği için üst plakanın kuvvetlere karşı dayanan kısmın azalmasına neden olduğu için birleşmenin mukavemetini düşürmektedir. Daha düşük takım ilerleme hızı 37 mm/dakika ile üretilen birleştirmenin arayüzeyinde oluşan kancanın daha uzun ve daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni daha yavaş ilerleme hızında ortaya çıkan ısının daha fazla olması ve malzemenin daha fazla yumuşaması ve daha fazla plastik deformasyona uğraması sonucu ile takım tarafından daha fazla sürüklemesidir. Dubourg, Merati & Jahazi (2010) göre ilerleme hızının artırılması kancanın küçülmesine neden olmaktadır.

a) 37 mm/dakika



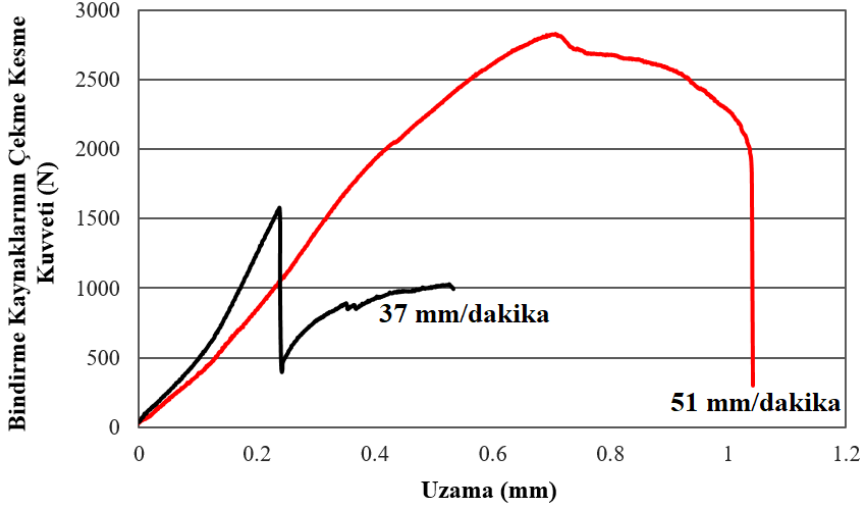
b) 51 mm/dakika



Şekil 3: SKBK kaynaklarının makro kesit alanı fotoğrafları. a) 37 mm/dakika, b) 51 mm/dakika ilerleme hızı

Takımın saat yönünde dönmesiyle birlikte, pimin ucundan takım omzuna doğru yukarı doğru bir malzeme transferi söz konusu olmuştur. Yapılan diğer çalışmalarda daha yüksek dönüş hızlarında (1400 devir/dakika) malzemenin tam bir hilal şeklindeki yer değiştirmesine yol açtığı tespit etmişlerdir (Kumar, Kailas & Srivatsan, 2011; Mishra & Ma, 2005; Nandan, DebRoy & Bhadeshia, 2008). Kaynakların çekme kesme kuvvet-uzama eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Kaynak mukavemeti ve uzaması takımın yüksek ilerleme hızında artmıştır. Daha düşük takım ilerleme hızında daha zayıf birleşmenin meydana gelmesinin nedeni Şekil 3'te de görüldüğü üzere daha büyük ve daha uzun bir kanca kusurunun oluşmasına bağlanabilir. Lee & Lee. (2008) 5052 ve 6061

alüminyum alaşımlarının SKBK ile birleştirilmesini çalışmış ve daha yüksek kaynak hızının daha dayanıklı kaynak oluşturduğunu belirtmiştir.



Şekil 4: Bindirme kaynakların çekme kesme yükü-uzama

Sonuçlar

Yapılan birleştirmelerde konik pimli takım ile 535 devir/dakika sabit dönme hızı ve 37 ve 51 mm/dakika ilerleme hızları uygulanmıştır. İlerleme hızının kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. İlerleme hızının düşük tutulması, arayüzey birleştirme alanından daha fazla uzaklaşan bir kancaya sahip olması kaynak mukavemet değerini azalmıştır.

Kaynakça

Ahmed, M. M. Z., Seleman, M. M. E., Fydrych, D., &Çam, G., (2023). Review on friction stir welding of dissimilar magnesium and aluminum alloys: scientometric analysis and strategies for achieving high-quality joints. *Journal of Magnesium and Alloys* 11 (11), 4082-4127.

Bilgin, M. (2019). Alüminyum / Magnezyum (al / mg) malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

Dubourg, L., Merati, A., & Jahazi, M. (2010). Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. *Materials & Design*, 31 (7), 3324-3330.

Emiralioglu, A. (2017). Farklı alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin kaynak edilebilirliğe etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı.

Kumar, K., Kailas, S. V., & Srivatsan T. S. (2011). The role of tool design in influencing the mechanism for the formation of friction stir welds in aluminum alloy 7020. *Materials and Manufacturing Processes* 26, 915-921.

Lee, C. Y., Lee, W. B., Kim, J. W., Choi, D. H., Yeon, Y. M., & Jung, S. B. (2008). Lap joint properties of FSWed dissimilar

formed 5052 Al and 6061 Al alloys with different thickness. Journal of Materials Science, 43, 3296-3304.

Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering R 50, 1-78.

Mohammadi J., Behnamian Y., Mostafaei A., & Gerlich A.P. (2015). Tool geometry, rotation and travel speeds effects on the properties of dissimilar magnesium/aluminum friction stir welded lap joints. Materials and Design, 75, 95-112.

Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science 53, 980-1023.

Ravikumar, S., Seshagiri Rao V., & Atish Ranjan (2013). Evaluation of bending strength for Dissimilar Friction stir welded AA6061T651 - AA7075 T651 aluminium alloy butt joint. 2nd International Conference on Trends in Industrial and Mechanical Engineering (ICTIME'2013) Sept 17-18, Hong Kong.

Saraçoğlu, E. (2007). Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının incelenmesi. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir, 2-3.

Shah, L. H., Othman, N. H., & Gerlich, A. (2018). Review of research progress on aluminium-magnesium dissimilar friction stir welding. Science and Technology of Welding and Joining 23 (3), 256-270.

BÖLÜM XVI

Güç Üretim Santrali Boylerlerinde By-Pass Klepelerindeki Sızdırmazlıkların Güç Üretimine Etkisi

Mehmet ALTINKAYNAK¹
Muammer Zafer ÖZTÜRK²

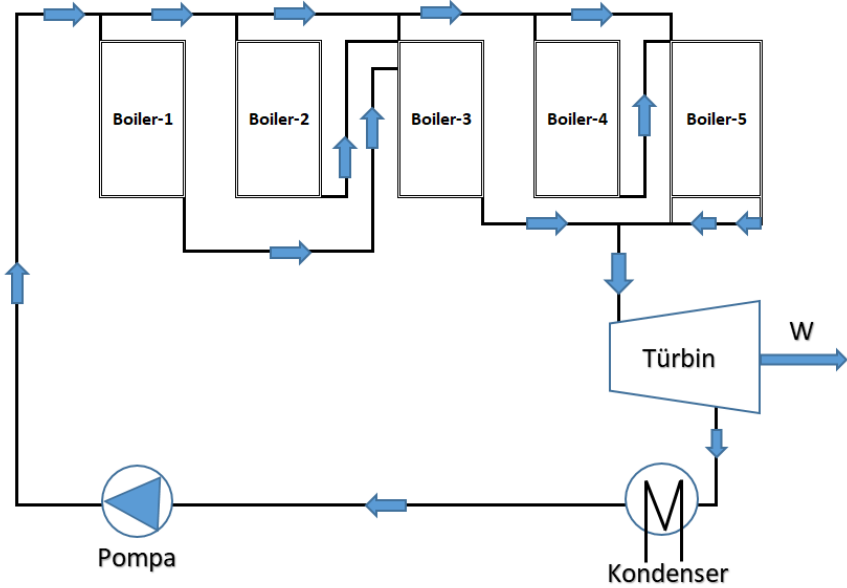
Giriş

Ülkemizde ve dünyada endüstride ve ağır endüstri olarak adlandırılan, yüksek yakıt ve ısıl enerji sarfiyatlarının olduğu tesislerin proses gazlarında yüksek sıcaklıklar mevcuttur. Bu proses gazları ısıtmada, tavlamada, kurutmada ve ürünün pişirilmesinde kullanılmaktadır. Başta Çimento sektörü, Demir Çelik sektörü ve Cam sanayi olmak üzere yüksek proses gazı sıcaklığına sahip tesisler bulunmaktadır. Bu tesislerde kullanılan sıcak gazlar işlevini

¹ Doç. Dr., Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Isparta/Turkey, Orcid: 0000-0003-2434-576X, mehmetaltinkaynak@isparta.edu.tr

² Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Isparta/Turkey, Orcid: 0009-0007-0282-8492, zafer.ozturk@goltas.com.tr

tamamladıktan sonra genellikle bacadan atılmaktadır. Bacadan atılan sıcak gazın bir ısı değiştiriciden geerilerek buhar üretilmesi ve elde edilen buharın da türbinden geerilerek g üretilmesi yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Bu proses gazlarının ısı değiştirici olarak adlandırdığımız boilerlerin giriş kısmında, özel aktarma organları dediğimiz boru hatları ve bunlara bağlı olan klepeler kullanılmaktadır. Kullanılan bu klepelerde yapılan analizler sonucunda tam kapatmama veya eksik kapatma olarak adlandırdığımız açık kalma durumları için gaz kaçakları olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada beş adet boiler bulunan bir g üretim santralinde bu kaçakların yerine sızdırmazlıkların iyileştirilerek g üretimine etkisi incelenecektir. Beş boilerli g üretim sisteminin akış şeması şekil 1’de verilmiştir.



şekil 1: Beş Boilerli G retim Sistemi

Şekil 1 de görünen beş adet boilerin sistem parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Boyler Sistem Parametreleri

Parametreler	Boiler 1	Boiler 2	Boiler 3	Boiler 4	Boiler 5
Gaz giriş Sıcaklığı (C°)	380	335	400	340	340
Gaz Çıkış Sıcaklığı(C°)	112	230	92	230	230
Gaz Debisi Nm ³ /h	110000	153000	150000	120000	150000
Superheater basıncı (MPa(g))	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2
Buhar Sıcaklığı (C°)	355	310	370	315	315
Buharlaştırma kapasitesi (t/h)	20.6	10.7	35.2	8.9	11.1

Şekil 1 de görünen güç üretim sistemindeki türbine ait sistem parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Türbin Sistem Parametreleri

Parametreler	
Model	N12-1.1
Kapasite	12MW
Nominal Buhar Giriş Basıncı (Mpa)(a)	1.1
Nominal Buhar Giriş Sıcaklığı (C°)	350 (+10)(-20)
Egzoz Basıncı (Mpa)(a)	0.007
Devir(r/min)	3000
Soğutma suyu sıcaklığı (C°)	27~33

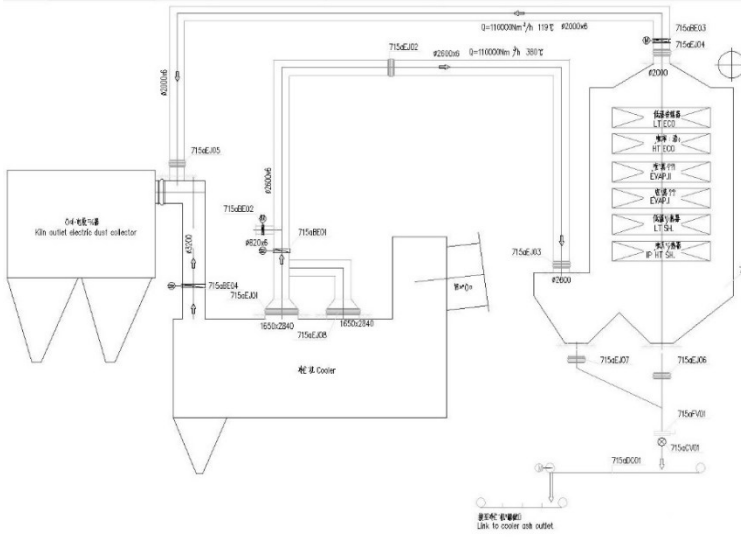
Şekil 1 de görünen güç üretim sistemindeki jeneratöre ait sistem parametreleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: Jenaratör Sistem Parametreleri

Parametreler	Jenerator
Model	QF-J12-2
Kapasite (MW)	12
Anma Gerilimi (V)	6300
Anma Devri (r/min)	3000
Verim %	97

Klinker soğutma gaz hattı üzerinde bulunan by pass klepesinin kanatlarına, boilerlere giden sıcak gazlardaki klinker tozlarının klepe

kanatları üzerine çökerek dolması ile klepeye hava akış yönünün tersinde ilave ağırlık yüklenmektedir. Bu ilave ağırlık ve gaz hattı basıncı sebebiyle klepe %100 kapanmamaktadır ve bir miktar açık kalmaktadır. Bahsi geçen klepe genel görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.



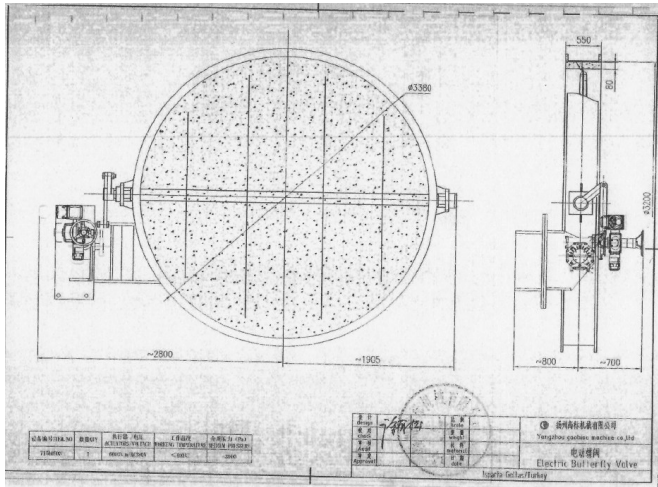
Şekil 2: Boiler Gaz Hattı Klepesi

Mevcut klepedeki sızdırmazlık yetersizliğinden gaz hızı, ölçülen sıcaklık, gaz debisi ve kaçak ısı miktarının 3200 mm çaptaki boruda enerji kaybına dair ölçüm verileri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4: Klepe sistemi kaçak gazın enerji eşdeğeri

By-Pass Bacası Çapı	3200	mm
Hız	10	m/s
Ölçülen Sıcaklık	230	°C
Debi	25,13	m ³ /s
Debi	13,19	kg/s
C _p	0,258	kcal/kg.C
Kaçak Isı	783	kcal/s
Kaçak Isı	24.691.831.919,61	kcal/yıl
Kömür Düşük Isı Değeri	6.200,00	kcal/kg
Kayıp Kömür Miktarı	3.982.553,54	kg/yıl

Yukarıdaki Tablo 4’de görülen kaçak gazın ısı değerinin kömür karşılığına bakıldığında yıllık kayıp kömür miktarının 3.982,5 ton olduğu hesaplanmıştır. Bu kaybın gerçekleştiği klepenin teknik resmi Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3: Mevcut Boiler Gaz Hattı Klepesi Teknik Resmi

Bu yıllık 3.982,5 ton kömürün geri kazanımı için tasarlanan klepe sisteminin genel görüntüsü Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4: Yüksek Sızdırmazlıklı Klepe

Yüksek sızdırmazlıklı klepe kullanımını sonrasında beklenen gaz hızı, ölçülen sıcaklık, gaz debisi ve kaçak ısı miktarının 3200 mm çaptaki boruda enerji kaybına dair ölçüm verileri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Yüksek Sızdırmazlıklı Klepe sistemi sonrası kaçak gazın enerji eşdeğeri

By-Pass Bacası Çapı	3200	mm
Hız	0,7	m/s
Ölçülen Sıcaklık	90	°C
Debi	1,76	m ³ /s
Debi	0,92	kg/s
Cp	0,258	kcal/kg.C
Kaçak Isı	21	kcal/s
Kaçak Isı	676.341.483,02	kcal/yıl
Kömür Düşük Isı Değeri	6.200,00	kcal/kg
Kayıp Kömür Miktarı	109.087,34	kg/yıl

Sonuç

Güç üretim santrallerinde Boiler girişindeki kaçak gazın yıllık enerji kaybına etkisi çok yüksek olmaktadır. Bu çalışmada mevcut bir güç üretim santralinde boiler klepelerindeki sızdırmazlığın yıllık kömür sarfiyatı açısından karşılığı incelenmiştir. İnceleme sonucunda çalışmada belirtilen klepe tipi için yıllık kaybın 3.982.553,54 kg kömür olduğu hesaplanmıştır. Tavsiye edilen yeni klepe sistemi ile bu kaybın geri kazanılması mümkün olacaktır.

Yüksek sızdırmazlıklı yeni klepe tasarımı sonrasındaki sistemdeki kayıp kömür miktarının yıllık 109.087,3 kg olduğu hesaplanmıştır. Yapılan iyileştirme önerisi sonucunda yıllık 3.873.466,24 kg kömür tasarruf edildiği ve bununla ısı enerjisi miktarının yıllık 24.015.490.688 kcal olduğu ifade edilmiştir.

Yapılacak iyileştirmenin kendisini çok kısa sürede geri ödeyeceği çıkan kömür tasarrufu hesabıyla görülmektedir.

BÖLÜM XVII

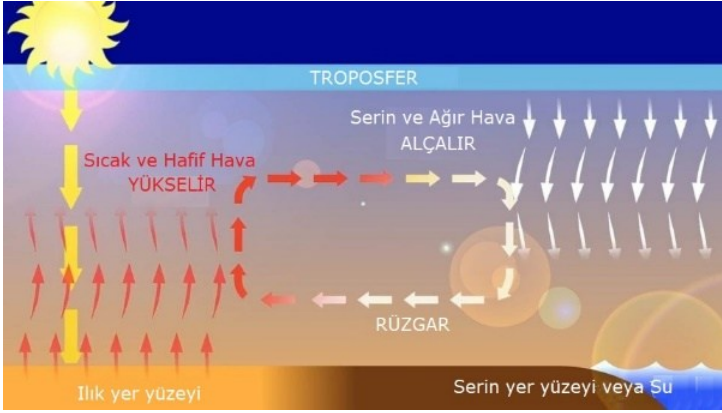
Yüksek Yapılı Barajların Rüzgar Akış Dinamikleri ve Hava Kalitesine Etkileri

Haluk KELEŞ¹

1. Giriş

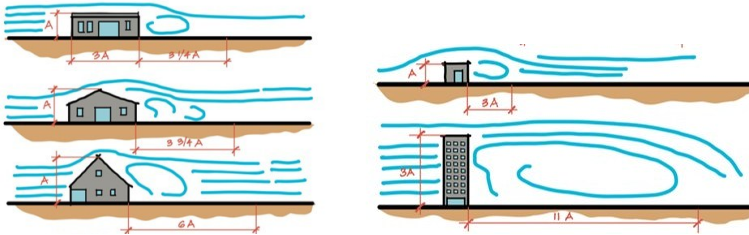
Rüzgar, atmosferdeki hava kütlelerinin yer değiştirmesi sonucu oluşan yatay hava hareketidir. Bu hareketin temel nedeni, yeryüzündeki sıcaklık farklılıklarıdır. Güneşin Dünya üzerindeki farklı bölgeleri eşit ısıtmaması nedeniyle basınç farkları ortaya çıkmaktadır. Hava, yüksek basınçlı alanlardan alçak basınçlı alanlara doğru hareket eder ve bu harekete rüzgar denir (Şekil 1).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin/Türkiye, Orcid: 0000-0002-6562-8902, hkeles@artvin.edu.tr



Şekil 1: Rüzgar oluşumunun şematik gösterimi (Climate, 2024)

Rüzgarın hızını ve yönünü belirleyen faktörler arasında: Basınç farkı ilk sırada yer almaktadır. Basınç farkı ne kadar büyükse, rüzgar o kadar güçlü olmaktadır. Faktörler arasında ikinci sırada, Dünya'nın dönme etki yani Coriolis etkisi yer almaktadır. Rüzgarın doğrusal hareketi Dünya'nın dönüşü nedeniyle sapmaktadır, bu olay kuzey yarımkürede sağa, güney yarımkürede sola yönlenme şeklinde gerçekleşmektedir. Üçüncü faktör olarak ise yeryüzü şekillerinin etkisi karşımıza çıkmaktadır. Dağlar, vadiler ve denizler gibi doğal oluşumlar rüzgarın yönünü ve hızını etkileyen unsurlar arasında gösterilmektedir.



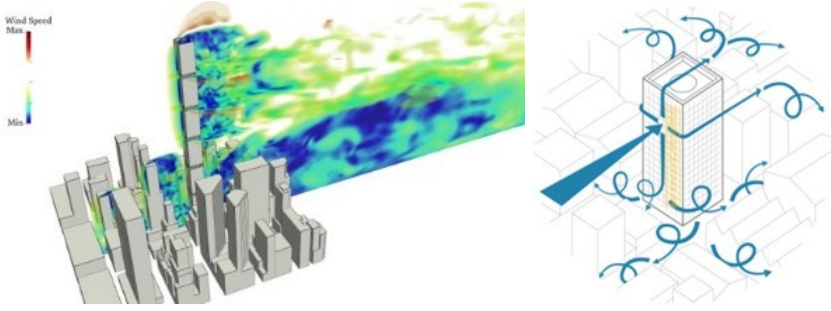
Şekil 2: Örnek yapılar üzerinde rüzgar etkilerinin şematik gösterimi (07sketches, 2024)

Havanın akım hareketi olan rüzgar, akışkanlar mekaniği ve aerodinamiğin çalışma alanları arasına girmektedir.

Yapılar, rüzgar hızını azaltma ve türbülans yaratma kapasitesine sahiptir. Bu yapıların bulunduğu alanlarda, rüzgarın akış şekli; yapıların yüksekliği, şekli ve konumu gibi faktörlerden etkilenir (Şekil 2). Yüksek yapılar, rüzgarın akışını engelleyerek hızı azaltabilir. Barajlar ve yüksek yapılar, bu rüzgar akışının yönünü, hızını ve türbülansını önemli ölçüde değiştiren unsurlardır. Rüzgarın yapıya çarpması sonucu yapının arka kısmında bir resirkülasyon bölgesi yani girdap bölgesi oluşturur.

Yüksek yapıların rüzgar üzerindeki bu etkileri, sadece inşaat mühendisliği ve mimarlık alanında değil, aynı zamanda çevre mühendisliği, hava kalitesi ve enerji üretimi gibi birçok disiplinde de önem taşımaktadır.

Yapıların varlığı, rüzgar akışında türbülans yaratma potansiyeline sahiptir. Rüzgarın yüksek yapıların etrafında dönmesi, dalgalanmalara ve karmaşaya yol açar (Şekil 3). Bu türbülans, özellikle yapının yakınında bulunan yayalar üzerinde rahatsız edici etkilere sebep olmasının yanı sıra hava kalitesini etkileyebilir ve çevredeki bitki örtüsü ile ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir.



Şekil 3: Örnek yapılar üzerinde rüzgar etkilerinin şematik gösterimi (Studco Building Systems, 2024, Mozart Cultures, 2024)

Çalışma konumuz olan barajlarda ise; rüzgar akışını nasıl etkilediği ve bu etkinin çevresel faktörlerle etkileşimi, derinlemesine incelenmesi gereken bir konudur.

2. Yüksek Yapılı Barajların Etkisi

Yüksek yapılı barajlar, su kaynaklarının yönetimi, enerji üretimi ve tarımsal sulama gibi alanlarda kritik roller üstlenmektedir. Ancak, bu büyük yapılar sadece su ve enerji sistemlerini değil, aynı zamanda atmosferik dinamikleri ve hava kalitesini de etkilemektedir. Baraj göllerinin oluşumuyla birlikte, mikroklimatik değişimler, rüzgar akış alanlarında farklılıklar yaratarak ve bölgesel hava kalitesinde önemli değişikliklere neden olabilmektedirler. Bu kitap bölümü, yüksek yapılı barajların rüzgar akış dinamikleri ve hava kalitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele alarak, Artvin’de bulunan Deriner Barajı’nın rüzgar akış dinamikleri ve yörede yarattığı etkinin 2 boyutlu sayısal analizli konu hakkında genel bilgiler sunmaktadır.

2.1. Rüzgar Akış Dinamikleri Üzerindeki Etkisi

Baraj göllerinin oluşumuyla birlikte, su yüzeyi sıcaklıkları ve arazi şekilleri değişmektedir. Bu değişimler, rüzgarın hızını ve yönünü etkilemektedir. Barajlar, rüzgarın yavaşlamasına veya belirli alanlarda tıkanmasına neden olabilmektedir. Bu durum, yerel hava sirkülasyonunda bozulmalara ve dolayısıyla bölgesel iklim şartlarında değişimlere yol açabilmektedir.

2.2. Hava Kalitesi Üzerindeki Etkiler

Baraj projeleri, inşaat sürecinde toz ve partikül yayılımına neden olurken, baraj gölü oluştuktan sonra bu etkiler yerini nem artışına ve sıcaklık farklılıklarına bırakır. Bu durum, ozon ve diğer kirleticilerin bölgeye dağılımını etkileyerek hava kalitesinde farklılıklar oluşturabilmektedir. Barajın yapılı olduğu vadi boyunca, baraj gövdesinin üst ve alt bölümlerinde ölü rüzgar alanları oluşabilmekte, bu alanlarda havadaki ağır gazların birikmesi beklenen bir olgudur.

2.3. Ekosistem ve Tarım Alanlarına Etkileri

Rüzgar desenlerindeki değişiklikler, bitki örtüsü ve tarım alanları üzerinde doğrudan etkilidir. Rüzgar sirkülasyonundaki azalma, bölgeye taşınan tohum ve polen miktarını azaltarak biyoçeşitliliği etkileyebilir. Aynı zamanda, artan nem oranı tarımsal verimliliği olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilir.

3. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde kullanılan araştırma yöntemleri, hem saha çalışmaları hem de bilgisayar tabanlı simülasyonlardan oluşmaktadır. Uydu görüntülemeleri, çevresel modeller, baraj

sahasındaki rüzgar akışını ve hava kalitesindeki değişimlerinin simülasyonunu oluşturmak için temel kaynaklar olarak kullanılmıştır.

Ülkemizde yüksek yapılı barajlar göz önüne alındığında Artvin’de bulunan Çoruh Vadisi ön plana çıkmaktadır (Şekil 4). Çoruh Vadi’sindeki barajlar yüksek yapılı oldukları için, bunların rüzgar üzerine etkilerinin incelenmesi ve hava kalitesine etkilerinin belirlenmesine yönelik bir ön çalışma bu kitap bölümü kapsamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4: Artvin ili ve Çoruh Vadisinin harita üzerinde gösterimi

3.1. Çoruh Vadisindeki Barajların Özellikleri

Çoruh Vadisindeki fiziksel ve konumsal özellikler, rüzgar akış dinamiklerinin ve hava kalitesinin incelenmesi açısından önemli bir bağlam sunmaktadır. Barajların çevresindeki hava akımının analizi, enerji üretimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bilgiler sağlayabilir. Barajın konumu, çevredeki ekosistem üzerinde etkili olabilmektedir. Rüzgar akışının değişimi, vadi içindeki bitki örtüsünü ve ekosistemi etkileyebilir.



Şekil 5: Çoruh Vadisi üzerindeki yüksek yapılı barajların konumsal gösterimi

Çoruh Nehri Vadisi, derin vadileri, dik yamaçları ve güçlü su akışı ile karakterizedir. Bu coğrafik özellikler, barajın inşası için uygun bir alan sağlamakta, aynı zamanda rüzgar akışını ve hava dinamiklerini de etkilemektedir. Vadi yapısı, rüzgarın yönünü değiştirebilir ve baraj çevresinde türbülans yaratabilir.

Vadi üzerinde dikkat çeken 3 büyük-yüksek yapılı baraj söz konusudur. Bunlar, Borçka Barajı, Deriner Barajı ve Yusufeli Barajlarıdır (Şekil 5).



Şekil 6: Borçka barajının konumsal gösterimi

Merkezi kil çekirdekli dolgu tipindeki, toplam 728 m uzunluğunda ve talvegden 86 m yükseklikte olan baraj gövdesine sahiptir. Bu üç baraj içerisinde gövde yüksekliği en az olan fakat yerleşim yerlerine en yakın olan bu barajdır (Şekil 6).



Şekil 7: Yusufeli barajının konumsal gösterimi

Yusufeli Barajı, Artvin İli'nin yaklaşık 40 km güneybatısında ve Çoruh Nehri üzerindeki Yusufeli ilçesinin 10 km akış aşağısında yer almaktadır (Şekil 7). Gövde yüksekliği 275 metre ile Vadideki ve ülkemizdeki gövde yüksekliği en büyük olan barajdır.



Şekil 8: Deriner barajının konumsal gösterimi

Sahip olduğu 249 metre gövde yüksekliği ile en yüksek 2. barajımız olan Deriner, yerleşim yerlerine yakınlık bakımından Borçka'nın gerisinde fakat Yusufeli'nin çok ilerisindedir (Şekil 8)

3.2. Deriner Barajının Özellikleri

Çalışmanın ana konusunu oluşturan Deriner Barajına gelecek olursak, Deriner Barajı, Türkiye'nin önemli su yapılarından biri olarak öne çıkmaktadır (Şekil 9).



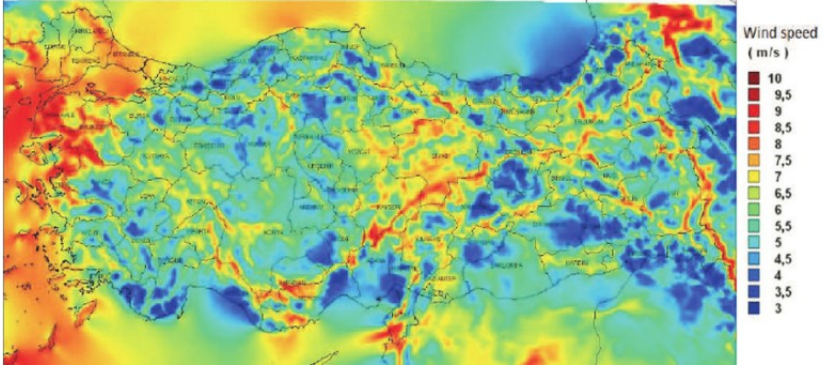
Şekil 9: Deriner barajının gerçek görüntüsü

Toplamda 249 metre yüksekliği ile Türkiye'nin en yüksek barajlarından biridir. Bu yükseklik, barajın su depolama kapasitesini ve enerji üretim verimliliğini artıran kritik bir faktördür. Barajın yüksekliği, aynı zamanda rüzgar akışını da etkilemektedir. Yüksek yapılar, çevresindeki hava akımını engelleyerek türbülans yaratmakta ve rüzgar hızını azaltmaktadır.

Barajın kurulu güç kapasitesi 670 MW olarak belirlenmiştir. Bu, Deriner Barajı'nın hidroelektrik enerji üretiminde önemli bir rol oynamasını sağlar. Yüksek enerji üretim kapasitesi, rüzgar akış dinamiklerini etkileyen su seviyeleri ve barajın çevresindeki hava akımını da etkileyebilir. Enerji üretiminde yüksek verimlilik, hidroelektrik santrallerinin çevresel sürdürülebilirliği üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır.

3.3. Rüzgar Akış Dinamikleri

Rüzgar akış dinamikleri, yerel coğrafı yapı, yüksek yapıların varlığı ve arazi eğimi gibi bir dizi faktörden etkilenir. Rüzgar enerjisi potansiyeli değerlendirmelerinde en önemli faktör, atmosferik olaylar içerisinde oldukça değişken ve öngörülmesi en zor olan rüzgar hızıdır (Doğanşahin vd., 2019). Şekil 10'da 100m rakımda ortalama rüzgar hızlarını gösteren bir Türkiye haritası görülmektedir. Bu haritadan Doğu Karadeniz'in rüzgar yönünden zayıf olduğu söylenebilir, ancak Artvin'deki Çoruh vadisinin ise bölge ortalamasının oldukça üzerinde olduğu dikkati çekmektedir. Özellikle vadinin dik yamaçlardan oluşması, ciddi sıcaklık farklılıklarının oluşmasına ve dolayısıyla rüzgar akımı oluşmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 10: Türkiye'nin ortalama rüzgar hızı haritası (Senguler ve Yumurtacı, 2019)

Çoruh Nehri Vadisi'nin dik ve dar yapısı, rüzgar akışını kanalize ederek belirli yönlere doğru hızlanmasına neden olabilir. Vadi içinde rüzgarın serbestçe hareket edebileceği alanların sınırlı olması, rüzgarın dar alanlardan geçerken hızlanmasına neden olurken, vadi boyunca rüzgarın yönü de önemli değişiklikler gösterebilir.

Vadi ve çevresindeki yamaçların eğimi, rüzgarın yerel hızını doğrudan etkiler. Dik eğimli alanlarda rüzgar hızlanma eğiliminde olurken, düz alanlarda yavaşlar. Barajın bulunduğu bölgenin eğim özellikleri, rüzgar akışının doğasını ve bu akışın baraj ve çevresindeki etkilerini şekillendiren önemli bir unsurdur.

Yüksek yapılar, rüzgarın akış yönünü engelleyerek yapı çevresinde türbülans yaratır. Bu türbülans, barajın arkasındaki "rüzgar gölgesi" olarak adlandırılan bölgede meydana gelir. Rüzgar gölgesinde hava akımları düzensizleşir, bu da hava kalitesinde bozulmalara ve rüzgarın gücünde düşümlere yol açabilir. Türbülansın

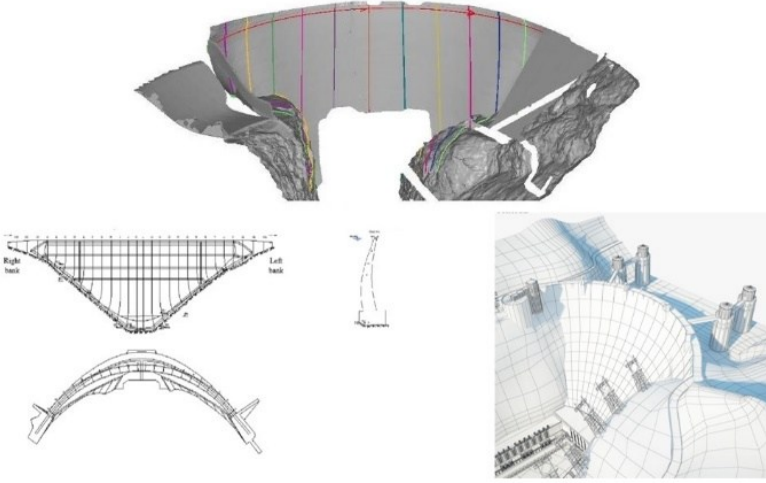
etkisi, barajın yüksekliği ve rüzgarın geliş açısına bağlı olarak değişir.

Rüzgar, yüksek yapıların varlığıyla doğal yönünde değişiklikler yaşar. Rüzgarın baraj gibi büyük bir yapıya çarpması, hava akımının çeşitli yönere dağılmasına yol açar. Çevresel faktörler ve arazi şekilleriyle birleştiğinde bu yön değişiklikleri, rüzgarın sürekli değişen bir hareket örüntüsü sergilemesine neden olur. Rüzgarın yönündeki bu değişiklikler, barajın çevresinde bulunan yerleşim alanları ve doğal habitatlar için önemli sonuçlar doğurabilir.

3.4. Simülasyon Modelinin Hazırlanması

ANSYS Fluent, özellikle akışkanlar dinamiği (CFD) alanında yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Karmaşık akışkan akışlarını, ısı transferini, kimyasal reaksiyonları ve faz değişimlerini simüle ederek analiz yapılmasına olanak tanır. Bu özellikleri sayesinde mühendislik ve araştırma alanlarında oldukça değerlidir.

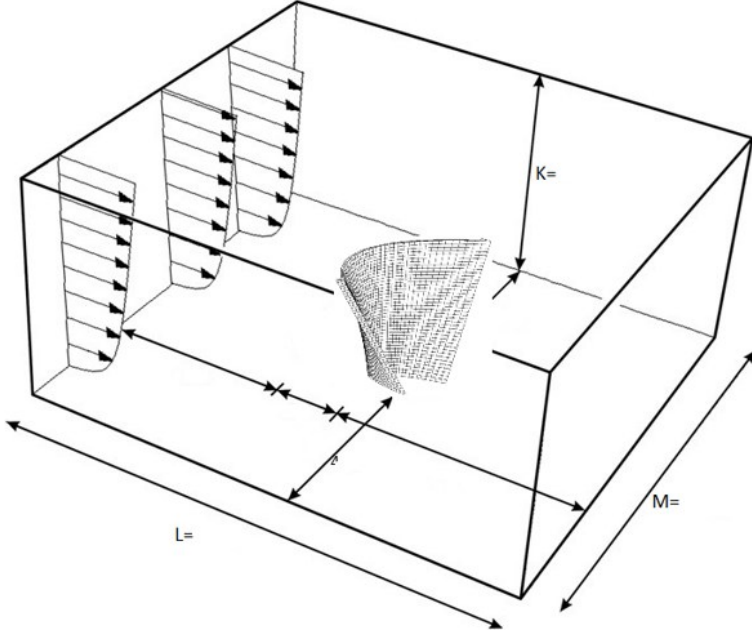
Barajlar gibi büyük yapılar etrafındaki rüzgar akışını analiz etmek için kullanılan FLUENT modülü, farklı akış rejimlerini, türbülans modellerini ve sıcaklık etkilerini yüksek hassasiyetle modelleyebilir (Şekil 11).



Şekil 11: Örnek bir baraj modelinin 3 boyutlu geometrisinin oluşturulması (Leica Geosystems, 2024)

Çalışmada ilk adım, barajın ve vadinin 3 boyutlu geometrik modelinin oluşturulmasıdır. Bu model, barajın yüksekliği, genişliği ve Çoruh Nehri Vadisi'nin topoğrafik özelliklerini içermelidir. Geometri oluşturulurken çevresel faktörler, rüzgar yönü ve vadi içindeki eğimler dikkate alınır. Barajın her iki tarafındaki rüzgar gölgeleri ve türbülans bölgeleri özellikle incelenir.

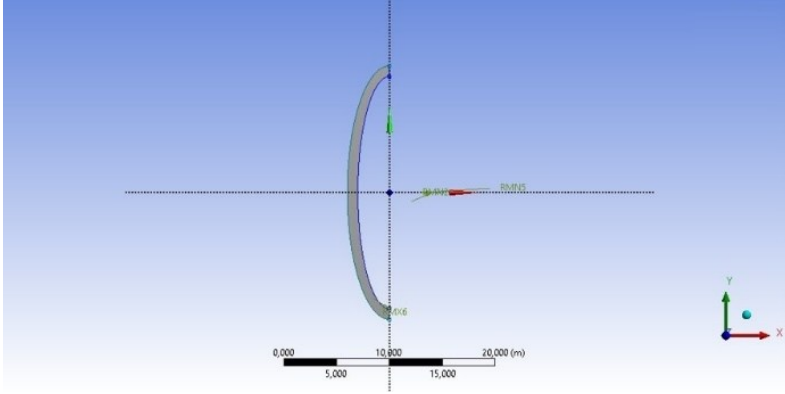
Bu kitap bölümü için hazırlanan çalışmadan bilgisayar kapasitesinin yetersizliği nedeniyle 2-Boyutlu analiz gerçekleştirilmiştir. Sonraki çalışmalarda vadinin 3-Boyutlu topoğrafik yapısının drone ile çıkarılması ve katı bir modele dönüştürülerek, akış analizlerinin bu model üzerinde gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.



Şekil 12: Baraj gövdesinin sayısal akış alanına yerleştirilmesi

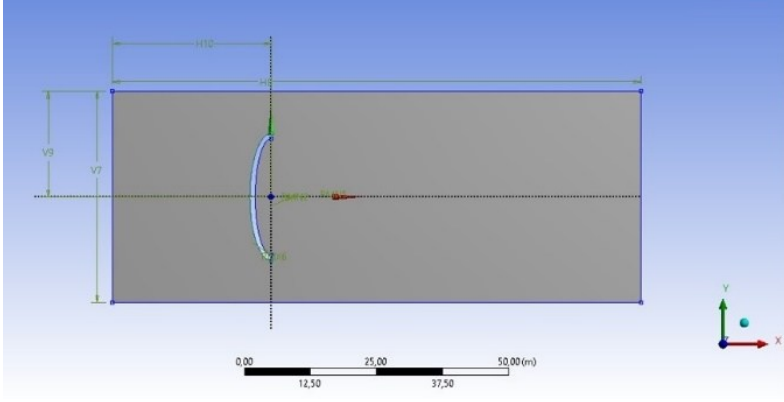
Baraj gövdesi modelinin üç boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni Şekil 12’de görülmektedir. Hesaplama hacmi $1250 \times 1000 \times 500 \text{ mm}^3$ boyutlarında oluşmuştur. Bu boyutlara göre blokaj oranı % 0.22 olarak gerçekleşmiştir. Girişteki serbest akış hızı 10 m/s (36km/sa) olarak, atmosferik sınır tabaka gelişimi de dikkate alınarak girilmiştir. Model etrafındaki akış alanları için aynı olan sınır şartları, girişte “VELOCITY INLET”, çıkışta “PRESSURE OUTLET” ve duvarlarda ve model yüzeyinde “WALL” olarak tanımlanmıştır.

Kitap bölümü için gerçekleştirilen çalışmada, baraj gövdesini temsil eden eliptik modelin iki boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni Şekil 13’te görülmektedir.



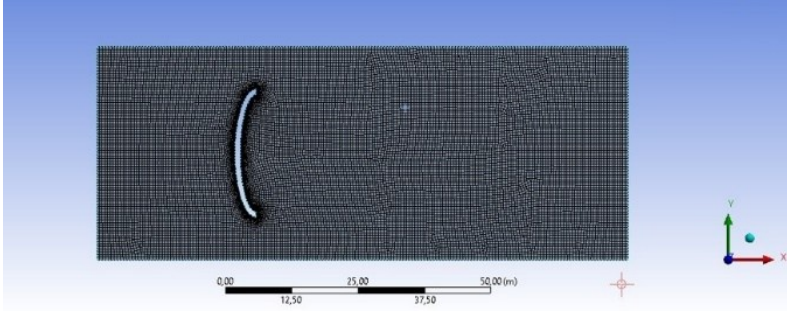
Şekil 13: 2 boyutlu baraj gövdesinin üstten görünüş çizimi

Hesaplama alanı 100m yatay, 40m düşey şeklinde oluşmuştur. Model ise VELOCITY INLET’ten itibaren yatayda 30m ileri konumlandırılmıştır (Şekil 14). Bu boyutlara göre blokaj oranı % 0.16 olarak gerçekleşmiştir. Girişteki serbest akış hızı 10 m/s (36km/sa) olarak, üniform biçimde girilmiştir. Model etrafındaki akış alanları için aynı olan sınır şartları, girişte “VELOCITY INLET”, çıkışta “PRESSURE OUTLET” ve duvarlarda ve model yüzeyinde “WALL” olarak tanımlanmıştır.



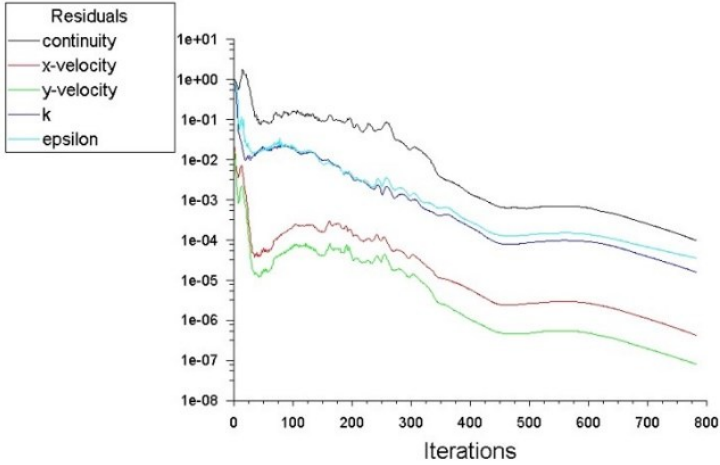
Şekil 14: 2 boyutlu baraj gövdesinin sınır koşullarının tanımlanması

ANSYS FLUENT'in Academic versiyonu ile gerçekleştirilen çözümlerde, bu özel geometrik durum için literatürde tercih edilen Realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Duvar yaklaşımı olarak, daha kısa sürede yakınsama sağlaması nedeniyle genişletilmiş duvar ifadesi (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak SIMPLE algoritması esas alınmıştır. Çözümlerde daha hassas sonuçlar verdiği için, değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişimine yönelik Second Order Upwind yaklaşımı kullanılmıştır. Çözüm alanındaki ağ yapısı Şekil 15'te görüldüğü gibi model etrafında yoğunluğu artan bir düzende oluşturulmuştur. Çözüm alanının tamamında quadrilateral ağ yapısının kullanımına özen gösterilmiştir. Bu şekilde oluşturulan ağ düzeni ile hesap alanı 32385 adet düğüm noktasından oluşmaktadır. Model katı yüzeyleri boyunca $y^+ < 2$ olmaktadır.



Şekil 15: 2 boyutlu baraj gövdesinin ağ yapısının oluşturulması

Sonucu hızlı ulaşabilmek adına Normalize edilmemiş artıkların 10^{-5} 'den küçük olması koşulu, çözüm yakınsama kriteri olarak belirlenmiştir. Bu koşulda çözüme yaklaşık 800'üncü itaesyonda ulaşılmaktadır (Şekil 16).



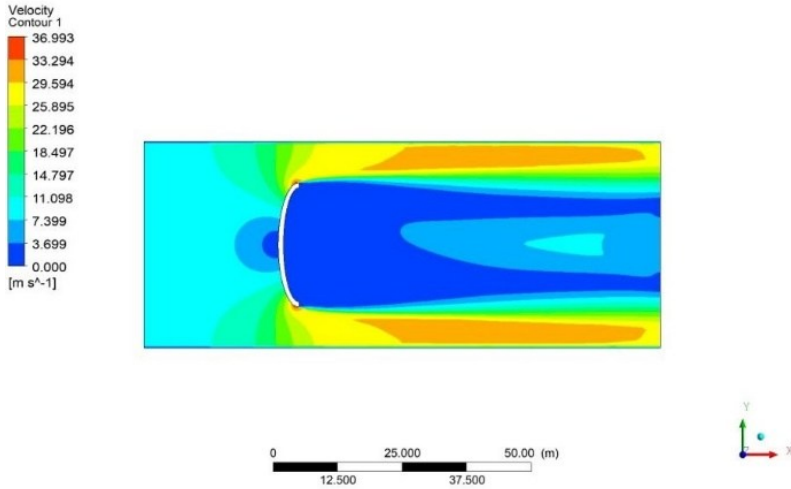
Şekil 16: İteratif çözümün yakınsama profili

4. Bulgular ve İrdeleme

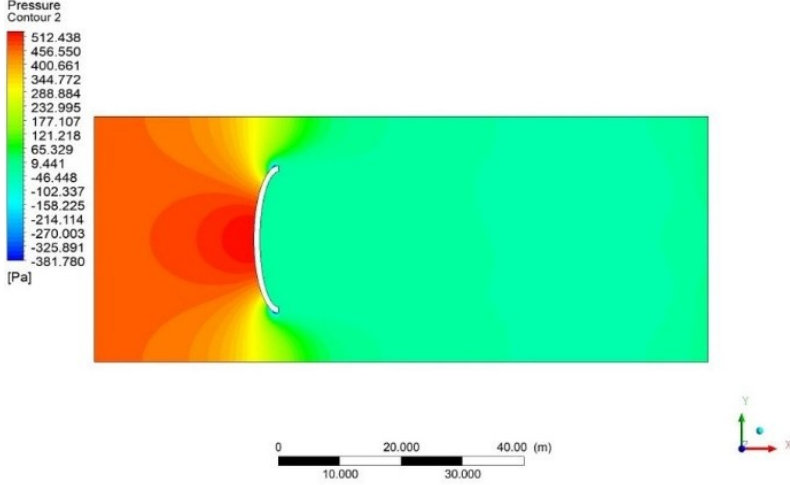
Gerçekleştirilen 2 boyutlu sayısal analiz sonucunda, eliptik baraj modeli üzerinde yatay kesitte rüzgar geliş açısının 0° değeri

için elde edilmiş hız konturu Şekil 17’de görülmektedir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, model ön yüzeyinin her iki kenarından itibaren akış yönlenerak hız kazanmaktadır. Model arkasında hız değerleri azalmaktadır.

Eliptik baraj modeli üzerinde yatay kesitte rüzgar geliş açısının 0° değeri için elde edilmiş basınç konturu Şekil 18’de görülmektedir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, model ön yüzeyinde çarpmanın etkisi ile pozitif basınç alanları oluşurken, model yanlarında akışın hızlandığı bölgelerde basınçta düşüşler, model arkasında ise negatif basınç alanları oluşmaktadır.

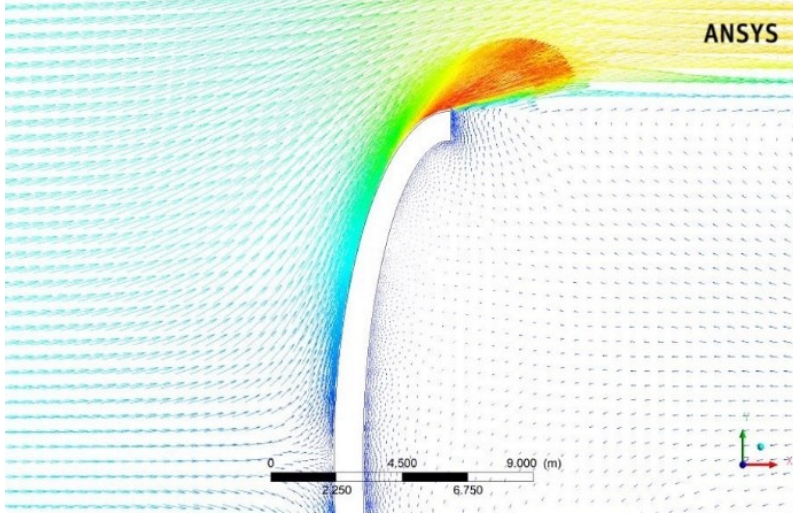


Şekil 17: 2 boyutlu baraj profiline hız kontur görüntüsü



Şekil 18: 2 boyutlu baraj profilinin basınç kontur görüntüsü

Eliptik baraj modeli üzerinde yatay kesitte rüzgar geliş açısının 0° değeri için elde edilmiş hız vektörleri Şekil 19’da görülmektedir. Model ön yüzeyine doğru hız vektörlerinin her iki kenara doğru büyüyerek yönlendiği, kenarda akışın sıkışması ile boyutlarının ve şiddetinin arttığı, model arkasında ise vektörlerin girdap oluşturarak ters akış alanları yarattığı görülmektedir.



Şekil 19: 2 boyutlu baraj profilinin basınç kontur görüntüsü

Elde edilen simülasyonlar sonucu, Deriner Barajı gibi büyük yapılar ve bunların çevresinde oluşan girdap alanları, rüzgar akışının azalmasıyla birlikte kirletici maddelerin birikmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Rüzgarın doğal temizleyici etkisi ortadan kalktığında, kirleticiler havada daha uzun süre asılı kalır ve bu bölgelerde birikir. Girdap alanlarında düşük basınç ve yetersiz hava akışı, hem doğal hem de insan kaynaklı kirleticilerin yayılmasını ve seyrelmesini engelleyici etki göstermektedir.

5. Sonuçlar

1. Barajın yüksek yapısı, vadideki doğal rüzgar akışını önemli ölçüde kesintiye uğratmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre, barajın rüzgar hızını vadi tabanında azalttığı ve rüzgarın yönünü değiştirerek türbülans yarattığı görülmüştür. Özellikle barajın arka tarafında girdap alanları oluşmuş, bu da vadi boyunca doğal hava sirkülasyonunu bozmaktadır.
2. Yüksek yapıların yarattığı türbülanslar, rüzgarın kararsız ve düzensiz hareket etmesine yol açmaktadır. Bu türbülanslar, vadinin farklı noktalarında ani rüzgar hızlanmaları ve yn değişikliklerine neden olabilmekte, bu da hava kalitesi açısından olumsuz sonuçların doğmasında etken olmaktadır.
3. Girdap bölgelerinde düşük basınç alanlarının oluşması, kirleticilerin bu bölgelerde yoğunlaşmasına ve birikmesine neden olması beklenmektedir. Rüzgarın zayıflamasıyla birlikte, vadideki sanayi faaliyetleri, araç egzozları v.b. sebeplerden kaynaklanan kirleticiler havada asılı kalması ve dağılamayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Climate (2024). (30/11/2024 tarihinde <https://www.slideshare.net/slideshow/climate-2/239202983> adresinden ulaşılmıştır).

07sketches (2024). (20/10/2024 tarihinde https://scontent.ftzx2-1.fna.fbcdn.net/v/t39.30808-6/370046247_734010858743314_6307338577395796060_n.jpg?_nc_cat=108&ccb=1-7&_nc_sid=833d8c&_nc_ohc=PSA6qvsLNO0Q7kNvgEo2Ff0&_nc_oc=AdiTbS5dMrjEqiCy0SY_KAgPBbW1UKmrVK__m66rtcKoAFDiV5oCiaENvvnv2FvEFyZg&_nc_zt=23&_nc_ht=scontent.ftzx2-1.fna&_nc_gid=A82ZMLhziIGjBqtTgZ8Ds3-&oh=00_AYCWvVigV2J40vxE0MbBf9YJXAGg6xPr-sfheHeNSJoY_FQ&oe=676FA4A5 adresinden ulaşılmıştır).

Studco Building Systems (2024). (25/11/2024 tarihinde <https://studcosystems.com.au/wp-content/uploads/2021/09/Simscale-vortex-350x219.jpg> adresinden ulaşılmıştır).

Mozart Cultures (2024). (25/11/2024 tarihinde https://mozartcultures.com/en/wp-content/uploads/2021/02/buildings_air-300x300.jpg adresinden ulaşılmıştır).

Doğanşahin, K., Uslu, A. F., & Kekezoğlu, B. (2019). İki Bileşenli Weibull Dağılımı ile Rüzgâr Hızı Olasılık Dağılımlarının Modellenmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(15), 315-326. <https://doi.org/10.31590/ejosat.505723>

Senguler, F., & Yumurtacı, Z. (2019) Hybrid Solar And Wind Energy Potential Map of Turkey and Cost Analysis of 1 MW Hybrid Power Plants. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (ijerat)*, 5(6), 01-14. Doi: 10.31695/IJERAT.2019.3450

Leica Geosystems (2024). (10/11/2024 tarihinde <https://cyclone3dr.leica-geosystems.com/help/2024.1/MeshingADam.html> adresinden ulaşılmıştır).

BÖLÜM XVIII

Examination of the alternatives for the use of additive and metal additive manufacturing methods in light weapons

Faruk GÜNER¹
Hasan Onur TAN²

Introduction

Throughout history, weapons have often been the instruments that shape and define the course of events. In today's globalized world, despite advancements in economic unity, communication, and widespread social humanist policies, large-scale conflicts are still directed by those who lead nations. Current events, such as the Russia-Ukraine and Gaza-Israel conflicts, highlight that major wars persist even amid growing interdependence. Consequently, the importance of the defense industry is increasing steadily.

¹ Assoc. Prof. Dr., Giresun University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Giresun/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3438-0553, faruk.guner@giresun.edu.tr

² Assist. Prof. Dr., Giresun University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Giresun/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3796-9889, hasan.tan@giresun.edu.tr

Materials and Models

While countries undeniably rely on aerial assets such as missiles, drones, and fighter jets to gain strategic advantages in warfare, actual occupation of a territory requires infantry superiority. Air systems serve to support ground operations by weakening the opposition's capabilities, providing crucial intelligence and firepower. This support is particularly vital since offensive personnel are typically more vulnerable than those in defensive positions. Modern conflicts reveal a pattern where each side attempts to inflict maximum damage from the air before transitioning to irregular ground warfare. The defending forces, often able to establish positions and ambushes with greater ease, tend to find strategic advantage in urban environments. The iconic defense of Stalingrad by Russian forces against the Germans in World War II is an early example, mirrored at the onset of the Russia-Ukraine conflict. Similarly, in Turkey's Diyarbakir/Sur region, organized military forces faced considerable losses against small, minimally equipped terrorist groups.

Given this backdrop, the advancement of light weapons—often considered the backbone of infantry operations—becomes critical for defense strategy. This study aims to examine damage patterns in light weaponry, proposing alternative testing methods to detect these damages during production and additional manufacturing approaches to prevent them.

A review of the literature reveals numerous studies in this field. One such study analyzed the propagation of micro- and nano-scale cracks in gun barrels and their effects on barrel fatigue strength. The study examined in detail the initiation and spread of these small cracks, emphasizing the critical importance of understanding how micro- and nano-sized flaws can impact the structural integrity of gun barrels over time, given the high stress and thermal loads they endure.

The research focused on high-strength steel used in barrel construction, exploring material properties and production

techniques. Barrel specimens underwent repeated load testing, with crack initiation and propagation observed and compared through fatigue testing, structural analysis using scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM), and numerical simulations. This approach provided a comprehensive view of crack progression and the factors affecting it.

The study found that micro- and nano-sized cracks significantly influence fatigue strength in gun barrels. Micro cracks typically initiate on the surface, and surface treatments can help delay this process. Nano-scale cracks often result from the merging of micro cracks, accelerating crack propagation. The study highlighted the need for optimized surface treatments and material composition to enhance fatigue life. Furthermore, numerical analyses were shown to be consistent with experimental results, validating their use as reliable methods for predicting crack behavior.

These findings are applied in the design and manufacturing processes of gun barrels, contributing to the development of more durable and reliable weapon systems (Ren & Wang, 2020). As an example, the strain nephogram in the transverse crack analysis of a barrel is given in Figure 1.

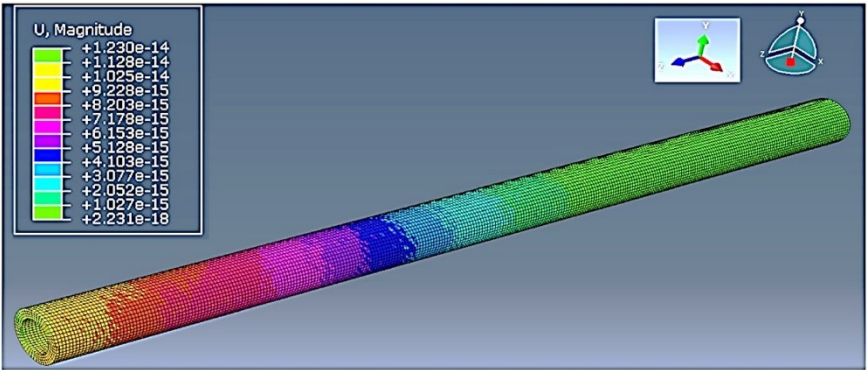


Figure 1: Strain nephogram of the barrel with transverse crack analysis

An important area of study is the investigation of the dynamic effects experienced by a gun barrel during firing. Due to the high experimental costs, some researchers use numerical analysis methods to examine these dynamic loads. During firing, the gun barrel is subjected to extreme conditions, including high pressure and temperature, which impact its structural integrity. To better understand these effects and develop more resilient barrel designs, researchers have modeled the barrel's dynamic behavior using the Finite Element Method (FEM), typically applied to high-strength steel, the standard material for gun barrels. This modeling accounts for pressure and temperature distributions occurring during firing, incorporating factors such as internal pressure, recoil forces, and thermal effects.

Advanced finite element software packages, such as Ansys, Abaqus, and Marc Mentat, are frequently used in these analyses. Numerical results are often validated against experimental data, enhancing the reliability of the findings. The study revealed that high-pressure zones develop along the inner surface of the barrel during firing, helping to identify critical stress areas in the barrel design. Additionally, it was observed that the high temperatures generated during firing temporarily alter the barrel's material properties, potentially affecting its fatigue life. The recoil forces following each shot were also found to create stress concentrations within the barrel, which may accelerate crack initiation—an issue especially relevant for small arms (Jamroziak, Bocian, Pyka, & Kulisiewicz, 2019).

Additive manufacturing is a modern manufacturing method that offers solutions to a wide range of engineering challenges. While additive manufacturing enables the production of complex geometries, predicting and improving the mechanical performance of these structures remains a challenge. Research has shown that lattice structures, in particular, can enhance structural strength while optimizing weight, making them especially valuable in industries where weight and strength are critical, such as aerospace and automotive.

Lattice structures manufactured additively can be designed and analyzed to predict and optimize their mechanical performance. Among numerical analysis methods, finite element analysis (FEA) is particularly prominent for this purpose. Innovative approaches within FEA are being developed to achieve more precise and convergent results. However, there are still relatively few studies focused on FEA-based analysis and optimization of lattice structures. In one study, lattice structures composed of metallic or polymeric materials, such as aluminum alloys or titanium, were analyzed under various geometrical configurations and loading conditions using FEA. Genetic algorithms and topology optimization were employed to identify optimal designs, and the numerical model's results were validated through experimental testing to ensure reliability.

The study demonstrated the effectiveness of FEA in optimizing the mechanical performance of additively manufactured lattice structures. Through FEA and optimization techniques, lattice designs were created that provided optimal mechanical performance across diverse loading conditions, achieving maximum structural strength with minimal material use. The FEA results offered detailed insights into how different geometrical parameters and material properties affect mechanical performance, helping to identify critical design parameters for truss structures. A high level of agreement between the numerical and experimental results confirmed the model's accuracy.

These findings support the development of durable, lightweight, and efficient structural components, which can be integrated into the design and manufacturing processes of additively manufactured lattice structures (Karri & Kambagowni, 2024). Stress distribution alternatives for different cellular structures are given in Figure 2.

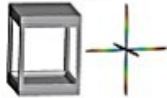
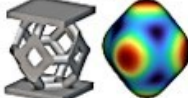

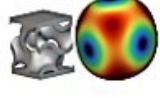

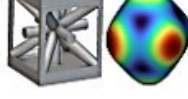
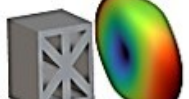

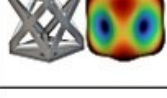


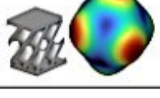
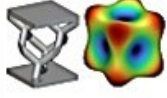

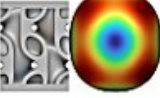
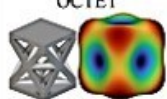



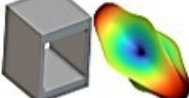
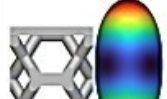
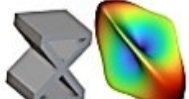
STRUT BASED		HONEYCOMB	TPMS
<p>SCC</p> 	<p>KELVIN CELL</p> 	<p>TRIANGULAR</p> 	<p>GYROID</p> 
<p>BCC</p> 	<p>ISO TRUSS</p> 	<p>TRIANGULAR ROTATED</p> 	<p>SCHWARZ</p> 
<p>FCC</p> 	<p>RE-ENTRANT</p> 	<p>HEXAGONAL</p> 	<p>DIAMOND</p> 
<p>DIAMOND</p> 		<p>HEXAGONAL ROTATED</p> 	<p>LIDINOID</p> 
<p>OCTET</p> 		<p>RE-ENTRANT</p> 	<p>SPLIT P</p> 
<p>TRUNCATED CUBE</p> 		<p>SQUARE</p> 	
<p>TRUNCATED OCTAHEDRON</p> 		<p>SQUARE ROTATED</p> 	

Figure 2: Modulus variation observed in cellular solids in Z direction

In this paper, we present a parallel finite element framework for part-scale thermomechanical analysis in metal additive manufacturing processes. This framework introduces a novel approach to manage the complexity and scale of these processes, incorporating adaptive meshing techniques and high-performance computational algorithms. It enables detailed modeling of complex effects, such as thermal gradients, material deformations, and internal stresses, which are inherent in metal additive manufacturing.

Accurately simulating the thermal and mechanical effects of these processes requires attention to specific material properties. For thermal analysis, thermophysical properties such as thermal conductivity and specific heat capacity are essential. For mechanical analysis, the focus shifts to the stress-strain behavior of the material, elastic-plastic deformation patterns, and material fatigue characteristics. The finite element method (FEM) is the primary tool used to handle the process's complexity and scale effectively.

Our results indicate that this parallel finite element framework is a powerful tool for thermomechanical analysis in metal additive manufacturing. Its high accuracy, adaptive capabilities, and scalability provide significant advantages for optimizing process parameters and enhancing product quality in industrial applications. Additionally, the framework's parallel computing infrastructure allows efficient execution of large-scale simulations, a feature critical for industrial-scale applications (Moreira, Caicedo, Cervera, Chiumenti, & Baiges, 2023).

Another important research area in recent years is residual stress in metal additive manufacturing processes. Managing residual stress is vital for maintaining material performance, durability, and geometric accuracy. Various control strategies have been proposed to mitigate these effects, ranging from material selection to process parameter optimization. Key material properties, such as thermal expansion coefficients, thermal conductivity, and temperature distribution, are particularly influential. Investigative methods, including finite element analysis, experimental measurements, and

computational techniques, are used to analyze how stresses form and distribute throughout the manufacturing process, guiding the development of effective control strategies. Figure 3 shows contour-fills of residual von Mises stresses and the vertical displacements for different AM processes.

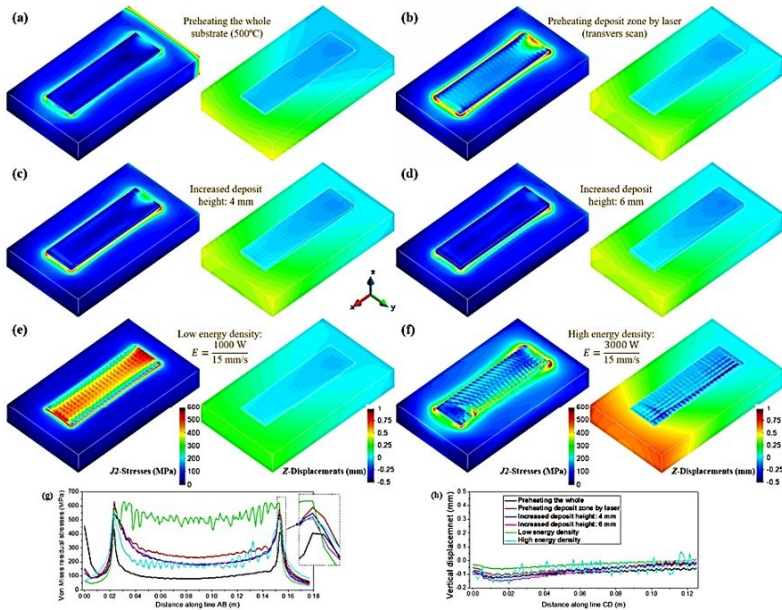


Figure 3: Contour-fills of residual von Mises stresses and the vertical displacements for different AM processes: preheating (a) the whole substrate to 500 °C and (b) the deposit region on the substrate surface by laser (transverse scan); increasing the deposit height to (c) 4 mm and (d) 6 mm, respectively; using the (e) lower and (f) higher energy to fabricate AM block, respectively; (g) residual von Mises stresses along the AB line at the substrate top; (h) vertical displacements along the CD line at the deposit top (Lu, Cervera, Chiumenti, & Lin, 2021).

This study highlights that controlling residual stress is essential for ensuring product quality, durability, and geometric

accuracy in metal additive manufacturing. With the implementation of an appropriate control strategy, risks such as cracking can be minimized, mechanical performance can be enhanced, and products are more likely to meet functional requirements. This approach ultimately improves the reliability and repeatability of the manufacturing process in industrial applications (Lu et al., 2021).

Another study highlights the use and importance of three-dimensional finite element modeling (FEM) in metal additive manufacturing processes, showcasing its advantages for designing and producing complex geometries. The study emphasizes key areas such as accurately simulating thermomechanical effects, analyzing material behavior, and optimizing the manufacturing process. It provides details on essential material properties and modeling techniques relevant to 3D FEM in metal additive manufacturing. Figure 4 shows the schematics of additive manufacturing (AM) by selective laser melting (SLM).

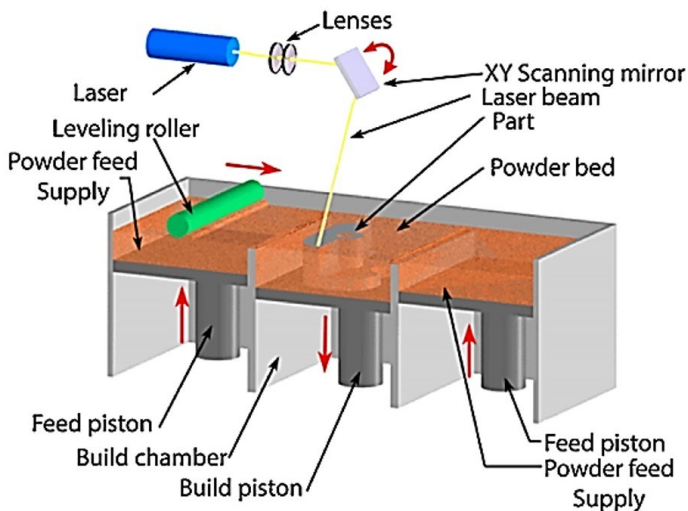


Figure 4: Schematics of additive manufacturing (AM) by selective laser melting (SLM) (Chen, Guillemot, Gandin, & Bellet, 2017)

Material selection, a critical initial step in the process, requires accurate modeling of properties like mechanical strength,

thermal conductivity, and thermal expansion coefficients of metal alloys. The study describes the process of creating a finite element mesh over the CAD model of the part geometry, calculating temperature distributions, and analyzing resulting stresses and deformations. Additionally, model validation is discussed, with experimental data comparisons to ensure accuracy.

The results demonstrate that three-dimensional finite element modeling offers substantial benefits in metal additive manufacturing. Despite complex geometries, this approach enhances process control, quality assurance, and production efficiency. FEM also plays a crucial role in decision-making processes, supporting optimization of process parameters, material selection, and overall manufacturing process improvement (Chen et al., 2017).

Computer modeling of Laser Powder Bed Fusion (LPBF), a 3D metal printing technology, demonstrates the ability to accurately simulate the complex thermal and mechanical interactions inherent to this process. Recent advancements in numerical analysis enhance this accuracy, including improved thermal modeling of material properties, computational methods for simulating layer-by-layer material deposition, and finite element analysis (FEA).

Several studies in the literature focus on optimizing and ensuring quality control in LPBF by integrating experimental data with model development strategies. One study, for example, presents a methodology that combines experimental data and theoretical modeling to accurately describe the thermal and mechanical properties of materials used in LPBF. This approach shows that advanced computational modeling not only deepens understanding of the LPBF process but is also essential for process optimization. Numerical analyses serve key objectives such as enhancing part quality, optimizing manufacturing processes, and advancing material design.

The study also suggests areas for future improvement in LPBF technology, such as further integration of material characterization and process parameters to support continued innovation in this field (Sarkar, Kapil, & Sharma, 2024). The simplest principles of LPBF schematized in Figure 5.

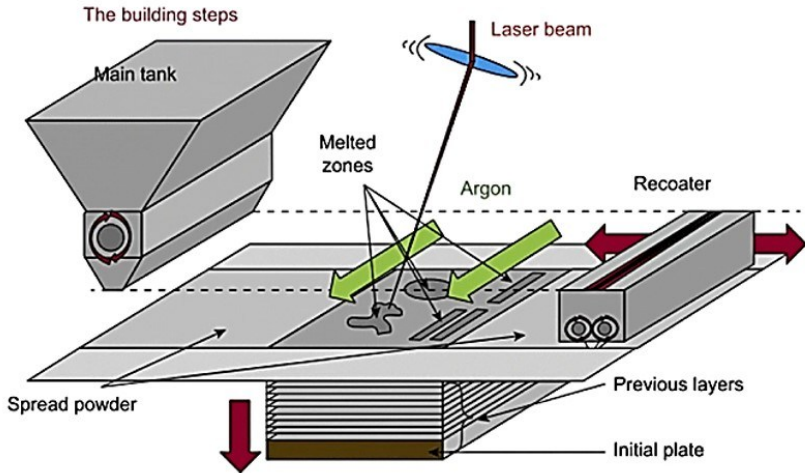


Figure 5: Schematic representation of the LPBF process (Kruth, Mercelis, Van Vaerenbergh, Froyen, & Rombouts, 2005)

The next evolution in Laser Powder Bed Fusion (LPBF) technology is Laser Additive Metal Manufacturing (LAM), a manufacturing process supported by experimental studies. In the literature, numerical methods, including finite element analysis (FEA), have been used to better understand LAM and ensure its precision for engineering applications. The focus of research has primarily been on metals critical for industrial use, particularly titanium and aluminum. Through FEA, studies have concentrated on analyzing temperature distribution and mechanical stresses within the LAM process. Results consistently show strong agreement between FEA modeling and experimental findings, with detailed evaluations on how LAM affects mechanical strength, surface quality, and geometric accuracy. The studies also outline

optimization techniques for critical parameters in the LAM process (Karri & Kambagowni, 2024).

Additive manufacturing (AM) processes have gained considerable traction in industry due to their high production speed. Alongside this efficiency, studies increasingly focus on enhancing material properties. In this context, numerical methods, particularly finite element analysis, are used to analyze temperature and thermal stresses within AM processes. These models, which assess temperature distribution and resulting thermal stresses, are critical for advancing the reliability of AM processes and improving material performance through effective thermal management.

The literature shows a high concentration of research on metals and polymers, particularly titanium and aluminum, which are commonly used in metal AM. FEA techniques are extensively employed to study various AM processes and analyze the effects of different energy sources, such as lasers, electron beams, or ultrasound, on material behavior. Temperature distribution analyses highlight the importance of thermal management, with simulations examining both surface and internal temperature variations. Studies further investigate how thermal stresses in AM parts are calculated and the impacts of these stresses on part geometry and material choice.

The literature provides a comprehensive review of thermal analyses across different AM processes, discussing their impact on process quality, part geometry, and mechanical performance. The findings show that theoretical results from FEA modeling are validated with experimental data, demonstrating the adaptability of FEA for practical, industrial applications(Luo & Zhao, 2018).

Conclusion

Experimental results have shown that applying the finite element method (FEM) to large surface areas yields favorable outcomes for in-depth analyses. Literature studies indicate that FEM plays a significant role in advancing specialized manufacturing

techniques such as additive manufacturing (AM), while also reducing production costs. The AM method is expected to become increasingly prevalent in the defense industry through diverse applications, enabling the mass production of complex parts.

References

Chen, Q., Guillemot, G., Gandin, C. A., & Bellet, M. (2017). Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials. *Additive Manufacturing*, 16, 124-137. doi:10.1016/j.addma.2017.02.005

Jamroziak, K., Bocian, M., Pyka, D., & Kulisiewicz, M. (2019, 2019//). *Numerical Analysis of the Dynamic Impact of a Gun Barrel During Firing*. Paper presented at the Mechatronics 2017 - Ideas for Industrial Applications, Cham.

Karri, C. P., & Kambagowni, V. (2024). Finite Element Analysis Approach for Optimal Design and Mechanical Performance Prediction of Additive Manufactured Sandwich Lattice Structures. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. doi:10.1007/s40033-024-00650-7

Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26-36. doi:10.1108/13552540510573365

Lu, X. F., Cervera, M., Chiumenti, M., & Lin, X. (2021). Residual Stresses Control in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(4), 138. doi:10.3390/jmmp5040138

Luo, Z. B., & Zhao, Y. Y. (2018). A survey of finite element analysis of temperature and thermal stress fields in powder bed

fusion Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 318-332. doi:10.1016/j.addma.2018.03.022

Moreira, C. A., Caicedo, M. A., Cervera, M., Chiumenti, M., & Baiges, J. (2023). An accurate, adaptive and scalable parallel finite element framework for the part-scale thermo-mechanical analysis in metal additive manufacturing processes. *Computational Mechanics*, 73(5), 983-1011. doi:10.1007/s00466-023-02397-6

Ren, J. P., & Wang, D. S. (2020). Micro/Nanocrack Propagation and Fatigue Strength Analysis of Gun Barrel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(3), 843-852. doi:10.1007/s11668-020-00882-1

Sarkar, D., Kapil, A., & Sharma, A. (2024). Advances in computational modeling for laser powder bed fusion additive manufacturing: A comprehensive review of finite element techniques and strategies. *Additive Manufacturing*, 85, 104157. doi:ARTN 104157

10.1016/j.addma.2024.104157