Teoriden Uygulamaya ileri Malzeme ve Üretim Yöntemleri

Editör
Hasan Köten

BİDGE

BİDGE Yayınları

Teoriden Uygulamaya İleri Malzeme ve Üretim Yöntemleri

Editör: Prof. Dr. Hasan Köten

ISBN: 978-625-372-445-0

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 Konfigürasyon Yönetiminin Uygulanması ve Önemi 6

Ali ÜZER 6

Abrasif Aşınma: Malzeme Sertlik ve Tokluğunun Etkisi 32

Aysel YAZICI 32

Gerinim Ölçer Teorisi ve Literatürdeki Güncel Uygulamaları 73

Ersan KIRAR 73

Savunma Sanayinde ve Askeri Kara Araçlarında Eklemeli İmalat Yöntemleri 89

Mustafa Akay SARIOĞLAN 89

Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan İleri Kaynak Teknikleri ve Uygulama Alanları 121

Şakir ALTINSOY 121

Nuray BEKÖZ ÜLLEN 121

İmalat Üretiminde DEM Modelinin Önemi 146

ALİ KEMAL ÇAKIR 146

Savunma Sanayii Sektöründe Sistem Mühendisliği Süreçleri Ve V Modelin Uygulanması 160

Ali ÜZER 160

Bakır Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu 185

Barış DOĞAN 185

Özgür ÖZGÜN 185

Zülküf BALALAN 185

Ömer EKİNCİ 185

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Kar Üfleme Aracında Kullanılan Çark Yapısının Fan Performansına Etkisi .. 212
Gökhan KOCA 212
Göktürk Memduh ÖZKAN 212
Rüzgar Türbini Kanatlarının Aeroakustik İncelenmesi 259
Haydar KEPEKÇİ 259
Hasan Rıza GÜVEN[2] 259
Metal Tozu Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi 309
Naci KURGAN 309
Dinamik Taşıt Modelinin Simülasyon Ortamında Enerji Tüketim Parametrelerinin İncelenmesi 395
Tevfik ATAMAN 395
Mehmet KARAYEL[2] 395
Plastik Malzemelerin Kaynağı ve Kaynağa Uygun Tasarım Prensipleri 416
Tuğçe TEZEL 416
Volkan KOVAN 416
Üç Boyutlı Yazıcı İle Üretilmiş Nano Partikül Takviyeli Kompozitlerin İncelenmesi 441
Umut TANYERİ 441
Farshıd KHOSRAVI 441
Boraks Dekahidrat Takviyeli Termoplastiklerin Eriyik Akış İndekslerindeki Değişimlerin İncelenmesi 457
Yılmaz KISMET 457
Hüseyin İSTEK[2] 457
Serhat GÜRAY[3] 457

Askeri Araçlarda Tırmanma, İniş ve Devrilme Test Performanslarının Değerlendirilmesi 470

Yunus AYAZSEVEN 470

Semi-Treyler Araçlarında Sürücü Konforu İçin Su Tankı Tasarımı ve Ergonomi Doğrulama Süreçleri 489

Mehmet VURGUN 489

Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçların CO_2 Salınımı Açısından İncelenmesi 506

Mustafa ÇAVLI 506

Eylem YILMAZ ULU 506

BÖLÜM I

Savunma Sanayii Sektöründe Konfigürasyon Yönetiminin Uygulanması ve Önemi

Ali ÜZER[1]

Giriş

Savunma sanayii, gelişen teknolojiler ve artan güvenlik gereksinimleriyle paralel olarak karmaşık sistemlerin entegre edilmesi ve yönetilmesi gereken bir sektör haline gelmiştir. Modern savunma projeleri, donanım, yazılım ve dokümantasyon gibi birbirine bağlı pek çok bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin sistemin genel performansını ve güvenilirliğini etkileyecek şekilde doğru ve tutarlı bir yapı içinde birleştirilmesi, projelerin başarısı açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak, bu bileşenlerden herhangi birinde yapılacak küçük bir değişiklik, sistemin tamamını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, her değişikliğin ve güncellemenin

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

sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, izlenmesi ve belgelenmesi gerekir. Konfigürasyon yönetimİ, bu kontrolün ve izlenebilirliğin sağlanmasında kilit rol oynar.

Savunma sanayi projelerinin başarısı, yalnızca sistemlerin teknik olarak doğru çalışmasından değil, aynı zamanda bu sistemlerin yaşam döngüsü boyunca yönetilmesi ve değişikliklerin etkin bir şekilde kontrol edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Savunma sanayiindeki sistemler, karmaşıklığı nedeniyle farklı disiplinlerin (yazılım, donanım, entegrasyon, bakım vb.) sürekli bir etkileşim içinde olduğu projelerdir. Bu projelerde her değişiklik, yalnızca mevcut sistemin değil, gelecekteki performansın ve güvenliğin de garantörüdür. Dolayısıyla, bu değişikliklerin yönetimi ve her bileşenin sürekli olarak izlenmesi gereklidir. Konfigürasyon yönetimi, bu amaçla sistem bileşenlerinin tanımlanması, belgelenmesi, izlenmesi ve değişikliklerin kontrol edilmesi gibi süreçleri içerir ve projelerin her aşamasında bu süreçlerin etkin bir şekilde uygulanmasını sağlar.

Bir savunma projesinde her bileşen, belirli kalite standartlarına ve güvenlik protokollerine tabi tutulur. Bu standartlar, yalnızca yerel düzeyde değil, uluslararası düzeyde de sıkı bir şekilde denetlenir ve projelerde uygulanması zorunludur. Konfigürasyon yönetimi, bu standartların korunmasını sağlamak amacıyla, her bir bileşenin doğru şekilde tanımlanmasını, düzenlenmesini ve gerektiğinde bu standartlara uyum sağlanarak değişiklik yapılmasını temin eder. Bu bağlamda, konfigürasyon yönetimi süreçleri, tüm proje paydaşlarının belirlenen kalite ve güvenlik hedeflerine ulaşmalarını sağlamak için yapılandırılır. Konfigürasyon kontrolü, değişiklik yönetimi ve değerlendirme süreçleri, bu tür projelerde, sistemin

güvenliğini ve kalitesini sağlayacak şekilde, sistemin her aşamasında titizlikle uygulanır.

Konfigürasyon yönetimi aynı zamanda, sistemlerin entegrasyonu ve tüm bileşenlerin uyum içinde çalışması için gerekli altyapıyı oluşturur. Konfigürasyon tanımlama, konfigürasyon anaçizgisi belirleme ve değişikliklerin izlenmesi gibi kritik süreçler, projelerin başarısı için vazgeçilmezdir. Bu süreçlerin doğru yönetilmesi, karmaşık savunma sistemlerinin her parçasının birbirleriyle uyumlu çalışmasını sağlar ve sistem entegrasyonunun kolaylaştırılmasında büyük rol oynar. Ayrıca, konfigürasyon yönetimi, proje ekiplerinin işbirliğini artırır, hata oranlarını azaltır ve projelerin daha verimli bir şekilde tamamlanmasına yardımcı olur.

Sonuç olarak, konfigürasyon yönetimi, savunma sanayiinde yüksek güvenlik, kalite ve verimlilik standartlarının sağlanması için temel bir yönetim aracıdır. Sistem mühendisliği disiplininde, karmaşık ve kritik projelerin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için konfigürasyon yönetiminin doğru ve tutarlı bir şekilde uygulanması gereklidir. Bu süreçler, yalnızca sistemin her parçasının düzgün çalışmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tüm projeyi öngörülen maliyetler ve süre içinde başarıyla tamamlamak için gerekli ortamı oluşturur. Savunma projelerinin başarısı, güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından konfigürasyon yönetiminin önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Bu nedenle, her savunma projesinde konfigürasyon yönetiminin etkili bir şekilde entegrasyonu, projenin tüm yaşam döngüsü boyunca başarıyı garanti altına alır.

Yöntem

Konfigürasyon yönetimi, savunma sanayinde birçok alanda doğrudan fayda sağlar. Örneğin, savunma projelerinde sistemlerin ömrü boyunca karşılaşılabilecek teknik sorunların çözümünde konfigürasyon yönetimi kritik bir rol oynar. Konfigürasyon yönetimi, tüm sistem bileşenlerinin versiyon kontrolünü sağlar ve sistemin ömrü boyunca her aşamada uyum içinde kalmasını garanti eder. Konfigürasyon yönetimi, izlenebilirlik ve şeffaflığın korunmasının, sistemde yapılacak değişikliklerin sorunsuz bir şekilde uygulanması açısından büyük bir önem taşır (Wilson, 2021).

Konfigürasyon; ürünün, teknik dökümanlarında tanımlandığı ve daha sonra ulaşıldığı şekliyle fonksiyonel ve fiziksel karakteristikleridir.

Konfigürasyon yönetimi; bir ürünün fonsiyonel ve fiziksel özelliklerinin kontrolunu ve izlenebilirliğini sağlamak amacıyla, hizmet süresi boyunca ürüne uygulanan bir yönetim disiplinidir. Ürünlerin maliyetlerini programlarını ve teknik performanslarını, tasarım, üretim ve lojistik destek safhalarında, müşterinin belirlediği ölçülerde tutmaya yarayan, birçok disiplini bünyesinde barındıran ve bu disiplinlerden yararlanan bir yönetim biçimidir.

Konfigürasyon Yönetimi, geliştirilen askeri sistemler için yaşam döngüsü desteğinin ayrılmaz bir parçası ve vazgeçilmez bir unsurudur. Tek başına çalışan, bağımsız bir süreç olarak görülmemelidir (NATO, Life Cycle Configuration Management Plan, 2024).

Bir sistemin yaşam döngüsü boyunca Konfigürasyon Yönetiminin uygun şekilde planlanması ve yürütülmesi, savunma

programlarının (ulusal, çok uluslu veya NATO) verimli bir şekilde çalışmasını ve ürün arayüzlerinin ve özelliklerinin İttifak operasyonel ihtiyaçlarıyla tutarlı olmasını sağlar (NATO, Policy On Configuration Management. , 2017)

Konfigürasyon Yönetiminin amacı müşterilerin bir sözleşme yaparak satın aldığı ürünün;

- Sözleşmede belirtilen teknik gereksinimlere uygun olduğunu,
- Fonksiyonel ve fiziksel olarak tanımlandığı gibi olduğunu garanti etmek,
- Gelecekte de ürünü, aynı kalitede, güvenilirlikte ve performansta tekrar üretebilmek için en alt seviyede parçalara kadar gerekli tanımlamaları yapmak,
- Ürünün bütünlüğünü ve tutarlılığını oluşturmak, oluşturulan bütünlük ve tutarlılığın devamlılığını sağlamaktır.

Tablo 1 Konfigürasyon Yönetim Standartları

MIL – STD-973	Configuration Management
ACMP (1-7)	Allied Configuration Management Publication
MIL-HDBK-61	Configuration Management Guidance
ISO 10007	Quality Management-Guidelines for Configuration Management
EIA-649B	Configuration Management Standart
MIL-STD-1521	Technical Reviews and Audits for Systems, Equipment And Computer Software

Konfigürasyon Yönetimi (KY) Gereksinimleri;

- Konfigürasyon Yönetimi Planlama,
- Konfigürasyon Tanımlama,
- Değişiklik Kontrolü,
- Konfigürasyon Değerlendirmesi ve Konfigürasyon Denetimi

uygulamalarından oluşmaktadır.

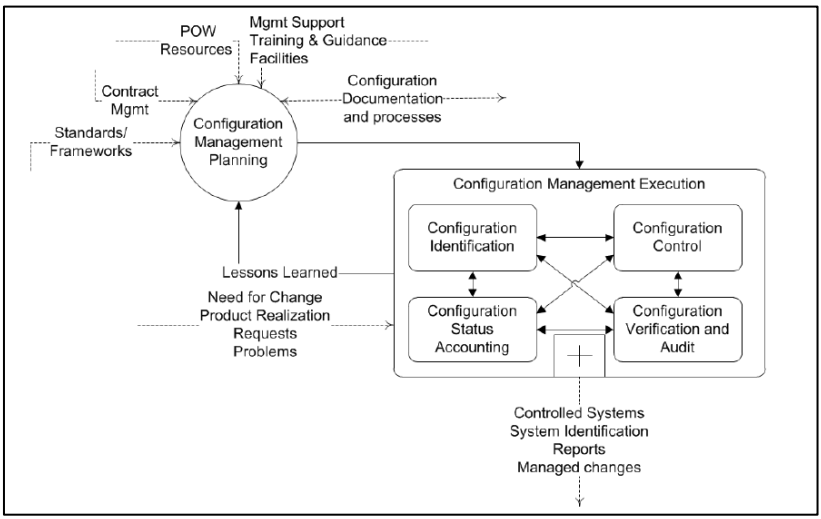
Şekil 1 Konfigürasyon Yönetimi İlişkileri

1. Konfigürasyon Yönetimi (KY) Planlama

KY Planı, belirli bir proje için konfigürasyon yönetiminin nasıl uygulanacağını tanımlar.

Müşteri ile konfigürasyon yönetimi konularında anlaşma sağlanması, firma sisteminin tanıtılması ve müşteri ile konfigürasyon konularında temas noktasının belirlenmesi amacıyla her proje için bir Konfigürasyon Yönetim Planı hazırlanmalıdır.

Konfigürasyon yönetimi ilke ve esaslarını açıklayan planda ayrıca; amaçlar, organizasyon ve diğer organizasyonlarla ilişkiler, konfigürasyon yönetimi ile ilgili yetki ve sorumluluklar da tanımlanmalıdır.



Şekil 2 Konfigürasyon Yönetimi Prosesi

Kaynak: LCCMP – Core, Version 1.5

ISO 10007: Quality Management—Guidelines for Configuration Management standardı, planlama aşamasının temel taşlarından biri olarak kabul edilir. Bu standart, konfigürasyon yönetiminin sadece teknik bir süreç olmadığını, aynı zamanda organizasyonel bir yönetim mekanizması olduğunu vurgular (Blanchard & Fabrycky, 2014).

Konfigürasyon Yönetim Planı aşağıdaki aşamalardan ve alt süreçlerinden oluşmalıdır;

- Konfigürasyon Yönetim Organizasyonu

    - Yetki ve Sorumluluklar
    - Konfigürasyon Kontrol Kurulu
- Konfigürasyon Tanımlama
    - Konfigürasyon Birimlerinin Belirlenmesi
    - Konfigürasyon Birimlerinin Tanımlanması
    - Konfigürasyon Birimlerinin Oluşturulması
        - İşlevsel Temel
        - Geliştirme Temeli
        - Ürün Temeli
- Konfigürasyon Kontrolü
    - Mühendislik Değişiklikleri
    - Sapma ve Feragat
- Konfigürasyon Tetkikleri
- Konfigürasyon Durum Takibi
- Arayüz Yönetimi
- Alt Yüklenici Yönetimi Faaliyetleri

2. Konfigürasyon Tanımlama

Konfigürasyon yönetiminde tanımlama; izlenebilirliği sağlayabilme amacı ile konfigürasyon kalemlerini belirleme ve tanımlama kurallarını kapsar. Proje yönetimi tarafından, istenilen ana çizgilerin her birinin tanımlandığı onaylı dokümanların hazırlanması için gereksinimler, sunma ve müteakiben yayınlanması işlemleri de tanımlanmalıdır.

Konfigürasyon tanımlama, her bir ana çizgiyi oluşturan dokümanları tanımlamalıdır. Tanımlama süreci, sistem değişikliğe uğramaya devam ettiği sürece devam etmelidir.

Dokümanların nasıl hazırlanacağı ve dahili olarak nasıl yayınlanacağının tanımlanmalıdır.

Konfigürasyon tanımlama kısaca şu aşamalardan oluşur;

- Konfigürasyon yönetimine tabi olacak konfigürasyon birimlerinin belirlenmesi,
- Her konfigürasyon birimi için oluşturulacak dokümantasyonun belirlenmesi,
- Birimler ve konfigürasyon dokümantasyonuna atanacak tanımlayıcıların (dok. ve parça no.) atanması,
- Belirli aşamalarda bir sonraki aşamalar için konfigürasyon dokümantasyonlarının dondurularak temellerin oluşturulması,
- Konfigürasyon birimlerinin işaretlenmesidir.

Konfigürasyon birimi, konfigürasyon yönetimine tabi olan değer, üründür.

Konfigürasyon birimi seçim kriterleri dokümante edilmelidir.

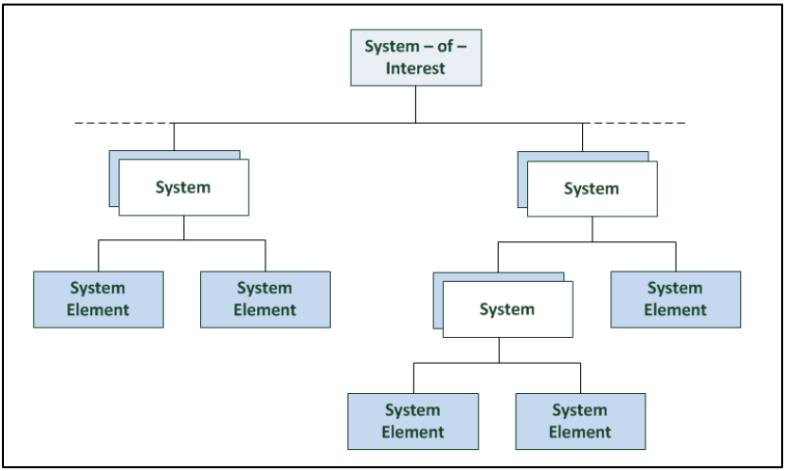
Konfigürasyon Birimi seçiminde aşağıdaki parametrelere göre yapılır.

- Projede yeni geliştirilecek olan birimler,
- Rafta Hazır Ticari Ürünler (RAHAT),
- Seri numaralar ile takip edilecek ürünler,

- Müşteriye teslim edilen ürünler,
- Belirlenmiş ara ürünler,
- Tedarik edilen ürünler,
- Projenin parasal açıdan değerli varlıkları,
- Tasarımda ve üretimde kullanılan alt yapılar,
- İki veya daha fazla grup tarafından kullanılan ürünler,
- Zaman içerisinde hata, gereksinim vb. nedenlerle değişme olasılığı olan ürünler,

Konfigürasyon öğesi olarak seçilen bileşenler, sistemin işlevselliğini ve performansını doğrudan etkileyen öğelerdir. MIL-HDBK-61A: Configuration Management Guidance, bir CI'nin şu özellikleri taşıması gerektiğini belirtir (ANSI/EIA, 2010):

- Benzersiz bir kimliğe sahip olmalıdır.
- Gözden geçirilebilir ve değişiklikler için izlenebilir olmalıdır.
- Sistem performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olmalıdır.



Şekil 3 Sistem İlgi Yapısı

Kaynak: NATO Standard Acmp-2009 Guidance On Configuration Management, March 2017

Her bir konfigürasyon birimi için tek bir tanımlayıcı belirlenmelidir.

Bu tanımlayıcılar; ürün parça numarası ve ürün tanımıdır. Konfigürasyon biriminin nasıl izlenebilirliğinin sağlanacağına da karar verilmelidir. Örneğin; seri numarası, versiyon veya revizyon numarası, Lot numarası vb. gibi yöntemlerle izlenebilirlik sağlanabilir.

Her bir konfigürasyon biriminin etiketi en az aşağıdaki bilgileri içermelidir.

- Ürün parça numarası,
- Nato Stok Numarası (varsa),
- Seri Numarası,
- Revizyon,

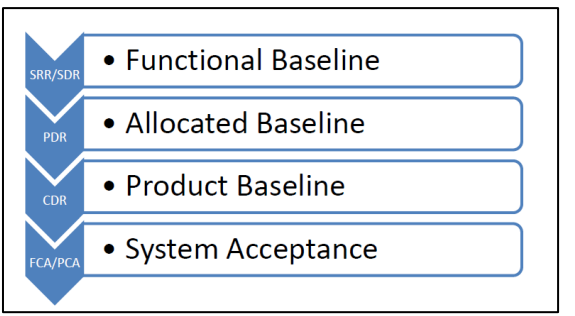
Etiket bilgileri herhangi bir yardımcı araç kullanılmadan okunabilir ve zaman içerisinde silinmeyecek yapıda olmalıdır.

3. Konfigürasyon Anaçizgisi

Konfigürasyon kaleminin, ömrü süresi içerisinde, belirli bir aşamada formal olarak tanımlanmış konfigürasyon dökümantasyonudur. Dokümanların ve fiziksel elemanların tanımlanması için kullanılacak yöntemler tanımlanmalıdır.

Konfigürasyon Ana Çizgisi (Configuration Baseline), sistemin belirli bir zaman diliminde onaylanmış durumunu temsil eder. Ana çizgi, değişikliklerin izlenebilirliği ve kontrolü için bir referans noktasıdır. NASA Systems Engineering Handbook'a göre, ana çizgi, aşağıdaki temel işlevleri yerine getirir (INCOSE, 2015):

- Sistem tasarımında değişikliklerin etkilerinin değerlendirilmesini kolaylaştırır.
- Gereksinimlerin doğrulama ve test aşamasına kadar korunmasını sağlar.



Şekil 4 Ana Çizgiler ve Ürün Geliştirme Aşamaları

Kaynak: LCCMP – Core, Version 1.5

Konfigürasyon birimleri seçim kriterleri, sınırlı olmamakla beraber, şunları içermelidir:

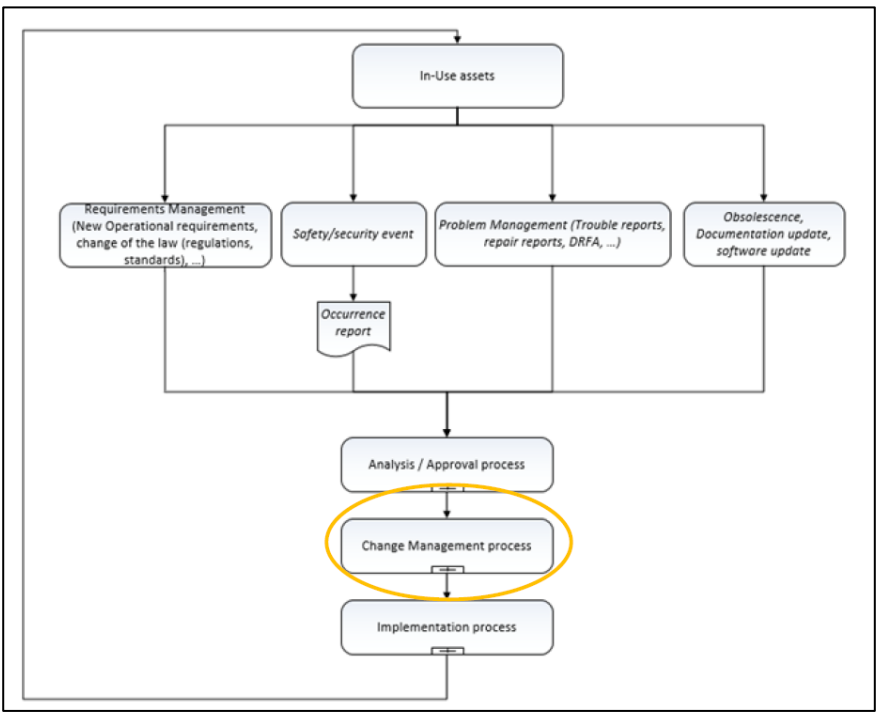
- Personelin ve/veya donanımın güvenliği,
- Kritiklik, karmaşıklık, yeni teknoloji, yüksek maliyetli ürünler,
- Kritik performans veya kullanım etkinliği,
- İşlevsellik ve başarım (performans),
- Diğer sistemlerle, hükümet veya alt yüklenici tarafından tedarik edilen parçaların, NATO standart parçaların ve destek ekipmanlarıyla iletişim,
- Entegre lojistik destek,
- Teslim edilen parçaları etkileyen uygulamalar,
- Güvenilirlik ve idame ettirilebilirlik,
- İkincil kaynaklar,
- Değişikliğe karşı hassasiyet.

3.1 Ana Çizgi Türleri

- **Fonksiyonel Ana Çizgi:** Sistemin işlevsel gereksinimlerini tanımlar.
- **Tahsis Edilmiş Ana Çizgi:** Gereksinimlerin alt sistemlere dağıtımını içerir.
- **Ürün Ana Çizgisi:** Nihai ürünün tasarımını ve üretim sürecini temsil eder (DAU, 2015).

4. Değişiklik Kontrolü

Konfigürasyon değişiklik yönetimi, konfigürasyon yönetimine tabi olan konfigürasyon kalemlerine ve tanımlayıcı dokümantasyona ilişkin değişikliklerin önerilmesi, değerlendirilmesi, onaylanması ve yürürlüğe alınmasına yönelik faaliyetlerin tanımlanmasıdır.



Resim 2 Değişiklik Yönetimi

Kaynak: LCCMP – Core, Version 1.5

Değişiklik kontrolü, KY'nin en kritik süreçlerinden biridir. Bu süreç, sistemin veya ürünün yaşam döngüsü boyunca değişiklik taleplerinin nasıl ele alınacağını belirler. MIL-STD-973, değişiklik kontrol sürecini şu şekilde açıklar (IEEE, 2012):

- **Değişiklik Talebinin Oluşturulması:** Bir sorun veya iyileştirme önerisi doğrultusunda değişiklik talebi oluşturulur.
- **Değişiklik Etki Analizi:** Değişikliğin sistemin diğer öğelerine olan etkisi değerlendirilir.
- **Onay Süreci:** Etki analizinin sonuçlarına göre değişiklik onaylanır veya reddedilir.
- **Uygulama ve İzleme:** Onaylanan değişiklik, sistem üzerinde uygulanır ve izlenir.

5. Konfigürasyon Kontrolü

Konfigürasyon kontrolü, konfigürasyon yönetiminin bir bileşeni olup, ürün veya sistemdeki tüm konfigürasyon öğelerinin değişikliklerinin yönetilmesini ve denetlenmesini sağlayan bir süreçtir. Konfigürasyon kontrolü, ürünlerin veya sistemlerin tasarım, üretim, test, bakım ve diğer yaşam döngüsü aşamalarında değişikliklerin izlenmesini, onaylanmasını ve belgelendirilmesini içerir. Bu süreç, herhangi bir değişikliğin sistemin tüm bileşenleriyle uyumlu olmasını ve istenmeyen etkilerin engellenmesini sağlamayı amaçlar.

Konfigürasyon kontrolü süreci kapsamında aşağıdaki belirtilmiş olan gereksinimler tanımlanır;

- Mühendislik değişiklik önerilerinin, sapma önerilerinin hazırlanması ve değerlendirilmesi,
- Değişiklikten etkilenen konfigürasyon dokümanı ve bu dokümanlara ait revizyon değişikliklerinin belirlenmesi,

- Mühendislik değişikliklerinin, sapma önerilernin teknik, mali ve lojistik etkilerinin değerlendirilmesi,
- Değişiklik sınıfının (Sınıf-1, Sınıf-2) belirlenmesi,
- Onaylı değişikliklerin gereklerinin yerine getirilmesi,

5.1 Sınıf-1 Değişiklikler

Ürünün şekil, uyum ve işlevinde değişikliğe yol açan (değiştirilebilirliği etkileyen) değişikliklerdir. Sınıf-1 değişiklikler kısaca aşağıdaki değerlendirmeleri içermelidir.

- Sistemin performansını,
- Güvenilirlik gereklerini,
- Arayüz ve birlikte çalışma gereksinimleri,
- Yaşam döngüsünü ve maliyetlerini etkileyen değişiklikler,
- Sistemin teknik gereksinimlerinde yapılan değişiklikler,
- Sözleşme değişikliklerinden etkilenen dokümanlarda yapılan değişiklikler,

5.2 Sınıf-2 Değişiklikler

Sınıf-1 kapsamına girmeyen ve basit değişiklikleri içeren değişiklikler bu sınıfa girmektedir. Örneğin; dokümandaki yazım düzeltmeleri, çizim hataları, standart malzemelerin boyut veya nitelik değişiklikleri bu sınıfa girmektedir.

5.3 Sapmalar

Sapmalar, üretimi devam etmekte olan ürünler için ve çeşitli zorunluluklar (eksik malzeme yerine alternatif malzeme kullanımı, bir müşteri için farklı renkte cihaz üretimi, üretim prosesinin çeşitli nedenlerle uygulanmaması veya farklı uygulanması) nedeniyle;

- Belirli bir iş emri ile üretilmekte olan partiye uygulanmak,
- Belirli müşteriler için üretilmekte olan ürünlere uygulanmak,
- Belirli bir dönemdeki üretimlere uygulanmak,
- Stoktaki malzeme tükeninceye kadar uygulanmak,

vb. üzere yapılan değişikliklerdir.

Sapma değişiklik kararları dokümanlara yansıtılmaz ve bu kararlarla ilgili olarak dokümantasyon kayıtlarında değişiklik yapılmaz.

Sapma değişiklikleri minör, majör ve kritik sapmalar olarak sınıflandırılır.

5.4 Feragatlar

Feragatlar, verilen “olduğu gibi kullan” ve “onarım” kararlarıdır.

Olduğu gibi kullan kararı; bir veya daha fazla küçük uygunsuzluğu olan, ancak hiçbir onarım işlemi uygulamaksızın, mevcut durumuyla kullanılmasında bir sakınca görülmeyen ürünler için verilen karardır.

Onarım kararı; yeniden işlemle giderilmesine olanak bulunamayan uygunsuzluğun etkisini azaltarak kabul edlebilir düzeye (küçük uygunsuzluğa) indirgemek üzere, normal üretim sürecinden farklı bir işlemin uygulanmasıdır.

Feragat kararları müşteri onayına tabidir.

6. Konfigürasyon Kontrol Kurulu

Değişiklik kararlarının değerlendirilmesi, onaylanması veya iptal edilmesine karar verilen kuruldur. Konfigürasyon kontrol kurulu, mühendislik değişiklik önerilerini değerlendirmek için aşağıdaki adımlar izlenir.

- Kullanılacak olan formları tanımlanır,
- Numaralandırma formatı belirler ve her bir değişiklik için ayrı bir numara verilir,
- Değişikliğin tanımı ve değişiklik tanımında belirtilmiş olan değişikliklerin gerekçesini belirlenir,
- Değişikliğin sınıf kararını (sınıf-1 veya sınıf-2) olarak verir,
- Değişikliğin önceliğini (çok ivedi, ivedi, normal) belirlenir,
- Yapılacak değişikliğe uygun olarak revizyon değişiklikleri belirlenir,
- Mühendislik değişikliklerinin değerlendiilmesi için konfigürasyon kontrol kurulu oluşturulur.

7. Konfigürasyon Değerlendirmesi ve Konfigürasyon Denetimi

Konfigürasyon Değerlendirmesi, ürün veya süreçlerin tanımlı gereklere uygunluğunun bağımsız şekilde değerlendirilmesidir. İlgili tarafların katıldığı toplantı şeklinde yapılır. Değerlendirmeler süreçlerin etkinlik seviyesinin belirlenmesi ve iyileştirme fırsatlarının tespiti için olanak sağlar.

Konfigürasyon Denetimi ayrıca;

- Üst yönetim kalite faaliyetlerine desteğini gösterir,
- Konfigürasyon değerlendirmesi, ürünlere yönelik bir değerlendirme çeşidi olup, projenin konfigürasyon yönetim planında planlanır,
- Değelendirmeler için kontrol listeleri oluşturulur,
- Liste kullanmak değerlendirmelerin standartlaşmasını sağlar ve raporlanmasını kolaylaştırır.

Konfigürasyon durum değerlendirmesi, konfigürasyon etkili bir şekilde yönetimini sağlayabilmek için anaçizgi dokümanlarında yapılmış tüm değişikliklerin durumlarının gözden geçirilmesi, kayıt altına alınması ve raporlanmasıdır.

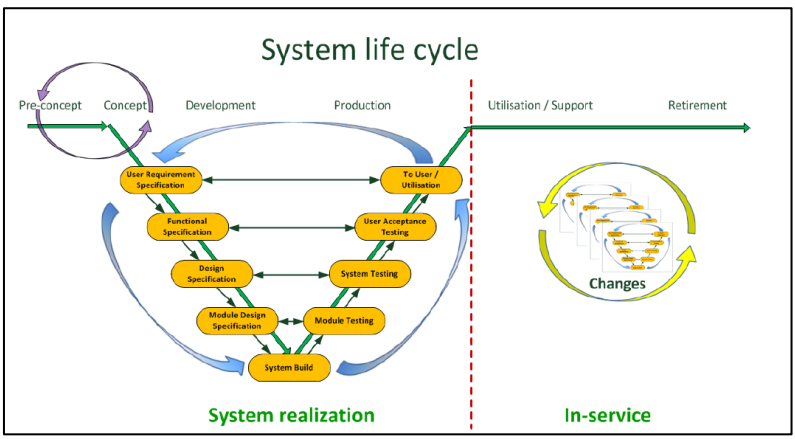
Konfigürasyon durum değerlendirmesinde;

- Konfigürasyon durum değerlendirme ihtiyaçlarının gözden geçirilmesi,
- Konfigürasyon durum değerlendirme verilerinin temin edilmesi,

- Konfigürasyon durum değerlendirme verilerinin gözden geçirilmesi,
- Konfigürasyon durum değerlendirme raporlarının hazırlanması aşamaları gerçekleştirilir.

Konfigürasyon Değerlendirmesi, sistem gereksinimlerinin eksiksiz bir şekilde karşılanıp karşılanmadığını belirlemek için yapılır.

Konfigürasyon Denetimi, belgelerin, tasarımların ve fiziksel öğelerin, ana çizgi ile uyumlu olup olmadığını doğrular (Grady, 2006).



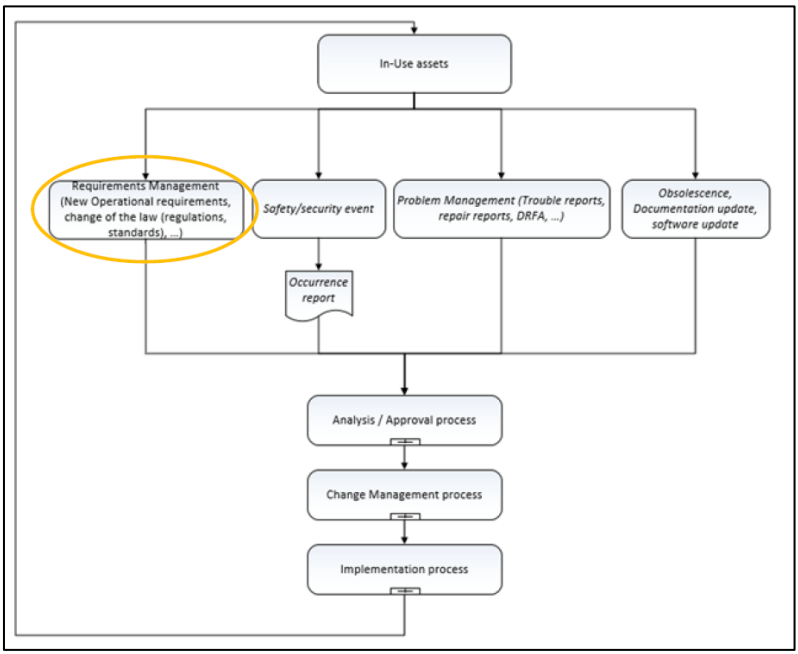
Şekil 5 Sistem Yaşam Döngüsü Aşamaları ve Değişiklik/Kontrol Süreçleri

Kaynak: NATO Standard Acmp-2009 Guidance On Configuration Management, March 2017

INCOSE Systems Engineering Handbook, denetimlerin KY sürecinde kalite güvencesi sağlamak için kritik bir rol oynadığını vurgular (Corporation, 2024).

7.1 İşlevsel Konfigürasyon Denetimi

Ürünün gereksinimleri karşıladığını doğrulayan denetimdir. Dokümanlar üzerinden ürünün gereksinimleri sağlandığını doğrulayarak gerçekleştirilir.



Şekil 6 Gereksinim Yönetimi ve İşlevsel Denetim

Kaynak: LCCMP – Core, Version 1.5

7.2 Fiziksel Konfigürasyon Denetimi

Ürünün detay tasarım ile birebir eşleştiğini doğrulayan denetimdir. Bu denetim ile üretimin başlangıç noktası için bir ürün temeli oluşturulmaktadır.

Savunma projelerinde konfigürasyon yönetiminin sağladığı başlıca faydalar şu şekildedir:

- **İzlenebilirlik ve Sorumluluk:** Konfigürasyon yönetimi, yapılan tüm değişikliklerin kayıt altına alınmasını ve izlenebilirliğini sağlar. Böylece herhangi bir sorun veya arıza durumunda değişikliklerin geçmişi incelenerek sorunun kaynağı kolayca tespit edilebilir.
- **Kalite ve Standartlarının Korunması:** Savunma projeleri yüksek güvenlik ve kalite standartlarına tabidir. Konfigürasyon yönetimi, bu standartların proje boyunca korunmasını sağlar ve dış tehditlere karşı sistem güvenliğini artırır.
- **Maliyet Kontrolü:** Sistem bileşenlerinin doğru bir şekilde yönetilmesi, gereksiz değişikliklerin ve fazla maliyetlerin önlenmesine yardımcı olur. Bu, savunma projelerinde özellikle önemlidir çünkü bu projelerde bütçeye sadık kalmak hayati bir öneme sahiptir. Johnson (2021), maliyet kontrolünün konfigürasyon yönetimiyle daha etkin sağlandığını ve projenin bütçeye uygun bir şekilde sürdürülebilir olduğunu ifade eder (Johnson, 2021).

Sonuç

Savunma sanayiinde, yüksek maliyetli ve uzun vadeli projelerin başarılı bir şekilde yönetilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu projelerin her aşamasında, sistem bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını sağlamak, kaliteyi korumak ve yapılan değişikliklerin etkin bir şekilde izlenmesi, başarıyı doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Konfigürasyon yönetimi, tüm bu süreçleri etkili bir şekilde kontrol ederek projelerin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde ilerlemesini sağlar. Konfigürasyon yönetimi, ürün veya sistem geliştirme sürecindeki her bileşenin doğru bir şekilde tanımlanması, belgelenmesi ve izlenmesi gerektiğini kabul eder. Bu yönetim disiplini olmadan, proje ekiplerinin, değişikliklerin veya hata düzeltmelerinin etkilerini doğru bir şekilde takip etmesi, sistem bileşenlerinin uyumlu çalışmasını sağlamak çok daha zor hale gelir.

Herhangi bir hatalı değişiklik, tüm sistemin güvenilirliğini, verimliliğini ve güvenliğini riske atabilir. Bu bağlamda, konfigürasyon yönetimi, savunma sanayi projelerinin hem verimliliğini hem de güvenilirliğini sağlamak için kritik bir rol oynar.

Konfigürasyon yönetiminin etkili bir şekilde uygulanması, sadece sistem bileşenlerinin birbirleriyle uyum içinde çalışmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bu projelerin ekonomik açıdan sürdürülebilir olmasına da yardımcı olur.

Savunma sanayi projelerinde, özellikle değişiklik yönetimi ve konfigürasyon anaçizgisi (baseline) üzerinde yapılacak her değişiklik, maliyet açısından önemli bir yük oluşturabilir. Bu tür projelerde yapılan her değişiklik, yalnızca tasarımda değil, aynı zamanda test süreçlerinde, üretimde ve bakımda da önemli maliyet artışlarına yol açabilir. Konfigürasyon yönetimi, bu değişikliklerin dikkatle izlenmesi, kontrol edilmesi ve sadece gerekli olduğunda yapılması gerektiğini belirleyerek, projelerde gereksiz maliyetlerin önüne geçer. Bu şekilde, gereksiz veya hatalı değişikliklerin önlenmesi sağlanır, kaynakların verimli kullanımı teşvik edilir ve

bütçeye sadık kalınır. Dolayısıyla, konfigürasyon kontrolü süreçlerinin etkinliği, savunma sanayi projelerinin maliyet etkinliğini artırır ve projelerin öngörülen maliyet sınırları içinde tamamlanmasını sağlar.

Konfigürasyon yönetiminin aynı zamanda değişiklik kontrolü ve konfigürasyon denetimi gibi bileşenleri, projelerdeki kaliteyi korumak için kritik bir öneme sahiptir. Savunma sanayinde, en küçük hata bile büyük güvenlik riskleri ve operasyonel zorluklar yaratabilir. Bu nedenle, her değişiklik ve güncelleme detaylı bir şekilde denetlenmeli, gerekirse onaylanmalıdır. Konfigürasyon yönetimi, bu tür kritik süreçlerin güvenli bir şekilde ilerlemesini sağlayarak, sistemdeki hataların tespit edilmesine ve bu hataların zamanında düzeltilmesine olanak tanır. Bu da sistemin genel güvenliğini ve etkinliğini artırır.

Ayrıca, konfigürasyon yönetimi, projelerin karmaşıklığını ve büyüklüğünü göz önünde bulundurduğunda, tüm bu yönetim süreçlerinin doğru bir şekilde yapılandırılmasını ve sürdürülebilirliğini sağlamak açısından vazgeçilmezdir. Konfigürasyon tanımlama ve konfigürasyon anaçizgisi süreçleri, sistemin her aşamasında gerekli verilerin toplanmasını ve bu verilerin doğru bir şekilde belgelendirilmesini sağlayarak projelerin şeffaflığını artırır. Bu süreçler, ayrıca proje ekiplerinin daha iyi bir işbirliği yapmalarını ve sistemin her parçasının nasıl birbiriyle etkileşime girdiğini anlamalarını kolaylaştırır. Böylece, her aşamada riskler daha iyi analiz edilebilir ve olası problemler daha hızlı çözüme kavuşturulabilir.

Sonuç olarak, konfigürasyon yönetimi, savunma sanayiinde yüksek güvenlik, kalite ve verimlilik standartlarının sağlanabilmesi için vazgeçilmez bir yönetim aracıdır. Bu süreçler sayesinde, karmaşık sistemlerin geliştirilmesi, entegrasyonu ve yönetimi çok daha kontrollü ve sistematik bir şekilde yapılabilir. Konfigürasyon yönetimi, projelerin sadece başarısını değil, aynı zamanda bu projelerin uzun vadeli sürdürülebilirliğini de garantiler. Savunma sanayiindeki yüksek riskler ve maliyetler göz önünde bulundurulduğunda, konfigürasyon yönetimi; verimlilik, güvenilirlik, kalite ve maliyet kontrolü alanlarında projelerin başarısını sağlayan en önemli unsurlardan biridir. Herhangi bir projede konfigürasyon yönetiminin etkin bir şekilde uygulanması, projenin tüm yaşam döngüsü boyunca kaliteyi, güvenliği ve verimliliği garanti altına alır.

Kaynakça

ANSI/EIA. (2010). ANSI/EIA-649: National Consensus Standard for Configuration Management.

Blanchard, B., & Fabrycky, W. (2014). Systems Engineering and Analysis.

Corporation, P. (2024). Windchill User Guide.

DAU. (2015). Configuration Management Training. Defense Acquisition University.

Grady, J. O. (2006). System Requirements Analysis.

IEEE. (2012). IEEE Standard 828: Configuration Management in Systems and Software Engineering. IEEE.

INCOSE. (2015). Systems Engineering Handbook (Version 4). Wiley.

Johnson, P. (2021). Cost Management Through Configuration Control. Journal of Defense Economics.

NATO. (2017). Policy On Configuration Management. .

NATO. (2024). Life Cycle Configuration Management Plan.

Wilson, A. (2021). Ensuring Traceability and Transparency in Configuration Management. Global IT Press.

BÖLÜM II

Abrasif Aşınma: Malzeme Sertlik ve Tokluğunun Etkisi

Aysel YAZICI[1]

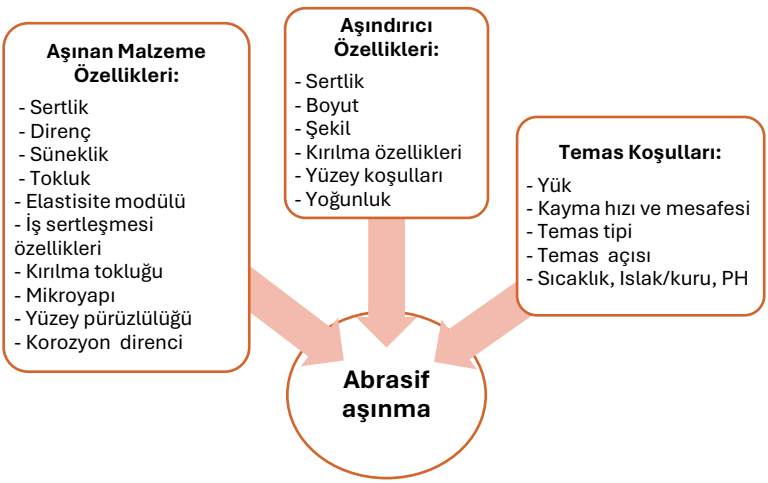
1.Giriş

Birçok sektörde önemli bir sorun ve maliyet oluşturan abrasif aşınma; sert parçacıkların veya sert çıkıntıların katı bir yüzeye doğru zorlanması ve bu yüzey boyunca hareket etmesi nedeniyle oluşan aşınma türüdür (ASTM G40-22a, 2022). Çizilme aşınması olarak da bilinen abrasif aşınma; madencilik, tarım, çimento endüstrisi, inşaat, ve metalurji gibi alanlarda yaygın olarak görülür. Abrasif aşınma sırasında malzemenin yüzeyden uzaklaştırılması, yüzeydeki gerilme kritik bir değere ulaştığında gerçekleşir. Bu yerel kırılma-gerinim, yüzeydeki tek veya çoklu aşındırıcı darbelerle meydana gelebilir.

[1] Prof. Dr. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Turgutlu Manisa/Türkiye, Orcıd: 0000-0003-1290-7104, aysel.yazici@cbu.edu.tr

Abrasif aşınmanın endüstrideki tüm aşınma sorunlarının %50'sine neden olduğu tahmin edilmektedir (Elleuch & ark., 2006).

Abrasif aşınmada kaldırılan malzeme hacmi: aşındırıcının sertliği, şekli, boyutu, kırılma özellikleri, yüzey koşulları, ve yoğunluğuna; aşınan bileşenin sertliği, direnci, tokluğu, sünekliği, Elastisite modülü, iş sertleşmesi özellikleri, kırılma tokluğu, mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü, ve korozyon direncine; yük, kayma hızı ve kayma mesafesi, temas tipi, temas açısı, ıslak/kuru ve sıcaklık gibi temas koşullarına bağlı olarak değişir (Şekil 1).



Şekil 1. Abrasif aşınmada kaldırılan malzeme hacmini etkileyen parametreler

Aşındırıcı parçacık boyutunun aşınma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Aşındırıcı parçacık boyutundaki artış (daha fazla yük anlamına gelir) karşı yüzeyde daha yüksek bir girinti derinliğine yol açarak aşınmayı artırır. Metallerde 100 µm'den küçük aşındırıcı partikül boyutları için aşınma oranı azalan partikül boyutu ile hızla

düşer. Bu partikül boyutu etkisi, genellikle aşındırıcı/aşınma malzemesi temasının doğasına atfedilir ve azalan boyut plastik temastan ziyade elastik teması tercih eder (Moore, 1981). Öte yandan, aşındırıcı parçacık boyutundaki artış aşındırılan yüzeyle etkileşime giren aşındırıcı parçacık sayısının azalması sonucunu doğurur ve bu da aşınma modunu etkiler (Adachi & Hutchings, 2003). Seramik ve polimerlerde aşındırıcı partikül boyutu baskın malzeme kaldırma mekanizmasını etkiler. Kritik bir aşındırıcı parçacık boyutunun üzerinde; seramiklerde parçalanmaya geçiş olurken, elastomerlerde elastik davranıştan yırtılma veya yorulmaya geçiş olur (Bayer, 2002).

Aşındırıcı parçacıkların şekli aşınma hacmini etkiler. Köşeli aşındırıcılar yuvarlak aşındırıcılara kıyasla aşınma yüzeyine daha fazla girinti yaparak daha yüksek aşınma kaybına yol açar. Yuvarlak geometriye sahip mikro aşındırıcı partiküllerin öteleme veya öteleme + dönme kinematik hareketleri yaparken karşıt gövdeyi kesmedeki fiziksel zorluk nedeniyle daha az aşınmaya neden olduğu düşünülmektedir (De Paula & ark., 2023).

Aşınma malzemesi sertliğinin aşındırıcı sertliğine oranı abrasif aşınmada kritik bir parametredir. Aşınan malzemenin sertliği aşındırıcının sertliğine yaklaştıkça aşınma azalır. Aşındırıcı partikülün aşınan malzeme üzerinde meydana getirdiği girinti derinliği; aşınma malzemesinin sertliği, aşındırıcı partikülün sertliği ve şekli ile yükün bir fonksiyonudur.

Yük ve kayma mesafesi arttıkça abrasif aşınma hacmi artar. Aşındırıcı hızın aşınma davranışı üzerindeki etkisi, aşındırıcı/aşınma malzemesi teması sırasında kinetik enerjinin dağılımıyla ilişkilidir.

Çok sayıda aşındırıcı aşınma ortamı için aşındırıcı parçacıkların hızı nispeten düşüktür (<10 m/s) ve bu nedenle çok az öneme sahiptir. Bununla birlikte, aşındırıcı parçacıkların bulamaç veya pnömatik formda taşınmasında hızın etkisi önemlidir (Bayer, 2002).

Aşındırıcının aşınma yüzeyine temas açısının aşınma üzerindeki etkisi malzeme tipine bağlı olarak değişir. Örneğin, genel olarak sünek alaşımlar en fazla 10° ila 30° gibi sığ hücum açılarında aşınırken, kırılgan malzemeler en fazla 90°'de aşınır. Seramiklerde normal gerilimin aşınma üzerindeki etkisi temas açısı arttıkça artar (Zanoria & Blau, 1998).

Abrasif aşınma hacmi Archard yasasına göre (Eşitlik 1) belirlenir (Archard, 1953). Abrasif aşınma katsayısı (K_{abr}), aşındırıcı pürüzlülüğün geometrisine ve aşındırıcı içeriğine bağlı olarak 10^{-5} ila $10^{-0.5}$arasında bir değer alır (Chattopadhyay, 2001). Son yıllarda, sertlik dışındaki malzeme özelliklerini ve tribolojik süreç sırasında malzeme özelliklerinin dinamik değişimini dikkate alan alternatif denklemlerin geliştirildiği görülmektedir.

$$V = K_{abr} \cdot \frac{F_N}{H} \cdot L \qquad (1)$$

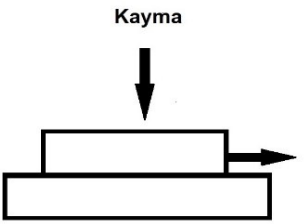
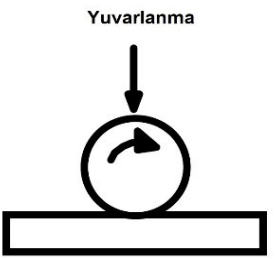
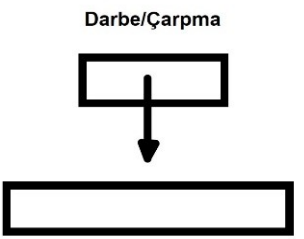
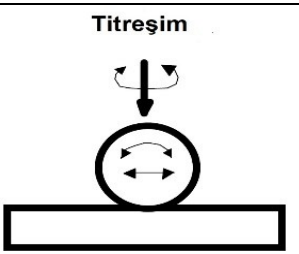
$$K_{abr} = K \cdot \frac{a.\cot\alpha}{\pi} \qquad (2)$$

***V**: Abrasif aşınma hacmi*
***F_N**: Normal kuvvet*
***L**: Kayma mesafesi*
***H**: Sürtünme çiftindeki daha yumuşak bileşenin sertliği*
***K**: Aşınma katsayısı*
***K_{abr}**: Abrasif aşınma katsayısı*
***a**: Temas alanı yarıçapı*
***α**: Temas açısı*

Abrasif aşınmada; kayma, yuvarlanma, darbe, ve titreşim temas tipleri söz konusu olup, temas tipine göre istenen aşınma malzemesi yüzey özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Yalnızca

çizilme/yırtılma koşulları altında malzeme sertliği arttıkça aşınma kaybı azalırken (Ratia & ark., 2013; Ratia, 2016), darbe temasında aşınma kaybının sertlikle artması mümkündür (Gore & Gates, 1997; Hawk & ark., 1999). Bu durum, malzeme sertliği arttıkça darbe enerjisi dağılımının ve deformasyon derinliğinin azalması ile açıklanabilir. Darbeli aşınmada; aşındırıcı parçacıkların aşınan bileşene çarpma açısı, çarpma hızı ve çarpma enerjisine bağlı olarak malzeme yer değiştirir, çarpma kraterleri gelişir, malzeme yüzeyinde ufalanma ve parçalanma meydana gelir (Chintha & ark., 2019). Bu nedenle, darbe teması söz konusu olduğunda malzeme sertliğinin yansıra tokluğunun geliştirilmesi önem arz eder.

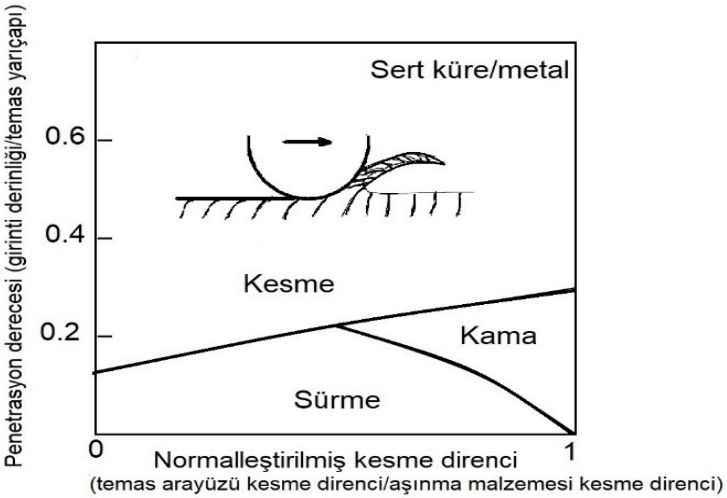
Tablo 1. Abrasif aşınmada temas tipleri ve aşınmayı azaltmak için istenen yüzey özellikleri

Tribolojik Hareket veya Sürtünme Tipi	**İstenen Yüzey Özellikleri**
	*Plastik deformasyona direnmek için yüksek sertlik, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması (yüzey tabakasında düşük kayma direnci), ve iyi yük desteği (Holmberg & Matthews, 2006).
	*Yüksek tokluk, yüksek sertlik, ve iyi yüzey topografyası.
	*Yüksek tokluk ve iyi esneklik (Holmberg & Matthews, 2006).
	*Yüzey gerilimlerini azaltmak için iyi esneklik, düşük kayma direnci. Çatlak başlangıcını ve ilerlemesini azaltmak için iyi yüzey tokluğu, iyi yüzey inertliği (Holmberg & Matthews, 2006).

Sürtünen bileşenlerin özelliklerine ve temas tipine bağlı olarak; abrasif aşınmada sürme, kama teşekkülü, kesme, ve parçalanma mikro mekanizmaları meydana gelir. Sürme, malzeme yana doğru yer değiştirdiğinde meydana gelir ve doğrudan malzeme kaldırmayı içermeyen olukların oluşmasına neden olur. Kama mekanizması durumunda, malzeme kama benzeri bir şekil oluşturmak için aşındırıcı parçacığın önüne itilir. Kama oluşumu, kesme ve sürme arasında var olan bir mekanizmadır. Kesme işlemi, malzeme yüzeyden döküntüler veya mikro talaşlar şeklinde ayrıldığında ve olukların kenarlarına çok az veya hiç malzeme gitmediğinde gerçekleşir. Parçalanma, malzeme bir kesme işlemi ile yüzeyden ayrıldığında ve girintili aşındırıcı aşınma malzemesinin yerel olarak kırılmasına neden olduğunda meydana gelir. Bu çatlaklar daha sonra aşınma oluğunun etrafında yerel olarak serbestçe yayılır ve parçalanma yoluyla ek malzeme kaldırılmasına neden olur (Bayer, 2002).

Metallerde penetrasyon derecesi ve kesme direncine bağlı olarak; sürme, kama teşekkülü, ve kesme mekanizmalarının meydana gelişi Şekil 2'de gösterilmiştir. Bir aşınma durumunda birden fazla mekanizma türü söz konusu olabilir. Ayrıca, bu münferit mekanizmalar daha karmaşık bir aşınma süreci oluşturmak için sırayla etkileşime girebilir. Bununla birlikte, genellikle bir mekanizma kontrol edici ve birincil mekanizmadır. Bireysel mekanizmaların göreceli önemi veya oluşumu tribosistem parametrelerindeki değişikliklerle değişebilir. Bu nedenle malzemeler; yük, hız, ve sürtünme gibi operasyonel parametrelerdeki değişikliklerin bir sonucu olarak aşınma davranışında geçişler sergileyebilir (Blau, 1989).

Sürme, kesme, ve parçalanmayı içeren abrasif aşınma mekanizmaları ağırlıklı olarak nispeten yüksek elastik modüle sahip malzemelerde (metaller, seramikler, ve sert polimerlerde) meydana gelir. Elastik modül azaldıkça aşındırıcı/aşınma malzemesi temasının doğası değişir ve lokalize elastik deformasyon daha önemli hale gelir. Plastik deformasyon mekanizmalarıyla meydana gelen aşınma olasılığı azalır, öyle ki elastomerler için kesme mekanizmaları yalnızca keskin aşındırıcı parçacıklara karşı temasla meydana gelebilir. Keskin olmayan aşındırıcı parçacıkların temasında iki ana aşınma mekanizması; çekme yırtılması ve yorulmadır (Bayer, 2002). Belirli bir çalışma koşulu için ortaya çıkan baskın aşınma mekanizmaları, aşınma malzemesinin plastik deformasyon ve kırılma davranışından büyük ölçüde etkilenir. Nispeten düşük akma dayanımı, yüksek kırılma direnci, ve yüksek süneklik sergileyen malzemelerin sürülerek aşındırılması daha olasıdır. Tersine, yüksek akma dayanımı, düşük süneklik, ve düşük kırılma direncine sahip malzemeler parçalanma yoluyla aşınır (Bayer, 2002).

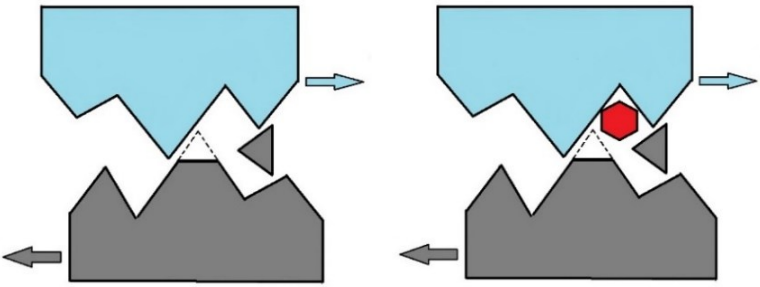


Şekil 2. Metallerin abrasif aşınma haritası

Kaynak: Hokkirigawa & Kato, 1988

Aşınan yüzeylerin sayısına bağlı olarak abrasif aşınma iki gövdeli ve üç gövdeli aşınma olarak kategorize edilebilir (Şekil 3). İki gövdeli aşınma kayma temasına benzerken, üç gövdeli aşınma belirli miktarda yuvarlanma temasını da içerir. Üç gövdeli aşınma sırasında parçacıklar dönebilir ve yüzeydeki hasar genellikle iki gövdeli aşınmanın neden olduğundan daha küçüktür (Hutchings, 1992). Kayma ve yuvarlanma temaslarında yüzeydeki kayma/kesme gerilmelerinin farklı olması nedeniyle, iki gövdeli aşınmada aşınma oranı üç gövdeli aşınmaya göre yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bunun nedeni, üç gövdeli aşınmada aşındırıcı partiküllerin zamanın yaklaşık %90'ını temas yüzeyinde fazla hasara yol açmadan yuvarlanarak ve sadece %10'nunun yüzeyi aşındırarak geçirmesidir (Rabinowicz & ark., 1961). Üç gövdeli aşınmada, malzeme

özelliklerine bağlı olarak her iki yüzeyde de aşınma meydana gelebilir.



İki gövdeli abrasif aşınma *Üç gövdeli abrasif aşınma*

Şekil 3. Abrasif aşınma tipleri

Aşındırıcı partiküllerin davranışı açısından abrasif aşınmayı tanımlamak için kullanılan diğer terimler "düşük gerilimli" ve "yüksek gerilimli" aşınmadır. Düşük gerilimli aşınma, aşındırıcı parçacıklar karşı yüzeyde kayarken herhangi bir hasar görmediğinde meydana gelir (örneğin: toprağın sürülmesi) ve aşınma malzemesinin yüzeyinde çizikler oluşur (çizik aşınması). Düşük gerilimli aşındırıcı koşullar altında, aşındırıcı partiküller aşınma malzemesinin yüzeyi boyunca hareket ederken serbestçe dönebilir ve yüzeye girinti yapma, yüzeyi çizme olasılığı daha düşüktür. Yüksek gerilimli aşınmada ise aşınma bölgesindeki gerilim aşındırıcının ezilmesi/kırılması için yeterlidir (örneğin: kaya/cevher kırılması). Kaya/cevher gibi sert aşındırıcıların daha yumuşak bir yüzeye -genellikle bir metale- tekrarlayan sıkıştırma yüklemesi etkisiyle aşınma malzemesinin yüzeyinde oluklar meydana gelir.

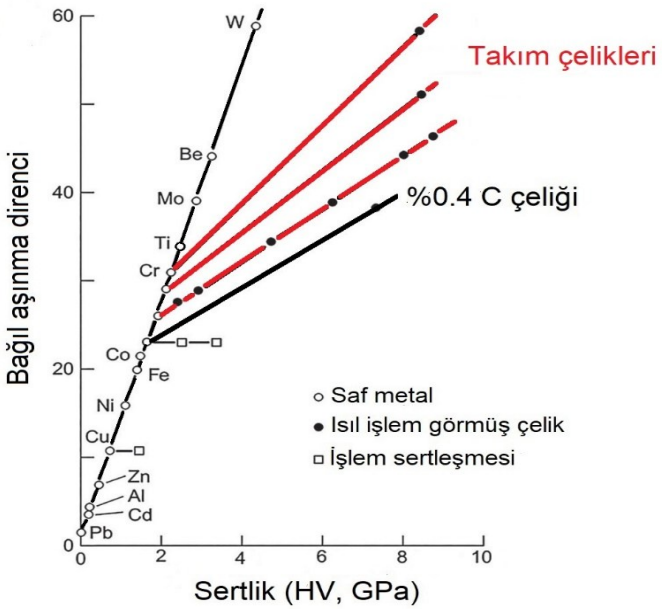
2.Malzeme Özellikleri

Aşınma malzemesinin sertliği, direnci, tokluğu, sünekliği, Elastisite modülü, yüzey pürüzlülüğü, kırılma tokluğu, iş sertleşmesi

özellikleri, mikroyapı, ve korozyon direnci abrasif aşınma üzerinde etkilidir. Genel olarak, malzeme aşınma direncinin geliştirilmesine yönelik temel stratejiler yüzey mühendisliği (kaplamalar, yüzey yapısını değiştirme, yüzey sertleştirme) ve matrisi güçlendirmeye odaklanır. Matrisi güçlendirmeye yönelik stratejiler; bileşimlerin kontrolü, takviye maddelerinin eklenmesi, ve mikro yapıların tasarımı etrafında yoğunlaşmıştır. Yüzey sertleştirme ısıl işlemleri ve kaplamalar gibi yüzey direncini geliştirmeye yönelik uygulamalar sert ve aşınmaya dayanıklı yüzeyler sağlar. Bir yüzeyin yapısının veya bileşiminin dikkatli bir şekilde değiştirilmesi, yüzey tabakasında alt tabakanınkine kıyasla yüksek aşınma direnci elde edilmesine yardımcı olur. Bu çalışmada malzeme sertlik ve tokluğunun abrasif aşınma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2.1. Sertlik

Malzemenin plastik deformasyona (batma veya çizilmeye) karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olan sertlik, malzemenin abrasif aşınma direncini belirleyen önemli bir parametredir. Malzemenin kimyasal bileşim ve mikro yapısı (tane boyutu, fazlar, fazların dağılım ve yoğunluğu, tane sınırlarının yapısı, dislokasyonlar, ikiz oluşumu) malzeme sertliğini etkiler. Genel olarak, malzeme sertliği arttıkça abrasif aşınma direncinin artması beklenmektedir. Aşınma malzemesinin yüzey sertliğindeki bir artış, aşındırıcı parçacıkların malzeme yüzeyine derinlemesine nüfuz etmesini engelleyerek abrasif/çizilme aşınma kaybını azaltır. Farklı metal, karbon içeriği, ve yapısal durum için abrasif aşınma direnci ile sertlik arasındaki ilişki Şekil 4'de, mikroyapı ve sertliğin çeliklerin aşınma direncine etkisi Şekil 5'de gösterilmiştir.

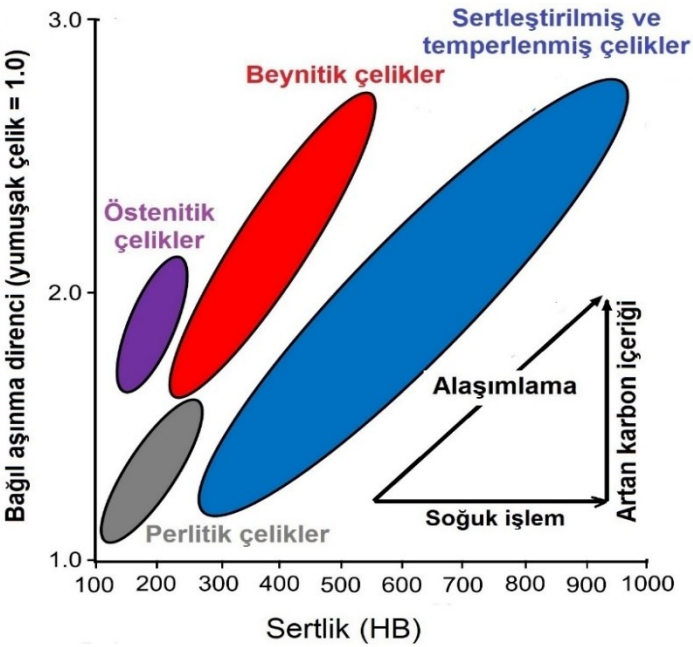


Şekil 4. Farklı metal, karbon içeriği, ve yapısal durum için abrasif aşınma direnci ile sertlik arasındaki ilişki

Kaynak: Khruschov, 1957

Aşınmaya direnç açısından sertleştirilebilirliği etkileyen malzeme kimyasal bileşimi önemlidir. Takviyelerin metal malzemelerin kafes distorsiyonu, kırılma performansı, plastisite, ve bağlanma mukavemeti üzerinde önemli etkileri vardır ve böylece aşınma direncini etkilerler. Örneğin, CrCoNi alaşımlarında Mo ilavesi ciddi kafes distorsiyonuna ve intermetalik fazların oluşumuna neden olarak basmadaki akma dayanımının 518 MPa'dan 1973 MPa'a ve sertliğin 244 HV'den ve 656 HV'ye belirgin bir şekilde iyileşmesine neden olur. Ancak diğer yandan, Mo katkılı CrCoNi alaşımının plastisitesi katkılamadan sonra oluşan kırılgan

intermetalikler nedeniyle bozulur. Bu nedenle, Mo katkılı CrCoNi alaşımının uygun kırılma tokluğunu elde etmek için katı çözelti güçlendirme ve gevrekleşme arasında bir dengeye ihtiyaç vardır (Miao & ark, 2018).



Şekil 5. Mikroyapı ve sertliğin çeliklerin aşınma direncine etkisi: yüksek gerilimli aşınma, alümina aşındırıcı

Kaynak: Zum Gahr, 1987

Alaşımlama ve ısıl işlemler ile yapıda sert fazların oluşturulması gibi mikroyapı tasarımları aşınma direncini geliştirir. Alaşımlamada yaygın olarak kullanılan elementler arasında krom, vanadyum, molibden, tungsten, niyobyum, bor, titanyum, nitrojen vb. bulunur. Bu elementler karbon ve demir ile reaksiyona girerek

daha sert karbürler, borürler, ve nitrürler oluşturur ve ikinci faz güçlendirme mekanizması yoluyla sertliğin önemli ölçüde artmasına neden olurlar (Li, 2017).

Çelik malzemelerin sertliği; katı çözelti sertleştirmesi, çökelme sertleştirmesi, iş sertleştirmesi, ve tane inceltme yoluyla arttırılabilir. Katı çözelti sertleştirmesinde, östenitin (γ- Fe: karbon çözündürmüş katı çözelti) soğuma hızına göre oluşan fazlar [perlit (yavaş soğutma), beynit (orta hızda soğutma), martenzit (hızlı soğutma)] çeliğin sertliğini, direncini, ve tokluğunu etkiler (Tablo 2). Östenit bölgesinden ani/hızlı soğutma ile elde edilen martenzit, sert ve kırılgan bir fazdır. Martenzitik fazın aşırı sertliğini ve kırılganlığını azaltmak için temperleme ısıl işlemi yapılır. Temperleme sıcaklığı ve süresi arttıkça, karbürlerin çökelmesi nedeniyle martenzit daha az tetragonal hale gelir ve süneklik artar (Aydın & Yazıcı, 2020). Çeliklerde Ni, Cr, ve Mo ilavesi östenitin diğer fazlara dönüşümünü geciktirerek daha fazla martenzit oluşmasına imkân tanır. Manganez, östeniti stabilize etme kabiliyeti nedeniyle çelik için önemli bir alaşım elementidir ve tokluğun belirgin şekilde artmasına neden olur.

Tablo 2. Çeliklerde görülen mikroyapılar ve bunlara ait mekanik özelliklerin özeti

Kaynak: Callister & Rethwisch, 2009

Mikroyapı Bileşeni	**Fazların Düzeni**	**Mekanik Özellikler (Bağıl Olarak)**
Kaba perlit	Nispeten kalın ve birbirini tekrarlayan α-Ferrit ve Fe_3C tabakaları	**Direnç/Sertlik** ↓ Kaba perlit, İnce perlit, Beynit, Temper martenzit, Martenzit ↑ **Süneklik**
İnce perlit	Nispeten ince ve birbirini tekrarlayan α-Ferrit ve Fe_3C tabakaları	
Beynit	α-Ferrit matris fazı içerisinde çok küçük ve uzamış durumda Fe_3C parçacıkları	
Temperlenmiş martenzit	α-Ferrit matris fazı içerisinde çok küçük küresel Fe_3C parçacıkları	
Martenzit	İğnemsi yapıdaki taneler	

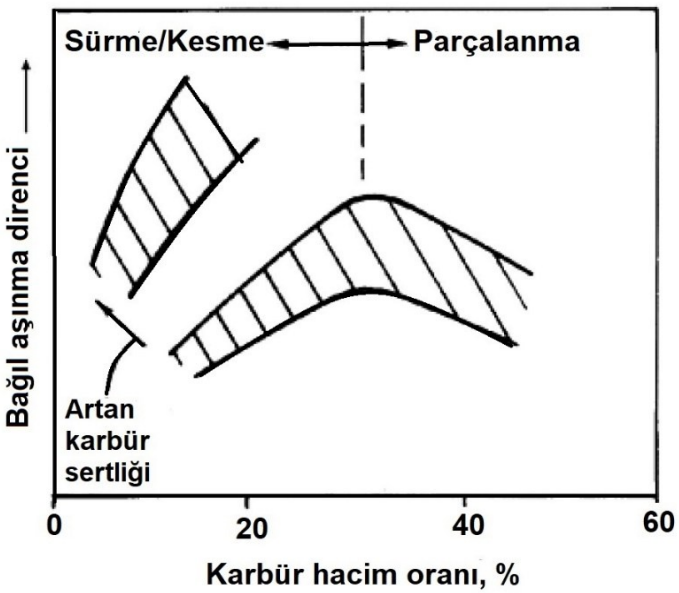
Sıvı fazdan katılaşması sırasında hızlı soğuma ile elde edilen beyaz dökme demirlerin tipik mikroyapısı sementit (Fe_3C) ve perlitten meydana gelir. Sementit sert ve gevrek bir bileşiktir ve beyaz dökme demirlerde önemli oranlarda bulunmasından dolayı beyaz dökme demirler sert ve aşınmaya karşı dirençlidirler. Gri dökme demirler; düşük sürtünme, mükemmel sönümleme kabiliyeti, yüksek ısı iletkenliği, ve iyi kayma aşınma direncine sahiptir. Gri dökme demirlerin süneklikleri kötüdür. Küresel grafitli dökme demirler; eriyik dökme demir içerisine döküm öncesi Mg, Ce, Sb gibi grafitleri küreselleştiren alaşım elementleri ilavesiyle elde edilirler. Mekanik özellikleri çeliğe en yakın olan dökme demir küresel grafitli dökme demirdir ve bu dökme demirlerde süneklik %20'lere kadar artar.

Alüminyum alaşımları; mükemmel dökülebilirlikleri, düşük yoğunlukları, yüksek korozyon dirençleri, iyi termal iletkenlikleri, ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılır. Alüminyum alaşımları motor karterleri, pistonlar ve çeşitli diğer otomotiv ve uçak bileşenleri gibi ulaşım uygulamaları için önemli hafif malzemelerdir. Aşınma direnci için alüminyumu güçlendirmek üzere genellikle silikon, demir, magnezyum, bakır, ve nikel gibi elementler kullanılır. Bu elementler alüminyum matrisinde AlFeSi, $Al_9Fe_2Si_2$, $FeAl_3$, Mg_2Si, $AlCu_2$, $NiAl_3$, ve $Al_{12}(Fe, Mn)3Si_2$ gibi sert fazların oluşumuna yol açar (Li, 2017). Çökelme sertleştirmesi (yaşlandırma), bakır ve magnezyumlu alüminyum alaşımlarında mukavemet artırmada kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Çökelme sertleştirmesi, malzeme içerisinde daha az miktarda bulunan ikinci fazın tanecikler halinde ana faz içerisinde çökeltilmesinin sağlanması ve bunların dislokasyon hareketlerini sınırlaması nedeniyle malzemede mukavemet artışının elde edilmesidir.

Dubleks bir mikro yapı sergileyen veya iki veya daha fazla bileşen fazından oluşan malzemelerde; sert fazın boyutu, aralığı, ve hacim oranının yanı sıra hem sert hem de yumuşak (matris) fazların mekanik özellikleri aşınma davranışını önemli ölçüde etkiler. Örneğin, bazı abrasif aşınma koşulları altında daha yumuşak fazın (genellikle matris) çıkarılması daha sert fazı desteksiz bırakır. Bu durumda ya bir çekip-çıkarma mekanizması ile aşınma yüzeyinden ayrılabilir ya da parçalanma yoluyla aşınmaya daha duyarlı hale gelebilir. Yine kompozit malzemelerde çeşitli bileşenler arasında bir arayüzün bulunması, özellikle darbe-aşınma koşulları altında daha

sert fazın çatlamasını ve parçalanmasını teşvik edebilir (Bayer, 2002).

Alaşımlı beyaz dökme demirlerde karbür hacim oranının aşınma davranışı üzerindeki etkisi Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir. Artan karbür hacim oranı ile artan aşınma direncinden azalan aşınma direncine geçiş, karbürlerin parçalanmasının ve matrisin sürülmesinin/kesilmesinin toplam aşınmaya olan göreceli katkılarından kaynaklanmaktadır. Karbür sertliği ve aşınma hasarına göre boyutu da bu eğilimleri etkilemektedir (Bayer, 2002).



Şekil 6. Alaşımlı beyaz dökme demirlerin ve krom karbür malzemelerin abrasif aşınma davranışına mikroyapının etkisi
Kaynak: Czichos, 1980

Katı çözelti sertleştirmesi, çökelti sertleştirmesi, ve iş sertleştirmesi mukavemeti arttırırken uzama ve tokluğu azaltır. Buna karşılık, tane inceltme yoluyla sertleştirme bu istenmeyen etkiye sahip değildir. Tane boyutunun sertleşme üzerindeki etkisi Hall-Petch ilişkisi ile ifade edilebilir. Akma gerilmesi (σ_y) ve sertlik (H_v) azalan tane boyutu (d) ile artar (Eşitlik 3 ve 4) (Hall 1951, Petch 1953). Bu ilişki plastik deformasyonun dislokasyon mekanizmalarına, yani tane sınırlarının dislokasyonların hareketini engellemesine dayanır. Bitişik tanelerin kafes yapısı yönelim açısından farklılık gösterdiğinden, bir dislokasyonun yön değiştirmesi ve bitişik taneye doğru hareket etmesi için daha fazla enerji gerekir.

Metalik malzemelerin tane boyutları nano ölçeğe yaklaştıkça Hall-Petch ilişkisinden kaynaklanan mukavemet artışları oldukça dramatik hale gelebilir. Bu durum dislokasyonların hareketsiz hale gelebileceği doğal olarak yüksek orandaki tane sınırlarından kaynaklanmaktadır. Metallerin veya alaşımların tane boyutu kritik bir boyutun (~10 nm) altına düştüğünde malzemenin mukavemeti azalabilir. Bunun nedeni, tane sınırlarının oranı artık o kadar yüksek olur ki taneler birbirlerine göre kolayca hareket edebilir. Bu "tane boyutu yumuşaması" ters Hall-Petch Etkisi olarak bilinir (Siegel & Fougere, 1995; Conrad & Narayan, 2000).

Hall-Petch sabitleri
Kaynak: Smith & Hashemi, 2006

Materyal	σ_o (MPa)	k (MPa.m$^{1/2}$)
Bakır	25	0.12
Titanyum	80	0.40
Yumuşak çelik	70	0.74
Ni_3Al	300	1.70

$$\boldsymbol{\sigma_y = \sigma_o + k.d^{-1/2}} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{H_v = H_o + k.d^{-1/2}} \quad (4)$$

σ_y: *Akma sınırı*
σ_o: *Malzemeye özgü sabit*
H_v: *Sertlik*
H_o: *Malzemeye özgü sabit*
k: *Malzemeye özgü sabit*
d: *Ortalama tane çapı*

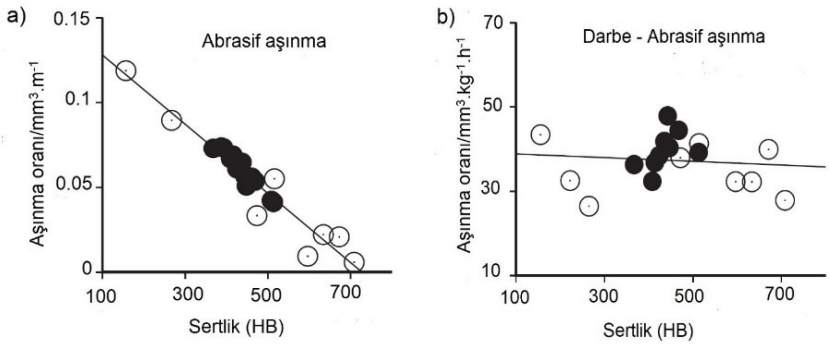
Suárez & ark. (2014) sıcak tek eksenli pres yöntemiyle ağırlıkça %1 karbon nanotüp ilavesiyle hazırladıkları Ni bazlı kompozit malzemede, saf Ni metallerde 47.54 µm olan tane boyutunun 7.58 µm'ye düştüğünü ve bunun kompozit malzemede sertliğin artmasına ve dolayısıyla yüksek aşınma direncine neden olduğunu rapor etmektedir. Tane inceltme aynı zamanda kompozitlerin oksidasyon kinetiğini de geliştirerek oluşan zararlı oksit yüzey tabakasının etkilerini azaltmış ve böylece sürtünme önleyici davranışlarını iyileştirmiştir.

Sertlik bir malzemenin çizilmeye karşı direncinin iyi bir ilk göstergesi olsa da malzemelerin aşınma davranışını tahmin etmede sertliğin kullanılmasında dikkatli olunmalıdır. Sertlik arttıkça malzeme kayma/çizilme koşullarında son derece iyi performans gösterirken, aşınma modu darbe veya oluk açmaya dönüştüğünde o kadar iyi performans gösteremeyebilir (Şekil 7). Bu aşınma modlarında malzemenin tokluğu ve iş sertleşmesi kabiliyeti gibi başka bazı özellikleri aşınma kaybını kontrol eder (Tylczak & ark., 1999). Sertlik arttıkça malzemenin kırılgan hale gelmesi aşınma davranışını etkiler. Darbeli aşınmada, malzeme sertliği arttıkça darbe enerjisi dağılımının ve deformasyon derinliğinin azalması nedeniyle aşınma kaybı sertlik arttıkça artabilir (Gore ve Gates,

1997; Hawk & ark., 1999). Darbe modunda özellikle matris içerisindeki sert fazların kırılması ve parçalanması söz konusu olabilir. Kırılan-parçalanan bu sert fazlar daha sonra aşınmayla uzaklaştırılmaya daha yatkındır.

Sare & ark. (1993) bir dizi beyaz dökme demirin darbe-abrasif aşınma direncini inceledikleri çalışmalarında; aşınma ağırlık kaybının tatmin edici bir şekilde sertlikle korelasyon göstermediğini, aşınma sonuçlarının kırılma tokluğuyla yakından uyumlu olduğu ve bu parametrenin yüksek öneme sahip olduğunu bildirmektedir. Bununla birlikte farklı sonuçlar veren çalışmalarda bulunmaktadır; yaklaşık 180-712 HV sertlik aralığı için darbe-aşınma koşulları altında aşınma direncinin sertlik ile geleneksel ilişkiyi takip ettiği, yani daha yüksek sertliğin daha yüksek aşınma direnci sağladığı bildirilmektedir (Chintha & ark., 2019; Ratia & ark., 2013).

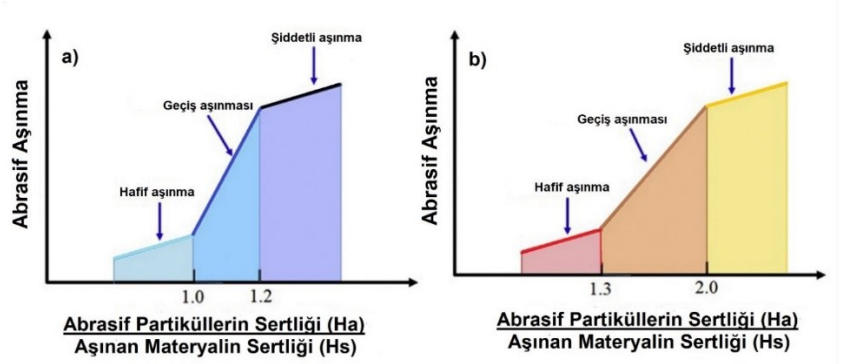
Abrasif aşınmada, sürtünme çiftindeki aşındırıcı (abrasif) partikülün sertliği (Ha) ile daha yumuşak (aşınan) bileşenin sertliği (Hs) arasındaki oran meydana gelen aşınma mekanizmalarını belirler. Tabor (1954), aşındırıcının sadece Ha ≥ 1.2 Hs olduğunda yüzeyi çizdiğini belirtmektedir. Bu değer kritik sertlik oranı (Ha/Hs) olarak adlandırılır. Magnee (1993), kendi model formülasyonunda bunu ölümcül aşınma katsayısı olarak adlandırır. Pintaude (2022)' ye göre kritik Ha/Hs oranı ile aşınma rejimi (hafif veya şiddetli aşınma) arasındaki ilişki, yalnızca aşınma mekanizmaları ve gövde yüzeylerinde gözlenen hasarlar iyi ilişkiliyse mantıklıdır.



Şekil 7. Brinell sertliğinin bir fonksiyonu olarak aşınma oranları a) 200-300 mm boyutunda silika parçacığı ile yapılan üç gövdeli aşınma testinde abrasif aşınma oranı, b) 19-25 mm boyutunda yüksek silika kuvars partikülleri ile tambur içerisinde aşınma testinde darbe-abrasif aşınma oranı. Dolu daireler aşınmaya dirençli ticari çeliği temsil ederken, içi boş daireler AISI 1040 gibi genel çelikleri temsil etmektedir

Kaynak: Tylczak & ark., 1999'a atfen Chintha, 2019

Zum Gahr (1997) aşındırıcının karşı parçayı homojen bir tribo-çift halinde kesebilmesi için, aşındırıcı/abrasif partikül sertliğinin (Ha) aşınan malzeme sertliğinin (Hs) 1.2 katından; Khruschov & Babichev (1960) ise 2 katından daha büyük olması gerektiğini bildirmektedir. Ha/Hs oranına göre oluşan üç farklı aşınma rejimi (hafif aşınma, geçiş aşınması, ve şiddetli aşınma) Şekil 8'de verilmiştir. Şiddetli aşınma bölgesinde baskın mikro mekanizma kesmedir. Sürtünme çiftindeki malzeme sertliğinin aşındırıcı partikül sertliğine yakın veya daha yüksek olması durumunda ise çoklu temas sonrası mikro çatlaklar oluşur (Pintaude & ark., 2009) ve malzeme parçalanma yoluyla uzaklaştırılır (Bayer, 2002).

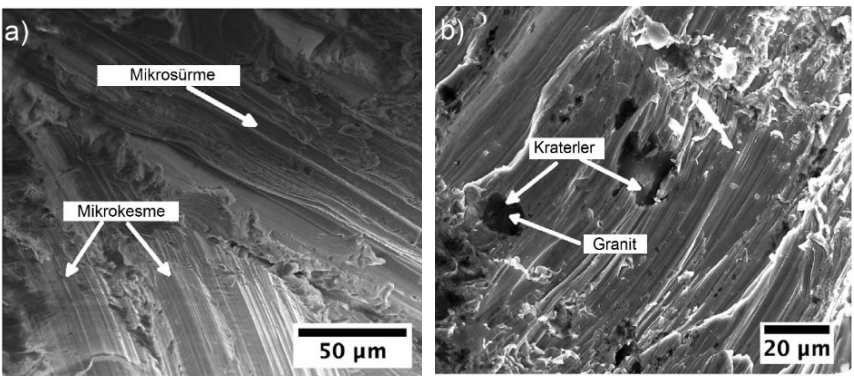


Şekil 8. İki gövdeli abrasif aşınmada, abrasif partiküllerin ve aşınan malzemenin sertlik oranına bağlı olarak aşınma şiddeti Kaynak: a) Zum Gahr, 1997 ve b) Khruschov & Babichev, 1960'a atfen Lijesh & Khonsari, 2020

Darbeli-abrasif aşındırma sadece abrasif (çizik) aşındırma ile karşılaştırıldığında, darbeli aşındırmanın malzemenin yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı görülmektedir. Sadece kayma/çizme koşullarında, malzemenin mikro kesme yoluyla kaldırılması nedeniyle malzeme yüzeyi daha düşük pürüzlülüğe haizdir. Darbeli-abrasif aşınma koşullarında ise malzeme yüzeyinde ufalanma ve parçalanmalar meydana gelir. Abrasif partikülün malzeme yüzeyine çarpma açısı 0°'ye yakın olduğunda; hasar mikro-sürme, kama teşekkülü, ve mikro-kesme mekanizmalarını içerir. Diğer çarpma açılarında ise, çarpma enerjisine bağlı olarak malzeme yer değiştirir veya çarpma bölgesinden uzaklaştırılır ve ayrıca çarpma kraterleri gelişir (Chintha & ark., 2019).

Düşük alaşımlı bir çelikte, darbe etkisiyle kopan malzeme (kraterler) ve sadece abrasif aşınma etkisinin neden olduğu mikro-kesme ve mikro-sürme aşınma mekanizmaları Şekil 9'da görülmektedir. Darbeli-abrasif aşınmada; mikro-kesme ve mikro-

sürme gibi geleneksel aşınma mekanizmalarının yanı sıra, malzeme yığılması, mikro çatlama, dudaklı oluk oluşumu, dökülme, ve kraterler gibi darbe olayının kendisinden kaynaklanan unsurlar görülebilir (Chintha & ark., 2019).



Şekil 9. Sıcak haddelenmiş çeliğin granit parçacıkları ile aşındırılması sonucu 4 saatlik testten sonraki yüzey topografyası; a) hareketli granit parçacıkları nedeniyle meydana gelen aşınmayı, b) darbeler sonucu oluşan kraterleri göstermektedir
Kaynak: Chintha & ark., 2019

2.2. Tokluk

Bir malzemenin kırılmaya kadar deformasyon sırasında enerjiyi absorbe etme yeteneği tokluk olarak adlandırılır. Tokluk; yükleme türü (çekme veya darbe), yükleme hızı, sıcaklık, mikroyapı, kusurların ve safsızlıkların varlığı gibi faktörlerden etkilenebilen bir malzeme özelliğidir.

Çekme yüklemesi için tokluk; kırılmaya kadar yavaş yüklenen düz/çentiksiz bir çekme numunesi için gerilme-gerinim eğrisi altındaki alan ile karakterize edilir (Medlin & Kuhn, 2000). Darbe tokluğu (çentik tokluğu); dinamik darbe altında çentikli bir numune

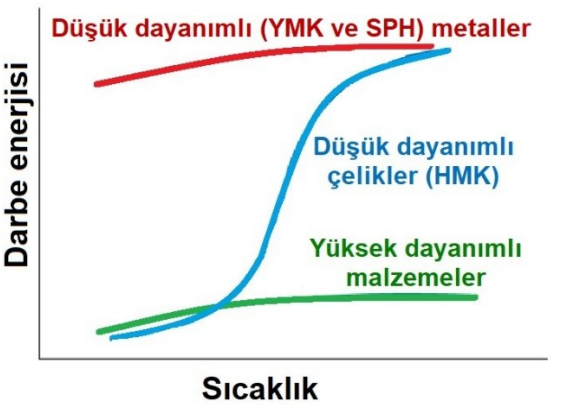
tarafından kırılıncaya kadar absorbe edilen enerji olarak adlandırılır. Darbe enerjisi, tipik olarak numunenin plastik deformasyonu önlemek için üç eksenli bir gerilme durumuna neden olan küçük bir V şekilli çentiğe sahip olduğu Charpy ve Izod testleri kullanılarak ölçülür (Zambrano, 2021). Kırılma tokluğu; kırılmaya yol açan önceden var olan bir çatlağın büyümesine direnen malzeme yeteneğini ölçmek için genel bir terim olarak tanımlanır (Zhang & ark., 2005).

Darbe tokluğunun aksine, kırılma tokluğu yarı statik koşullarda gerçekleştirilir, yani çekme testine benzer şekilde yavaş deformasyon oranları uygulanır (ASTM E1820, 2020). Kırılma tokluğu; genellikle doğrusal elastik gerilme yoğunluk faktörü (K), çatlak ucu açılma yer değiştirmesi (CTOD), çatlak uzama direnç eğrileri (R-eğrileri), ve J-integrali (J) tarafından tanımlanan elastik-plastik parametre gibi farklı parametrelerle ölçülür. Kırılma tokluğu bazen statik kırılma tokluğu (K_{Ic}) olarak adlandırılır. Dinamik kırılma tokluğu (K_{Id}) terimi; yükleme hızı etkisini dikkate almak amacıyla yük ve yer değiştirmenin (enerji) zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedildiği enstrümante Charpy numuneleri kullanılarak elde edilir ve kırılma yükü ASTM E399'a göre eğme numuneleri denklemi kullanılarak hesaplanır (Zambrano, 2021).

Mühendislik uygulamalarından önce tüm malzemelerin kırılma dirençlerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesi önemlidir. Malzemeler mikro yapıya, sıcaklığa, yükleme türü, ve yükleme hızına bağlı olarak gevrek ya da sünek olarak kırılabilir. Gevrek kırılma genellikle plastik deformasyon kanıtı olmaksızın yıkıcı bir şekilde gerçekleşir ve bu nedenle pratikte daha fazla endişe kaynağıdır (Li & ark., 2018). Sünek kırılmada ise malzeme yüksek

miktarda enerji absorbe ederek önemli oranda plastik deformasyona uğrar. “Gevrek” bir şekilde kırılan malzemeler genellikle 10 MPa$\sqrt{m}$ altında bir kırılma tokluğuna sahipken, “sünek kırılan” malzemeler için bu değer birkaç on ila yüzlerce arasında değişebilir (Lewandowski & ark., 2006; Li & ark., 2016).

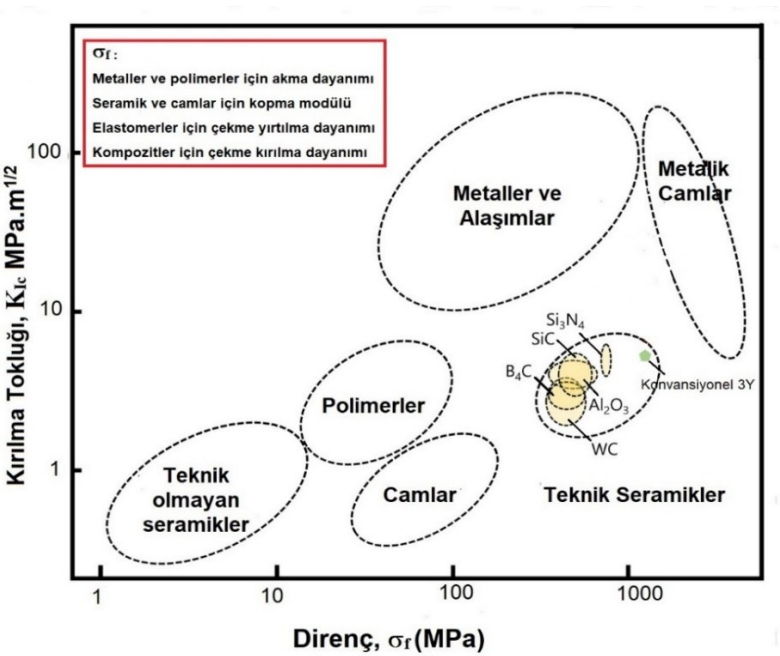
Sıcaklık düştükçe çoğu malzemenin darbe enerjisi azalır (Şekil 10). Darbe enerjinin sıcaklıkla değişiminin nedeni; düşük sıcaklıklarda dislokasyon hareketlerinin engellemesi olarak düşünülür. Nispeten yüksek sıcaklıklarda; dislokasyonların engellerden kurtulabildiği düşünülmekte ve bu yüzden darbe enerjisinin arttığı varsayılmaktadır. Kristal yapı, sıcaklık, ve kimyasal bileşim darbe tokluğunu etkiler (Callister & Rethwisch, 2009).



Şekil 10. Çeşitli malzemeler için sıcaklık-darbe enerjisi davranışı
Kaynak: Callister & Rethwisch, 2009

Hem yüksek mukavemete hem de yüksek tokluğa sahip yapısal malzemeler geliştirmek malzeme bilimcilerin nihai

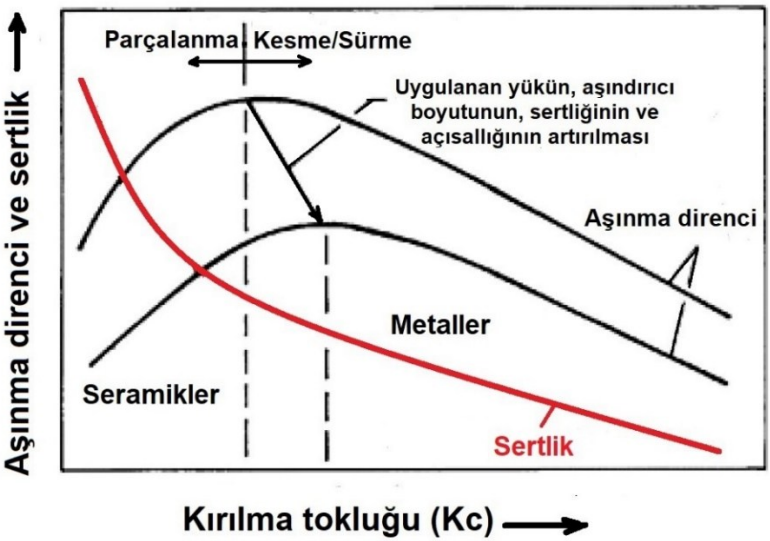
hedefidir. Çeşitli mühendislik malzemeleri için kırılma tokluğu-mukavemet ilişkilerini gösteren Ashby haritası Şekil 11'de gösterilmektedir. Seramik malzemelerin iyi mukavemete rağmen düşük tokluğa sahip olmaları pratik uygulamalarını büyük ölçüde sınırlamaktadır. Seramiklerin sünekliği olmadığından gerilim yoğunluklarına (delikler veya çatlaklar gibi) veya yüksek temas gerilimlerine (örneğin, sıkıştırma noktalarında) karşı düşük bir toleransları vardır. Sünek malzemeler; yükü daha eşit şekilde yeniden dağıtacak şekilde deforme olarak gerilim yoğunluklarına uyum sağlar ve bu nedenle akma dayanımlarının küçük bir marjı içinde statik yükler altında kullanılabilirler (Ashby, 2016).



Şekil 11. Çeşitli mühendislik malzemeleri için kırılma tokluğu-mukavemet ilişkisi
Kaynak: Ashby, 2016'ya atfen Matsui & ark., 2023

Metalik malzemelerle karşılaştırıldığında daha sert ve daha yüksek aşınma direnci sergileyen seramik malzemelerin düşük kırılma tokluğu, özellikle aşınma sırasında büyük darbe kuvvetleri veya büyük gerilim dalgalanmaları söz konusu olduğunda performanslarını olumsuz etkiler. Seramik gibi kırılgan malzemeler için temasın doğası elastik-plastik girintiden Hertzian kırılmasına değiştiğinde, aşınmada kesme mekanizmasından parçalanmayı da içeren bir mekanizmaya geçiş meydana gelir (Moore, 1981). Bu geçişin gerçekleştiği koşullar; aşındırıcı partiküllerin boyutuna ve şekline, uygulanan gerilime, ve aşınma yüzeyinin sertliğine bağlıdır. Aşınma malzemesinin sertliğinin azaltılması ve kırılma tokluğunun artırılması; parçalanmaya geçişin gerçekleştiği kritik aşındırıcı boyutunu artırır. Bu nedenle, kırılgan malzemelerin sertliğini azaltmak veya alternatif olarak kırılma tokluğunu artırmak daha düşük aşınma oranlarına yol açar (Zum Gahr, 1987; Mutton, 1988).

Metaller ve seramiklerde; aşınma direnci, sertlik, ve kırılma tokluğu (Kc) arasındaki ilişki Şekil 12'de gösterilmektedir. Düşük kırılma tokluğuna sahip malzemeler için, sertlikte belirgin bir düşüş olmasına rağmen aşınma direnci artan kırılma tokluğu ile artar. Malzemenin aşınma direncindeki artış toplam aşınma oranına parçalanma katkısının azalmasından kaynaklanır. Yüksek kırılma tokluğuna sahip malzemeler için, aşınma yalnızca kesme ve sürme yoluyla gerçekleşir. Bu malzemelerde aşınma oranı girinti direnci tarafından kontrol edilir ve aşınma direnci sertliğin azalmasıyla azalır (Bayer, 2002).



Şekil 12. Aşınma direnci, sertlik ve kırılma tokluğu arasındaki şematik ilişki
Kaynak: Gates & Gore, 1995

Metalik alaşımlarda; mikro yapı, sertlik ve mukavemetin iyi bir şekilde ilişkili olduğu bilinmektedir. Aynı şekilde, mikro yapı ile kırılma tokluğu arasında belirgin bir korelasyonun olması beklenebilir. Statik kırılma tokluğu (K_{Ic}, $MPa\sqrt{m}$) ve dinamik kırılma tokluğu (K_{Id}, $MPa\sqrt{m}$) ile karbid hacim fraksiyonu (KHF, %) arasındaki ilişki östenitik ve martenzitik mikroyapılar için eşitlik 5-8'de verilmiştir (Zum Gahr & Scholz, 1980).

Östenitik mikroyapılar için: $K_{IC}=32.92+0.03*(KHF(\%))-0.005*KHF(\%)^2$ (5)

Martenzitik mikroyapılar için: $K_{IC}=22.66+0.44*(KHF(\%))-0.011*KHF(\%)^2$ (6)

Östenitik mikroyapılar için: $K_{Id}= 28.05-0.216*(KHF(\%))$ (7)

Martenzitik mikroyapılar için: $K_{Id}\ 20.65-0.102*(KHF(\%))$ (8)

Tokluğu geliştirmeye yönelik stratejiler; genel olarak bileşimlerin kontrolü ve mikro yapıların tasarımı etrafında yoğunlaşmıştır. Örneğin, 0.3-0.4 wt.% C içeren çeliklerde, alaşıma ağırlıkça %2'ye kadar Mn, ağırlıkça %2-4'e kadar Cr, ve ağırlıkça %0.5'e kadar Mo eklemek sertlik ve tokluk kombinasyonuna katkıda bulunur (Salesky & Thomas, 1982). Darbe aşınması koşullarında, benzer sertlik seviyesinde daha iyi tokluğa sahip çelik daha sert ve nispeten kırılgan bir çelikten daha iyi performans gösterir (Chintha & ark., 2019).

Düşük gerilimli abrasif aşınması koşullarında, çeliklerde beynitik mikroyapıların aşınma direncini geliştirdiği anlaşılmaktadır (Gupta & ark., 2004; Yazıcı, 2012). İyi tok bir matris ve kırılgan martenzitin yokluğu nedeniyle alt beynitik yapının perlitik ve üst beynitik mikro yapılardan daha iyi aşınma direnci gösterdiği rapor edilmektedir (Devanathan & Clayton 1991; Shipway & ark., 1997).

Darbe tokluğu (Charpy) ve darbe-abrasif aşınması arasındaki ilişki hakkında birkaç çalışma rapor edilmiştir. Madencilik ve mineral işleme alanında, Teeri & ark. (2006) farklı toz metalürjik çelikleri ve referans çeliklerini değerlendirdiği çalışmasında; en yüksek sertliğe sahip malzemelerin en iyi darbe-abrasif aşınma performansı sergilemediğini göstermiştir. Darbe tokluğunun kırılgan davranışın önlenmesinde önemli bir rol oynadığı ve en iyi aşınma direncini yüksek sertlik ile yüksek darbe tokluğunun bir araya geldiği malzemenin sağladığını rapor etmektedir.

Benzer şekilde, Ge & ark. (2017) madencilik endüstrisinde kullanılan orta manganlı çelik ve martenzitik çelik için, darbe-abrasif aşınma koşulları altında manganlı çeliğin martenzitik çeliğe

göre daha iyi aşınma direnci gösterdiğini, bunun temel nedeninin daha yüksek darbe tokluğu değeri olduğunu, ancak belli bir noktadan sonra darbe tokluğu değerlerindeki artışın aşınma direncini artırmadığını ifade etmektedir. Bununla birlikte karşı görüş bildiren çalışmalarda mevcuttur. Pei & ark. (2018) darbe-aşınma koşulları altında, manganez çeliğinin martenzitik çelikten daha yüksek bir darbe tokluğuna sahip olmasına rağmen, martenzitik çeliğin manganez çeliğinden daha iyi aşınma performansı gösterdiğini; dolayısıyla darbe tokluğu ve darbe-abrasif aşınması arasında bir korelasyon bulunamadığı rapor etmektedir.

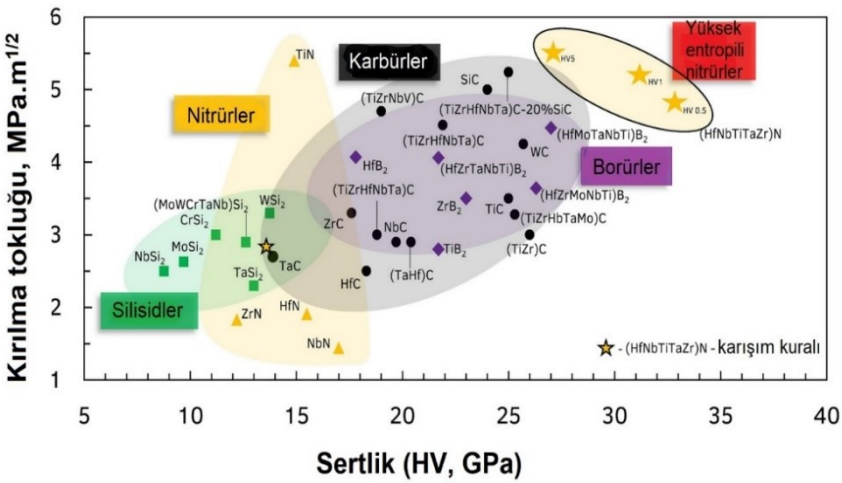
WC-Co sert metaller, mikroyapısı tungsten karbür tanelerinden ve ağırlıkça %3-30 oranında Co bazlı metal bağlayıcıdan oluşan özel bir kompozit malzeme sınıfını temsil eder. Sert metallerin farklı uygulamalardaki performans ve aşınma davranışlarının, özellikle sertlik ve kırılma tokluğu olmak üzere mekanik özelliklerini etkileyen mikro yapılarına ve bağlayıcı içeriklerine bağlı olduğu iyi bilinmektedir (Konyashin & ark., 2020). Nanoya yakın mikron altı ve ultra ince sert metaller, genellikle orta-kaba ve ultra-kaba sert metallere kıyasla daha yüksek sertliğe, basma dayanımına, ve yorulma direncine sahiptir; ancak kırılma tokluğu daha düşüktür (Heiniö, 1999; Hussainova, 2007). İnce taneli sert metallerin düşük WC ortalama tane boyutları, nispeten kaba aşındırıcı parçacıkların kullanılmasıyla aşınma oranlarının azaltılması açısından elverişlidir. Bununla birlikte, aşındırıcı partiküller aşınma testleri sırasında yoğun kırılmaya maruz kalırsa, bu tür ince taneli sert metallerin avantajlarını kısmen kaybettiği bildirilmektedir (Antonov & ark., 2012).

Zambrano (2021)'e göre, başlangıçta malzeme yüzey sertliği en azından ilk aşamalarda aşınmayı önleyecek kadar yüksek olmalıdır, ancak çok yüksek olmamalıdır, çünkü malzemenin tekrarlayan sürme mekanizmasına ve aşındırıcıların neden olduğu darbelere direnmek için iş sertleşmesi göstermesi önemlidir. Darbe-aşınma koşullarında, sertlikten ziyade darbe tokluğu veya kırılma tokluğu dikkate alınmalıdır. Saf abrasif aşınma koşullarında bile, malzeme sertliği kritik bir değeri aştığında (aşındırıcı sertliği ile malzeme sertliği arasındaki kritik oran) aşınma mekanizması değiştiği için aşınma kaybı artar. Aşınma mekanizması; mikro-sürme veya mikro-kesmeden mikro çatlamaya (ki bu aşınma mekanizması düşük kırılma tokluğu ile ilgilidir) değişir, bu nedenle malzemenin kırılma tokluğu önemlidir. Malzemenin kimyasal bileşim ve mikroyapısının belirlediği sertlik, direnç, ve tokluk parametrelerinin ideal kombinasyonunun ortaya konulması abrasif aşınma kayıplarını azaltabilir (Yazıcı, 2024).

Geleneksel alaşımlar ile elde edilemeyen özellikleri elde etmek için çok bileşenli yüksek entropili alaşımlar son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu alaşımlar yüksek dayanım/sertlik, yüksek korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek tokluk, ve düşük sıcaklıklarda bile daha sünek özellikler gösterebilmektedir. Diğer tüm yapısal malzemelerde olduğu gibi, özellikle güvenlik açısından kritik uygulamalar için yeterli kırılma direncine ulaşmak yüksek entropili alaşımlar içinde hayati bir gerekliliktir (Li & ark., 2018).

Yüksek entropili seramiklerin kritik uygulamalar için kırılma tokluğu konusunda fırsatlar sağlayabileceği düşünülmektedir. Moskovskikh & ark. (2020)'ye göre, sert ve tok nitrür seramikler

çeşitli gelişmiş uygulamalar için yeni alanlar açmaktadır. Yüksek entropili nitrür ($Hf_{0.2}Nb_{0.2}$ $Ta_{0.2}Ti_{0.2}$ $Zr_{0.2}$)N olağanüstü sertlik ve kırılma tokluğu göstererek süper sert kaplamalar, yapısal malzemeler, optikler, ve diğerler alanlar için umut vadetmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Yüksek entropili nitrürler ve çeşitli seramiklerin sertlik ve kırılma tokluğu değerleri
Kaynak: Moskovskikh & ark., 2020

Sonuç

Malzeme aşınma direncinin geliştirilmesine yönelik temel stratejilerin; kaplamalar, yüzey yapısını değiştirme, ve yüzey sertleştirme gibi yüzey mühendisliği ile bileşimlerin kontrolü, takviye maddelerinin eklenmesi, ve mikro yapıların tasarımı gibi matrisi güçlendirme konularına odaklandığı görülmektedir.

Malzeme sertliği saf abrasif aşınmaya karşı direncin iyi bir göstergesi olsa da aşınma modu darbe veya oluk açmaya

dönüştüğünde aşınma davranışını bozabilir. Genel olarak, malzeme sertliğindeki bir artışa sünekliğinde bir azalma eşlik eder ve bu da aşınma mekanizmasında ağırlıklı olarak sürme ve/veya kesmeden parçalamaya doğru bir değişikliğe neden olur. Kırılma tokluğu, özellikle büyük stres dalgalanması veya darbe kuvveti söz konusu olduğunda abrasif aşınmaya direnmede önemli bir rol oynar. Sertlik ve kırılma tokluğunun optimum kombinasyonu daha iyi aşınma direnci sağlar.

Kaynaklar

Adachi, K., Hutchings, I.M. (2003). Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. Wear. 255, 23–29.

Antonov, I., Hussainova, R., Veinthal, J. P (2012). Effect of temperature and load on three-body abrasion of cermets and steel. Tribol. Int. 46, 261–268.

Archard, J.F. (1953). Contact and rubbing of flat surface. J. Appl. Phys. 24, 981–988.

Ashby, M. F. (2016). Materials property charts in Materials Selection in Mechanical Design, M. F. Ashby, Ed. (Butterworth-Heinemann), pp. 55–103.

ASTM G40-22a (2022). Standard terminology relating to wear and erosion.

ASTM E1820 (2020). Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, West Conshohocken, PA.

ASTM E399-19 (2019). Standard Test Method for Linear-Elastic Plane Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials, West Conshohocken, PA.

Aydın, G., Yazıcı, A. (2020). Effect of quenching and tempering temperature on tensile properties of low alloyed boron steels. Mater. Test. 62, 139–145.

Ball, A. (1983). On the importance of work hardening in the design of wear-resistant materials. Wear. 91, 201–207.

Bayer, R.G. (2002). Fundamentals of Wear Failures, Failure Analysis and Prevention, Vol 11, ASM Handbook, ASM International, pp 901–905

Blau, P.J. (1989). Friction and Wear Transitions of Materials, Noyes Publications, Park Ridge, NJ.

Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2009. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.

Chintha, A.R. (2019). Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. Mater. Sci. Technol. 35, 1133–1148.

Chintha, A., Valtonen, K., Kuokkala, VT., Kundu, S., Peet, M., Bhadeshia, H. (2019). Role of fracture toughness in impact abrasion wear. Wear. 430–431, 430–437.

Chattopadhyay, R., 2001. Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention, 1st ed. ASM International, Materials Park, Ohio.

Conrad H., Narayan, J. (2000). On the grain size softening in nanocrystalline materials. Scripta Mat. 42(11), 1025–1030.

Czichos, H. (1980). Systems Approach to Wear Problems. Wear Control Handbook, M.B. Peterson & W.O.Winer, Ed., American Society of Mechanical Engineers, p 17–34.

Devanathan, R., Clayton, P. (1991). Rolling-sliding wear behavior of three bainitic steels. Wear. 151, 255–267.

Elleuch, K., Mezlini, S., Guermazi, N., Kapsa, P. (2006). Abrasive wear of aluminum alloys rubbed against sand. Wear. 261, 1316–1321.

Gates, J.D., Gore, G.J. (1995). Wear of metals: philosophies and practicalities. Mater. Forum.19, 53–89.

Gore, G.J., Gates, J.D. (1997). Effect of hardness on three very different forms of wear. Wear. 203, 544–563.

Ge, S., Wang Q., Wang, J. (2017). The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines. Wear. 376–377, 1097–1104.

Gupta, A.K., Jesudas, D.M., Das, P.K., Basu, K. (2004). Performance evaluation of different types of steel for duck foot sweep application. Biosyst. Eng. 88, 63–74.

Hall, E.O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: II, Characteristics of the lüders deformation. Proceedings of the Physical Society. 64, 742-753.

Hawk, J.A., Wilson, R., Tylczak, J.H., Doğan, O.N. (1999). Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation. Wear. 225–229, 1031–1042.

Heiniö, M. (1999). Rock Excavation Handbook, Sandvik Tamrock Corp.

Hokkirigawa, K., Kato, K. (1988). An Experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. Tribol. Int. 21, 151–157.

Holmberg, K., Matthews, A. (2006). Tribology of Engineered Surfaces, Wear. In: Stachowiak, G. (Ed.), Wear – Materials, Mechanisms and Practice. England: John Wiley & Sons Ltd, pp. 123–166.

Hussainova, I. (2007). Microstructural design of ceramic-metal composites for tribological applications. Key Eng. Mater. 334-335, 125–128.

Hutchings, I.M. (1992). Tribology—Friction and Wear of Engineering Materials, Butterworth Heinemann, Oxford.

Khruschov, M.M. (1957. Resistance of metals to wear by abrasion as related to hardness. J. Mech. Eng. 1957, 655–659.

Khruschov, M.M., Babichev, M.A. (1960). Friction and Wear in Machinery, No. 12, translated from the Russian, Am. Soc. Mech. Eng. 5. New York.

Konyashin, I., Antonov, M., Ries, B. (2020). wear behaviour and wear mechanisms of different hardmetal grades in comparison with polycrystalline diamond in a new impact-abrasion test. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 92, p 105286

Lewandowski, J.J., Shazly, M., Shamimi Nouri A. (2006). Intrinsic and extrinsic toughening of metallic glasses. Scripta Mater. 54, 337–341.

Li, D. (2017). Abrasive wear, in George E. Totten (Ed.), Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International.

Li, W., Liaw, P. K., Yanfei, G. (2018). Fracture resistance of high entropy alloys: A review. Intermetallics. 99, 69-83.

Li, W., Bei, H., Gao, Y. (2016). Effects of geometric factors and shear band patterns on notch sensitivity in bulk metallic glasses. Intermetallics. 79, 12–19.

Lijesh, K.P., Khonsari, M.M. (2020). Characterization of abrasive wear using degradation coefficient. Wear. 450-451, 203220.

Magneè, A. (1993). Modelization of damage by abrasion. Wear. 162-164: 848-855.

Medlin, D., Kuhn, H. (2000) Fracture Toughness and Fracture Mechanics, Mechanical Testing and Evaluation, Vol 8, ASM Handbook. H. Kuhn et al., Ed., ASM International, pp 563–575.

Miao, J., Guo, T., Ren, J., Zhang, A., Su, B., Meng, J. (2018). Optimization of mechanical and tribological properties of FCC CrCoNi multi-principal element alloy with Mo addition. Vacuum. 149, 324-330.

Misra A., Finnie, I. (1981). On the size effect in abrasive and erosive wear. Wear. 65, 359–373

Moore, M.A. (1981). Abrasive wear, in D.A. Rigney (Ed.), Fundamentals of Friction and Wear of Materials, American Society for Metals, pp 73–118.

Moskovskikh, D., Vorotilo, S., Buinevich, V. et al. (2020). Extremely hard and tough high entropy nitride ceramics. Sci Rep. 10, 19874.

Mutton, P.J. (1988). Abrasion Resistant Materials for the Australian Minerals Industry, Australian Minerals Industries Research Association Limited.

Matsuia, K., Hosoia, K., Fenga, B., Yoshidaa, H., Ikuharaa, Y. (2023). Ultrahigh toughness zirconia ceramics, PNAS, 120, 27, e2304498120.

Petch, N.J. (1953). The cleavage strength of polycrystals. J. Iron Steel. Inst. 174, 25-28.

Pei, Z., Song, R., Ba Q., Feng Y. (2018). Dimensionality wear analysis: three-body ımpact abrasive wear behavior of a martensitic steel in comparison with Mn13Cr2. Wear. 414–415, 341–351.

Pintaude, G., Bernardes, F.G., Santos, M.M., Sinatora, A., Albertin, E. (2009). Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion. Wear. 267, 19–25.

Pintaude, G. (2022). Remarks on Wear Transitions Related to Hardness and Size of Abrasive Particles. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.99324

Ratia, V., Valtonen K., Kuokkala, V.T. (2013). Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles. Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol. 227(8), 868–877.

Ratia, V. (2016). Behavior of martensitic wear resistant steels in abrasion and impact wear testing conditions. Tribol. Finn. J. Tribol. 34.

Rabinowicz, E., Dunn, L., Russell, P. (1961). A study of abrasive wear under three-body conditions. Wear. 4, 345–355.

Salesky, W., Thomas, G. (1982). Medium carbon steel alloy design for wear applications. Wear. 75, 21–40

Sare, I.R., Arnold, B.K., Dunlop G.A., Lloyd, P.G. (1993). Repeated impact-abrasion testing of alloy white cast irons. Wear. 1993, 162–164, 790–801.

Siegel, R.W., Fougere, G.E. (1995). Mechanical properties of nanophase metals. NanoStruct. Mater. 6, 1–4, 205–216.

Shipway, P.H., Wood, S.J., Dent, A.H. (1997). The hardness and sliding wear behaviour of a bainitic steel. Wear. 203–204, 196–205.

Smith, W. F., Hashemi. (2006). Foundations of Materials Science and Engineering (4th ed.), McGraw-Hill.

Suárez, S., Rosenkranz, A., Gachot, C., Mücklich, F. (2014). Enhanced tribological properties of MWCNT/Ni bulk composites – Influence of processing on friction and wear behaviour. Carbon, 66,164-171.

Tabor, D. (1954). Moh's hardness scale – a physical interpretation. Proc. Phys. Soc. Sec. B 67, 249–257.

Teeri, T., Kuokkala, V.T., Siitonen, P., Kivikyto Reponen P., Liimatainen, J. (2006). Impact Wear in Mineral Crushing, Proc. Eston. Acad.Sci. Eng. Eston. Acad. Publ. 12, 408–418.

Tylczak, J.H., Hawk, J.A., Wilson, R.D. (1999). A comparison of laboratory abrasion and field wear results. Wear. 225-229, 1059–1069.

Yazıcı, A. (2012). Investigation of the wear behavior of martempered 30MnB5 steel for soil tillage. Trans. ASABE 55, 15–20.

Yazıcı, A. (2024). Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. Soil Tillage Res. 242, 106161.

Zhang, S., Sun, D., Yongqing Fu., Hejun, D. (2005). Toughness measurement of thin films: a critical review. Surf. Coat. Technol. 198(1), 74–84.

Zambrano, O. A. (2021). A review on the effect of impact toughness and fracture toughness on impact-abrasion wear. JMEP 30, 10, 7101-7116.

Zanoria, E.S., Blau, P.J. (1998). Effect of incidence angle on the impact-wear behaviour of silicon nitride, J. Am. Ceram. Soc. 81, 901–909.

Zum Gahr, K. H. (1978). Relation between abrasive wear rate and the fracture toughness of metallic materials. Z. Metallkd. 69, 643–650.

Zum Gahr, K.H., Scholz, W.G. (1980). Fracture toughness of white cast irons, JOM, 32(10), 38–44.

Zum Gahr, K.H. (1987). Microstructure and Wear of Materials, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands: pp 132-292.

Zum Gahr, K.H. (1997). Wear by hard particles, in: I.M. Hutchings (Ed.), New Directions in Tribology, Institute of Mechanical Engineers, London, 1997.

BÖLÜM III

Gerinim Ölçer Teorisi ve Literatürdeki Güncel Uygulamaları

Ersan KIRAR[1]

1.Giriş

Birçok yapının tasarım aşamasında deneysel gerilme analizleri önemlidir (İnternet kaynak, 2024). Yapılardaki kuvvet ölçümü için geliştirilen çeşitli dinamometreler bulunmaktadır. Bunlar genellikle yük hücresi (load cell) esaslı dinamometreler ve gerinim ölçerlerdir (strain-gauge) (TOPAL & ark., 2010). Deneysel olarak uygulanan gerinim ölçer kullanılan mekanik testler sonucunda malzemenin elastisite modülü, poisson oranı ve kayma modülü gibi parametreleri tespit edilebilmektedir (İnternet kaynak, 2024).

[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

Gerinim ölçerler (Strain gauge) uygulandığı yapıdaki gerinimleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca gerinim ölçerler makine alanındaki uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak gerinim ölçerler literatürde çok farklı amaçlarla kullanılsa da bu uygulamaların toplu olarak derlenip değerlendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada gerinim ölçerlerin güncel uygulamalarının derlemesi çalışılmıştır. Yapılan çalışmayla gerinim ölçer alanında yapılacak çalışacaklara yön göstermiştir.

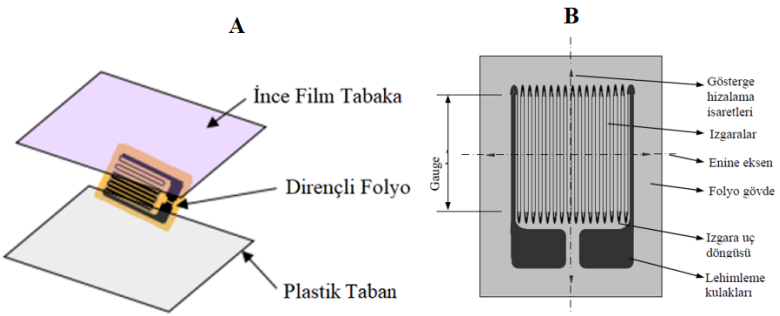
2.Gerinim Ölçer (Strain Gauge) ve Teorisi

Gerinim ölçer, bir nesne üzerindeki gerinimi ölçmek amacıyla kullanılan bir objedir. Arthur C. Ruge ve Edward E. Simmons tarafından 1938'de icat edilen ve en yaygın kullanılan gerinim ölçer türü, metalik bir folyo desenini destekleyen yalıtkan esnek bir arkalıktan oluşmaktadır. Ölçüm yapılan nesne deforme oldukça folyo da deforme olur ve bu durumda nesnenin elektriksel direncinin değişmesine sebep olur (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024).

Gerinim ölçerler, kesiti çok küçük olan iletken bir telin çok ince bir şerit üzerine tekrarlı olarak sarımlar şeklinde yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Gerinim ölçerler üzerine yapıştırılan nesneyle beraber deformasyona uğrarlar. Bu sırada da nesnedeki gerinim ölçerler üzerindeki tellerin çapı da değişir. Çapı değişen iletken tellerin direnci de değişerek üzerinden geçen akımın voltajını değiştirir. Bu voltaj değişiminin ölçülmesiyle tellerdeki ve dolayısıyla gerinim ölçerin üzerine yapıştırıldığı parçadaki gerinim tespit edilmiş olur. Daha sonrasında ise elastisite teorisinin bilinen denklemleri yardımıyla ölçülen gerinim gerilmeye dönüştürülebilir (Koç, 2012; İnternet kaynak, 2024). Gerinim ölçerlerin bu özelliği

gerinime duyarlı olan bir malzeme sayesinde gerçekleşmektedir. Bu türdeki malzemeler iki tiptedir: yarı iletken veya metalik (Wilson, 2002; Hofman, 1989).

Gerinim ölçerin temel yapısında, ince bir plastik film tabanı (12-16 mikron kalınlığında) ile bir laminasyon veya kaplama arasına sıkıştırılmış ince metalik dirençli folyodan (3-6 mikron kalınlığında) oluşmaktadır (İnternet kaynak, 2024; Wilson, 2002). İnce tellere sahip olan gerinim ölçerler yüksek sıcaklıklardaki ortamlarda kullanılmasına rağmen birçok gerinim ölçer Şekil 1'de gösterilen folyo yapıya sahiptir. Folyo gerinim ölçerler genel olarak baskılı devre işlemiyle imal edilirler (Wilson, 2002, Topal & ark., 2010). Tek yönlü folyo gerinim ölçerler, hassasiyetinin yüksek olduğu aktif bir eksene ve düşük olduğu pasif bir eksene sahiptirler (Topal & ark., 2010).



Şekil 1. A-Gerinim ölçer yapısı (İnternet kaynak, 2024) B-Gerinim ölçer elemanları (Topal & ark., 2010)

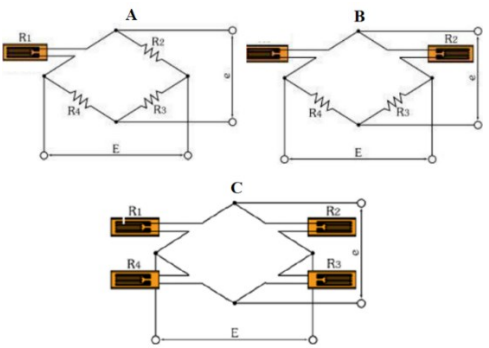
Her bir gerinim ölçer, üretici firma tarafından belirlenmiş olan direnç ile şekil değiştirme arasındaki uygunluğu sağlayan ve geyç faktörü (K) olarak bilinen, hassasiyet faktörüne sahiptir (Koç, 2012). Geyç faktörü (K), gerinim ölçerde tercih edilen malzemeye göre değişmektedir. Genellikle nikel-bakır alaşımlı olan gerinim

ölçerlerin geyç faktörü yaklaşık 2 veya 2,1 olmaktadır. Gerinim ölçerler, genel olarak 120 veya 350 Ω dirence sahiptirler (İnternet kaynak, 2024).

$$K = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \qquad \text{Denklem 1}$$

Denklem 1'de "R_0" sıfır noktasındaki direnç (yük yok) (Ohm), "ε" uzama ve "ΔR" yük uygulandıktan sonra dirençteki değişimdir (Koç, 2012; İnternet kaynak (Wikipedia), 2024; İnternet kaynak, 2024).

Oldukça küçük bir direnç değişimini yeterli hassasiyetle doğru bir şekilde ölçmek çok zordur ve ölçüm için ohmmetre kullanmak da mümkün olmamaktadır. Bu nedenle de gerinim ölçerdeki direnç değişimlerini ölçmek için Wheatstone köprüsü elektrik devresinden yararlanılmaktadır (İnternet kaynak, 2024). Gerinim ölçerle doğru bir ölçümün yapılabilmesi için Şekil 2'de gösterilen bir elektrik devresi (Wheatstone köprüsü) kurulmaktadır. Wheatstone köprüsü, bilinmeyen bir direnç değerinin bilinen dirençler ile elde edilmesini sağlayan bir elektrik devresidir (Topal & ark., 2010).

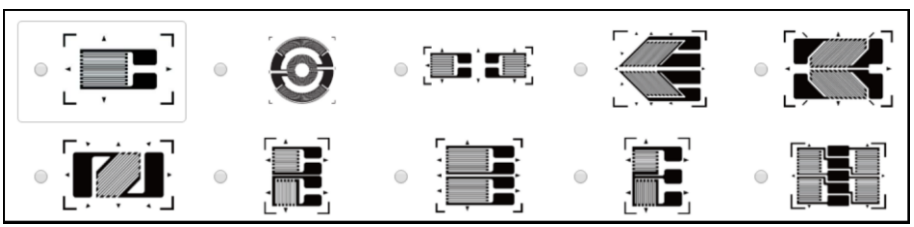


Şekil 2. Wheatstone köprüsü çeşitleri (A-Çeyrek B-Yarım C-Tam) (İnternet kaynak, 2024)

3.GERİNİM ÖLÇER ÇEŞİTLERİ

Gerinim ölçerlerin çeşitli boyut ve şekilleri mevcuttur. Gerinim ölçerlerin ölçüm ızgarasının farklı uzunluklarının yanı sıra, bağlantılar için de çeşitli konumlar ve tasarımları da bulunmaktadır (Şekil 3). Gerinim ölçerlerin çok sayıdaki şekil ve boyutu, farklı uygulama sorunlarını çözmesini sonucudur (Hofman, 1989). Piyasada aşağıdaki farklı türde gerinim ölçerler mevcuttur (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024):

- Doğrusal gerinim ölçerler
- Membran rozet gerinim ölçerler
- Çift doğrusal gerinim ölçerler
- Tam köprü gerinim ölçerler
- Kayma gerinim ölçerleri
- Yarım köprü gerinim ölçerler
- Sütun gerinim ölçerler
- 45° Rozet (3 ölçüm yönü)
- 90° Rozet (2 ölçüm yönü)



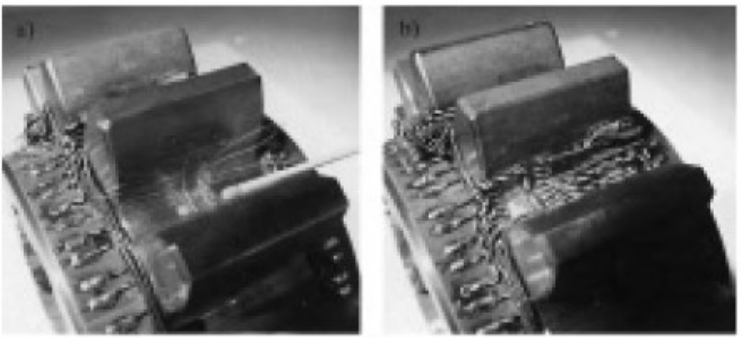
Şekil 3. Gerinim ölçer çeşitleri (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024)

4.GERİNİM ÖLÇER UYGULAMA ALANLARI

Gerinim ölçerler birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Gerinim ölçerler yardımıyla gerilme, gerinim, elastisite modülü, poisson oranı ve kayma gerilmesi gibi malzemenin temel mekanik özellikleri tespit edilebilir (Koç, 2012). Bu alanlar incelendiğinde**;**

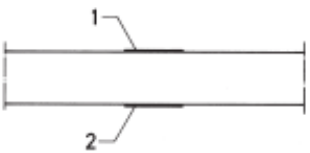
- **Yapısal sağlık izleme:** Yapısal sağlık izleme, yapıları tamamlandıktan sonra takip etmek için kullanılmaktadır. Yapıdaki arızaları önlemek amacıyla, kaymayı ve hasarları belirlemek için gerinim ölçerler kullanılır (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024).
- **Biyolojik ölçümler:** Gerinim ölçerler yardımıyla deri gerginliğinin ölçülmesi hem hayvanlarda hem de insanlarda duruş, solunum, şişme ve eklem rotasyonu gibi birçok biyomekanik ölçümün yapılmasını sağlayabilir (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024).
- **Öngörücü bakım:** Gerinim ölçerler, bir yapıdaki belirli parçaların ne zaman servise alınması veya değiştirilmesi gerektiğini tahmin etmek amacıyla kullanılabilir (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024).
- **Havacılık:** Havacılıkta, kanat sapmasının hesaplanmasında ve yapısal yükün ölçülmesinde gerinim ölçerler standart yaklaşım olarak sıklıkla tercih edilmektedir (İnternet kaynak (Wikipedia), 2024).
- **Gerilim gradyanlarının belirlenmesi için gerinim ölçer zincirleri:** Uygulamada nesnedeki gerilme gradyanı genellikle çok net olarak tespit edilemez ve

maksimum yükleme noktası ise kesin olarak tespit edilemez. Bu sorunun çözümü içinde nesnelerde gerinim ölçer zincirleri geliştirilmiştir (Şekil 4) (Hofman, 1989).



Şekil 4. Gerinim ölçerler yardımıyla dişli üzerindeki gerilme gradyanının tespiti (Hofman, 1989)

- **Artık gerilimin araştırılması için gerinim ölçerler:** Yük taşıyan parçalardaki artık gerilimi ölçme için de gerinim ölçerler sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 5) (Hofman, 1989).



Şekil 5. Eğme yükü altındaki yapının artık gerilme tespiti (Hofman, 1989)

5.LİTERATÜRDEKİ GÜNCEL GERİNİM ÖLÇER UYGULAMALARI

Literatür incelemesinde gerinim ölçerlerin kullanıldığı güncel ve güncele yakın çalışmalar kullanılmıştır. Literatürden elde edilen

güncel verilere göre gerinim ölçer uygulamaları yorumlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde;

Marques & ark. (2024), çalışmalarında sandviç kompozit plakanın eğme yükü altındaki hasarını gerinim ölçerler yardımıyla incelemişlerdir. Çalışmada plakanın hem alt hem de üst kısmına gerinim ölçerler yapıştırılarak alınan gerinim verileriyle eğme hasarına kadar veri alarak hasarı daha net incelemişlerdir.

Zhao & ark. (2024), çalışmalarında kompozit uçak kanadının çalışma koşullarındaki yükleme durumunu gerinim ölçerler yardımıyla araştırmışlardır. Çalışma sonucunda kompozit uçak kanadına gelen değişken yükleme durumu verilerini elde ederek ileriki çalışmalara ışık tutmuşlardır.

Wang & ark. (2024), çalışmalarında tork ölçümü için yeni belirledikleri altılı gerinim ölçer setini kullanmışlardır. Yirmi dört gerinim ölçer yardımıyla yapılan eski çalışmaların aksine daha az sayıda gerinim ölçer yardımıyla inceleme yapabilmişlerdir.

Zhao & ark. (2024), çift makaralı rulmanların kullanıldığı yükleme altındaki şaftların gerinim verini gerinim ölçer yardımıyla yapmışlardır.

Nieminen & ark. (2023), çalışmalarında trenin tekerleklerindeki yükleme ve deformasyon davranışını gerinim ölçer ile tespit etmişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla da desteklemişlerdir.

Shi & ark. (2023), paketleme sanayisinde oldukça önemli epoksi reçinenin sıcak su ortamındaki viskoelastik özelliklerinin

gerinim ölçer ile incelemişlerdir. Elde ettikleri verilerle ileriki çalışmalara veri alt yapısı oluşturmuşladır.

Beghini & ark. (2023), çalışmalarında eğme yükü altında zor elde edilen kalıntı gerilmeyi gerinim ölçerler yardımıyla belirlemişlerdir. Ayrıca elde ettikleri verilerin hassasiyetinin XRD ve HDM testleriyle de incelemeleri sonucunda yeterince hassas olduğu sonucuna varmışlardır.

Maslow (2023), 500 C^o sıvı metale maruz kalan yapıdaki gerinim ve gerilme verilerini gerinim ölçerler yardımıyla belirlemişlerdir. Elde ettikleri verilerle nükleer reaktörlerde kullanılan bu yapının mekanik incelemesini daha sağlıklı yapabilmişlerdir.

Shimokusu & ark. (2023), titreşim özelliği gösteren sıcak borularının gerinim bilgilerini gerinim ölçerler tespit etmişlerdir. Elde ettikleri verilere göre titreşimi önlemeye çalışmışlardır.

Dizdar & ark. (2022), çalışmalarında gerinim ölçerin hassasiyetinin etkileyen parametreleri araştırmışlardır. Elde edilen verilerle daha sağlıklı ölçümlerin yapılabilmesine katkı sağlamışlardır.

Lake & ark. (2021), gelgit türbin kanatlarının çalışma koşullarındaki gerininim dalgalanmalarını gerinim ölçerler yardımıyla incelemişlerdir. Çalışma sonucunda verilerdeki dalgalanmanın önemli seviyede olmadığını tespit etmişlerdir.

Iriarte & ark. (2021), şaftların gerilme incelemesinde iki ya da üçlü setler kullanılmasına rağmen çalışmalarında belirli konumlara

yerleştirdikleri daha az sayıdaki gerinim ölçer yardımıyla inceleme yapmışlardır.

Cardoso & ark. (2021), daha kolay imal edilebilen FBG (Fiber Bragg Grating) gerinim ölçerlerin uygulamadaki ölçüm hassasiyetini araştırmışlardır. Olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Sadeghi & ark. (2020), birbirlerine yapıştırılan parçaların dayanım incelemesine etki eden parametreleri gerinim ölçerler yardımıyla araştırmışladır.

Stano & ark. (2020), üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle ürettikleri ve dört gerinim ölçer kullanılan yük hücrelerini çekme ve basma yükü altında denemişlerdir. Çalışma sonucunda olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Braga & ark. (2016), çalışmalarında yarış araçlarının sürücü kısmında ağırlık azaltması amaçlı kullanılan malzemeye üç nokta eğme testini gerinim ölçer yardımıyla uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre ağırlık azaltma çalışması yapmışlardır.

Kervran & ark. (2015), çalışmalarında mikrokristalin silikon kirişin eğme yüklemesi altındaki yüksek deformasyon davranışını gerinim ölçerler yardımıyla incelemişlerdir.

Payo & Feliu (2014), esnek kirişlerin yükleme altındaki üç boyutlu deformasyon incelemesini çeşitli konumlara yapıştırdıkları gerinim ölçerler yardımıyla yapmışlardır. Çalışma sonucunda ölçüm yönteminin uygun sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır.

Drouet & Champoux (2014), gerinim ölçerler yardımıyla yapıya gelen yüklerin hassas olarak ölçülme durumunu

incelemişlerdir. Bisikletin selesine gelen yükün incelemesiyle gerinim ölçerlerin yük ölçümündeki hassasiyetini tespit etmişlerdir.

Zhang & ark. (2013), şaftlardaki yatak kuvvetlerinin tespitini gerinim ölçer yardımıyla yapmışlardır. Çalışma sonucunda ölçüm hassasiyetini gerinim ölçer ve gerinim ölçerin konumunun etkilediği sonucuna varmışlardır.

Grange (1995), test numunesinin sürünme davranışını gerinim ölçerler yardımıyla incelemişlerdir. Elde ettikleri verilere göre malzeme karakterizasyonu yapmışlardır.

Yapılan literatür incelemesinde gerinim ölçerlerin makine alanında oldukça geniş bir uygulama alanı olduğu tespit edilmiştir. Literatürden elde edilen güncel verilere göre de gerinim ölçerlerin yeni ve güncel kullanım alanları sunulmuştur. Elde edilen güncel uygulama alanları bilgileriyle yeni çalışmaların yapılmasına ve bu konuda ilerlemelerin olmasına katkı sağlanacağa düşünülmektedir.

6.SONUÇLAR

Literatürde gerinim ölçerlerin güncel uygulamalarının derlenmesi üzerine çalışmaya rastlanmadığında çalışmada bu konu işlenmiştir. Bu çalışmada gerinim ölçerlerin (Strain gauge) temeli ve uygulama alanları üzerine çalışılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar;

-Literatürde gerinim ölçeler geniş bir alanda tercih edilmektedir.

-Bu çalışmada güncel gerinim ölçer çalışmaları derlenerek literatüre toplu kaynak açısından katkı sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa bilimleri fakültesi, Makine Mühendisliği bölümü, Makine laboratuvarı ders notu, Gerinim ölçerlerle şekil değiştirme ölçümü. (31.07.2024 tarihinde https://www.aybu.edu.tr/bolumroot/contents/muhendislik_makina/files/STRAIN%20MEASUREMENT%20BY%20USING%20STRAIN%20GAUGE.pdf adresinden ulaşılmıştır.)

Beghini, M., Grossi, T. & Santus, C. (2023). Validation of a strain gauge rosette setup on a cantilever specimen: Application to a calibration bench for residual stresses. Materials Today: Proceedings, 93, 719–724. Doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.505

Braga, D. F.O., Ramos, T., Eslami, S., Tavares, P. J., Infante, V., de Castro, P. M.S.T. & Moreira, P.M.G.P. (2016). Train passenger car floor panel testing using digital image correlation and strain gauges and comparison with finite element modelling. Engineering Failure Analysis, 69, 69. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.015

Cardoso, V. H.R., Caldas, P., Giraldi, M. T. R., Frazão, O., Carvalho, C. J. R., Costa, J. & Santos, J.L. (2021). Experimental investigation of a strain gauge sensor based on Fiber Bragg Grating for diameter measurement. Optical Fiber Technology, Volume 61, 102428. Doi: 10.1016/j.yofte.2020.102428

Dizdar, H., Aydemir, B. & Vatan, C. (2022). Investigation of the effect of load rate on creep and hysteresis errors in strain gauge and piezoelectric force transducer. Measurement: Sensors, 22, 100374. Doi: 10.1016/j.measen.2022.100374

Droueta, J. & Champoux, Y. (2014). Designing a Strain Gauge Transducer for Dynamic Load Measurement in Cycling using numerical simulation. Procedia Engineering, 72, 304–309. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.016

Grage, H., Maeder, C., Bieth, C., Renard, S. & Delapierre, G. (1995). Thin film srain gauge on polymers:main characteristic. Sensors and Actutors A, 213-217. Doi:10.1016/0924-4247(94)00892-L

Hoffmann, K. (1989). An Introduction to Measurements using Strain Gages. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.

Iriarte, X., Aginaga, J., Gainza, G., Ros, J. & Bacaicoa, J. (2021). Optimal strain-gauge placement for mechanical load estimation in circular cross-section shafts. Measurement, 174, 108938. Doi: 10.1016/j.measurement.2020.108938

Kervran, Y., Sagazan, O. D., Crand, S., Coulon, N., Mohammed-Brahim, T. & Brel, O. (2015). Microcrystalline silicon: Strain gauge and sensor arrays on flexible substrate for the measurement of high deformations. Sensors and Actuators A: Physical,Volume 236, 273-280. Doi: 10.1016/j.sna.2015.08.001

Koç, E., Keleş, İ. & Yıldızlı, K. (2012). Strain Gage Deney Föyü. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü. (30.07.2024 tarihinde https://mak-muhendislik.omu.edu.tr/tr/belgeler/deney-foyleri/STRAIN%20GAGE%20deneyi.pdf adresinden ulaşılmıştır.)

Lake, T., Hughes, J., Togneri, M., Williams, A. J., Jeffcoate, P., Starzmann, R., Kaufmann, N. & Masters, I. (2021). Strain gauge

measurements on a full scale tidal turbine blade. Renewable Energy, 170, 985-996. Doi: 10.1016/j.renene.2021.01.137

Marques, J., Garcia, M., Infante & V., Amaral, P. (2024). Damage assessment on an asymmetric sandwich composite made of natural materials using strain gauges. Engineering Failure Analysis, 160, 108167. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108167

Maslow, S. W. (2023). Application of a full-scale strain gauge to study the stress-strain state of structures subjected to the action of a liquid-metal coolant at high temperatures. Procedia Structural Integrity, 50, 178–183. Doi: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.10.039

Nieminen V., Tuohineva A. & Autio M. (2023). Wheel load reconstruction using strain gauge measurements on the bogie frame for strain prediction and fatigue assessment. International Journal of Fatigue, 170, 107533. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107533

Payo, I. & Feliu, V. (2014). Strain gauges based sensor system for measuring 3-D deflections of flexible beams. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 217, 81-94. Doi: https:10.1016/j.sna.2014.06.014

Sadeghi, M. Z., Weiland, J., Zimmermanna, J., Schiebahn, A., Reisgen, U. & Schröder, K. U. (2020). Experimental and FE investigations on the influential parameters in positioning and measurement of strain gauges in adhesively bonded single lap joints. Procedia Structural Integrity, 28, 1590–1600. Doi: https:10.1016/j.prostr.2020.10.131

Shi, X., Qiu, Y., Jia, F. & Ma, H. (2023). A novel method for measuring viscoelastic parameters of epoxy resins under water bath environments using embedded strain gauges. Polymer Testing, 117, 107847. Doi: https:10.1016/j.polymertesting.2022.107847

Shimokusu, T. J., Drolen, B., Wilson, C., Didion, J. & Wehmeyer, G. (2023). Strain gauge measurements of an oscillating heat pipe from startup to stable operation. Applied Thermal Engineering, Volume 233, October 2023, 121118. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121118

Stano, G., Nisio, A. D., Lanzolla, A. & Percoco, G. (2020). Additive manufacturing and characterization of a load cell with embedded strain gauges. Precision Engineering,Volume 62, 113-120. Doi:10.1016/j.precisioneng.2019.11.019

Topal, E. S., Çoğun & C., Odabaş, D. (2010). Tornalama işleminde kesme kuvvetlerini ölçen gerinim ölçer esaslı dinamometre tasarımı ve imalatı. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26(2): 190-202.

Wang,Y., Ch P., Li Y., L T. & Sue C. (2024). A six-axis force and torque sensor consisting of compliant mechanisms and full-bridge strain gauges. Measurement, 226, 114151. Doi: 10.1016/j.measurement.2024.114151

Wikipedia, Strain gauge. (31.07.2024 tarihinde https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge adresinden ulaşılmıştır.)

Wilson, E. J. (2002). Strain-Gage Instrumentation. Allan G. Piersol (ED.), Chapter 17, Harris' Shock and Vibration Handbook, Fifth Edition.

Zhang, S., Yang, J., Li & Y., Li, J. (2013). Identification of bearing load by three section strain gauge method: Theoretical and experimental research. Measurement, 46, Issue 10, 3968-3975. Doi: 10.1016/j.measurement.2013.07.017

Zhao, X., Li, Y., Yun, Z. & Zhang, W. (2024). shInvestigation on flight load calibration of aircraft composite wing base on strain gauge measurement. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 100540. Doi: 10.1016/j.taml.2024.100540

Zhao, Z., Wang, X. & Hou, Y. (2024). Measurement of the roller tilt angle in a double-row tapered roller bearing with strain gauges. Measurement, 226, 114106. Doi:10.1016/j.measurement.2023.114106

BÖLÜM IV

Savunma Sanayinde ve Askeri Kara Araçlarında Eklemeli İmalat Yöntemleri

Mustafa Akay SARIOĞLAN[1]

1.Giriş

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinin aksine, katman katman malzeme ekleyerek şekil oluşturma prensibine dayanır. Malzemeyi kesmek, şekil vermek veya çıkarma işlemleri yapmak yerine, her katmana malzeme ekleyerek istenilen şekil elde edilir. Bu süreç, dijital bir modelin bilgisayar destekli bir yazılım aracılığıyla doğrudan fiziksel bir nesneye dönüştürülmesini sağlar. Özellikle parçaların hızlı tedarik edilebilmesi, talebe uygun şekilde özelleştirilebilme olanağı sunması gibi konularda avantaj sağlamaktadır.

[1] Mustafa Akay SARIOĞLAN, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., ARGE Uzmanı, Mersin/Türkiye, ORCID: 0009-0002-7591-5582, akay.sarioglan@koluman.com

Bu teknoloji, savunma sanayinde özellikle askeri kara araçlarının imalatında önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Eklemeli imalat, daha az fireli hammadde, tasarım esnekliği ve hızlı prototipleme gibi avantajlar sunarak, askeri kara araçlarının geliştirilmesinde yeni bir çığır açmaktadır.

İmalat maliyetlerini düşürmek, yenilikçi tasarım ve mühendislik seçenekleri açmak için modern teknolojilere talep arttıkça, eklemeli imalat teknolojisi savunma sanayi ve askeri araç sektörlerinde devrim niteliğinde gelişmeler için oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. Eklemeli imalat halihazırda havacılık, makine ve otomotiv gibi ileri teknoloji endüstrilere birçok fayda sağlamaktadır.

Son araştırmalar küresel havacılık ve savunma endüstrisinin 2027 yılına kadar eklemeli imalat teknolojilerine yaklaşık olarak 6 milyar dolar harcanacağını öngörmektedir. Bu öngörü, bu çok yönlü teknolojinin çeşitli uygulamalarda kullanılıyor olması göz önüne alındığında beklenen bir durumdur. Defense Intelligence tarafından yapılan bir araştırmaya göre iş dünyası yöneticilerinin %75'i eklemeli imalat teknolojilerinin önümüzdeki 10 yıl içinde savunma sanayi sektöründe de yaygınlaşacağını öngörmektedir. (Colorado, ve ark., 2023)

Askeri kara araçları, muharebe alanlarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu araçlar, askeri operasyonların, tatbikatların başarılı bir şekilde tamamlanmasında, personellerin, teçhizatların ve sistemlerin taşınmasında ve muharebe koşullarında hayatta kalmalarında önemli görevler üstlenmektedir. Geleneksel imalat yöntemleriyle bu araçların imalatı genel olarak zaman alıcı, pahalı

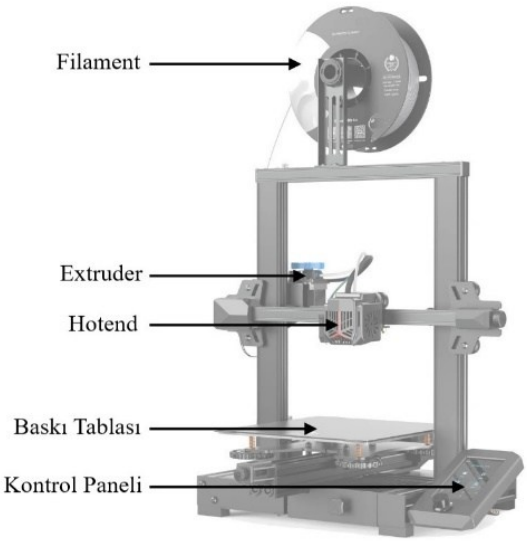
ve karmaşık olabilir. Eklemeli imalat, günümüzde dijital modelleme teknolojilerinin ilerlemesi ile birlikte, zırhlı askeri araçların imalatında devrim yaratma potansiyeline sahiptir.

Eklemeli imalatın, zaman zaman geleneksel yöntemlerle imalatı yapılamayacak olan karışık geometrili parçaların imalatı, talep ve ihtiyaçlara göre özelleştirebilme olanağı, hızlı prototipleme, hafifletme ve dayanıklılık gibi konularda avantajlı olduğu bilinmektedir.

2.Eklemeli İmalat Teknolojileri

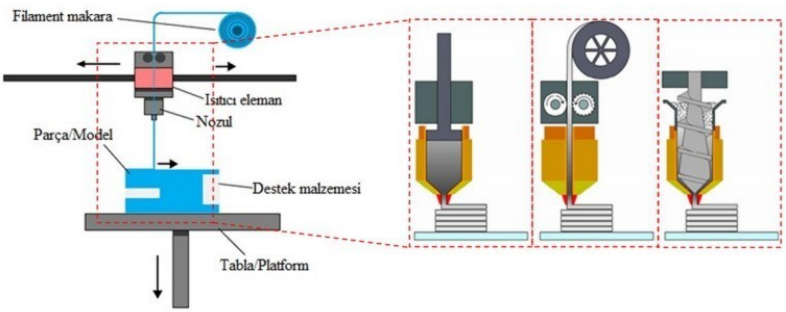
Eklemeli imalat, bir parçanın ya da aletin katman katman üretilme sürecidir. Bu süreç birbirinden farklı teknikler kullanılarak gerçekleştirilir, bu tekniklerden savunma sanayinde ve askeri kara araçlarında kullanılan ve kullanılabilecek olanlar:

Fused Deposition Modeling (FDM): Belirli sıcaklıklarla eriyen plastik hammaddelerin katman katman eklenmesi yöntemidir. Şekil 1'de gösterilen kontrol paneli, baskı tablası, hotend, extruder ve filament birimlerinden oluşur. Extruder yardımı ile hotend'e getirilen filament baskı malzemesine (abs, pla, tough pla, pet-g, tpu vb.) uygun sıcaklıklarda eritilerek yine baskı malzemesine uygun sıcaklıkta olması gereken baskı tablası üzerinde şekil 2'de görüldüğü gibi katmanlar şeklinde üç boyutlu baskı yapılır. Genel olarak prototipleme aşamasında kullanılır, ancak bazı hafif yapıların imalatlarında da tercih edilebilir.



Şekil 7: FDM Teknolojisi Elemanları

Kaynak: 3D Pros. (n.d.)



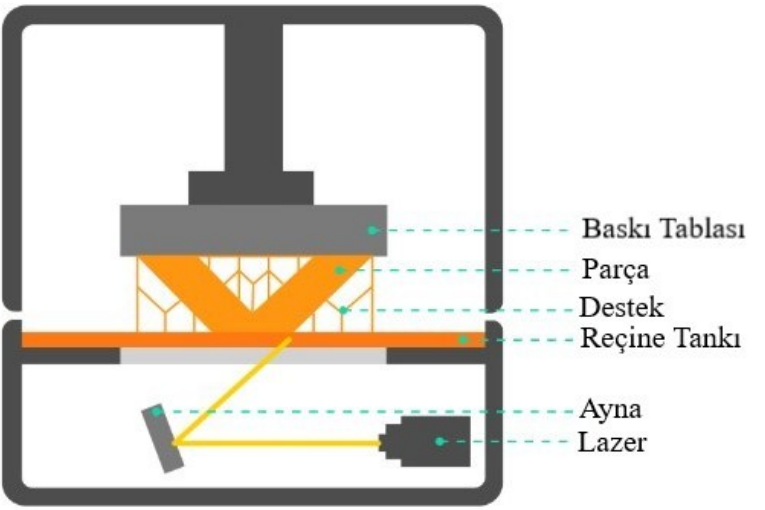
Şekil: 8 FDM Teknolojisi Baskı Prensibi

Kaynak1: Loughborough University Additive Manufacturing Research Group. (2021, January 3)

Kaynak2: Guiterrez & ark., 2018

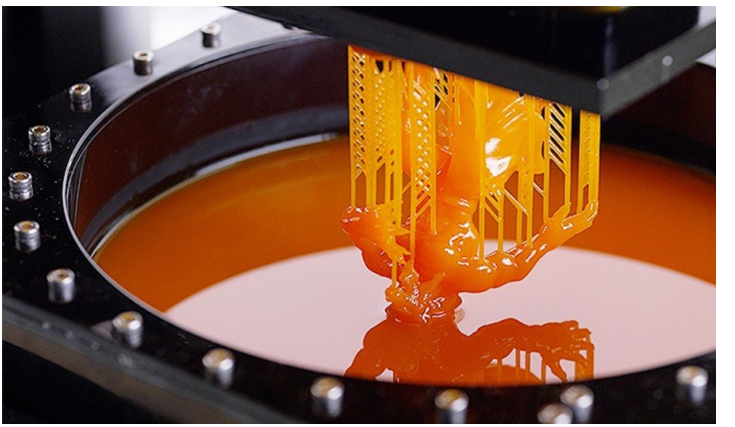
Stereolithography (SLA): Fotopolimer reçineyi lazer ile kürleme işlemi yaparak katmanlı imalat yapılması yöntemidir. Genellikle yüksek hassasiyetli prototiplerin ve parçalara dayalı imalatların yapılmasında kullanılır. Bu yöntem de tıpkı FDM'de olduğu gibi genellikle prototipleme aşamasında kullanılır.

Genel olarak Şekil 3'te gösterilen elemanlardan oluşur. SLA teknolojisinde, UV lazeri ya da ışık kaynağı aracılığıyla reçinenin her bir katmanını sertleştirir. Lazer ışığı, reçineyi belirli bir şekle göre sertleştirirken, bir sonraki katman yazıcı başlığı tarafından sıvı reçine ile örtülür ve bir önceki katmanla birleşir. Her katman sertleştikçe, baskı platformu bir miktar yükselir. Bu, yeni bir reçine katmanının baskı alanına ulaşmasını sağlar. Şekil 4'te SLA teknolojisi ile yapılan bir baskının örneği görülmektedir. Baskı tamamlandıktan sonra tabladan sökülen modelin destekleri temizlenir. Model, fazla reçineyi temizlemek için genellikle isopropil alkol (IPA) ile yıkanır. Bu, baskı sonrası kalıntıları temizler ve yüzeydeki reçinenin tam olarak sertleşmemiş kısmını giderir. Temizlenen model, UV ışığı altında daha fazla sertleştirilir. Bu işlem, modelin dayanıklılığını artırır ve son katmanların tam olarak sertleşmesini sağlar. Post-curing işlemi genellikle özel bir UV kürleme odasında veya fırında yapılır.



Şekil 9: SLA Teknolojisi Baskı Prensibi

Kaynak: UNSW making. (n.d.)

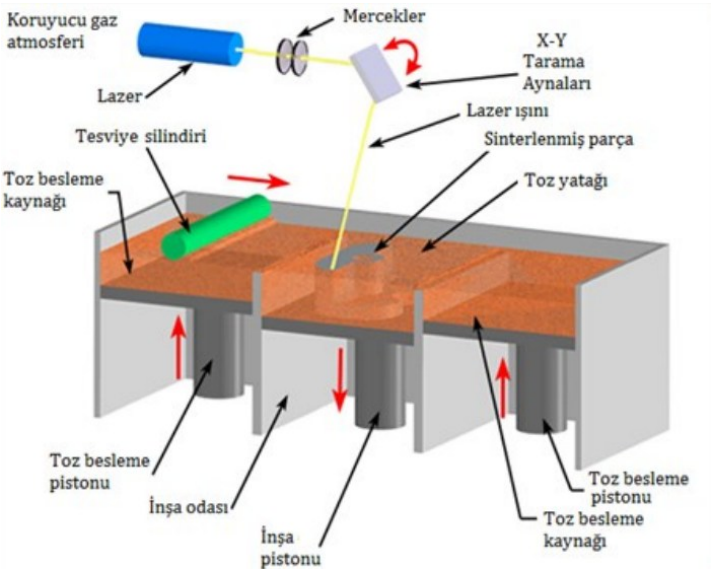


Şekil 10: SLA Teknolojisi Baskı Örneği

Kaynak: Tayan, M. I. (n.d.)

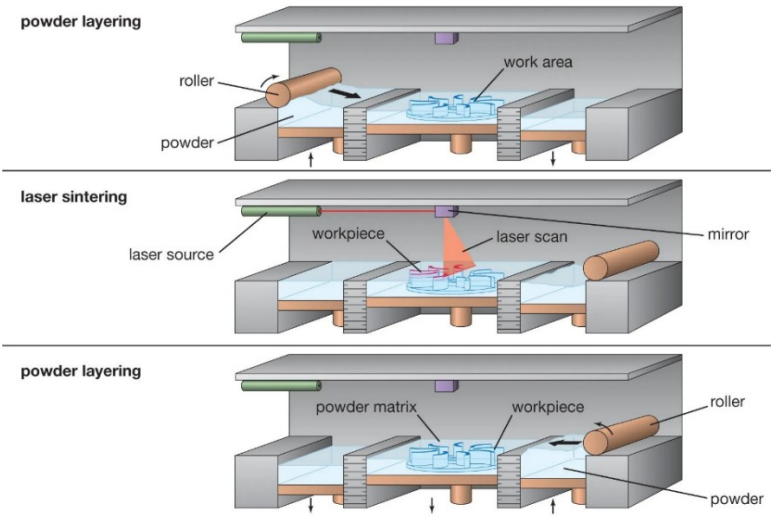
Selective Laser Sintering (SLS): Toz halindeki malzemelerin lazerle eritilip birbirine kaynaştırılmasıdır. Metal ve plastik

hammaddeler ile çalışabilir, askeri araçlarda yüksek dayanıklılık isteyen, yük taşıyacak olan parçaların gerekliliklerini karşılamak için uygundur. Bu teknoloji, 1980'li yılların ortalarında Teksas Üniversitesi'nde Dr. Carl Deckard ve danışmanı Dr. Joe Beaman tarafından geliştirilmiş ve 3D yazıcı teknolojileri arasında devrim yaratmıştır. Şekil 5'te bu teknolojinin elemanları gösterilmektedir. SLS (Selective Laser Sintering) ve benzer yöntemlerde, lazer ışını ile ısıtıldığında kaynaşabilen toz malzemeleri, her seferinde ince ve düzgün bir katman halinde yayılır. Lazer, belirlenen bölgelere odaklanarak, bu alanlardaki tozları ısıtarak eritir veya sinterler, böylece toz taneleri birbirine kaynaşır ve bir katman oluşturur. Her yeni katmanın ardından, yazıcıdaki platform bir miktar aşağı çekilir ve yeni bir toz katmanı serilir. Bu işlem, her katman için tekrarlanarak parça inşa edilir. Bu işlemler şematik olarak şekil 6'da gösterilmiştir. Son katman tamamlandığında, baskı sırasında destek görevi gören serbest tozlar, dikkatlice temizlenir ve modelin tamamlanmış hali elde edilir. Bu yöntem, yüksek hassasiyet ve karmaşık geometrilerin üretilebilmesini sağlar, ancak her bir imalat adımında zaman alıcı ve detaylı bir işlem gerektirir. (Deckard, 1989) (Partee, Hollister & Das, 2006) (Neğiş, 2014)



Şekil 11: SLS Teknolojisi Elemanları

Kaynak: Özsoy & Duman, 2017



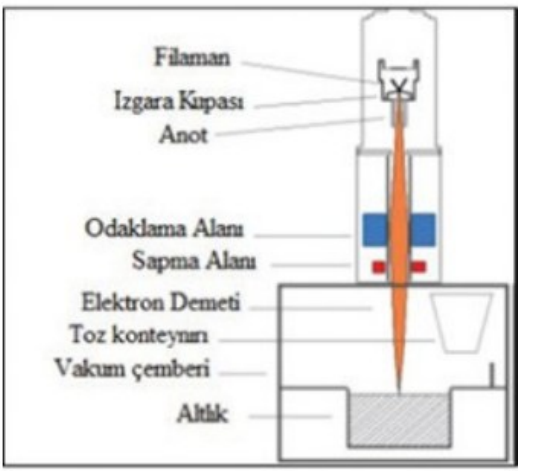
Şekil 12: SLS Teknolojisi Çalışma Prensibi

Kaynak: 3D printing. 2024

Electron Beam Melting (EBM): Elektron ışını eritme (EBM), metal tozlarını veya filamentleri bir elektron ışını kullanarak yüksek sıcaklıklarda eriten ve katmanlı imalat gerçekleştiren yenilikçi bir teknolojidir. Bu süreç, Selective Laser Sintering (SLS) tekniğiyle benzerlik gösterir, çünkü her iki yöntem de toz halindeki malzemeyi işlemek için bir enerji kaynağı kullanır. Ancak EBM, lazer yerine bir elektron ışını kullanarak metal tozlarını eritme işlemini gerçekleştirir. Elektron ışını tabancasında, bir tungsten filament, vakum altında hızlandırılmış ve elektriksel olarak yüklenmiş elektronları serbest bırakır. Bu hızlandırılmış elektronlar, elektromıknatıslarla yönlendirilir ve manyetik alan aracılığıyla istenen çapta odaklanır. Elektron demeti, baskı yatağı üzerinde hedeflenen bölgelere yönlendirilerek metal tozlarının hızla ısınmasına ve kaynaşmasına neden olur. EBM işlemi, tüm imalat süreci vakum ortamında yapıldığı için, metal tozunun oksitlenmesi engellenir ve yüksek kaliteli, oksitlenmemiş parçalar elde edilir. Elektron ışını eritme teknolojisi, son derece yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 2000°C) ulaşabilmesi sayesinde, yüksek dayanıklılığa sahip metal parçaların imalatına olanak tanır. Bu, özellikle aerostructure ve tıbbi implantlar gibi yüksek performans gereksinimlerine sahip parçaların imalatında EBM'yi çok değerli kılar. Şekil 7’de gösterilen elemanları kullanır. (Yılmaz, 2019)

Elektron ışını eritme (EBM) tekniğinde, erime işlemi elektrik yüklerine dayandığı için kullanılan malzemelerin iletken özelliklere sahip olması gerekmektedir. İletken olmayan malzemelerde, elektron ışını ve toz arasındaki etkileşim gerçekleşmez, bu da işlemeyi olanaksız kılar. Bu nedenle, polimer veya seramik gibi iletken olmayan malzemelerle EBM kullanımı mümkün değildir.

EBM için en uygun malzeme türleri, iletken özellik gösteren metal tozlarıdır. Titanium alaşımı (Ti6Al4V), kobalt krom, 316L çelik ve Inconel 718 gibi metal tozları, bu teknoloji için ideal seçeneklerdir. EBM, işlenmiş metal parçalara benzer özellikler üretirken, döküm parçalardan genellikle daha üstün mekanik özellikler sunar. EBM ile üretilen parçalar, özellikle DMLS (Direct Metal Laser Sintering) ile yapılan baskılardan daha az destek yapısına ihtiyaç duyar. Bu, parçaların daha karmaşık geometrilerle üretilmesini mümkün kılar. Ayrıca, EBM teknolojisi, sinterleme işlemini ortadan kaldırarak, kullanıcıların parçalarda gözeneklilik üzerinde hassas bir kontrol sağlamasına olanak tanır. Ancak, EBM'nin vakumlu ortamda çalışıyor olması, bazı boyut sınırlamaları getirebilir, bu da işlem sürecindeki imalat kapasitesini etkileyebilir. (Turan, 2019)



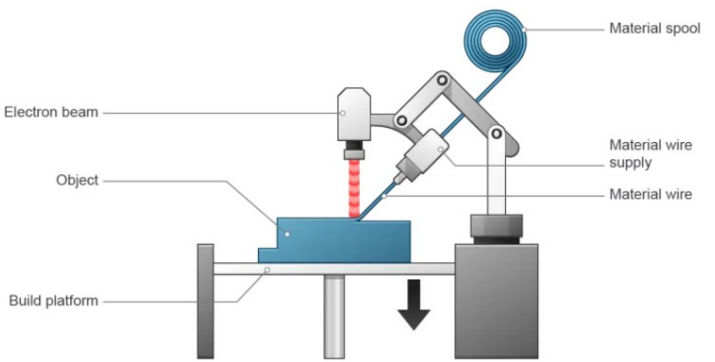
Şekil 13: EBM Teknolojisi Elemanları

Kaynak: Özsoy & Duman, 2017

Direct Energy Deposition (DED): Yüksek güçlü enerji kaynakları kullanılarak metal tozlarının eritilerek anında yapı

oluşturulan katmanlı imalat yöntemidir. DED teknolojisi, ergimiş malzemenin belirli bir yüzeye bırakılmasını sağlayan bir nozul sistemine dayanır. Bu nozul, Şekil8'de de görüldüğü üzere çok eksenli bir kol üzerine monte edilmiştir ve malzeme ekleme işlemi, esasen ekstrüzyonla benzer bir prensibe dayanır. Ancak, DED teknolojisinin farkı, nozulun yalnızca bir eksene sabitlenmemesi ve birden fazla yönde hareket edebilmesidir.

4 ve 5 eksenli makineler sayesinde, eklenen malzeme lazer veya elektron ışını ile ergitilir ve hedef yüzeye biriktirilir. Bu teknoloji, metal tozları veya tel formundaki malzemelerle en yaygın şekilde kullanılsa da, polimerler ve seramikler gibi diğer malzeme türleriyle de uygulanabilir. DED, özellikle karmaşık şekillerin ve geometrilerin imalatı için ideal olup, genellikle onarım, prototip imalatı ve büyük ölçekli parça imalatı için tercih edilen bir yöntemdir. Genel olarak yüksek dayanıklılık isteyen, yük altında çalışacak parçalarda tercih edilirler. (Ded Teknolojisi, 2024)



Şekil 14: DED Teknolojisi Elemanları

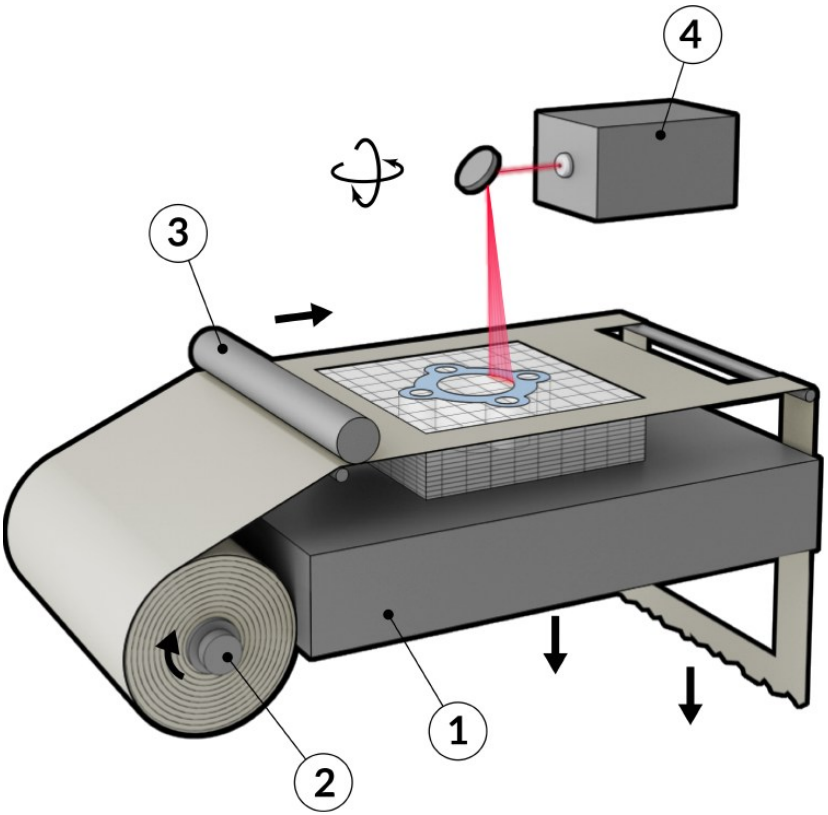
Kaynak: Directed energy deposition. 2023

Laminated Object Manufacturing (LOM): Helisys tarafından geliştirilen ve 1991 yılında piyasaya sürülen ilk ticari Lamine Nesne İmalatı sistemi, eklemeli imalat alanında önemli bir yenilikti. Bu sistemin ana bileşenleri, inşa platformu üzerinde bir levha ilerleten bir besleme mekanizması, her katmanı birbirine yapıştırmak için ısıtılmış bir silindir ve her katmandaki parçanın dış hatlarını kesmek için bir lazer içerir. LOM teknolojisi, parçayı bir dizi ince, yapışkan kaplı levhanın üzerine yapıştırarak, keserek ve biriktirerek oluşturur. Her yeni levha, ısıtılmış silindir yardımıyla bir önceki katmana basınçla yapıştırılır. Lazer, her katmanda parçanın dış hatlarını keser ve işlem tamamlandıkça, platform, her seferinde levha kalınlığına eşit bir derinliğe indirilir. Yeni bir levha, bir önceki levhanın üzerine ilerletilir, ardından platform hafifçe yükseltilir ve yeni katman ısıtılmış silindirle yapıştırılır. Bu işlem, parça tamamlanana kadar tekrarlanır. Her bir katman kesildikten sonra, artık malzeme, parçaya destek sağlamak için yerinde kalır ve bu, özellikle destek yapıları gerektiren karmaşık geometriler için faydalıdır. LOM, özellikle büyük parçaların hızlı prototiplemesi ve imalatı için uygun, maliyet etkin bir yöntemdir.

Lamine nesne imalat teknolojisi, genellikle estetik ve görsel modellerin imalatı için kullanılır; ancak bu tür nesneler, yapısal kullanım için genellikle uygun değildir. Yöntemin işlem sıcaklıkları düşüktür, bu da farklı iç geometrilerin ve karmaşık yapısal tasarımların oluşturulmasına olanak tanır. Levha veya sac laminasyonu ile çeşitli malzemeler birbirine bağlanabilir, ancak metal gibi yüksek erime sıcaklıklarına sahip materyallerle çalışmak için bu yöntem ideal değildir. Metal erimediği için, lamine nesne imalatı, erime yöntemlerine göre daha az enerji gerektirir.

Laminasyon hızının artırılması için, yüksek deformasyon, sıcaklık ve ısıtmalı silindir ile kâğıt arasındaki temas yüzeyinin artırılması gerekir. Bu faktörlerin dengeli bir şekilde ayarlanması, parça mukavemetini artırarak çok iyi bir yapışma gücü elde edilmesini sağlar. Bu sayede, farklı malzemelerin birleşiminden güçlü ve dayanıklı yapılar oluşturulabilir. (Özsoy & Duman, 2017) (Karagöz, Bekdemir & Tuna, 2021)

Şekil 9'da görüldüğü üzere 2 numaralı parça levhayı baskı yapılacak alana doğru sürer, beslemesi gereken kadar kısım beslendikten sonra 3 numaralı silindir baskı alanının üzerinden baskı ve ısıyla geçerek alt katmanlara son katmanı yapıştırır. Daha sonra 4 numaralı parçadan çıkan lazer, baskısı yapılacak modelin o katmandaki kesim aşamasını yapar, en son aşamada da 1 numaralı parça yani baskı tablası levha kalınlığı kadar aşağıya inerek bir katmanın tamamlanması sağlanır. Sonra tüm prosesler tekrarlanır.



Şekil 15: LOM Teknolojisi Çalışma Prensibi

Kaynak: Laminated Object Manufacturing, LOM. (n.d.)

Her bir teknoloji, belirli avantajlara ve sınırlamalara sahiptir; bu yüzden, savunma sanayinde ve askeri kara araçları imalatında kullanılacak katmanlı imalat yönteminin seçimi uygulama gereksinimlerine göre yapılmalıdır.

3.Eklemeli İmalatın Askeri Kara Araçlarındaki Uygulama Alanları

Askeri kara araçlarında eklemeli imalatın kullanımı, platformların operasyonel etkinliğini artırırken, lojistik ve imalat

süreçlerinde köklü değişiklikler yapmaktadır. Bu teknoloji sayesinde hafiflik, dayanıklılık ve işlevsellik gibi kritik unsurlar daha verimli bir şekilde yönetilebilir hale gelmektedir. Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla, eklemeli imalat teknolojisi daha karmaşık geometrilere sahip ve performans açısından optimize edilmiş parçaların imalatını mümkün kılar. Bu da araçların daha hafif, hızlı ve çevik olmasını sağlayabilir.

Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen yedek parçalar, sahadaki bakım ve onarım süreçlerini hızlandırarak askeri operasyonların kesintisiz devam etmesine katkıda bulunur. Özellikle 3D yazıcılar sayesinde yerinde imalat olanağı, lojistik maliyetleri düşürmekte ve dışa bağımlılığı azaltmaktadır. "Amerikan Ordusu Deniz Kuvvetleri misyonlarında da biyomedikal cihazların üretilmesi ve savaş durumunda birliklerin hayatta kalmasına katkı sağlaması öngörülmektedir. Amerikan donanması USS-Essex isimli amfibi hücum gemisinde 3D yazıcılar yerleştirdiğini ve burada plastik şırınga, neşter, güverte kapağı gibi birçok tıbbı ürün ve askeri yedek parça üretildiğini açıklamıştır. U.S. Navy Proceedings'te yayınlanan bir makalede gemi filolarının eklemeli imalat fabrikalarına dönüşerek birçok bakım, onarım ve yedek parça imalatlarının bu şekilde üretilebileceği savunulmuştur. Hatta daha da fütüristtik bir bakış açısıyla insansız deniz sistemleri arttığı zaman da birçok görevi icra edebilecek robot mürettebatların 3D yazıcılarda basılarak üretilebileceği ifade edilmiştir." (Sevenson, 2014) (Cheney-Peters & Hipple, 2013).

Ayrıca, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya olanaksız olan özel alaşımlar ve kompozit malzemeler sayesinde araçların

balistik koruma seviyeleri artırılabilirken, ağırlıkları da minimize edilebilmektedir.

Savunma sanayinde güvenilirlik, maliyet etkinliği ve teknolojik üstünlük sağlama gereksinimi, eklemeli imalat yöntemlerinin önemini her geçen gün artırmaktadır. Bu yöntemler, askeri kara araçlarından insansız kara araçlarına (İKA) ve modüler silah sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Gelecekte, eklemeli imalat teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, savaş alanlarının ihtiyaçlarına yönelik yenilikçi çözümler ve yüksek performanslı askeri sistemlerin üretilmesi daha da mümkün hale gelecektir.

3.1.Parça İmalatı ve Yedek Parçalar

Zırhlı araçlarda eklemeli imalat özellikle zor bulunan ve pahalı yedek parçaların hızlı imalatı için önemli bir fırsat sunmaktadır. Askeri operasyonlar sırasında araçlarda meydana gelebilecek arızaların hızlı bir şekilde giderilmesi kritik bir durum olabilir. Bu teknoloji yöntemi ile imalat sahada bile yüksek dayanıklılığa sahip parçaların üretilmesini mümkün kılar. Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerine göre askeri kara araçlarının parçalarının imalatında önemli avantajlar sunmaktadır. Bunları şu şekilde özetleyebiliriz:

Karmaşık Geometri ve Özelleştirilmiş Parçalar: Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemleriyle imalatı zor ya da olanaksız olan karmaşık geometrilerin imalatına olanak tanır. Zırhlı araçlar, operasyonel ihtiyaçlara göre özelleştirilebilen birçok parça içerir. Eklemeli imalat ile bu parçalar, geleneksel imalat yöntemlerine göre daha düşük maliyetle ve daha hızlı bir şekilde tasarlanabilir ve

imalatı yapılabilir. Örneğin, plastik kalıp maliyetini karşılayamayacak miktarda imalatı gereken plastik parçaların, içyapıları güçlendirilmiş ancak dışarıdan bakıldığında daha hafif görünen parçalara sahip araçların imalatı mümkündür.

- **Özelleştirilmiş Parçalar:** Eklemeli imalat ile farklı görevler için özelleştirilmiş, yüksek performanslı parçaların imalatını yapmak mümkündür. Örneğin, bir aracın motor bölümünde yer alan parçalar, aşırı ısınma ya da mekanik deformasyonu engellemek için özel olarak tasarlanabilir.
- **Karmaşık Soğutma Sistemleri:** Eklemeli imalat, özellikle motor soğutma sistemlerinde çok önemli noktalara gelebilir. İç içe geçmiş, karışık soğutma kanalları ve sıvı soğutma sistemleri geleneksel yöntemlerle üretilemezken, bu teknoloji ile kolayca tasarlanıp imalatı yapılabilir. Bu da motorların daha verimli çalışmasına ortam oluşturur.

Yedek Parçaların Hızlı ve Esnek İmalatı: Zırhlı askeri araçlar sahada kullanıldığında, çok sık şekilde yedek parçalara ihtiyaç duyulur. Eklemeli imalat, sahada bile hızlı üretilebilecek parçaların tasarlanmasına ortam hazırlar. Geleneksel tedarik zinciri süreçlerinde yaşanan gecikmeler, bu teknoloji ile ortadan kaldırılabilir. Çünkü ihtiyaç duyulan parçalar doğrudan sahada ya da yakın bir imalat tesisinde imal edilebilir.

Depo Maliyetleri ve Lojistik: Eklemeli imalat, yedek parçaların dijital ortamda tasarlanıp, gerektiği anda imalatının yapılabilmesi sayesinde, büyük yedek parça stokları tutulmasına olan ihtiyacı azaltır. Bu da lojistik maliyetlerini düşürür ve araçların uzun süre hizmette kalmasını sağlar.

3.2.Hafifletme ve Malzeme Tasarrufu

Zırhlı araçlar ağır metal malzemeler kullanılarak imal edilir. Ancak eklemeli imalat, malzeme kullanımını optimize ederek araçların daha hafif ve sağlam olmasını sağlayabilir. Bu da aracın toplam ağırlığını azaltacağı gibi taşıma kapasitesini de arttırabilir. Bazı durumlarda yakıt tasarrufunu iyileştirir.

İçyapı ve Fonksiyonel Hafifletme: Eklemeli imalat, parçaların içyapılarında (örneğin gövde içindeki ızgara yapıları) hafifletme sağlar. Bu tür yapılar, geleneksel döküm veya talaşlı imalat ile üretilemez, ya kalıp maliyetine katlanmak gerekir ya da eklemeli imalat ile imal edilebilir. Aynı zamanda bu tasarımlar yapısal güçten ödün vermeden araçlarının toplam ağırlığının azaltılmasına olanak tanır.

3.3.Araçların Performansına Yönelik Yenilikçi Tasarımlar

Eklemeli imalat, sadece parça imalatında değil, aynı zamanda zırhlı araçların genel performansını arttırmak için de çok önemli noktalara gelebilir. Bu alandaki yenilikçi tasarımlar aşağıdaki şekillerde gerçekleştirilebilir:

Zırh ve Koruma Sistemlerinin Yeniden Tasarımı: Zırhlı araçlarda zırh, araçların ve personellerin hayatta kalabilmeleri konusunda çok kritik bir rol oynar. Eklemeli imalat, zırhların şekli ve malzemesi üzerinde radikal değişiklikler, yenilikler yapmayı mümkün kılar. Eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmek üzere tasarlanan zırhlar, daha karmaşık geometrilere sahip olabilir ve belirli bölgelerde daha yoğun zırh kullanılmasına olanak tanıyabilir.

Fonksiyonel Zırh Tasarımı: Günümüzde kullanılan malzemeler ile imal edilen zırhlar genellikle düz yüzeylere

yerleştirilen, homojen malzemelerden oluşur. Ancak eklemeli imalat ile zırhın içyapısı katmanlı veya kompozit malzemelerin takılabileceği şekilde tasarlanabilir. Farklı yoğunluklarda ve kalınlıklarda zırhlar yapılabilir. Bu da aracın belirli bölgelerinde daha fazla koruma sağlarken, diğer bölgelerde ağırlığın azaltılmasını ve maliyet tasarrufu yapılmasını mümkün kılar.

Dinamizm ve Adaptif Koruma: Eklemeli imalat, gelecekteki araçlar için adaptif zırh teknolojilerinin gelişmesine olanak tanıyabilir. Örneğin, bir eklemeli imalat ile imal edilmiş bir parça dış etkilere bağlı olarak şekil değiştirebilen veya sertleşebilen akıllı malzemeler kullanılarak yapılabilir.

Araç İçi Sistemlerin Entegre Edilmesi: Eklemeli imalat, askeri araçlarda karmaşık sistemlerin daha derli toplu ve verimli bir şekilde toplanmasına olanak tanır. Örneğin, elektronik sistemler, güç sistemleri, sensörler ve iletişim donanımları tek bir parça içinde toplayarak daha ergonomik, daha verimli ve sağlam yapılar imal edilebilir.

Entegre Elektronik ve Mekanik Sistemler: Eklemeli imalat, bir aracın şasi, motor ve elektronik sistemlerini entegre bir şekilde tasarlamayı mümkün kılar. Bu tür bir entegrasyon, hem mühendislik maliyetlerinde tasarruf sağlar hem de parçaların montaj sürelerini kısaltabilir.

Gelişmiş Termal ve Aerodinamik Performans: Zırhlı araçların performansını artırmak için araç aerodinamiğinin ve termal yönetim sistemlerinin optimize edilmesi önemlidir. Eklemeli imalat, bu sistemlerin tasarımında da önemli yenilikler sunabilir:

Aerodinamik İyileştirmeler: Eklemeli imalat, aerodinamik özellikleri optimize edebilecek daha ince ve keskin tasarımlar yapılmasını ve bu tasarımların üretilebilmesini sağlar. Bu durum da zırhlı araçların hız ve manevra kabiliyetlerini arttırabilir.

Isı Dağıtımı ve Soğutma: Eklemeli imalat, aracın motor kısmındaki ısıyı daha verimli şekilde dağıtacak soğutma kanalları tasarlamak ve bu tasarımın üretilebilir olmasını sağlamak için kullanılabilir. Bu durum da motorun aşırı ısınmasını engeller ve motor ömrünü uzatabilir.

Modüler Tasarımlar: Eklemeli imalat ile imal edilen parçalar, belirli görevlerde kullanılmak üzere modüler bir şekilde tasarlanabilir. Bu durum da askeri araçların farklı görevler için hızla yeniden yapılandırılabilmesini sağlar.

3.4.Prototipleme ve Hızlı İnovasyon

Eklemeli imalat, yeni tasarımların hızlı bir şekilde prototip imalatı yapılmasına ve denenmesine olanak tanır. Bu da özellikle askeri araçların yeni teknolojiler ve yenilikçi özelliklerle donatılması gereken durumlarda büyük bir avantaj sağlar. Hızla test edilebilen prototip imalatlar, tasarım süreçlerini hızlandırarak sahada daha verimli ve gelişmiş araçların kullanılmasına olanak tanır. Seri imalat yapılacak parçalar için de kalıp maliyetine katlanılacak parçalar için de eklemeli imalat yöntemi ile nihai ürün için denemeler yapılarak maliyetler minimuma indirilebilir.

4.Eklemeli İmalatın Savunma Sanayine Katkıları

Gelişen teknolojiler ve 4. Sanayi Devrimi, savaş ortamlarını ve senaryolarını önemli ölçüde değiştirmektedir. Yeni dünya düzeninde, ülkeler arası savaşlar yerine merkezsiz savaşlar, meskûn

mahaldeki gerilla-devlet çatışmaları ve siber savaşlar daha yaygın hale gelmiştir. Ayrıca, birçok büyük ülke, kendi topraklarında savaşmak yerine başka ülkelerde savaşmakta ya da başka coğrafyalardaki çatışmaları desteklemektedir. Amerikan Savunma Bakanlığı, uzay ve siber uzayı da yeniçağda savaş alanları olarak tanımlamış ve orduların merkezsiz savaşlara, yani gerektiğinde farklı coğrafyalarda çatışmalara hazır olması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu yeni stratejik yapıda, ordular için en önemli kıstaslardan birisi, yüksek bir hazır bulunuşluk seviyesinin sağlanmasıdır. Bu hazır bulunuşluk, tedarik sürelerinin kısaltılması, hızlı bakım onarım kabiliyetlerinin geliştirilmesi, hızlı tasarım iyileştirmeleri ve imalat süreçlerinin hızlandırılması gibi unsurlar sayesinde elde edilebilir. Özellikle farklı coğrafyalarda savaşmanın zorluklarını göz önünde bulundurursak, eklemeli imalat teknolojileri, bu hazır bulunuşluk seviyesinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Eklemeli imalat, savaş ortamlarında hasar gören sistemlerin hızlı bir şekilde onarılmasına, küçük hacimli özelleştirilmiş parçaların üretilmesine ve tasarımda hızlı iyileştirmelerin yapılmasına olanak tanımaktadır. (Yasa & Ersoy, 2019) (Office of the Secretary of Defense, 2018) (Office of the Secretary of Defense, 2021) (Sevenson, 2014)

Savunma sanayinde, platformların ömür devri genellikle diğer sektörlere göre daha uzun olduğu için, kullanılan parçalar zamanla demode hale gelebilir. Bu durum, demodelik yönetimi gerektirir ve bu parçaların tedarikçilerinin veya imalat kalıplarının güncel olmayabilmesi ihtimali söz konusu olabilir. Böyle durumlarda, tersine mühendislik ve eklemeli imalat teknolojilerinin kullanılması, eski ve tedarik edilmesi zor olan parçaların üretilmesini veya tamir

edilmesini mümkün kılarak büyük bir ekonomik avantaj sağlar. Özellikle savaş senaryolarında, operasyonlar sırasında hasar gören sistemlerin onarılması, küçük hacimli özelleştirilmiş bileşenlerin imalatı ve hızlı bir şekilde yedek parça temini, ordular için hayati önem taşır. Katmanlı imalat teknolojileri, sadece imalat süreçlerini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda tasarım ve geliştirme aşamalarında da zaman tasarrufu sağlar. Böylece, savaş alanında stok bulundurma zorunluluğu ortadan kalkar ve merkezsiz imalat olanakları sayesinde malzeme ve yedek parça temini hızlı bir şekilde yapılabilir. Amerikan Donanması'nın gemilerinde 3D yazıcıların kullanılması, plastik şırıngalar, neşterler ve güverte kapakları gibi tıbbi ürünler ile askeri yedek parçaların üretilmesi, bu teknolojilerin sağladığı avantajların en iyi örneklerinden birisidir. Bu tür uygulamalar, sahada hızlı çözüm sunarak operasyonel verimliliği artırmaktadır. (Sevenson, 2014) (Asclipiadis, (n.d.))

Amerikan Ordusu, Hızlı Teçhizatlandırma Sahası (İngilizce adıyla: Rapid Equipping Fielding (REF)) gibi merkezlerde, savaş ya da operasyon alanında ortaya çıkan beklenmedik ihtiyaçları hızla çözebilmek için 3D yazıcıları kullanmaktadır. Bu sahalarda, pil adaptörlerinden mayına karşı korumalı araçların lastik şişirme sistemlerine kadar birçok önemli ürün hızlı bir şekilde üretilebilmekte, böylece lojistik ve tedarik zinciri süreçleri hızlandırılmaktadır. Bu hızlı teçhizatlandırma sahaları, askeri birliklere ihtiyaç duydukları parçaları en kısa sürede sunmak için ideal çözümler sunmaktadır. Ayrıca, eklemeli imalat teknolojileri biyomedikal alanda da önemli avantajlar sağlamaktadır. Savaş durumlarında yaralanan askerler için kişiselleştirilmiş protezler, implantlar ve organlar 3D yazıcılar ile basılarak kayıpların

minimuma indirilmesi hedeflenmektedir. Bu tür kişiselleştirilmiş çözümler, askerlerin daha hızlı bir şekilde iyileşmesini sağlamakta ve savaş sırasında hayatta kalma şanslarını artırmaktadır. Ayrıca, savaş senaryolarında kullanılan yapılar ve barınaklar da 3D yazıcılarla üretilebilmektedir. Beton ve metal gibi malzemeler kullanılarak inşa edilen sığınaklar, barınaklar ve köprüler, savaşın farklı coğrafyalarındaki zorluklara hızla adapte olunmasını mümkün kılmaktadır. (Hambling, 2021) (Clemens, 20222) (Goulas & Friel, 2016)

Savunma sanayinde, eklemeli imalat teknolojilerinin sağladığı bu merkezi olmayan imalat avantajları, özellikle uzay sanayinde de büyük bir potansiyele sahiptir. Uzay uygulamalarında, ağırlık en önemli faktörlerden biridir. Eklemeli imalat teknolojileri, hafif malzemeler kullanılarak optimize edilmiş yapılar üretmeye olanak tanır. Titanyum gibi hafif alaşımların kolayca işlenmesi, uzay uygulamaları için eklemeli imalat teknolojilerini rakipsiz hale getirmektedir. Örneğin, Mars'ta imalat yapmayı hedefleyen projelerde, ay tozu gibi yerel malzemelerle imalat yapılması planlanmaktadır. Bu tür projeler, eklemeli imalat teknolojilerinin uzay keşiflerinde de büyük bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Ancak, bu avantajlardan tam anlamıyla faydalanabilmek için bazı zorlukların aşılması gerekmektedir. Özellikle kalite yönetimi, sertifikasyon ve siber güvenlik gibi konularda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinin savunma sanayinde daha etkin kullanılabilmesi için imalat metodları, malzeme seçimleri ve tezgahlar gibi faktörlerin sistematik bir şekilde belirlenmesi ve bu süreçlerin standartlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, ürün tasarımında da değişiklikler yapılması,

yeni tasarım paradigmalarının benimsenmesi gerekmektedir. Bu değişiklikler, savunma sanayindeki eklemeli imalat uygulamalarının daha verimli ve etkili olmasını sağlayacaktır. Savunma sanayinde eklemeli imalat teknolojilerinin avantajlarının tam anlamıyla uygulanabilmesi için kalite ve sertifikasyon standartları da göz önünde bulundurulmalıdır. Nihayetinde, eklemeli imalat teknolojilerinin yaygınlaştırılması, daha yüksek verimlilik, daha düşük maliyetler ve daha hızlı operasyonel süreçler elde edilmesini sağlayacaktır. (Office of the Secretary of Defense, 2021) (Murr, 2016) (Deloitte, (n.d.))

Sonuç olarak, katmanlı imalat teknolojilerinin savunma sanayinde kullanımı, 4. Sanayi Devrimi'nin sunduğu en büyük fırsatlardan biridir. Bu teknolojiler, hem lojistik süreçleri hem de operasyonel verimliliği büyük ölçüde iyileştirebilir. Ancak, bu teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli mühendislik desteği, kalite yönetimi ve standartların oluşturulması önemlidir. Katmanlı imalatın sunduğu merkezsiz imalat avantajları, özellikle savaş alanlarında malzeme temini, yedek parça imalatı ve hızlı çözüm sunma açısından kritik bir rol oynamaktadır ve bu nedenle bu teknolojilerin savunma sanayinde daha geniş bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

5.Eklemeli İmalatın Zorlukları ve Kısıtlamaları

Eklemeli imalat, savunma sanayi ve askeri kara araçları imalatı için büyük fırsatlar sunsa da bazı teknik ve lojistik dezavantajlar barındırmaktadır:

- **Malzeme Sınırlamaları ve Uygunluk Sorunları:** Eklemeli imalatın savunma sanayisinde

kullanılabilmesi için dayanıklı, yüksek performanslı malzemelere ihtiyaç vardır. Ancak, mevcut 3D yazıcılar, savunma sektöründe yaygın olarak kullanılan metal alaşımları ve kompozit malzemelerle uyumlu olmayabilir. Özellikle askeri araçlar, zırhlar, silahlar ve mühimmatlar için gerekli olan malzeme özelliklerini sağlayabilen malzemelerin sınırlı olması, bu teknolojinin yaygınlaşmasını engelleyen büyük bir etmendir. Özellikle yüksek sıcaklık ve darbe dayanımına sahip parçaların imalatı, eklemeli imalat ile mümkün olmayabilir.

- **Tasarım ve İmalat Kalitesi:** Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerine göre daha fazla tasarım esnekliği sunsa da, bu esneklik imalat kalitesini etkileyebilir. Yüksek hassasiyet ve güvenilirlik gerektiren savunma sanayisi uygulamaları, eklemeli imalatın genellikle değişken imalat kalitesi nedeniyle riskli olabilir. Örneğin, zırh parçaları ve motor bileşenleri gibi kritik parçaların doğruluğu çok önemli olduğundan, bu parçaların imalatında eklemeli imalatın kullanımı güvenlik açısından endişelere yol açabilir. Ancak imalat sürecinde yüksek kalite kontrol ve test prosedürlerinin uygulanması güvenilirlik ve kaliteyi artırabilir.

- **Büyük Ölçekli İmalat:** Savunma sanayinde imalat genellikle büyük ölçekli ve çok miktarda parça imalatı gerektirir. Eklemeli imalat, özellikle büyük parçaların hızlı bir şekilde üretilebilmesi açısından avantajlar

sunsa da, bu teknolojinin yüksek hacimli imalat için maliyetli ve zaman alıcı olması, büyük ölçekli askeri imalatta sınırlı kullanımına yol açmaktadır. Bu nedenle, 3D baskı, özellikle prototip imalatı veya küçük ölçekli, parti imalatları için daha uygun hale gelmektedir.

- **Güvenlik ve Güvenilirlik:** Savunma sanayisindeki parçaların çoğu, askeri operasyonlar sırasında güvenliği doğrudan etkileyebilecek kritik parçalar olabilir. Eklemeli imalatla üretilen parçaların, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen parçalarla karşılaştırıldığında daha az dayanıklı olma riski bulunmaktadır. Ayrıca, yazılım ve tasarım hataları, parçaların hatalı üretilmesine neden olabilir. Bu da askeri operasyonlarda güvenlik risklerine yol açabilir.
- **Regülasyonlar ve Standartlar:** Savunma sanayisinde kullanılan her ürün, ulusal ve uluslararası düzenlemelere ve güvenlik standartlarına uymak zorundadır. Eklemeli imalat, bu düzenlemelere uygun parçalar üretilmesi konusunda zorluklar yaratabilir, çünkü bu teknolojinin hala gelişmekte olan bir alan olması nedeniyle, net standartlar ve regülasyonlar henüz tam anlamıyla oluşturulmamıştır.
- **Maliyet ve Yatırım Gereksinimleri:** Eklemeli imalat makineleri, özellikle endüstriyel sınıfta olanlar, oldukça pahalı olabilir. Savunma sanayinde bu makinelerin kullanılabilmesi için ciddi bir başlangıç

yatırımı gereklidir. Ayrıca, özel malzeme ve teknolojilerin kullanımı da maliyetleri artırmaktadır. Bu durum, savunma sanayisindeki bazı şirketlerin veya ülkelerin 3D yazıcı teknolojisini benimsemesini zorlaştırmaktadır.

- **Gelişen Teknolojiler ve Eğitim İhtiyacı:** Eklemeli imalat, sürekli gelişen bir teknolojidir. Bu da demek oluyor ki, savunma sanayisindeki personelin bu yeni teknolojiyi etkin bir şekilde kullanabilmesi için eğitim alması gerekecektir. Hem mühendislerin hem de imalat personelinin bu teknolojiyi öğrenmesi, başarılı bir şekilde entegre edilmesi için önemlidir. Ek olarak sürekli gelişen bir teknoloji olduğu için takip edebilmek adına yapılacak yatırım maliyetleri artabilir.

6.Gelecekteki Yönelimler ve Araştırma Alanları

Eklemeli imalatın askeri araç imalatında tam anlamıyla benimsenmesi, malzeme biliminde, süreç optimizasyonunda ve tasarım inovasyonunda önemli ilerlemeler gerektirir. Gelecekteki araştırmalar aşağıdaki alanlara odaklanabilir:

- **Yeni Malzeme Gelişimi:** Daha dayanıklı, hafif ve uygun maliyetli malzemelerin keşfedilmesi ve geliştirilmesi.
- **Entegre İmalat Yöntemleri:** Geleneksel imalat yöntemleri ile eklemeli imalat yöntemlerinin birleşimi ile daha verimli imalat süreçlerinin oluşturulması.

- **Yüksek Hızda İmalat:** Eklemeli imalat süreçlerinin kaliteden taviz vermeden hızının artırılması için yeni teknikler ve teknolojilerin geliştirilmesi.
- **Test ve Sertifikasyon:** Eklemeli imalat ile üretilen askeri araç parçalarının dayanıklılığını ve güvenliğini onaylamak için test protokollerinin geliştirilmesi.

7.Sonuç

Eklemeli imalat, askeri kara araçlarının imalatı için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle karmaşık geometriler, parça özelleştirme, hafifletme, hızlı prototipleme ve yedek parça imalatı gibi alanlarda avantajlar sağlamaktadır. Ek olarak zırh sistemlerinin yeniden tasarımı, araç içi sistemlerin entegrasyonu ve yenilikçi koruma teknolojileri gibi alanlarda da önemli yenilikler ortaya koymaktadır. Ancak bu teknolojinin tam olarak uygulanabilmesi için malzeme, süreç ve test alanlarında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, eklemeli imalat savunma sanayinde daha verimli, dayanıklı, özelleştirilebilir ve hızlı üretilebilen araçlar için güçlü bir destek sunmaktadır. Bu teknolojinin daha fazla benimsenmesi ve geliştirilmesi ile gelecekteki askeri araçların ve bileşenlerinin tasarım ve imalat süreçlerinde önemli bir gelişme ortaya koyabilir.

Referanslar

Colorado, H. A., Cardenas, C. A., Gutierrez-Velazquez, E. I., Escobedo, J. P., & Monteiro, S. N. (2023). Additive manufacturing in armor and military applications: Research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges. *Journal of Materials Research and Technology*.

3D Pros. (n.d.). FDM 3D printer component overview. Retrieved November 25, 2024, from https://3dpros.com/guides/fdmreference

Loughborough University Additive Manufacturing Research Group. (2021, January 3). 7 categories of additive manufacturing [Online]. Available: https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/

Guiterrez, J. G., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., & Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials, 11*(5), 840.

UNSW making. (n.d.). 3D Printing: SLA | UNSW Making. Available at: https://www.making.unsw.edu.au/learn/3d-printing-with-sla-resin-printers/ (Accessed: November 26, 2024).

Tayan, M. I. (n.d.). SLA (stereolithography), Hava Ulaştırma Fakültesi - THKU. Available at: https://aml.thk.edu.tr/pages/75/sla-stereolithography (Accessed: November 26, 2024).

Deckard, C. (1989). Method and apparatus for producing parts by selective sintering. *US Patent 4,863,538*, filed October 17, 1986, published September 5, 1989.

Partee, B., Hollister, S. J., & Das, S. (2006). Selective laser sintering process optimization for layered manufacturing of CAPA® 6501 polycaprolactone bone tissue engineering scaffolds. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128*(4), 531-540.

Neğiş, E. (2014). *Autofab* [Webpage]. Retrieved from http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab

Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 1*(1), 36-48.

3D printing. (2024). *Encyclopædia Britannica*. Available at: https://www.britannica.com/technology/3D-printing (Accessed: November 26, 2024).

Yılmaz, G. Ü. R. (2019). 3 boyutlu masa üstü yazıcı ile matematiksel bir modelden gerçek bir nesnenin dijital üretimi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19*(2), 237-245.

Turan, K. (2019). Metal tozlarının lazer ile birleştirilerek katmanlı parça üretimi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Ded Teknolojisi. (2024). *infoTRON*. Available at: https://infotron.com.tr/3-boyutlu-teknolojiler/3d-yazicilar/ded-teknolojisi (Accessed: November 26, 2024).

Directed energy deposition. (2023). *Dassault Systèmes*. Available at: https://www.3ds.com/make/guide/process/directed-energy-deposition (Accessed: November 26, 2024).

Karagöz, İ., Bekdemir, A. D., & Tuna, Ö. (2021). 3B yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemler ve gelişmeler üzerine bir derleme. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9*(4), 1186-1213.

Laminated Object Manufacturing, LOM. (n.d.). *Find suppliers, processes & material*. Available at: https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom (Accessed: November 26, 2024).

Yasa, E., & Ersoy, K. (2019). Dimensional accuracy and mechanical properties of chopped carbon reinforced polymers produced by material extrusion additive manufacturing. *Materials, 12*(23), 3885. https://doi.org/10.3390/ma12233885

Office of the Secretary of Defense. (2018). *Summary of the 2018 National Defense Strategy*. U.S. Department of Defense. Retrieved from https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/2018-National-Defense-Strategy-Summary.pdf

Office of the Secretary of Defense. (2021). *Department of Defense Additive Manufacturing Strategy*. U.S. Department of Defense.

Sevenson, B. (2014). U.S. Navy installs 3D printer on their first ship, the USS Essex. *3D Print*. Retrieved from https://3dprint.com/2554/uss-essex-3d-printer-navy/

Cheney-Peters S., Hipple M., Print Me a Cruiser! | Proceedings - April 2013 Vol. 139/4/1,322 (usni.org), 2013

Asclipiadis, A. (n.d.). Rapid Equipping Force uses 3-D printing on the frontline. *The United States Army*. Retrieved from https://www.armytimes.com

Hambling, D. (2021). U.S. Army's new expeditionary 3D concrete printer can go anywhere, build anything. *Forbes*. Retrieved from https://www.forbes.com

Clemens, M. (2022). Manufacturing may be possible on Mars thanks to 3D printing. *3Dnatives*. Retrieved from https://www.3dnatives.com

Goulas, A., & Friel, R. F. (2016). D printing with moondust. *Rapid Prototyping Journal, 22*(6), 864-870.

Murr, L. E. (2016). Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: From human organs to aircraft fabrication. *Journal of Materials Science & Technology, 32*(10), 987-995.

Deloitte. (n.d.). 3D opportunity for quality assurance and parts qualification. *DUP_1410-3D-opportunity-QA_MASTER1.pdf*. Deloitte. Retrieved from https://www.deloitte.com

BÖLÜM V

Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan İleri Kaynak Teknikleri ve Uygulama Alanları

Şakir ALTINSOY[1]
Nuray BEKÖZ ÜLLEN[2]

Giriş

Gün geçtikçe gelişmekte ve kendini yenilemekte olan dünyamızda her sektörde ve endüstri alanında olduğu gibi otomotiv endüstrisinde de yaşanan gelişmeler ve çalışmalar sayesinde insanlık adına birçok kolaylık sağlanmaktadır. Otomotiv endüstrisi, gelişen ve halen gelişmekte olan teknoloji ile beraber bir bütün halinde tüm gelişmelere adapte olabilen bir endüstridir. Bir otomobilin üretiminde yer alan binlerce farklı parça ve bu parçaların

[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

birleştirilmesi ve üretilmesinde yüzlerce farklı tip yöntem kullanılmaktadır. Bu kullanılan yöntemlerden araç kalitesinin yaklaşık olarak %35-40 oranında etkiyebilecek olan araç gövdesinin ve bileşenlerinin ortaya çıkarılmasını sağlayan işlem *"kaynak"* işlemidir. Otomobil kaynak yöntemlerinden bazıları; direnç nokta kaynağı, sürtünme kaynağı, lazer kaynağı, lehimleme yöntemleri, ark kaynağı, toz altı kaynak gibi kaynaklardır (Karslı & Koç, 2022; Mert & Mert, 2015).

Otomotiv sektöründe günümüz çağı ve teknolojisi ile bakıldığında bu sektörde aranılan özelliklerin başında güvenlik, konfor, hafiflik gibi standartlar gelmektedir. Otomobil ağırlığının azaltılması farklı malzemelere, farklı üretim tekniklerine ve stratejelerine doğru yönelimi sağlamıştır. Bir otomobilin üretiminin en önemli basamaklarından olan gövde yani şase denilen bölümün imalatında gelişen teknoloji ile farklı metotlar da uygulanmaktadır. Otomobil endüstrisi açısından en bilinen ve tercih edilen kaynak tekniği direnç nokta kaynağıdır. Günümüz teknolojisinde sedan model bir aracın gövdesinde ortalama 4000-6000 arasında nokta kaynağı bulunmaktadır. Araç gövdesi yani şasenin birleştirilmesinde %80-85 oranında direnç kaynağı kullanılmaktadır. Aynı zamanda yapılan bu direnç kaynağı da başta bahsettiğimiz güvenlik kriterlerine uyması açısında tehlike arz etmemesi için sayısal analizleri yapılarak optimum kaynak sayısı bulunarak yapılmalıdır (Perka & ark., 2022; Tomiyama & ark., 2007).

Araç üzerinde yapılan her türlü kaynak işleminden sonra aracın seri üretimine başlanmadan önce araç üzerindeki kaynak bağlantı ve birleştirme bölgelerinde ultrasonik testler gibi testler yapılarak yapılan kaynakların da kontrolü sağlanmış olur. İnce

kesitli metal saç malzemelerin, otomotiv, uzay, havacılık, beyaz eşya ve makine sanayi gibi birçok alanda kullanımı kaynak edilebilirlikleri üzerine çalışılmasını sağlamıştır. Yüksek ısıl şartlarda kalıcı deformasyona maruz kalan ince cidarlı saçların kaynak işlemi düşük ısı girdisi ile kısa sürede gerçekleştirilmelidir. Kaynaklı yapıların ekonomik olarak birleştirmesi ve kaynak mukavemetinin yüksek olması için ileri kaynak tekniklerine başvurmak gerekmektedir (Donders & ark. 2005; Karslı & Koç, 2022; Kimchi & Phillips, 2023; Mert & Mert, 2015). Tablo 1'de bazı marka ve model araçlara ait yaklaşık direnç kaynak sayıları karşılaştırılmıştır.

Tablo 1: Bazı otomobillere ait direnç nokta kaynak sayıları.

Kaynak: Doruk & ark., 2015

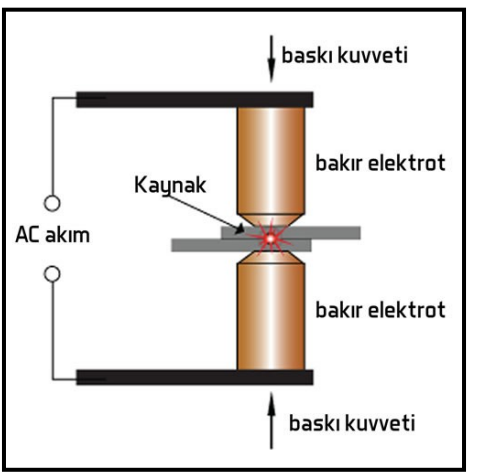
Marka-model	Nokta kaynağı, adet
Ford Grand C-MAX	5011
Volvo S60	3966
Alfa Romeo Giulietta	3676
Opel Meriva	4533
Citroen C4	3938
VW Sharan	5600
Fiat Linea	5031
Honda CR-Z	4254
BMW 5 Series	5800
Renault Latitude	5208
Saab 9-5 Sedan	4250

2..Otomotiv Endüstriinde Kullanılan Kaynak Teknikleri

2.1.Direnç nokta kaynağı

Direnç nokta kaynağı (DNK) veya punta kaynağı metal esaslı parçalardan geçirilen elektrik akımına karşı, metal yüzey noktalarının birleştirildiği parçaların gösterdiği dirençten oluşan ısı

yardımıyla yapılan kaynak işlemidir. Ergimiş kaynak banyosunun oluşumu ile beraber elektrik akımı kesilerek kaynak edilecek parçalara basınç uygulanır. Birleştirmenin ardından basınç altında soğuma gerçekleştirilerek sökülemeyen kaynak birleşimi elde edilir. Nokta kaynağında küçük bir alana yoğunlaştırılan kaynak akımı ile karşılıklı bakır elektrotlarla kaynaklı birleştirme sağlanır. Genelde 0,5-6 mm arası et kalınlığına sahip parçalar elektrotların uyguladığı basınç sayesinde bir arada tutulurlar. Bu kaynak tekniğinde genel olarak; ilk aşamada elektrotlar parça yüzeyine hafif bir basınç ile temas ettirilir, bu sayede elektrotlardan gelen akım kaynak yüzeylerine geçer ve işlem sonlandırılır. Bu esnada bakır elektrotlar malzeme soğuması gerçekleşene kadar yerinde tutulur (Akyol, 2015; Kırık & Özdemir, 2012; Mert & Mert, 2015; Perka & ark., 2022). Şekil 1'de direnç nokta kaynağının çalışma prensibinin şematik gösterimi verilmiştir.

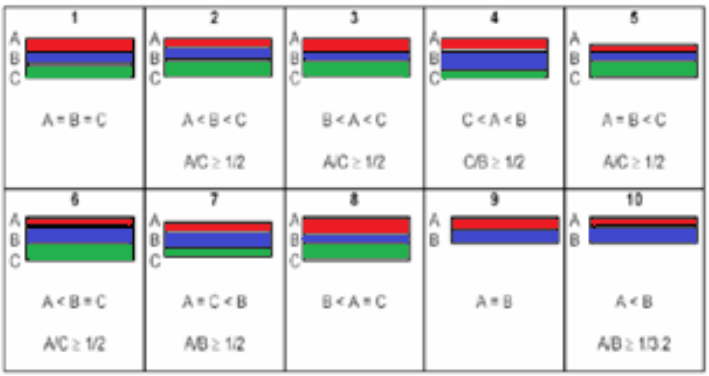


Şekil 1: Direnç nokta kaynağının çalışma prensibinin şematik gösterimi.

Kaynak: Karslı & Koç, 2022

2.1.1.Otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağı

Otomotiv endüstrisinde araç imalat sürecini incelediğimizde ana temelde üç aşama mevcuttur. Bu aşamalar; metal esaslı parçalarının çeşitli tekniklerile birleştirilmesi sonucu ana gövdenin elde edilmesi, elde edilen gövdenin boyanması ve elektrik-elektronik donanım, motor, şanzıman, plastik ve metal gibi parçaların ana gövdeye montaj edilmesidir. Kaynaklı birleştirme gövde imalatının en önemli aşamasıdır. Birleştirmelerden yapısal olarak iyi mekanik dayanım, yorulma dayanımı, burulma, eğilme, rijitlik gibi özelliklerin yanı sıra iyi korozyon dayanımı ve güçlü bir sızdırmazlık beklenmektedir (Mert & Mert, 2015). Otomobil endüstrisinde direnç nokta kaynağı tekniğinde, kanak yapılacak saçların kalınlıkları ve geometrileri ilgili standartlar gereği Şekil 2'deki gibi belirlenmiştir. Gerektiği durumlarda verilen kalınlık değerleri azaltılabilir veya arttırılabilir. Standartlara göre eğer farklı kalınlıklarda üç saç birleştirilecekse, en ince olan ortaya gelmelidir. Genellikle saç kalınlıkları 0,6 mm-6 mm aralığında değişmektedir. Bazı istisnai durumlarda 10 mm'ye kadar saç kalınlıkları çıkmaktadır. Saç kalınlıklarına göre kaynaklı birleştirme süreleride değişmektedir. Kaynak süreleri 1,5 mm kalınlıkta saçlar için 10-12 sn, 1,2-2 mm arası saçlarda 12-15 sn, 2 mm üzerindeki kalınlıklarda 14-18 sn olarak gerçekleştirilmektedir (Buckley & Servent, 2009; Chaturvedi & Arungalai Vendan, 2021; Doruk & ark., 2015). Şekil 3'te otomobil gövdesinin birleştirilmesinde robotik nokta kaynak uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2: Direnç nokta kaynağı standart kalınlık oranları.

Kaynak: Doruk & ark.*, 2015*

Şekil 3: Otomobil gövdesinde robotik nokta kaynak uygulaması.

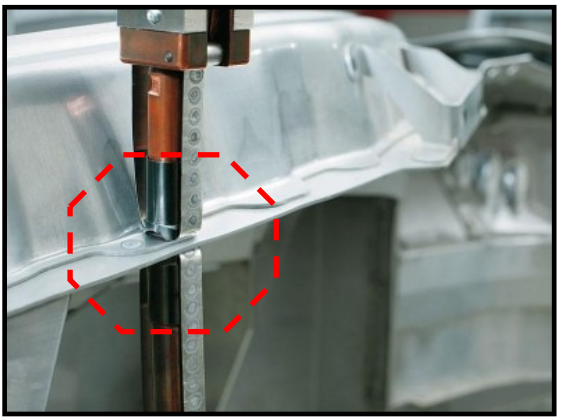
Kaynak: (Doruk & ark., 2015)

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilecek otomobil gövdesi ve diğer yerlerdeki parçalar genelde fonksiyonel olarak ayrılır. Bu ayırım, kaynak bölgesinde oluşan yük konsantrasyonuna, görüntü açısına ve kullanım yerine göre gerçekleşmektedir (Chaturvedi & Arungalai Vendan, 2021; Doruk & ark., 2015). Direnç nokta kaynağında iyi bir kaynak dikiş kalitesi için uygun elektrot seçimi yapılmalıdır. Saç kalınlıklarına ve sacın kimyasal yapısına göre

elektrot seçenekleri değişmektedir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte elektrotlara farklı özellikler katacak kaplamalar, ısıl işlemler ve kriyojenik işlemler yapılarak modifiye edilmektedir. Bu işlemlerle elektrotların özellikleri iyileşmekte ve kullanım potansiyeli artmaktadır. Yaklaşık 4000-6000 arası nokta kaynağı olan otomobil endütrisinde eletrotlardaki iyileşme araçların kalite ve maliyeti üzerinde olumlu etkiler oluşturmaktadır.

2.1.2.DKN'nin otomotiv sektöründe kullanım alanları

Direnç punta kaynağı, tasarımının bindirme bağlantılarına müsaade ettiği durumlarda ve sızdırmaz bağlantılar istendiğinde 3 mm'ye kadar sac metallerin kaynak edilmesinde tercih edilmektedir. Kaynaklı yapının bakım ve orarım süreçlerinde, sökme gibi zor ve ekonomik olamayan işleme gerek duyulmayan perçin veya vida gibi bağlantı elemanlarının yerine kullanılmaktadır. Direnç punta kaynak tekniği otomobillerde aynı kimyasal bileşime ve kalınlığa sahip düşük karbonlu çelik sac parçalarının otomobil üzerinde otomobil kullanılmaya başlandıktan sonra ömrünü tamamlayıncaya kadar sökülüp takılma ve onarıma ihtiyaç duyulmayacak gövde, şase, podye, taban gibi öemli kısımlarında kullanılmaktadır (Kimchi & Phillips, 2023; Mert & Mert, 2015). Şekil 4'te direnç punta kaynağı ile otomobil tabanının şaseye bağlanması gösterilmiştir.



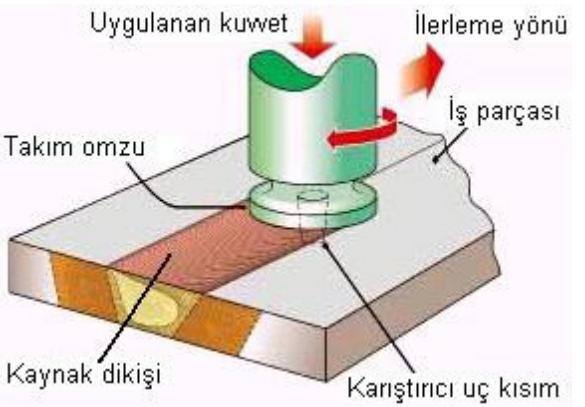
Şekil 4:Direnç punta kaynağı ile otomobil tabanının şaseye bağlanması.

Kaynak: Karslı & Koç, 2022

2.2.Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağı, biri dönen diğeri sabit olan parçaların birbirine dokunan yüzeylerinde sürtünme ile gerçekleşen mekanik enrjinin termal enerjiye dönüştürülmesi sonucu oluşansıcaklık ve eksenel basıncında yardımıyla yapılan birleştirmedir. Plastik deformasyon oluşumu için sürtünen parça yüzeylerinin basınç etkisinde kalması gerekmektedir. Kaynaklı bölgede diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi ergimenin görülmemesi basıç kaynağı adıyla anılmasını sağlamıştır. Dönme hız, sürtünme kaynak süresi, yığma basıncı ve yığma süresi gibi parametreler önemlidir, optimize edilmesi iyi bir kaynak için gereklidir. Parçaları harekeri genelde parçalardan biri sabit diğer döner ancak her iki kaynaklı parçanın birbirine ters yönde dönmesi de mümkündür (Akyol, 2015; Chaturvedi & Arungalai Vendan, 2021; Donders & ark., 2005; Kırık & Özdemir, 2012; Smith & ark., 2006). Otomotiv endüstrisinde

kullanılan sürtünme kaynağı tekniğinin nokta direnç kaynağına alternatifi sürtünme karıştırma nokta kaynağıdır (Akyol, 2015). Şekil 5'te sürtünme karıştırma kaynağının şematik olarak görüntüsü verilmiştir. Dönen silindirik omuzlu takım alın yüzeyleri birbirine denk getirilmiş parçaların arasına getirilir.Takımın ucu kaynak işlemi yapılacak parçalardan daha kısadır, çapı ise parçaların kalınlığına yakındır. Takım ve parça sürtünmesi sonucu oluşan ısı, kaynaklı parçaların erime sıcaklığının altındadır (Mert & Mert, 2013).

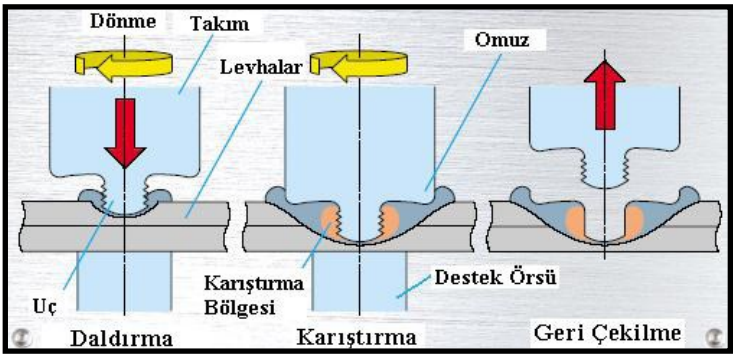


Şekil 5: Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin prensibi.

Kaynak: Mert & Mert, 2013

2.2.1.Sürtünme karıştırma nokta kaynağı

Sürtünme karıştırma nokta kaynak (SKNK) yönteminde kaynak bölgesine takımla daldırma, karıştırma ve takımın geri çekilmesi olarak üç adım vardır. Bu adımlar sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin adımları Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir (Smith & ark., 2006).



Şekil 6: Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin aşamaları.

Kaynak: Thomas, 2003

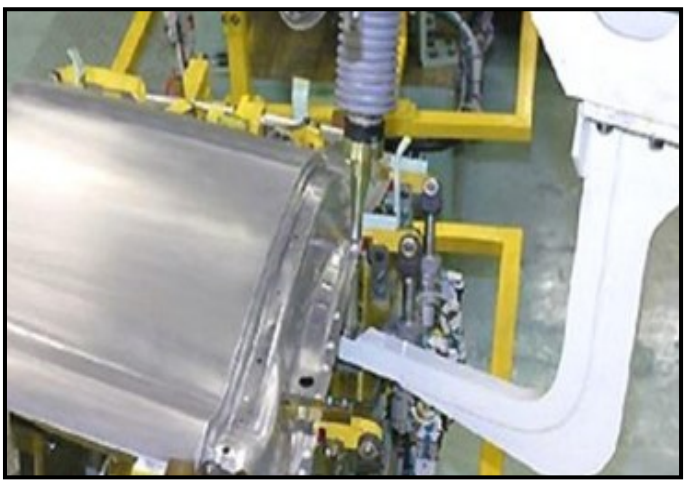
Daldırma aşaması döndürülen takımın ucu kaynaklı parçalara temas ettiğinde başlamaktadır. Takım ile elde edilen kuvvet, sürtünme ısısının oluşumunu sağlar. Yumuşama noktasına gelen kaynaklı bölgede takım ucu için dalma alanı oluşur. Takım omzu üst parçanın daha geniş olan yüzeyine temas ederek , daha geniş bir alanda yumuşama sağlanmış olur. Bu sayede yumuşayan bölge karıştırılarak metalurjik bağ oluşumu gerçekleşir. Parçalara kuvvet uygulamasının devam etmesi tam yüzey temasının olmasını sağlar. Karıştırma esnasında yumuşayan malzemenin; eksenel ve dönme doğrultuda yumuşamış malzeme hareketleri olarak iki çeşit hareketi vardır. Kaynaklı birleştirme bittikten sonra takım dönmeye devam ederek geri çekilir. Takım parçalardan uzaklaştıkça kaynaklı bölgede karakteristik özellikte boşluk oluşumu gerçekleşir (Awang & ark., 2005; Gerlich, 2005; Zhang & ark., 2011; Donders & ark., 2005; Mert & Mert, 2015).

2.2.2. SKNK yönteminin DNK yöntemi ile karşılaştırılması

SKNK yönteminde oluşan kaynaklı yapının görünüşü, özellikle otomobil gövdelerinin montajında sıklıkla tercih edilen DNK yöntemini yansıtmaktadır. Araçların gövde birleştirmesi için ilk yöntem olan DKN, yoğunluğu düşük demir dışı alaşımlarda, galvaniz çeliklerde ve yüksek dayanımlı ileri çelik yapıların kaynağında yüksek kaynak kuvveti ve kimyasal reaksiyon yüzünden sorunlar oluşturmaktadır. Bu yüzden SKNK yöntemi ön plana çıkmış ve otomotiv üretim endüstrisinde dikkat çekmiştir. Metalurjik olarak bir farklılık yaratacak ergime durumu SKNK yönteminde meydana gelmez. SKNK'da oluşan ısı direnç nokta kaynağına göre daha az olduğundan ısısal deformasyonun gerçekleşme olasılığı daha düşüktür. SKNK'da yüksek elektrik kaynağına, harcana enerji servo motorlara gereken elektrik gücü kadar olduğundan gerek olmaz. Direnç nokta kaynağına göre 20 kat daha az elektrik tüketimi söz konusudur. Böylesine büyük bir oran kaynak işleme maliyetlerini büyük oranda azaltır (Bilici & Yükler, 2012; Çam & Mistikoglu, 2014; Hu & Feng, 2021). SKNK yönteminde kullanılan birleştirici takım ucu, alüminyum alaşımlarında aşınmaya karşı yeteri kadar duyarlı değildir bu yüzden takım ömrü daha fazla olmaktadır. Çevreci yöntemleri gün geçtikçe daha da önem kazanması, duman ve tozun olmadığı SKNK yöntemini ön plana çıkarmaktadır. Kaynak süresinin kısa olması ekonomik olarak avantajdır ve yüksek oranda elektrik akımına ihtiyaç duyulmaması elektomanyetik gürültü oluşum riskini azaltmaktadır. SKNK yönteminde kaynak edilecek parçaların ve kaynak ortamının diğer yöntemler gibi temiz olması gerekmemektedir (Akyol, 2015; Mert & Mert, 2015, 2013).

2.2.3. SKNK yönteminin otomobillerdeki yeri ve kullanım alanları

SKNK yöntemi 1993'de Japon otomobil üreticisi Mazda tarafından geliştirilerek kullanılmıştır. Firma kaynak yöntemini ilk olarak RX-8 modelinin üretiminde 2003 yılında kullanmıştır. Şekil 7'de görseli verilen yekpare parça olan alüminyumdan üretilmiş arka kapı paneli bu yöntem ile kaynak edilmiştir. Farklı otomobil firmaları da alüminyum esalı gövdelerde aynı kynak tekniği uygulamaları gerçekleştirmişlerdir (Donders & ark., 2005; Mert & Mert, 2015).



Şekil 7: SKNK yönteminin araç arka kapısına uygulaması.

Kaynak: Mert & Mert, 2015

Otomotiv endüstrisinde kullanılan SKNK yöntemi kaynak işleminde saçılan kaynak kıvılcımlarını bertaraf etmesi ve enerji tasarrufu sağlaması açısından oldukça önemlidir. Bu açıdan Mazda firması tarafından RX-7 ve RX-8 model spor arabaların üretiminde kullanılmıştır (Karslı & Koç, 2022). Japonya'da üretilen

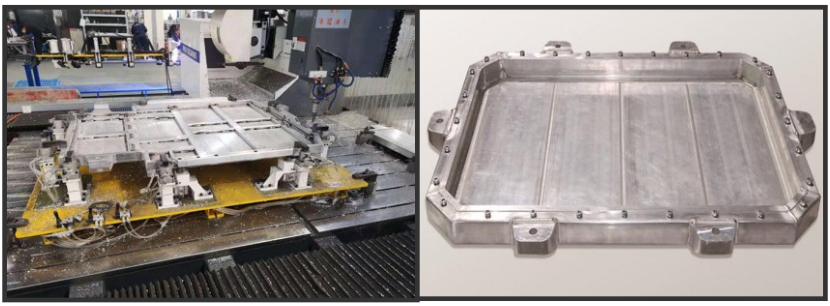
otomobillerde, derin çekilmiş alüminyum alaşım levhalardan kapılar, kaputlar ve bagaj kapakları imalatında SKNK yöntemi kullanılmıştır (Akyol, 2015; Mert & Mert, 2015). SKNK'nın otomotiv endüstrisindeki ilk uygulamalarından biri de Norveç'de bulunan Hydro Marine Aluminium firmasında otomobil jantlarının prototip parçalarının birleştirilmesidir. Şekil 8'de SKNK yöntemi ile birleştirilen Al alaşımı prototip otomobil jantı gösterilmektedir.

Şekil 8: SKNK ile birleştirilen Al alaşımı prototip otomobil jantı.

Kaynak: Mühendis Gelişim, 2024

Son yıllarda elektrikli ve hibrit otomobillerin hayata geçmesi ile farklı parçalar ve tasarımlar geliştirilmiştir. Batarya takım tepsisi genellikle çelik esaslı ve alüminyum esaslı alaşım gruplarından üretilmektedir. Elektrikli araçlarda hafiflik önemli olduğundan Al alaşımı dünya çapında daha fazla tercih edilmektedir. SKNK yöntemide alüminyum alaşımlı batarya tepsisinin birleştirilmesinde otomasyona uyumlu olması, erime olmaması, çevre dostu yöntem olması ve entegre özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 9'da elektrikli araç için SKNK yöntemi ile üretilen 6082 Alüminyum alaşım batarya tepsisi gösterilmektedir.

SKSN yönteminin özellikle elektrikli araçlarının batarya tepsisinin yanı sıra alüminyum alaşımlı elektrik dolabı, motor ürünleri ve su soğutma parçalarının imalatında tercih edilmektedir.



Şekil 9: SKNK yöntemi ile üretilen 6082 Alüminyum alaşım batarya tepsisi.

Kaynak: Mühendis Gelişim, 2024

SKNK yönteminin otomotiv endüstrisine sunduğu avantajlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

- Kaynak bölgesinin yüksek dayanıma sahip olması
- Toz ve duman olmamasından dolayı çevre dostu bir kaynak tekniği olması
- Otomasyon sistemine uygun olması
- Kalıntı gerilme ve distorsiyonların en az seviyede olması
- Ek olarak kaynak teli ve koruyucu gaz gereksinimi olmayışı
- Kaynak ağzı hazırlığına gerek olmayışı

- Farkı özellikte metallerin birleştirilme olanağının olması

SKNK yönteminin bazı dezavantajlarıda vardır. Bunlar;

- Sabitlemek için etkili aparatlara ve destek elemanlarına ihtiyaç vardır.
- Kaynak hızı saç kalınlığı ve malzemenin kimyasal yapısına göre geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu durumda bazı sorunlara neden olmaktadır.
- Kaynak yerinde perçinli bağlantının ayrılması ile boşluk oluşur.

2.3. Lazer Işın Kaynağı

Lazer ışını lazer oluşum mekaniması ile elde edilir ve yönlendirme amaçlı kullanılan aynalardan yansıma ile yoğunlaştırılmış olarak malzemenin yüzeyine iletilir. Oldukça dar olanlar, kiriş, derin kaynaklar, yüksek oranda kaynak oranlarına olanak veren lazer ışını ısı kaynağı oluşturmaktadır. Kaynak edilecek bölgenin bölgesel olarak ergitilmesi ile kaynak işlemi başlamış olur. Oldukça avantajlı olan lazer kaynağı diğer ark kaynak tekniklerinden farklı olarak, birleşme bölgesine odaklanarak daha az enerji harcanması, kaynak bölgesi dışında ısı tesirinin azalması mekanik özelliklerin iyileşmesine sebep olur (Püskülcü & Koçulular, 2009). Lazer kaynağı; otomotiv endüstrisinin yanı sıra elektronik sanayi ve havacılık sektöründe de tercih edilmektedir. Çarpılma oranının düşük olduğu lazer kaynak yöntemi karmaşık yapılı parçaların kaynağında yüksek oranda güçlü lazer kullanımı ile otomotiv endütrisinde birçok farklı parçada kullanılmaktadır. Düşük

yoğunluklu metallerden alüminyum, magnezyum, titanyum alaşımlarında ve kombinasyonlarında çeşitli çelik türlerinde lazer ışını kullanım alanı bulmuştur. Mekanik olarak kritik özelliklere sahip alanlarda, bu yöntemin oldukça iyi sonuçlar vermesi tercih edilebilirliğini arttırmaktadır. Otomotiv sektöründe gerçekleşen lazer kaynaklı birleştirmelerde mikro çatlak oluşum riski azaltılmaktadır. Ancak sıcaklığın yüksek olması sebebiyle özellikle alüminyum alaşımlarında yapıda bulunan Mg ve Zn gibi elementler buharlaşırak kaynaklı yapıdagözenek oluşmasına neden olurlar (Yusof & Jamaluddin, 2014).

Otomasyona uygunluk,yüksek kaynak ilerleme hızı, düşük ısı girdisi, ısıdan etkilenen bölgenin dar alan olması, dar kaynak dikişi, farklı türdeki ve kalınlıktaki malzemelerin kaynak edilebilirliği diğer kaynak yöntemlerine göre yöntemi üstün kılar. Tüm bunlara karşın, yüksek maliyet gerktirmesi,sertleşebilir yapıdaki malzemelere uygulamada yaşanan zorluklar, kaynak nüfuziyetinin dar bir aralıkta olması kalın parçaların kaynak edilememesi, lazer ışınlarının sağlık açısından dson derece tehlikeli olması, kaynak operatörünün yeterlliğinin olması, ek tedbirleri gerekliliği gibi olumsuz yönleride vardır. Lazer kaynağı ayarlanabilir lazer atımları ya da sürekli dalga modunda kaynak işlemine olanak verir. Endüstriyel alanda en çok kullanılan lazer kaynak sistemleri; katı hal lazerleri, gaz lazerleri, yarı iletken lazerler, sıvı lazerler ve fiber lazerler olarak çeşitli gruplarda toplanır. Lazer kaynağını lazer gücü, odak mesafesi, kaynak hızı, koruyucu gazın sahip olduğu özellikler gibi parametreler etkilemektedir (Püskülcü & Koçulular, 2009). Küçük boyutta parçaların kaynak edilmesinde etkili bir teknik olan lazer kaynağı, daha az güç uygulaması ile yüksek oranda kalitede lazer

ışın eldesi mümkündür. Lazer kaynağı; ışın sapmasının düşük olması, çıkışının esnekliği, yüksek verimlilik, boyutsal kompaktlık ve bakım maliyetlerinin düşük olması ve yüksek oranda güç sağlaması gibi olanaklar sunmaktadır. Lazer ışın kaynağında kullanılan ekipmanları görseli Şekil 10'da verilmektedir (Yusof & Jamaluddin, 2014).

Şekil 10: Lazer kaynak ekipmanları.

Kaynak: Yusof & Jamaluddin, 2014

2.3.1. Otomotiv endüstrisinde lazer kaynağı

Otomotiv endüstrisinde lazer ışın kaynağının kullanımı, kaynağın noktasal olarak yoğun enerji aktarımının uygulanmasından dolayı yüksek güç yoğunluğuna sahip düşük ısı girişli kaynak teknolojilerinden biridir ve son yıllarda kullanımı artmıştır. Bir diğer önemli sebepte kaynağın dar alanda derinlemesine uygulanabilirliğidir. Yüksek hızda kaynak edilebilirlik, kontrollü birleştirmenin uygulanabilirliği, kaynak öncesi yüzey hazırlık işlemlerinin olmaması ve kaynak sonrası yüzey işlemenin gerekli olmaması, farklı kimyasal bileşimde malzemelerin kaynak edilmesinin mümkün olması lazer kaynağının otomotiv endüstrisinde tercih edilmesini sağlamaktadır. Yüksek hızının yanı

sıra artık gerilmeleri ve süreksizlikleri az olduğu yüksek hassasiyetli ve ısıl bozulmaların az olduğu temassız bir işlem olması da bu kaynak metodunun otomotiv endüstrisinin yanı sıra elektrik-elektron sanayide yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır (Kimchi & Phillips, 2023).

Özellikle elektrikli araçlarla beraber otomobillerde ağırlıkta azalmanın istenmesi ve dayanım unsurlarının buna oranla artmasının talebi oldukça farklı malzeme grupları ile çalışmayı gerektirmektir. Otomobil gövde bileşenlerinde mukavemet ve görsellik açısında lazer kaynak kullanımı yaygındır. Genel olarak dünya çapında otomotiv üretimi yapan firmalar lazer kaynak kullanımının avantajlarının fark etmiş ve uygulamaya almışlardır (Püskülcü & Koçulular, 2009).

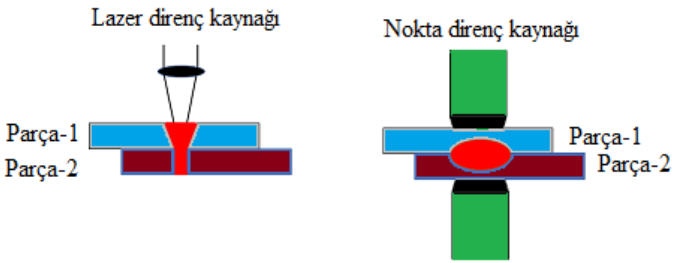
2.4 Lazer Nokta Kaynağı

Lazer nokta kaynağı, metal esaslı plakların birleştirilmesinde ileri teknolojik işlemler arasındadır. Bunun yanı sıra punta kaynağı çok geleneksel, nokta direnç kaynağı ise yoğun olarak otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Lazer nokta kaynağı, nokta direnç kaynağının kullanıldığı neredeyse tüm alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Lazer nokta kaynağının temas gerektirmeyen bir işlem olması, kompleks yapılara uygulanabilirliğinin mümkün olması, tek taraflı olması gibi özellikleri, bu kaynak yöntemini diğer kaynak yöntemlerine göre avantajlı hale getirir. Özellikle yakıt tüketimi açısından verimliliği artıran düşük ağırlıklı parçaların üretimi konusunda büyük avantajlar sunar (Püskülcü & Koçulular, 2009). Otomotiv endüstrisinde montaj gerektiren parçalarda güvenlik hayati önem taşımaktadır. Çarpışmanın etkisi ile emilen enerjinin tutulması, kaza esnasında yolcuların korunması açısından

gereklidir. Absorbe edilen enerji nokta kaynak kalite ile yakından ilişkilidir. Lazer nokta kaynağı, diğer yöntemlere göre daha iyi mekanik dayanım ve daha az ısıl deformasyon sağlamasından dolayı araç güvenliği düzeyini arttırmaktadır. Otomotiv üretiminde lazer nokta kaynağı yüksek kopma dayanımı gerektiren araç gövde birleştirilmesinde, yapısal parçaların birleştirilmesinde ve şaşi üretiminde yer bulmuştur. Lazer nokta kaynağı, kaynak kalitesinin yüksek düzeyde olması istendiğinde, yüksek sayıda nokta kaynak istenen yerlerde ekonomik ve araç ağırlığı açısından oldukça avantajlıdır. Lazer nokta kaynağı elektronik sanayi, savunma ve havacılık endüstrilerinde ve denizcilik alanında da kullanım yeri bulmuştur (Chaturvedi & Arungalai Vendan, 2021; Püskülcü & Koçulular, 2009).

2.4.1. Otomotiv endüstrisinde lazer nokta kaynağı

Otomobil endüstrisinde kaynak hızı, kaynak dikiş kalitesi ve sarf giderleri açısından daha ekonomik olduğundan lazer nokta kaynak kullanım tercihi artmaktadır. Lazer nokta kaynağı kullanım ve gelişimi fiber lazer kaynak teknolojisi ile uygulanmaya başlanmıştır. Son yıllarda otomotiv sektöründe katı hal lazer kaynak kullanımı yerini fiber lazer kaynak kullanımı almıştır (Chaturvedi & Arungalai Vendan, 2021). Şekil 11'de lazer nokta kaynağı ve nokta direnç kaynağının karşılaştırılması şematik olarak verilmiştir. Rezonatörde oluşturulan lazer ışın kaynağı fiber kablolar aracılığıyla gerçekleşir.



Şekil 11: Lazer nokta kaynağı ve Nokta direnç kaynağının şematik gösterimi.

Kaynak: Tekin, 2019

Lazer nokta kaynağında ısı etkisi altındaki bölge daha dar bir alanda kendini göstermektedir. Bu nedenden dolayı lazer nokta kaynak uygulamalarında birleştirilen parçalarda daha az ısıl deformasyon etkisi oluşmakta ve distorsiyonlar önlenerek boyutsal hassasiyet korunmaktadır. Buna karşın ısı tesiri altındaki bölgesi fazla olan nokta direnç kaynağında daha fazla ısıl deformasyon etkisi oluşarak kaynak sonrası istenen toleranslardan farklı ürünler elde edilebilmektedir. Bu açıdan lazer ışını daha esnek şekilde yönlendirilebilir ve kaynak edilen bölgelerde ulaşım kolaylığı oluşturur. Otomotiv endüstrisi gibi bazen çok kompleks olan parçalarda geometrik zorlukları olan ürünler için avantaj sağlamaktadır (Tekin, 2019).

3.Sonuç

Otomotiv endüstrisinde daha hafif araç üretimi ve güvenlik standartlarının geliştirilerek iyileştirilmesi hem kullanılan malzeme hem de imalat süreçlerinde yeniliklere yönelim olmuştur. Otomotiv endüstrisinde aynı veya farklı özellikte metal esaslı sac plakaların birleştirilmesinde sıklıkla kaynak işlemi kullanılmaktadır. Üretim

sürecinin en önemli adımı olan gövde birleştirmede kaynaklı işlemi çok önemlidir. Günümüzde kaynak yöntemleri arasında en fazla tercih edilen ve kullanılan sedan araç gövdelerinde ortalama 4.000 ile 6.000 arasında olan elektrik direnç nokta kaynağıdır. Araç gövdesinin oluşturulmasında yaklaşık %85 oranında diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında direnç nokta kaynağı kullanılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ile kaynak tekniklerinde robotik uygulamalarda gerçekleştirilmektedir. Ancak üretim süreçlerinin bazı noktalarında manuel nokta kaynak uygulamaları da bulunmaktadır. Araçlarda istenilen güvenlik seviyesinin oluşturulması için yapılan kaynakların optimizasyon şartlarının belirlenmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Matematiksel modelleme ve sanal analiz sonuçları ile de desteklenmesi önemlidir. Gerçekleştirilen testler ile de parametrelerin doğrulanması sağlanmış olur. Seri üretime geçildiğinde de araç gövdesi üretim hatlarında kaynak kalitesinin kontrolünde en yaygın olarak ultrasonik test yöntemi kullanılır. Otomotiv endüstrisinde üretim oranının yüksek olması, rekabetin yoğun olduğu bir sektör olması ve maliyetlerin azaltılma eğilimi kaynak yöntemleri arasında da gelişmeye neden olmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağı alüminyum esaslı parçaların birleştirilmesinde oldukça başarılı sonuçlar sağlamıştır. Ancak otomotiv üretiminde kullanım alanı umulduğu şekilde gelişmemiştir. Sonuç olarak otomotiv endüstrisinde daha kaliteli kaynaklı birleştirmeler, geliştirilmiş kaynak mukavemeti, daha hafif araç üretimi, faklı yapıda malzemelerin kaynak edilebilirliği gibi konulardaki gelişmeler ile kaynak teknolojisindeki gelişim hızlanacaktır.

Kaynaklar

Akyol, M., 2015. Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar (Yüksek Lisans Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Awang, M., Mucino, V.H., Feng, Z., David, S.A., 2005. Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW) process: use of an explicit adaptive meshing scheme. SAE Technical Paper.

Bilici, M.K., Yükler, A.I., 2012. Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. Materials & Design 33, 145–152.

Buckley, J., Servent, R., 2009. Improvements in ultrasonic inspection of resistance spot welds. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 51, 73–77.

Çam, G., Mistikoglu, S., 2014. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. J. of Materi Eng and Perform 23, 1936–1953. https://doi.org/10.1007/s11665-014-0968-x

Chaturvedi, M., Arungalai Vendan, S., 2021. Advanced Welding Techniques: Holistic View with Design Perspectives. Springer Singapore, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6621-3

Donders, S., Brughmans, M., Hermans, L., Tzannetakis, N., 2005. The effect of spot weld failure on dynamic vehicle performance. Sound and Vibration 39, 16–25.

Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, I., Kumru, U., 2015. Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynaği TOFAŞ Uygulamalari. Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, pp. 29–37.

Gerlich, A., 2005. Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys. Materials Fourum, 2005 290–294.

Hu, X., Feng, Z., 2021. Advanced High-Strength Steel-Basics and Applications in the Automotive Industry. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

Karslı, Y.T., Koç, F.G., 2022. Otomotıv endüstrisinde kullanılan çelikler TRIP çelikleri ve kaynak kabiliyeti. Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.

Kimchi, M., Phillips, D.H., 2023. Resistance spot welding: fundamentals and applications for the automotive industry. Springer Nature.

Kırık, İ., Özdemir, N., 2012. Otomotiv Endüstrisinde Kullanilan Sürtünme Kaynak Makinesi İmalati ve Farkli Özellikteki AISI 1040/AISI204L Çelik Çiftlerinin Sürtünme Enerjisi Kullanilarak Birleştirilmesi. Technological Applied Sciences 7, 60–74.

Mert, Ş., Mert, S., 2015. Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin otomotiv sektöründeki yeri. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 3, 432–438.

Mert, Ş., Mert, S., 2013. Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin incelenmesi. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi 2, 26–35.

Mühendis Gelişim, 2024. Otomotiv Sanayii'de Kullanılan Malzemeler - Mühendis Gelişim [WWW Document]. URL https://muhendisgelisim.com/otomotiv-sanayiide-kullanilan-malzemeler/ (accessed 8.29.24).

Perka, A.K., John, M., Kuruveri, U.B., Menezes, P.L., 2022. Advanced high-strength steels for automotive applications: arc and laser welding process, properties, and challenges. Metals 12, 1051.

Püskülcü, G., Koçulular, F., 2009. Lazer kaynak yöntemi ve uygulamaları. Engineer & the Machinery Magazine.

Smith, C.B., Hinrichs, J.F., Ruchl, P.C., 2006. Friction stir and friction stir spot welding, Friction Stir Link Inc.

Tekin, G., 2019. Otomotiv sektöründe kullanılan elektrik direnç kaynağına alternatif laser nokta kaynağının mekanik ve termal etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye.

Thomas, W.M., 2003. Friction stir welding-recent developments, in: Materials Science Forum. Trans Tech Publ, pp. 229–236.

Tomiyama, T., D'Amelio, V., Urbanic, J., ElMaraghy, W., 2007. Complexity of Multi-Disciplinary Design. CIRP Annals 56, 185–188. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.044

Yusof, F., Jamaluddin, M.F., 2014. Welding defects and implications on welded assemblies.

Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., Zou, B., 2011. Effect of welding parameters on microstructure and

mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. Materials & Design 32, 4461–4470.

BÖLÜM VI

İmalat Üretiminde DEM Modelinin Önemi

ALİ KEMAL ÇAKIR[1]

Giriş

Hızla gelişen üretim dünyasında, endüstriler ürün kalitesini artırmak, maliyetleri düşürmek ve operasyonel verimliliği artırmak için sürekli olarak yenilikçi çözümler aramaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için mevcut en güçlü araçlardan biri Ayrık Eleman Yöntemi (DEM- Discrete Element Method) modellemesinin kullanılmasıdır. DEM, tanecikli malzemeler, partiküller veya yığın katılar içeren sistemlerin davranışını simüle etmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Toz işleme ve karıştırmadan malzeme taşıma ve malzeme akışı simülasyonlarına kadar çok çeşitli üretim süreçlerinin anlaşılmasında ve optimize edilmesinde önemli bir rol oynar.

[1] Doç. Dr., Adnan Menderes Üniversitesi, Germencik Yamantürk Meslek Yüksek Okulu, Makin ve Metal Teknolojileri Bölümüi,, Aydın/Türkiye, Orcid: 0000-0002-2185-8108,, ali.kemal.cakir@adu.edu.tr

Endüstriler Endüstri 4.0 ve dijital üretime doğru ilerledikçe, Nesnelerin İnterneti (IoT), Yapay Zeka (AI) ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin geleneksel üretim süreçleriyle entegrasyonu hızlanıyor. DEM modelleme, fiziksel operasyonlar ile dijital simülasyon arasında bir köprü görevi görerek bu dijital dönüşümün ön saflarında yer alıyor. DEM'i sensörlerden gelen gerçek zamanlı verilerle birleştiren üreticiler, gerçek çalışma koşullarına dayalı sonuçları yalnızca simüle etmekle kalmayıp aynı zamanda tahmin eden son derece doğru, veri odaklı modeller oluşturabilir.

Örneğin, üretim ekipmanına yerleştirilmiş sensörler sıcaklık, basınç ve malzeme akışı hakkında gerçek zamanlı veriler sağlayabilir. Bu veriler, DEM simülasyonları ile entegre edildiğinde, değişen koşullara uyum sağlayan ve gelecekteki davranışları tahmin eden dinamik modellerin oluşturulmasına yardımcı olur. Bu gerçek zamanlı değişkenlere uyum sağlama yeteneği sistemlerin sürekli olarak optimize edilebilmesini sağlayarak hem verimliliği hem de ürün kalitesini artırır.

DEM Modelleme

Günümüzde yaygın olarak kullanılan sayısal analiz metotlarına; Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), Sonlu Farklar Metodu (FDM), Sınır Elemanları Metodu (BEM) ve Ayrık Elemanlar Metodu (DEM) örnek olarak verilebilir (1).

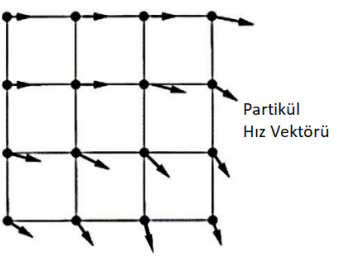
Ayrık Eleman Yöntemi, bir sistemdeki parçacıklar ve nesneler arasındaki etkileşimleri simüle etmek için kullanılan bir hesaplama yöntemidir. Tek tek parçacıkları veya cisimleri izlemeyi ve çarpışma, sürtünme ve kohezyon gibi etkileşimlerini göz önünde bulundururken her biri için hareket denklemlerini çözmeyi içerir. Bu

etkileşimler daha sonra parçacık düzeyinde uygulanan kuvvetler ve kısıtlamalar kullanılarak modellenir.

Dem metodu bir sayısal analiz metodur. Sayısal analiz metotları ile çözüm yapabilmek için iki ana modelleme yaklaşımı söz konusudur. Bu modellemeler süreklilik yaklaşımı ve ayrık yaklaşımıdır. (1).

Süreklilik Yaklaşımı

Sürekli bir sistemi, problemin karakterine uygun sonlu elemanlara bölerek, elde edilen elemanlar üzerine iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimizasyonu ve daha sonrasında da bu elemanların birleştirilmesi ile tüm sistemin çözümünü bulmak şeklinde tanımlanabilir (Buna örnek, mesela Sonlu elemanlar yöntemi, FEM). (Şekil 1). (1).

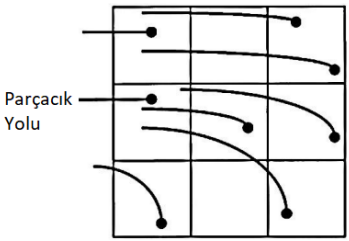


Şekil 1. *Süreklilik Yaklaşımı*

Ayrık Yaklaşımı

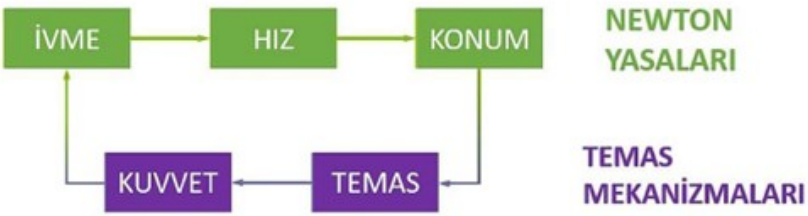
Bu yaklaşımda, ayrık yaklaşımlar her bir parçacığı ayrı bir varlık olarak modelleme yapar (Şekil 2). TAyrıca, tnecikli malzemeyi ideal parçacıklar topluluğu olarak temsil eder. Genel (makroskopik) sistem davranışı, bireysel parçacıkların birbirleriyle olan etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu yaklaşım, parçacık

çapının uzunluk ölçeğinde meydana gelen olayları araştırmak ve parçacıkların kütle davranışını simüle etmek için çok iyi bir yaklaşımdır (Örneğin, Ayrık elamanlar yöntemi-DEM) (Şekil 2). (1).



Şekil 2. *Ayrık Yaklaşımı.*

Ayrık elemanlar yöntemi, farklı geometrik şekilli (taş, mermer, ahşap vb.) kütleler veya dairesel şekilli taneciklerin modellenmesi, bu taneciklerin temas algılama algoritmaları ve uygun temas modelleri seçilerek, ivmelere, hızlara ve pozisyonlara göre Newton'un hareket yasaları dikkate alınarak kütle, atalet ve momentum ilişkileri ile taneciklerin fiziksel hareketlerinin çözümlenmesini sağlayan sayısal bir yöntemidir (Şekil 3). (1).



Şekil 3. *Ayrık Elemanlar Yöntemi Algoritması*

Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM), partiküller arasındaki etkileşimleri simüle etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. İlk

olarak 1970'lerde Cundall ve Strack (2) tarafından geliştirilen bu yöntem, günümüzde granüler malzemelerin ve partikül tabanlı sistemlerin davranışlarını modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (2). Bu yöntem, üretim süreçlerinde, özellikle toz işleme, karıştırma, taşıma ve malzeme akışı gibi alanlarda büyük bir öneme sahiptir. DEM, mühendislerin üretim süreçlerini optimize etmelerini sağlayarak, maliyetleri düşürmelerine, süreç verimliliklerini artırmalarına ve daha kaliteli ürünler üretmelerine yardımcı olur. Bu yöntemin en önemli avantajı, malzemelerin mikroskobik seviyedeki etkileşimlerinin, makroskobik seviyedeki davranışlara nasıl yansıdığını anlamamıza olanak tanımasıdır (3).

DEM Modeli ile Sanal Prototipleme ile Teslim Sürelerini ve Maliyeti Azaltma

DEM modellemenin en önemli faydalarından biri, sanal prototipleme yoluyla hem teslim süresini hem de maliyetleri azaltabilmesidir. Birçok sektörde, yeni ürünlerin veya süreçlerin geliştirilmesi hem zaman alıcı hem de maliyetli olabilen birkaç fiziksel prototip yinelemesini gerektirir. DEM simülasyonları ile üreticiler, fiziksel prototipler oluşturulmadan önce tasarımları sanal olarak test edebilir ve optimize edebilir. Bu sadece ürün geliştirme döngüsünü hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda deneme yanılma ile ilişkili malzeme israfını da azaltır.

Örneğin, parçaların üretimden önce titiz testlerden ve prototiplerden geçtiği otomotiv veya havacılık üretiminde DEM, arızaları tahmin etmek, tasarımı iyileştirmek ve test sürelerini kısaltmak için farklı stres koşulları altında malzeme davranışını simüle edebilir. Üreticiler bu ayarlamaları dijital ortamda yaparak aşırı fiziksel prototip ihtiyacından kaçınır ve malzeme

maliyetlerinden, üretim süresinden ve ilgili işçilik maliyetlerinden tasarruf eder.

DEM Modeli ile Gerçek Zamanlı İzleme ve Kestirimci Bakım

DEM modellemesinin paha biçilmez olduğunu kanıtlayan bir diğer husus da üretim ekipmanlarının gerçek zamanlı izlenmesi ve öngörücü bakımının yapılmasıdır. Tanecikli malzemelerin ekipmanda (konveyörler, karıştırıcılar veya reaktörler gibi) nasıl davrandığını izleyerek, DEM simülasyonları malzeme tıkanıklıkları, düzensiz akış veya ekipman aşınması gibi potansiyel sorunları, bu sorunlar arızalara veya kapanmalara yol açmadan çok önce tespit etmek için kullanılabilir.

Örneğin bir konveyör sistemi söz konusu olduğunda DEM, malzeme akışını tahmin edebilir ve kayışın veya diğer bileşenlerin aşırı stres yaşayabileceği alanları belirleyebilir. Bu bilgiler sayesinde üreticiler, bir arıza meydana gelmeden önce bakım planlayabilir, böylece maliyetli duruş sürelerini önleyebilir ve ekipmanın genel ömrünü uzatabilir.

DEM Modelleri ile Üretimin Ölçeklendirilmesi

Bir üretim sürecini küçük ölçekli bir laboratuvardan veya pilot projeden tam ölçekli üretime ölçeklendirmek göz korkutucu bir görev olabilir. Ölçek büyütmede karşılaşılan en önemli zorluklardan biri, proses kapasitesi arttıkça malzemelerin akışının, karışımının veya davranışının tutarlı kalmasını sağlamaktır. DEM modelleri, küçük ölçekten büyük ölçekli üretime geçerken sistemin dinamiklerinin nasıl değiştiğine dair içgörüler sağlayabilir ve bu da zayıf malzeme akışı, düzensiz karıştırma veya tutarsız kalite gibi yaygın sorunları önleyebilir.

Mühendisler çeşitli ölçeklerde simülasyonlar çalıştırarak, ölçek büyütme sürecinin mümkün olduğunca sorunsuz olmasını sağlamak için ekipman tasarımında ince ayar yapabilir veya operasyonel parametreleri değiştirebilir. Bu özellikle, üretim hacmi katlanarak arttığında bile malzeme davranışı üzerinde hassas kontrolün kritik önem taşıdığı ilaç, kozmetik ve kimyasallar gibi sektörlerde faydalıdır.

Çevresel Etki: DEM Aracılığıyla Sürdürülebilirlik

Günümüz dünyasında, endüstrilerin sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermeleri ve çevresel etkilerini azaltmaları için artan bir baskı söz konusudur. Üretimdeki en büyük çevresel zorluklardan biri hammaddelerin verimli kullanımıdır. DEM, üreticilerin atık, enerji tüketimi ve emisyonları azaltmak için malzeme işleme süreçlerini optimize etmelerine yardımcı olabilir.

Örneğin, çimento üretiminde DEM, farklı hammadde karışımlarının öğütme ve taşıma süreçleri sırasında nasıl davrandığını modelleyebilir. Üreticiler bu etkileşimleri optimize ederek enerji tüketimini en aza indirebilir ve üretimle ilişkili karbon ayak izini azaltabilir. Benzer şekilde, plastik geri dönüşümü gibi sektörlerde DEM modelleri, karışık atık malzemelerin davranışını tahmin ederek üreticilerin ayırma ve geri dönüşüm verimliliğini artıran sistemler tasarlamasına yardımcı olabilir.

Ayrıca, DEM modellemesinden elde edilen bilgiler, bir ürünün yaşam döngüsünün çevresel etkisini değerlendirmek için de uygulanabilir. Üreticiler, farklı üretim senaryolarını simüle ederek en sürdürülebilir üretim yöntemlerini seçebilir, böylece hem işletme maliyetlerini hem de ürünlerinin çevresel ayak izini azaltabilirler.

Üretim Süreçlerinde DEM Kullanmanın Temel Nedenleri

1. Süreç Optimizasyonunun Geliştirilmesi

DEM modellemesini üretimde kullanmanın en önemli avantajlarından biri, süreç optimizasyonunu geliştirme yeteneğidir. Geleneksel deneme-yanılma yöntemleri zaman alıcı ve maliyetli olabilir. DEM, mühendislerin farklı koşulları ve süreç varyasyonlarını sanal olarak simüle etmesine olanak tanıyarak malzemelerin farklı gerilimler, sıcaklıklar veya konfigürasyonlar altında nasıl davrandığına dair daha derin bir anlayış sunar.

Örneğin toz işlemede DEM, tozların bunkerler, mikserler ve diğer ekipmanlardan nasıl aktığını simüle edebilir. Mühendisler, akışı etkileyen kuvvetleri anlayarak malzeme verimini artırmak, israfı azaltmak ve tıkanmaları önlemek için ekipman tasarımını optimize edebilirler.

2. Malzeme İsrafını Azaltma

Birçok üretim sürecinde, fazla malzeme israfı sadece çevresel bir sorun değil aynı zamanda ekonomik bir sorundur. DEM modellemesi, malzeme kayıplarının meydana gelebileceği alanların belirlenmesine yardımcı olabilir ve israfı azaltmak için değişiklikler önerebilir. Bu, özellikle maliyetleri düşürmek ve ürün tutarlılığını sağlamak için malzeme işlemede hassasiyetin gerekli olduğu ilaç veya gıda üretimi gibi sektörlerde kritik öneme sahiptir.

3. Ürün Kalitesinin ve Tutarlılığının Artırılması

DEM modelleme, üreticilerin işleme sırasında parçacıklar veya malzemeler arasındaki mikro düzeydeki etkileşimleri simüle etmesine ve anlamasına olanak tanır. Mühendisler, tek tek

parçacıkların davranışını analiz ederek nihai üründe homojenliği sağlamak için ekipman parametrelerini ayarlayabilirler.

DEM, malzeme akışını optimize ederek, fazla malzeme kullanımını ve enerji kaybını önlemeye yardımcı olur. Örneğin, çimento üretiminde DEM kullanarak, öğütme süreçlerindeki enerji tüketimi minimize edilebilir. Ayrıca, malzemelerin taşınması sırasında ortaya çıkan kayıplar, DEM simülasyonları ile en aza indirilebilir (4).

4. Daha İyi Ekipman ve Altyapı Tasarlama

DEM, üretim ekipmanlarının tasarımında da önemli bir araçtır. Özellikle malzeme taşıma sistemlerinin, karıştırıcıların, öğütücüler ve sıvı taşımacılık sistemlerinin tasarımında, DEM kullanılarak sistemlerin performansı önceden simüle edilebilir. Bu sayede, ekipmanların aşırı aşınması ve arızalanması engellenebilir, böylece bakım maliyetleri düşürülebilir ve sistem ömrü uzatılabilir (5-7). DEM, konveyör bant aşınması ve tutarsız akış modelleri gibi sorunların sıklıkla ortaya çıktığı dökme malzeme işlemede, bakımı en aza indirmek ve uzun vadeli performansı optimize etmek için en iyi malzeme seçimlerinin, yüzey kaplamalarının ve hareket kontrol sistemlerinin belirlenmesine yardımcı olabilir.

5. Sürdürülebilir Üretimi Etkinleştirmek

Daha sürdürülebilir üretim uygulamalarının benimsenmesine yönelik artan baskı karşısında DEM hayati bir rol oynayabilir. DEM, malzeme taşıma verimliliğini optimize ederek ve atıkları en aza indirerek daha sürdürülebilir uygulamalara katkıda bulunur. Ayrıca DEM, farklı süreçlerdeki enerji kullanımını simüle ederek

üreticilerin enerji tüketimini ve emisyonları azaltma fırsatlarını belirlemelerine yardımcı olabilir.

6. Güvenliği Artırmak

Üretim ortamları, özellikle tehlikeli malzemeler veya ağır makinelerle çalışan sektörlerde güvenlik riskleri oluşturabilir. DEM, malzemelerin dengesiz hale gelebileceği, toz patlamaları, tıkanmalar veya ekipman arızaları yaratabileceği durumları simüle ederek potansiyel güvenlik tehlikelerini tahmin etmeye ve azaltmaya yardımcı olabilir. Üreticiler bu tür riskleri önceden tespit ederek daha güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için önleyici tedbirler alabilirler.

7. Araştırma ve Geliştirmenin Hızlandırılması

DEM modelleme, yeni ürün ve süreçlerin geliştirilmesini hızlandırmada önemli bir rol oynamaktadır. Mühendisler, malzemelerin ve ekipmanların çeşitli koşullar altındaki davranışları hakkında içgörü sağlayarak, maliyetli fiziksel prototiplere ihtiyaç duymadan tasarımları hızlı bir şekilde yineleyebilirler. Yeni malzemelerin ve yenilikçi üretim yöntemlerinin sürekli olarak geliştirildiği otomotiv üretimi veya havacılık gibi sektörlerde DEM, yeni ürünlerin pazara sunulma süresini önemli ölçüde kısaltabilir.

Üretimde DEM'in Gerçek Dünya Uygulamaları

1. İlaç Endüstrisi

İlaç endüstrisinde, tabletler veya kapsüller gibi katı dozaj formlarının üretimi karmaşık partikül etkileşimlerini içerir. DEM, tablet sıkıştırma, toz karıştırma ve kaplama işlemlerini simüle etmek için kullanılır. Mühendislerin akış özelliklerini tahmin etmelerine,

homojenliği sağlamalarına ve nihai ürünün tutarlılığını artırmalarına yardımcı olur.

2. Gıda İşleme

DEM, gıda üretiminde tahıl, şeker ve tuz gibi tanecikli malzemelerin modellenmesinde çok önemli bir rol oynar. DEM modelleri, karıştırma ve dağıtım modellerini simüle ederek gıda işleme sistemlerinin tasarımını optimize etmeye ve nihai ürünün kalitesini ve homojenliğini artırmaya yardımcı olur.

3. Çimento ve Beton Üretimi

Çimento endüstrisi kum, çimento tozu ve agregalar gibi granül malzemelerin karıştırma, depolama ve nakliye sırasında nasıl davrandığını anlamak için DEM'e güvenmektedir. DEM, partikül dağılımını, akış özelliklerini ve karıştırma verimliliğini optimize etmeye yardımcı olur,

Üretimde DEM'in Geleceği

İleriye baktığımızda, simülasyon teknolojisi ilerlemeye devam ettikçe DEM'in üretimdeki rolü daha da genişlemeye hazırlanıyor. Yapay zekanın (AI) DEM modelleriyle entegrasyonu, kendi kendini optimize eden üretim sistemleri yaratma potansiyeline sahiptir. Yapay zeka algoritmaları, büyük miktarda simülasyon verisini analiz edebilir ve malzeme akışını optimize etmek, israfı azaltmak ve ürün kalitesini gerçek zamanlı olarak artırmak için üretim süreçlerini otomatik olarak ayarlayabilir.

Ayrıca, katmanlı üretime (3D baskı) giderek daha fazla odaklanılması, tanecikli malzemelerin farklı 3D baskı süreçlerinde nasıl davranacağını tahmin etmeye yardımcı olarak baskı doğruluğunu ve malzeme verimliliğini artırabileceğinden DEM

modellemesinden büyük olasılıkla yararlanacaktır. Bu, özellikle 3D baskılı parçaların hassasiyetinin bir güvenlik meselesi olabileceği havacılık ve tıp endüstrilerinde çok önemlidir.

Bulut tabanlı platformların artan hesaplama gücü ve erişilebilirliğinin de DEM'i daha küçük üreticiler için daha uygun fiyatlı ve erişilebilir hale getirmesi bekleniyor. Simülasyon araçları daha kullanıcı dostu ve yaygın olarak kullanılabilir hale geldikçe, küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) bile süreç optimizasyonu ve ürün geliştirme için DEM'den yararlanabilecek ve dünya çapındaki üreticiler için oyun alanını düzleştirecektir.

Sonuç ve Öneriler

Üretim süreçlerinde DEM modelleri oluşturmanın ve kullanmanın önemi göz ardı edilemez. Parçacık düzeyinde karmaşık etkileşimleri simüle etme kabiliyetiyle DEM, üreticilerin süreçleri optimize etmesine, maliyetleri düşürmesine ve çok çeşitli sektörlerde ürün kalitesini artırmasına olanak tanır. Malzeme israfını azaltmaktan güvenliği artırmaya ve araştırma ve geliştirmeyi hızlandırmaya kadar DEM, modern üretim araç kutusunda kritik bir araç olarak hizmet vermektedir.

Dijital dönüşüm üretim ortamını yeniden şekillendirmeye devam ettikçe DEM'in rolü daha da önemli hale gelecektir. DEM teknolojisini benimseyen üreticiler daha fazla verimlilik, daha fazla sürdürülebilirlik ve giderek daha karmaşık ve zorlu hale gelen bir pazarda rekabet avantajı elde etmeyi dört gözle bekleyebilirler. DEM, malzeme davranışı ve sistem performansı hakkında ayrıntılı bilgiler sağlayarak, üreticilerin yalnızca süreçlerini iyileştirmelerini

değil, aynı zamanda önümüzdeki zorluklar için operasyonlarını geleceğe hazırlamalarını sağlar.

Kaynakça

1- Ayrık Elemanlar Metodu ve Tarım Makinelerindeki Bazı Uygulamaları, Bahadır, M., Acar, M., Yıldırım, M., Vural, F. Ö., Doğan, İ. B., Özbek, O., MAS JAPS 8(4): 630–653, ISSN 2757-5675, Doi: http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8395677, 2023.

2- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete element model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.

3- Kloss, C., et al. (2012). *Modelling and Simulation of Granular Materials Using DEM*. Wiley-VCH.

4- Cleary, P. W. (2004). DEM modelling of industrial granular flows. *Applied Mathematical Modelling*, 28(8), 747-770.

5- Yang, R., et al. (2016). DEM simulation of granular flow and applications in industrial processes. *Computers & Chemical Engineering*, 90, 1-9.

6- Mian, H. (2016). Application of discrete element modelling in mining. *Mining Technology*, 125(1), 20-30.

7- Fleissner, F., Gaugele, T. & Eberhard, P. Applications of the discrete element method in mechanical engineering. *Multibody Syst Dyn* **18**, 81–94 (2007). https://doi.org/10.1007/s11044-007-9066-2.

BÖLÜM VII

Savunma Sanayii Sektöründe Sistem Mühendisliği Süreçleri Ve V Modelin Uygulanması

Ali ÜZER[1]

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

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:

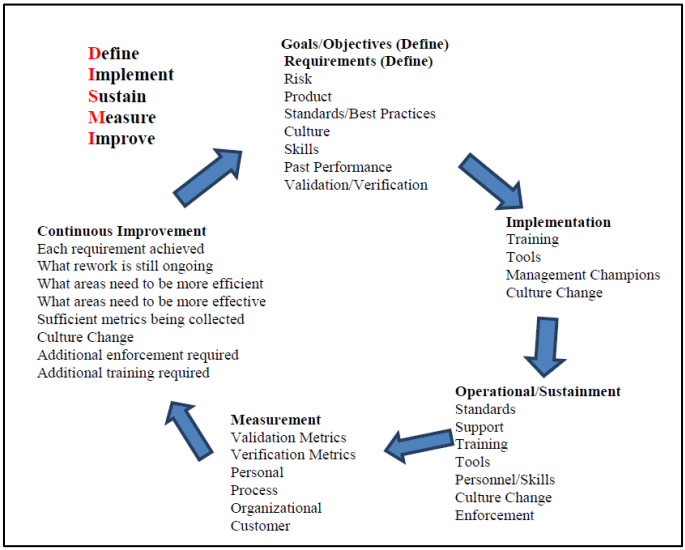
Müşteri İhtiyacı: Sistem geliştirme sürecinin ilk adımı, müşterinin ihtiyaçlarının net bir şekilde tanımlanmasıdır. Bu aşama, sistemin ne amaçla kullanılacağı, hangi problemlere çözüm getireceği ve hangi performans kriterlerini karşılaması gerektiği gibi unsurları kapsamaktadır.

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.

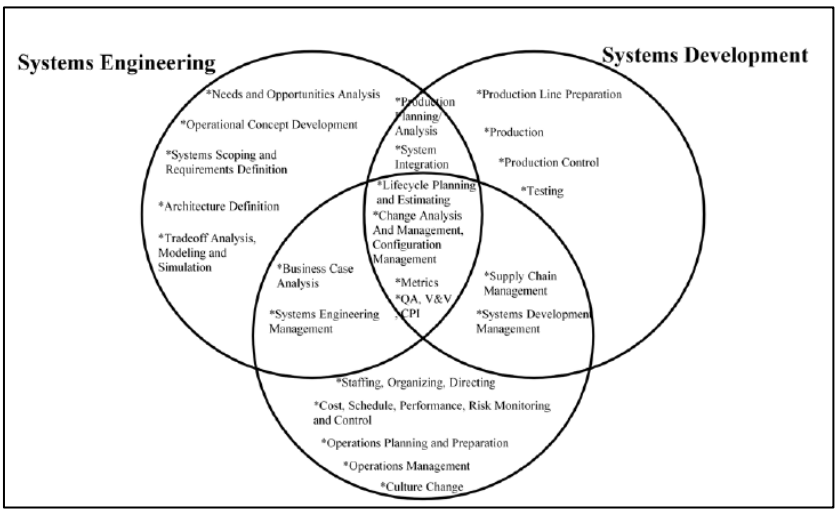
Sistem Tasarımı: Mimari oluşturulduktan sonra, tasarım süreci başlar. Bu aşamada, her bir alt sistemin detaylı tasarımı yapılır, prototipler oluşturulur ve gerekli analizler gerçekleştirilir. Bu süreç, hem yazılım hem de donanım unsurlarını kapsar.

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 16 Sistem Mühendisliği Süreçlerinde DISMI Kullanımı

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



Şekil 17 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 mühendisliğinin amacı, bir kuruluşun müşterilerinin ve iç veya dış paydaşlarının ihtiyaçlarını ve beklentilerini belgelemesini, doğrulamasını ve karşılamasını 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 karşılamasını garanti eder ve proje risklerini minimize eder. Literatürde,

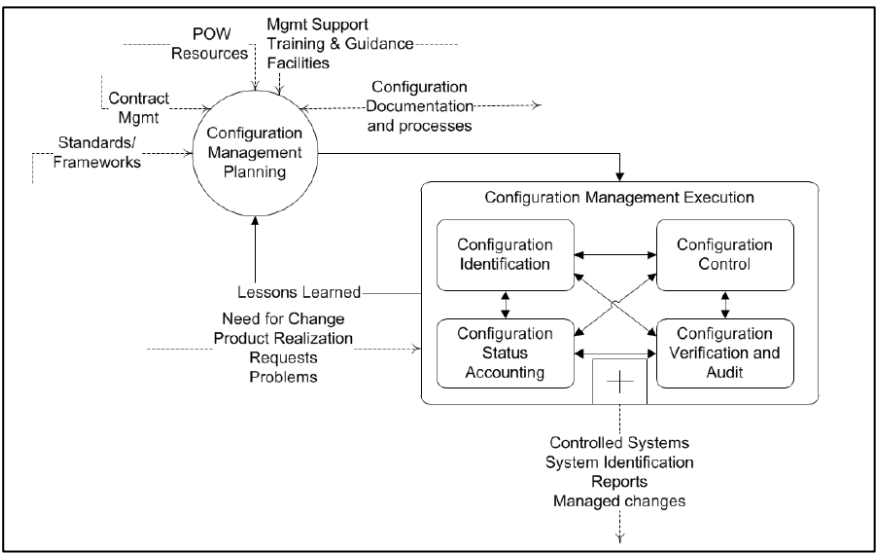
gereksinim yönetiminin etkili yapılmaması durumunda proje başarısızlık oranlarının ciddi şekilde arttığı belirtilmektedir (INCOSE, 2017).

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.



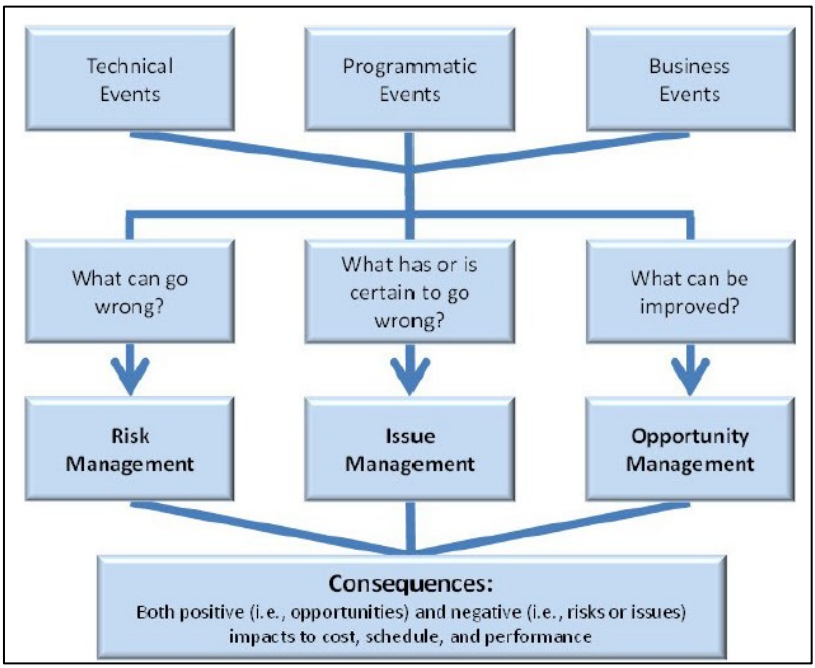
Şekil 18 Konfigürasyon Yönetimi Prosesi

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 19 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

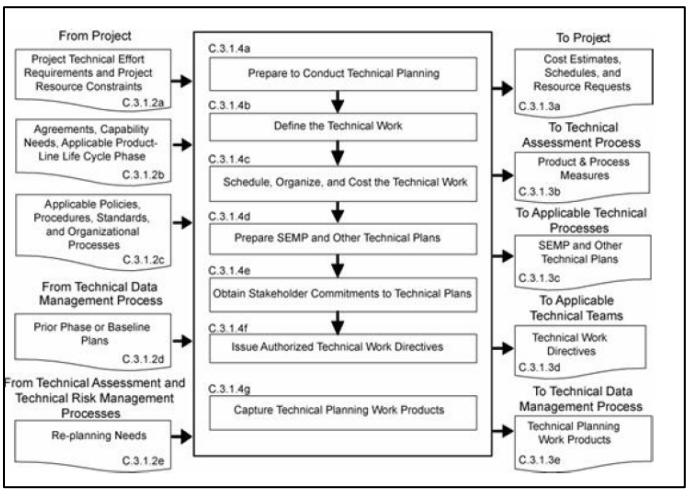
programın tüm yönleriyle ilişkilendirilebileceğinden, risk tanımlamasının yalnızca program yöneticisi veya sistem mühendisinin değil, herkesin işinin bir parçası olduğunu kabul etmek önemlidir. Buna test yöneticisi, mali yönetici, sözleşme görevlisi, lojistikçi ve diğer tüm ekip üyeleri dahildir. Sistem 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 20 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/çözüm 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

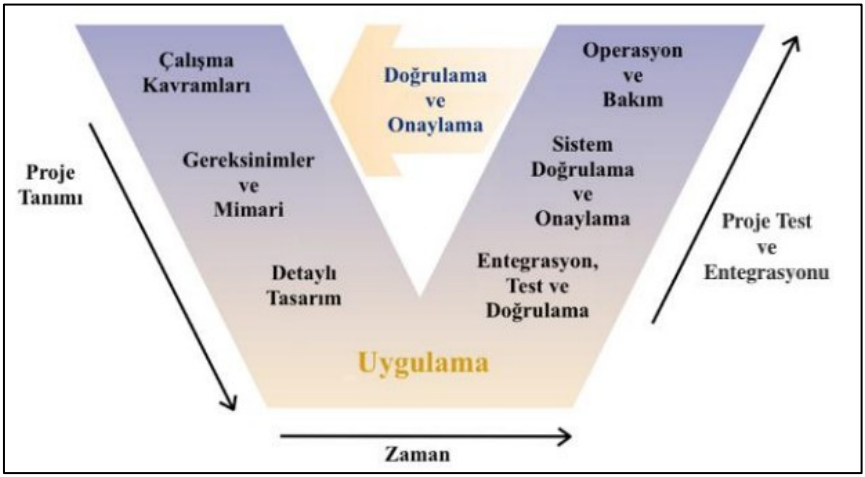
Ürün (sistem) doğrulaması, bir ürün öğesi, bir ürün, bir belge, bir hizmet, bir görev, bir gereksinim vb. gibi herhangi bir öğenin doğruluğunu kontrol etmek için kullanılan bir dizi eylemdir. Bu tür eylemler, ürünün yaşam döngüsü boyunca planlanır ve gerçekleştirilir. Doğrulama, gerçekleştiği bağlam içinde örnekleştirilmesi 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 21 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 entegrasyonuyla 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).

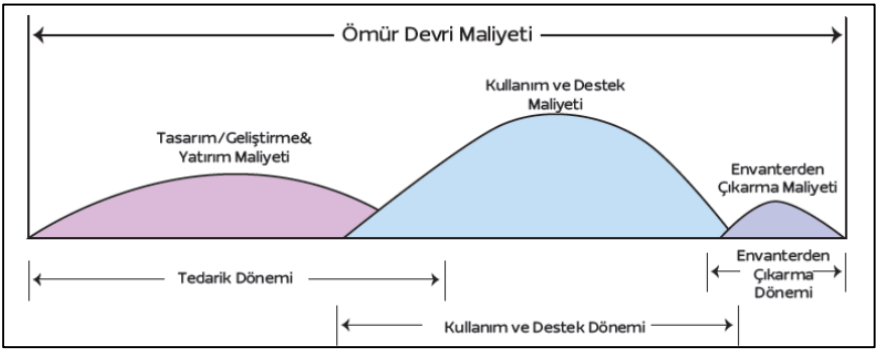
Yaşam döngüsünün ilk aşamaları ürün ihtiyaçlarını tanımlanmaya başlanır ve ardından sistem gereksinimlerini olgunlaşmaya başlar. Sistemler, bu sistemi oluşturan alt sistemlerden oluştuğu için daha sonra alt sistemlerin gereksinimlerini tanımlanır ve sistemin olgunlaşan gereksinimleri detaylanmış olur. 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 & McDermid, 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 22 Sistem Ömür Devri

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

Sonuç

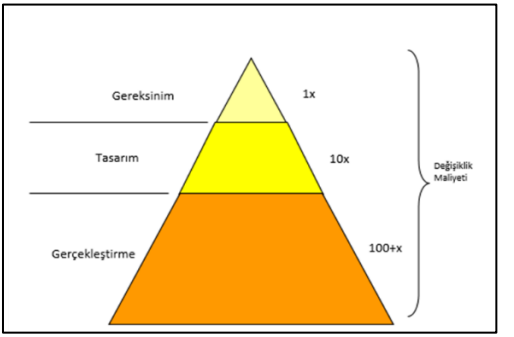
Savunma sanayii projeleri, doğası gereği karmaşık, çok disiplinli ve yüksek güvenlik gereksinimlerine sahip projelerdir. Bu nedenle, her aşamanın dikkatle yönetilmesi, sistemin her bileşeninin uyum içinde çalışması ve tüm gereksinimlerin karşılanması, projenin başarıyla tamamlanabilmesi için kritik öneme 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 23 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 VIII

Bakır Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Barış DOĞAN[1]
Özgür ÖZGÜN[2]
Zülküf BALALAN[3]
Ömer EKİNCİ[4]

Giriş

İnsanların bulduğu en eski metallerden biri olan bakır, yaklaşık 10.000 yıldır kullanılmaktadır. Bronz ve pirinç gibi bakır ve bakır

[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

alaşımları Yunanlılar, Mısırlılar, Çinliler, Romalılar ve Sümerler de dahil olmak üzere çeşitli eski medeniyetlerde hem dekoratif hem de 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 dönemli bir malzeme olmaya devam etmesi beklenmektedir (ASM, 2001). Bakır matrisine seramik parçacıkları eklenerek bakırın mukavemeti arttırılabilir. 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

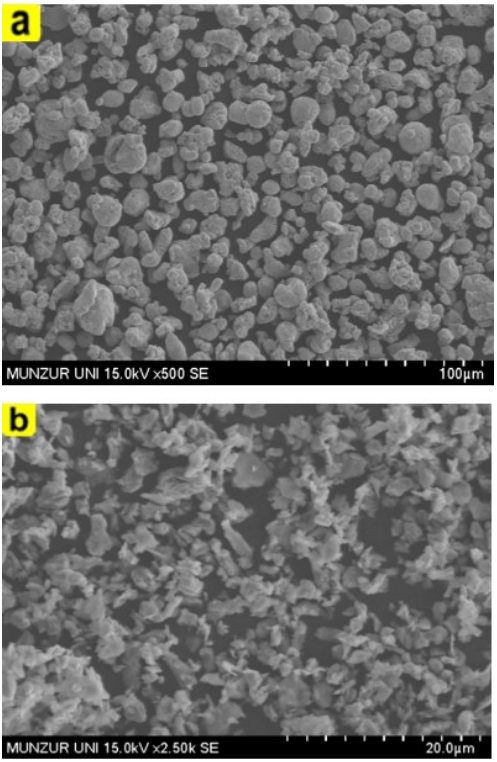
mühendislikte temel bir problem haline gelmiştir (Torquato, 2000). 20. yüzyılın ilk yarısında başlayan modern kompozitler üzerindeki çalışmalar, geleneksel malzemelerin sunduğu özelliklerin yetersiz kalmasıyla artan teknoloji talepleri nedeniyle günümüze kadar sürekli büyümüştür ve teknolojinin gelişen 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

Deneylerde 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

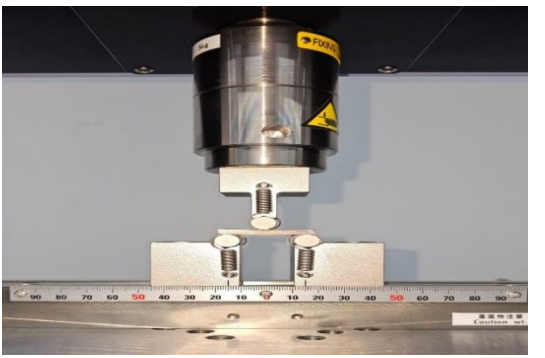
Şekil 3: SPS makinesi

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'luk 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 (λ=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.

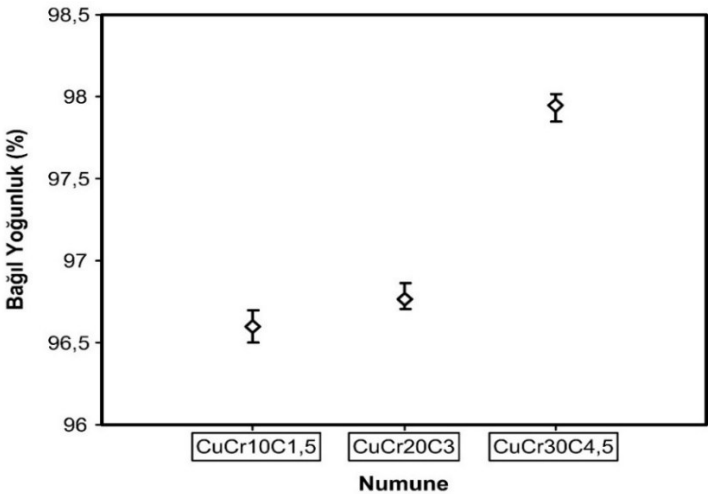
Sonuçlar ve Tartışma

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 bağıl yoğunluk değerlerinin arttığı bildirilmiştir (Özgün&Erçetin, 2017). Söz konusu çalışmada ağırlıkça %40 Cr ve %4 C takviye edilen kompozitte %95,1 bağıl yoğunluğa ulaşıldığı belirtilmiştir. Tez çalışmasında spark plazma sinterleme yöntemi sayesinde daha düşük Cr-C ilavelerinde bile daha yüksek bağıl yoğunluklara ulaşılmıştır.

Tablo 2: Üretilen kompozitlerin teorik ve ölçülen yoğunluk değerleri

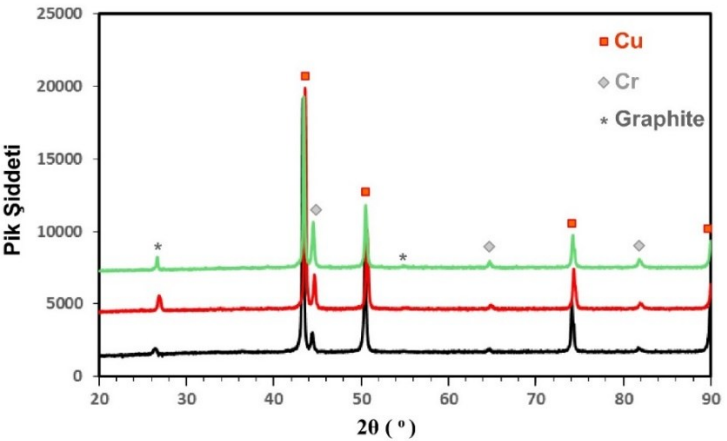
Numune	**Teorik Yoğunluk ($g.cm^{-3}$)**	**Ölçülen Yoğunluk ($g.cm^{-3}$)**
Cu-Cr10-C1,5	8,2784	7,9969
Cu-Cr20-C3	7,708	7,45883
Cu-Cr30-C4,5	7,2111	7,06306



Şekil 6: Üretilen kompozitlerde ile elde edilen bağıl yoğunluk değerleri

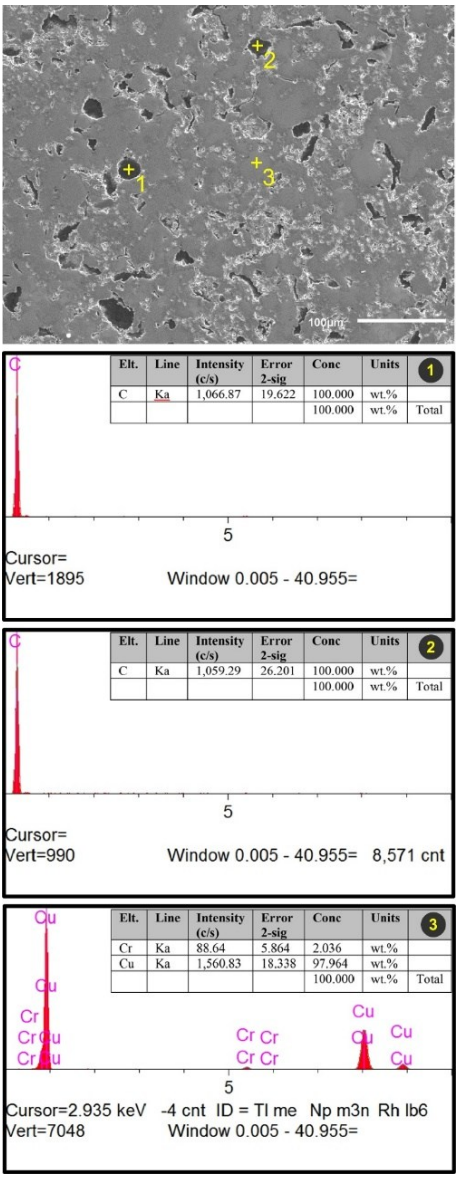
Şekil 7'de üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde her üç numunenin de kırınım desenlerinde Cu, Cr ve grafit olmak üzere sadece üç faz bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada her ne kadar Cu içerisine Cr ile birlikte C ilave edilerek mikroyapıda karbür bileşikleri 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.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	1
C	Ka	1,066.87	19.622	100.000	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

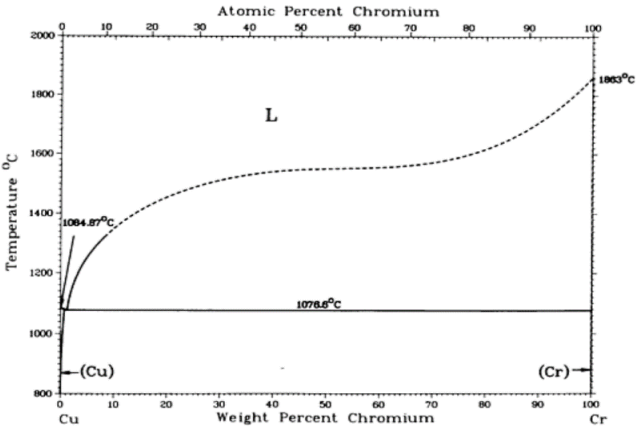
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	2
C	Ka	1,059.29	26.201	100.000	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	3
Cr	Ka	88.64	5.864	2.036	wt.%	
Cu	Ka	1,560.83	18.338	97.964	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

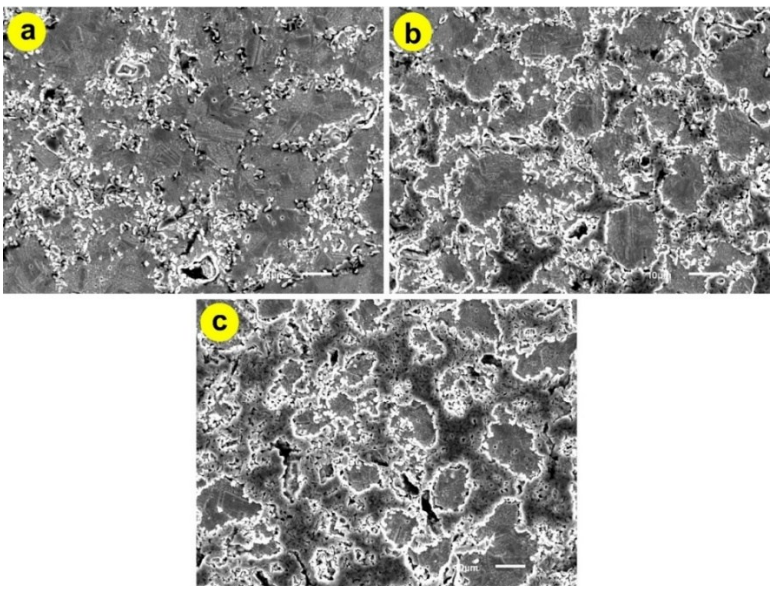
Şekil 8: CuCr30C4,5 numunesinden dağlama işlemi öncesi alınmış SEM/EDS nokta analizi

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.

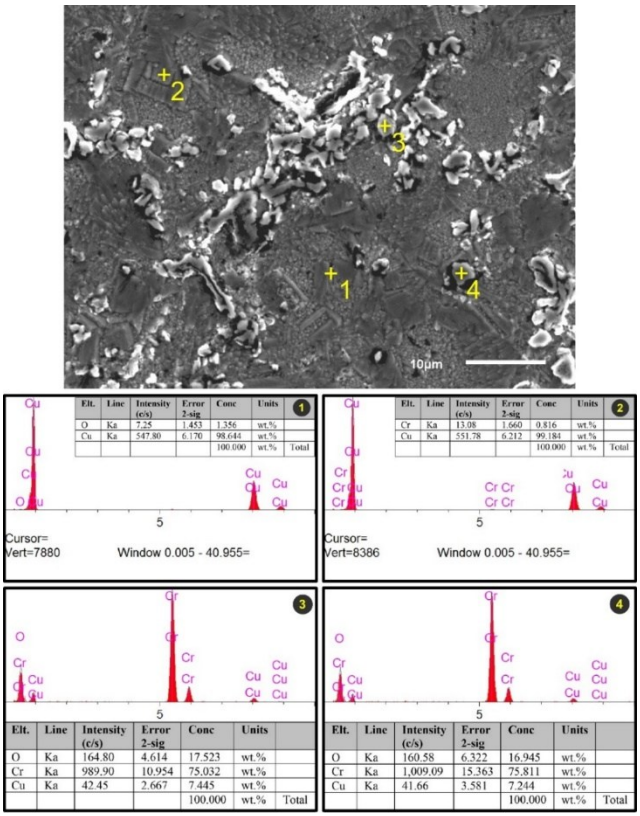


Şekil 9: Cu Cr faz diyagramı (Chakrabarti & Laughlin, 1984)



Şekil 10: Numunelerin SEM görüntüleri; a) CuCr10C1,5, b) CuCr20C3, c) CuCr30C4,5

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 içerinde 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 çözeltinin 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 bileşeninin 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.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	7.25	1.453	1.356	wt.%	
Cu	Ka	547.80	6.170	98.644	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
Cr	Ka	13.08	1.660	0.816	wt.%	
Cu	Ka	551.78	6.212	99.184	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

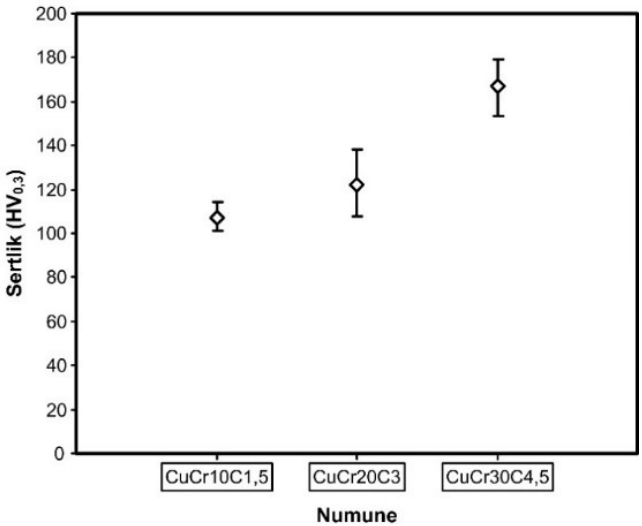
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	164.80	4.614	17.523	wt.%	
Cr	Ka	989.90	10.954	75.032	wt.%	
Cu	Ka	42.45	2.667	7.445	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
O	Ka	160.58	6.322	16.945	wt.%	
Cr	Ka	1,009.09	15.363	75.811	wt.%	
Cu	Ka	41.66	3.581	7.244	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

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

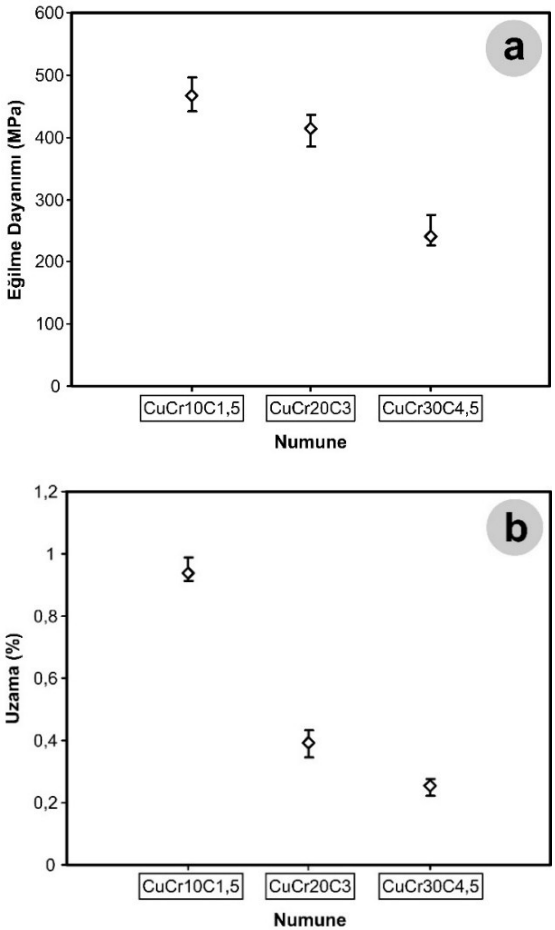
tarafından oluşturulmuş karbür ve nitrür bileşikleri olduğu bildirilmiştir (Özgün&Erçetin, 2017). Şimdiki çalışmada da karbür bileşikleri oluşturularak sertlik ve mukavemetin artırılması hedeflenmiştir. Fakat 900oC'de ve 35 MPa basınç altında gerçekleştirilen SPS işlemi sonucu böyle bir bileşik oluşturulamamıştır. 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

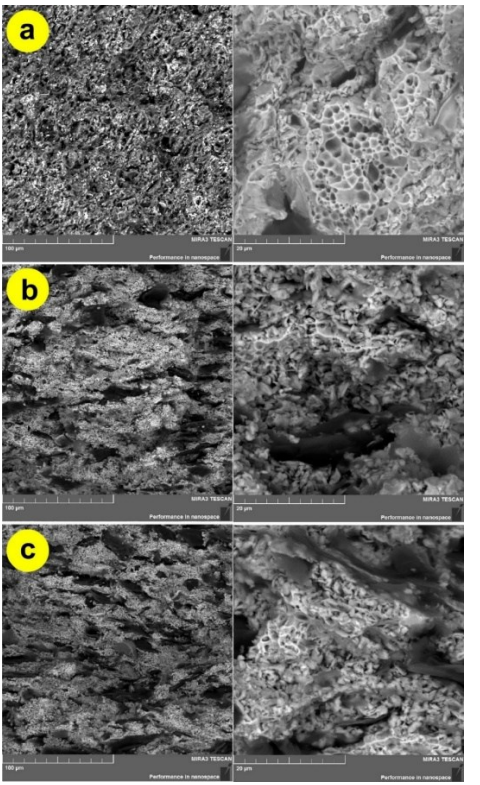
sinterleme yöntemiyle ürettikleri grafit takviyeli Cu matrisli kompozitlerde en yüksek eğilme mukavemetinin 223 MPa olarak %3 grafit takviye edilen kompozitte elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Artan grafit takviye oranının eğilme mukavemetini azalttığını bildirmişlerdir (Wang&ark., 2013). (Chang&ark., 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 üretnişlerdir. 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 CuCr10C1,5 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 kompozisyolar 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 işlemi 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 ayrık 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 ulaşılmıştır. 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. & Lın J. H. & Lın S. J. & Theo Z. K. (1999). Processing Copper and Silver Matrix composites by Electroless Plating and Hot Pressing, Metallurgıcal and Materials Transactıons 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. & Altinsoy, 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-Sıtu Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensitütüsü.

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 Technologyfor High-Strength Applications, Journal of MaterialsScience, 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 İnjection 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 İmprove 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 IX

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Kar Üfleme Aracında Kullanılan Çark Yapısının Fan Performansına Etkisi

Gökhan KOCA[1]
Göktürk Memduh ÖZKAN[2]

1. Giriş

Günümüzde, dünyada 8 milyar insan yaşamakta ve her insanın günlük ortalama 1,03 kg atık bıraktığı varsayılmaktadır. Ayrıca hızlı kentleşme, teknolojinin hızla ilerlemesi doğal kaynaklarımızı tehdit etmekte ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Fakat çevre hakkının, en temel insan haklarından biri olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle çevrenin korunmasına yönelik yapılacak her aktivite ve atılacak her adım insanlık yararına yapılmış olacaktır. Sağlıklı bir toplum

[1] Ar&Ge Süpürge Ekip Lideri, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., Ar&Ge Müdürlüğü Mersin/Türkiye, Orcid: 0009-0004-8290-1781, gokhan.koca@koluman.com
[2] Doçent Dr., Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3698-2486, gmozkan@cu.edu.tr

oluşturulmasının yolu, çevre sorunlarının çözülmesiyle mümkün olacağı günümüzde kabul görmüş bir gerçektir.

Çevre kirliliğine neden olan atıkların, atık yönetim sistemi ile bertaraf edilmesi konusu önemini sürekli arttırmaktadır. Atık yönetimi konusunda kamu kurumlarının üzerine düşen görevler bulunmaktadır. Kamu kurumları, özellikle temizlik konusunda çeşitli bölümler ile atık yönetimi konularında uzmanlaşarak görevlerini yerine getirmektedirler. Bu konu özelinde, belediyeler ve havalimanı işletmeciliğini yapan kurumlar, çevre temizliğinde görevlendirmek üzere, taşıyıcı bir kamyon üzerine monte edilmiş yol ve pist süpürgesi araçları ile kar küreme, üfleme araçları temin etmektedirler. Temin edilen bu araçlar çevresel sorunların merkezinde yer alan ve yaşam döngüsü ile gelişimin temel unsurlarından biri olan enerji tüketimi gerçekleştirmektedir.

Sanayi, ulaşım ve binalar enerjinin ana tüketim alanlarını oluşturmaktadır. Günümüzde, dünya enerji tüketiminin yaklaşık %90'ı fosil yakıtlardan (kömür, petrol, doğal gaz) sağlanmaktadır. Önemli teknolojik atılımlar gerçekleşmediği sürece, fosil yakıtlara olan bu bağımlılığın yakın gelecekte devam etmesi beklenmektedir. Bu yakıtların yakılması, atmosfere CO_2, CO, SO_2 ve NO_x gibi emisyonlar salarak sera etkisine yol açmakta ve dünyanın ekolojik dengesini bozmaktadır. Bunun sonucunda emisyonlar ve diğer atıklar artmakta, doğal kaynaklar tükenmekte, hava ve su kirliliği yükselmektedir. Ayrıca, enerjiye olan talebin artmasıyla birlikte bilinen fosil yakıt rezervleri azalmaktadır ve bu kaynaklar artan talebi karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu durum, yakıt fiyatlarının artmasına ve/veya dalgalanmasına neden olmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için dünya genelinde enerji

verimliliğini artırma ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırma yönünde yoğun çabalar bulunmaktadır. Ancak, bu süreç nispeten yavaş ilerlemektedir.

Enerji sürdürülebilirliği, gerekli enerjinin sürekli bir şekilde, finansal, çevresel ve sosyal maliyetlerle sağlanmasını mümkün kılan politika, teknoloji ve uygulamalar bütünüdür. Bu, enerji üretimi ve kullanımının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmeyi ve ekonomik açıdan uygun çevre dostu stratejiler geliştirmeyi gerektirir. Sürdürülebilir kalkınmanın üç temel bileşeni olan kaynakların korunması (enerji, su vb.), çevrenin korunması ve ekonomik uygunluk, bu hedeflere ulaşmak için birlikte çalışmalıdır.

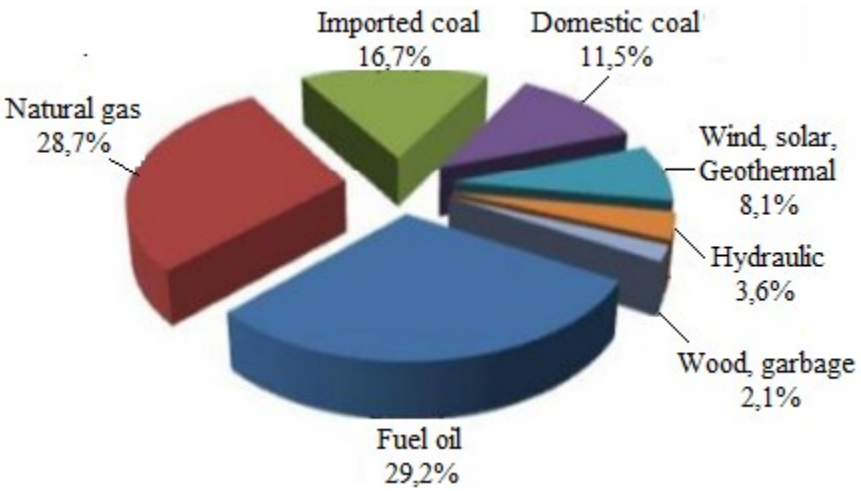
Küresel Enerji Tüketimindeki Eğilimler 2022 yılında, küresel enerji tüketimindeki büyüme yavaşlamış, ancak 2010-2019 yılları arasındaki ortalamanın üzerinde kalmıştır. Dünya'nın en büyük ekonomilerinde enerji tüketimi yavaşlarken, güçlü ekonomik büyüme gösteren ülkelerde artış gözlemlenmiştir. Öte yandan, Avrupa'da birincil enerji tüketimi azalmıştır. Bunun nedeni, hem sanayi hem de konut tüketicilerinin, yükselen enerji maliyetleri ve Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle meydana gelen ılıman hava koşulları nedeniyle enerji talebini azaltmaya teşvik edilmesidir. Dünya enerji talebini karşılayan birincil enerji kaynaklarını ve bunların neden olduğu CO_2 emisyon miktarları Tablo 1.1'de gösterilmektedir (Enerdata, 07.01.2024).

Tablo 1.1 Dünya Enerji Talebinin Gelişimi

	Küresel Dünya				
				Politik	
	2000	2017	2018	2025	2040
Kömür	2,217	3,718	3,772	4,165	5,045
Akaryakıt	3,519	4,607	4,662	4,815	5,477
Doğal Gaz	2,158	3,142	3,309	3,514	4,682
Nükleer	585	597	611	839	997
Hidro Elektrik	617	920	949	409	513
Diğer Yenilenebilir		490	561	1,948	2,584
TOPLAM	9,095	13,475	13,865	15,690	19,298
Fosil Yakıt%	87	85	85	80	79
Akaryakıt %	39	34	34	31	28
CO2 emisyonu Milyon ton CO3	23,668	33,243	33,891	35,000	43,000

Kaynak : Enerdata, 07.01.2024

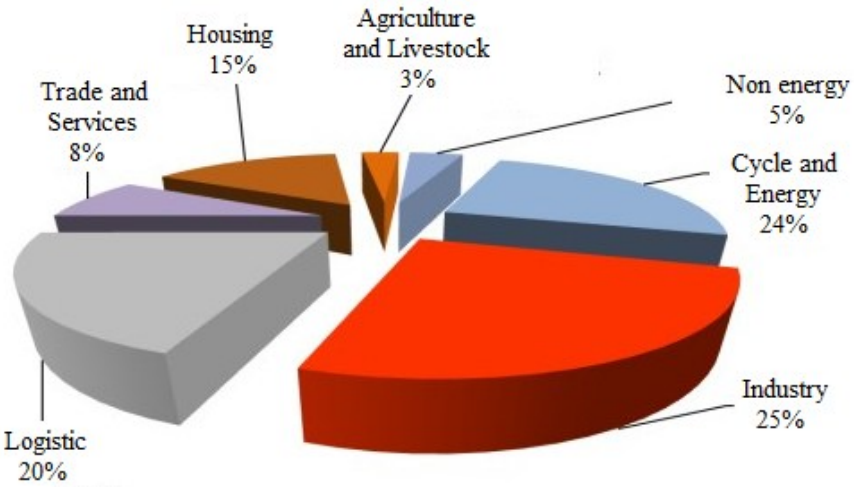
Türkiye'de birincil enerji arzı Şekil 1.1'de gösterildiği gibi gerçekleşmiştir. 2018 yılında 143,7 milyon ton eşdeğer petrol (TEP) olarak gerçekleşmiştir. Birincil enerji talebinde doğal gazın payı %28,7, kömürün %28,4, petrolün %29,2, hidrolik enerjinin %3,6 ve hidrolik olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının %12,2 olmuştur (Aydın, 2020).



Şekil 1.1. Birincil enerji arzı gelişiminin kaynaklara göre dağılımı

Kaynak : Aydın, 2020

Birincil enerji arzımızın sektörlere göre dağılımı incelendiğinde, %25'inin sanayide, %24'ünün konut ve hizmet sektöründe, %23'ünün ulaştırmada, %23'ünün dönüşümde, %4'ünün enerji dışı kullanımda ve %3'ünün tarım ve hayvancılık sektöründe kullanıldığı görülmektedir. (bkz. Şekil 1.2.) Hâlihazırda petrol için %93, doğal gaz için %99 olan dışa bağımlılık oranının önümüzdeki yıllarda da yaklaşık aynı seviyelerde devam edeceği tahmin edilmektedir. (Aydın, 2020).



Şekil 1.2. Birincil enerji tüketiminin sektörel dağılımı

Kaynak : Aydın, 2020

Bu çalışmanın amacı, kamu kurumlarının, özel sektör firmalarının, havalimanı işletmelerinin kullanmakta olduğu süpürge araçlarının sahip olduğu ve mühendislik hesaplamalarıyla sürekli geliştirilen merkezkaç fanları ile çevre temizliği konusunda kısa sürelerde büyük alanları temizlemede başarı sağlarken tüketmekte olduğu enerji miktarının azaltılarak dış kaynak ihtiyacını minimalize etmektir.

1.1. Fan

AMCA Standardı 99-0066'ya göre, hava veya gaz taşımak için kullanılan, enerjiyle çalışan pervaneler birer cihaz olarak tanımlanır. Fan, genellikle ahşap, plastik veya metalden yapılmış kanat ya da pervanelerin bir araya gelmesiyle oluşan dönen bir düzenektir. Bu düzenek, havaya etki ederek hava akışı sağlar. Kanat ve göbekten oluşan bu dönen yapı, "pervane," "rotor" veya "koşucu" olarak

adlandırılır ve genellikle bir muhafaza veya kasa içerisinde yer alır (Encyclopædia Wikipedia, Erişim: 07.01.2023).

Fanlar; bina havalandırma sistemleri, demir-çelik, cam, çimento, ahşap sanayii, otoyol ve demiryolu tünel havalandırmaları, rüzgâr tünelleri, taşımacılık, otomotiv ve endüstriyel havalandırma gibi pek çok sektörde kullanılır. Ayrıca, havalimanlarındaki pistlerin, apronların ve taksi yollarının temizlenmesinde, belediyelerde bulvar, cadde ve sokakların temizliğinde, pazar yerleri ve özel işletmelerin iç mekânlarının temizliğinde de yaygın olarak tercih edilir.

Fanların tahrikinde kullanılan enerji kaynakları sektörlere göre farklılık göstermektedir. Sanayi sektöründe genellikle elektrik motorları tercih edilirken, mobil uygulamalarda endüstriyel tip dizel motorlar yaygındır. Örneğin, kar küreme ve yol süpürme gibi uygulamalarda dizel motorlar kullanılmaktadır. Dizel motorlar, fosil enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Bu enerji, iki farklı yöntemle fan sistemlerine aktarılabilir:

1. Doğrudan Aktarım: Mekanik enerji şaft aracılığıyla doğrudan fan pervanesine bağlanır ve pervane bu enerjiyle döner.
2. Hidrolik Enerji Dönüşümü: Dizel motor volanına bir hidrolik pompa takılarak mekanik enerji hidrolik enerjiye dönüştürülür. Hidrolik pompa, mekanik enerjiyle hidrolik yağı sıkıştırarak basınçlı hale getirir. Bu basınçlı hidrolik yağ, hortum ve bağlantılar aracılığıyla fan tekerleğine bağlı hidrolik motora iletilir. Hidrolik motor ise bu hidrolik gücü

tekrar mekanik güce çevirerek pervaneye aktarır. Böylece pervane dönmeye başlar.

Enerji tüketiminde güncel durum: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre, Türkiye'nin 2022 yılı elektrik enerjisi tüketimi bir önceki yıla kıyasla %0,5 azalarak 331,1 TWh seviyesine gerilemiştir. Aynı dönemde elektrik üretimi ise %1,9 düşüşle 328,3 TWh olarak gerçekleşmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 08.01.2023).

Fanlarda enerji verimliliği: Fanlar, ömürleri boyunca ilk yatırım maliyetlerinin katbekat fazlası kadar enerji tüketmektedir. Bu nedenle, fan seçiminde yalnızca ilk yatırım maliyeti değil, aynı zamanda enerji tüketimi ve işletme maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Enerji verimliliği, fan seçimi, üretim süreçleri ve işletim yöntemlerinin optimize edilmesiyle sağlanabilir. Bir işletme için en uygun fan, yalnızca düşük maliyetli olan değil, uzun vadede enerji tüketimini minimize eden bir tasarıma sahip olan fandır. Bu doğrultuda, fanların ömür boyu maliyet analizine dayalı olarak seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Bulgurcu, 2015).

1.1.1.Fan Çeşitleri

Fanlar farklı şekillerde sınıflandırılabilir (Bleier, 1985):

- Eksenel fanlar,
- Santrifüj fanlar,
- Eksenel-santrifüj fanlar,
- Çatı tipi fanlar,
- Çapraz akışlı üfleyiciler,

- Vorteks veya rejeneratif fanlar.

Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar Eksenel Fanlar ve Santrifüj Fanlar olup, aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

1.1.1.1 Eksenel Fan

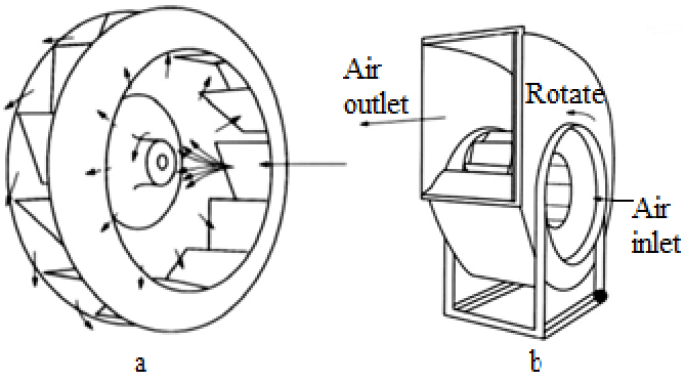
Eksenel fanlar, akışkanın yönünü değiştirmeden, fan pervanesiyle aynı eksende hareket ettiği fan türleridir. Diğer bir deyişle, akışkanın pervane çıkışındaki akışı, mil eksenine paralel bir şekilde gerçekleşir. Bu fanlar genellikle yüksek debi ve düşük basınç gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Ancak, yüksek ses seviyelerine sahiptirler.

Kullanım alanına bağlı olarak farklı gövde yapılarıyla üretilirler; örneğin, kanal tipi, duvar tipi veya çatı tipi gibi çeşitleri bulunmaktadır. Çok geniş bir kullanım alanına sahip olmalarına rağmen, en yaygın olarak egzoz fanı olarak kullanılırlar.

Şekil 1.3. Eksenel fan

1.1.1.2 Santrifüj Fan

Santrifüj fanlar, akışkanın pervaneden çıkışının mil eksenine dik, yani radyal yönde gerçekleştiği fan türleridir. Bu fanlar, yüksek akış direncini aşmak için kullanılır. Genellikle yüksek basınç ve düşük debi gerektiren uygulamalarda tercih edilirler.



Şekil 1.4. Sanrifüj fan (a) çark, (b) salyangoz

Santrifüj fanlar, endüstriyel uygulamalara bağlı olarak avantaj ve dezavantajları bulunan, farklı kanat şekillerine sahip 6 farklı tipte olabilir. Bu tipler şunlardır:

AF (airfoil / hava folyosu),

BC (backward-curved / geriye eğimli),

BI (backward-inclined / geriye yatık),

RT (radial-tip / radyal uçlu),

FC (forward-curved / ileri eğimli),

RB (radial blade / radyal kanatlı) (Bleier, 1985).

Her bir tür, kullanım amacına ve ihtiyaçlara göre farklı avantajlar sunar.

Şekil 1.5. Santrifüj fanlarda maksimum verimlilik sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan altı farklı kanat şekli

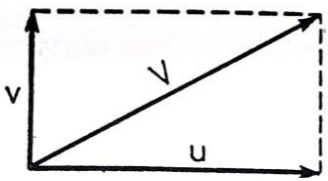
Kaynak : Bleier, 1985

2. Materyal ve Method

Austin Church, sıkıştırılabilirlik, sıcaklık, basınç değişimleri ve kayıplar gibi faktörleri göz önünde bulundurarak fan tasarımı çalışmalarında bir öncü olmuştur (Church, 1947).

2.1. Hız Diyagramı

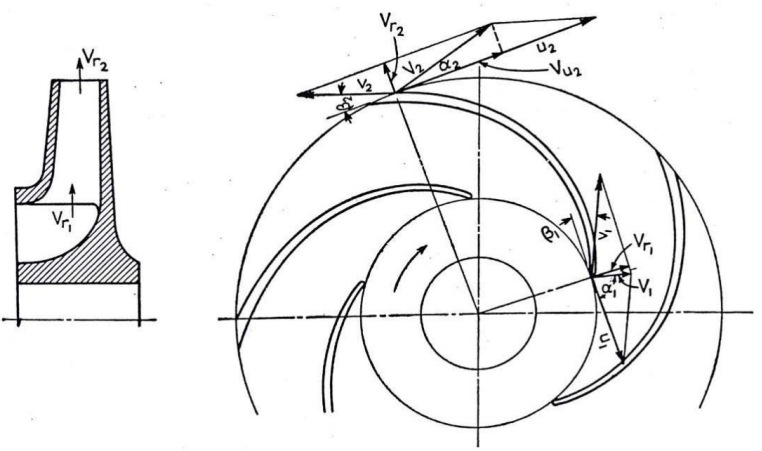
Rotor içerisindeki akışı anlayabilmek için, hareketli nesnelerin hızları arasındaki farkı iyi kavrayabilmek gereklidir. Burada iyi bilinmesi gereken iki kavram bulunmaktadır: "göreli hız" ve "mutlak hız".



Şekil 2.1. Göreceli ve mutlak hız diyagramı

Kaynak : Church 1947

Bir dönen pervane için, u, pervanedeki bir noktanın yere göre hızını, v, akışkanın pervane ile göreli hızını ve V, akışkanın mutlak hızını ifade eder. Benzer şekilde, geriye eğimli kanat yapısına sahip bir pervaneye ait hız üçgenlerini çizdiğimizde, Şekil 2.2.'deki durumu görürüz. Burada yalnızca radyal hızlar V_r ile gösterilmiştir. Şekil 2.3'ün sol tarafındaki resim, sağdaki pervanenin kesitini göstermektedir. Akışkan, pervaneye eksene paralel olarak girer, dönüş yaptıktan sonra 90° döner ve eksene dik bir hız olan V_{r1} ile pervane kanadına girer. Daha sonra, eksene dik olarak (sağdaki resimde merkezden dışa doğru) devam eden akış, santrifüj kuvvetinin etkisiyle, pervane çıkışında V_{r2} hızına ulaşır.

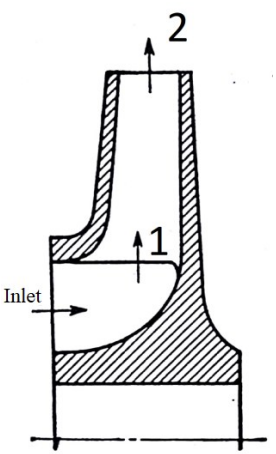


Şekil 2.2. Geriye yatık kanatlı pervane için giriş ve çıkış hız diyagramları

Kaynak : Church 1947

Akışın pervane ile ilk karşılaştığı bölge nokta 1 olarak adlandırılırken, pervaneden çıktığı bölge nokta 2 olarak adlandırılır. İlk olarak, dönüş hızından kaynaklanan tanjant hızına "u_1" denir. Pervanenin şekli nedeniyle bu hızla belirli bir açı yapan ve akışkanı yönlendiren, pervane kanadına tangensiyel hız olan "v_1" ise, "β_1" açısıyla tanımlanır. Bu iki vektörel hızın birleşimi ise "V_1"'dir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, "V_1" hızının "u_1" vektörüyle yaptığı açı "α_1" olarak adlandırılır. Aynı yöntem nokta 2'de uygulandığında, hız üçgeni Şekil 2.3'de gösterildiği gibi oluşur.

Son olarak, santrifüj kuvvetinin etkisiyle oluşacak olan "V_r" hız bileşenleri, dönüş eksenine dik ve dışa doğru yerleştirilerek hız üçgenleri tamamlanır. Akışkanın dönen pervane üzerindeki hareketi sırasında oluşan hız üçgenlerinin yerleri, Şekil 2.3'de pervane kesitinde gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Çark kesiti

Kaynak : Church 1947

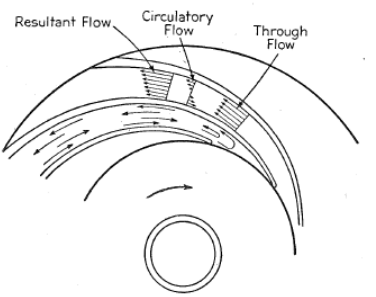
Hız diyagramındaki sembollerinin tanımları:

- u_1: Pervane kanadının girişindeki noktanın yere göre tanjant hızı
- v_1: Akışkanın pervane kanadının girişindeki noktasının, pervane ile göreli hızı
- β_1: u_1 ve v_1 yönleri arasındaki açı
- V_1: Akışkanın pervane kanadının girişindeki noktasının mutlak hızı (yere göre)
- α_1: V_1 ve u_1 vektörleri arasındaki açı
- V_{r1}: V_1'in radyal bileşeni (V_1'in eksene dik bileşeni)
- V_{u1}: V_1'in aksiyel bileşeni (V_1'in eksene paralel bileşeni)
- u_2: Pervane kanadının çıkışındaki noktanın yere göre tanjant hızı
- v_2: Akışkanın pervane kanadının çıkışındaki noktasının, pervane ile göreli hızı
- β_2: u_2 ve v_2 yönleri arasındaki açı
- V_2: Akışkanın pervane kanadının çıkışındaki noktasının mutlak hızı (yere göre)
- α_2: V_2 ve u_2 vektörleri arasındaki açı
- V_{r2}: V_2'in radyal bileşeni (V_2'nin eksene dik bileşeni)
- V_{u2}: V_2'in aksiyel bileşeni (V_2'nin eksene paralel bileşeni)

2.2. Kayıplar

Teorik formüllerin uygulanmasında bazı varsayımlar yapılır; bunlar arasında sürtünmesizlik, türbülanssızlık ve akışkanın tamamen kanatlara uygun şekilde hareket ettiği (sonsuz sayıda kanat olduğu varsayımı) kabulü yer alır. Ancak gerçekte, fanlarda sürtünme, türbülans, disk sürtünmesi, sızıntılar ve mekanik kayıplar gibi kayıplar mevcuttur. Bu kayıpların belirlenmesi ve formülize edilmesi ile ilgili çalışmalarda, birçok araştırmacı CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanarak etkilerini incelemiştir. Stodola (Stodola, 1945), pervane kanatları arasındaki akış üzerinde pervane dönüşünün etkisini formüle eden ilk kişiydi.

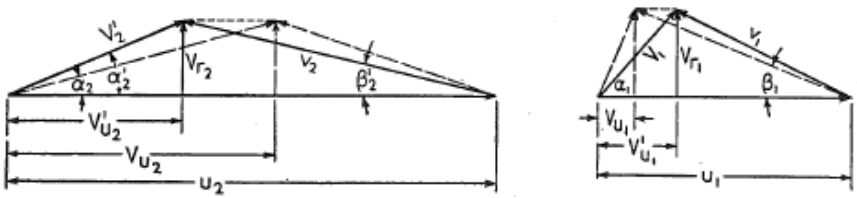
Şekil 2.4'te, üstteki iki kanat arasındaki bölgedeki "Doğru Akış" ile gösterilen vektörler, bu kanatlar arasındaki akışkanın dönüş etkisi olmadan hareketini gösterir. "Dönme Akışı" ile gösterilen vektör, alt iki kanat arasındaki bölgede dönüş etkisini tanımlayan vektördür. Kombine akış, doğru akış ve dönüş akışının birleşim vektörüdür.



Şekil 2.4. Dönel akış, düz akış ve birleşimi

Kaynak : Church 1947

Çark giriş ve çıkış bölgelerinde meydana gelen hız üçgenleri Şekil 2.4'de gösterilen dönme etkisi ile değişmektedir. Değişen hız üçgenleri Şekil 2.5'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Dolaşım akışı düzeltmesi ile giriş ve çıkış hız diyagramları

Kaynak : Church 1947

Stodola'ya göre, hız üçgenindeki teğet çıkış hızı vektörü V_{u2}, bahsedilen dönme etkisinden dolayı W_z kadar azalır. Bu miktar aşağıdaki formül ile bulunur (Stodola, 1945).

$$Wz = \frac{\pi u2 \sin \beta 2}{z} \qquad (2.1)$$

Wz : *Akıştan dolayı oluşan kayıp*

Π : *Pi sayısı*

u_2 : *Bıçak çıkış tanjant açısı*

β_2 : *Bıçak çıkış açısı*

z : Kanat sayısı

Bu formül daha sonra Kearton'un (Kearton, 1942) deneyleriyle doğrulanmıştır. Kearton'un yaptığı deneyler, pervane dönüşü ve hız

üçgenlerinde meydana gelen değişiklikler ile ilgili sonuçları doğrulamıştır. Bu ve benzeri diğer kayıplar (sürtünme, türbülans, disk sürtünmesi, sızıntı kayıpları, mekanik kayıplar vb.) tasarım metodolojisi sırasında dikkate alınmalıdır.

2.3. Tasarım Metodolojisi

Tasarım yöntemi 6 adımdan oluşmaktadır. Bunlar; çark tasarımı, salyangoz tasarımı, kayıplar (hidrolik kayıplar, sızdırmazlık kayıpları ve güç kayıpları), verimler, fanı döndürmek için gereken ideal mil gücü ve mil çapı hesaplamasıdır (Church, 1947).

2.3.1 Çark Tasarımı

Hacimsel debi sabit kalırken, yoğunluk sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişeceği için kütlesel debi de buna bağlı olarak değişecektir. Havanın yoğunluğu, termodinamiğin 1. yasasındaki ideal gaz denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$\rho_{atm}=\frac{P_{atm}}{RT_{atm}} \quad (2.2)$$

ρ_{atm} : *Density of air at atmospheric Pressure [kg/m^3]*

P_{atm} : *Atmospheric Pressure [Pa]*

R: Ideal gas constant [Nm/molxK]

T_{atm} : *Temperature of Fluid in Kelvin at Atmospheric Pressure [K]*

Çark merkezinden, akışkanın çarkın iç kısmından dış kısmına doğru hareket ederken çarka ilk temas ettiği noktaya olan mesafeye iç bölme çemberi, çark merkezinden akışkanın çarktan ayrıldığı noktaya olan mesafeye ise dış bölme çemberi denir. Emme tarafındaki akış hızına dik olan kanal kesit hızı (V kanal) için bir tahmin yapılır ve istenilen debide fanın süreklilik denklemi kullanılarak emme kanal kesit çapı şu şekilde hesaplanır.

$$D_{channel}=\sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{channel}}} \quad (2.3)$$

Düşüyü hesaplamak için Bernouilli denklemi kullanılır.

$$H=\frac{P}{\rho}+\frac{V^2}{2g}+z \rightarrow H=\frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

H : Düşü (m)

Çarktaki havanın enerjisi aşağıdaki denklemle elde edilir.

$$H=\frac{V_{inlet}^2}{2g} \quad (2.5)$$

Mutlak statik basınç;

$$P_{giriş} = P_{atm} - P_{statik} \quad (2.6)$$

Patm : Atmosferik Basınç [Pa]

Pgiriş : Giriş Basıncı [Pa]

Pstatik : Statik Basınç [Pa]

$$\varepsilon_p = \frac{P_{inlet}}{P_{atm}} \quad (2.7)$$

ε_p *: Basınç oranı*

İdeal gaz denklemi;

PV=mRT

(2.8)

P: Mutlak Basınç *[Pa]*

V: Hacim *[m3]*

m *: Hava ağırlığı* *[g]*

R: Hava sabiti *[J/Kmol]*

T: Mutlak Sıcaklık *[K]*

$$w = -\int_a^b vdP$$

(2.9)

$$Pv^k = C = constant$$

(2.10)

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

(2.11)

w *: iş*

cp *: Sabit basınçta özgül ısı* *[J/gK]*

cv *: Sabit hacimde özgül ısı* *[J/gK]*

P: Statik Basınç *[Pa]*

v : Hava hızı *[m/s]*

c : sabit *[-]*

Amerikan Makine Mühendisleri Derneği (ASME) standartlarına göre santrifüj kompresörlerde hava için %36 nem oranı ve 68 °F sıcaklık esas alınır (Church, 1947).

k=1,3947

$$P_b V_b^k = P_a V_a^k$$

(2.12)

$$P_b = P_a \left(\frac{V_a}{V_b}\right)^k = \frac{WRT_b}{V_b}$$

(2.13) $V_b = V_a \left(\frac{P_a}{P_b}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{WRT_b}{P_b}$

(2.14)

$$T_b = \frac{T_a P_b V_a \left(\frac{P_a}{P_b}\right)^{\frac{1}{k}}}{P_a V_a} = T_a\left(\frac{P_b}{P_a}\right)\left(\frac{P_a}{P_b}\right)^{\frac{1}{k}} = T_a\left(\frac{P_b}{P_a}\right)\left(\frac{P_b}{P_a}\right)^{-\frac{1}{k}} = T_a\left(\frac{P_b}{P_a}\right)^{1-\frac{1}{k}}$$

$$T_b = T_a\left(\frac{P_b}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad (2.15)$$

$$\frac{k-1}{k} = 0.283$$

(2.16)

$$T_{inlet} = T_{atm}\left(\frac{P_{inlet}}{P_{atm}}\right)^{0.283}$$

(2.17)

$$T_{inlet} = T_{atm}(\varepsilon_{pinlet})^{0.283} \ (^0K) \qquad (2.18)$$

$$\rho_{inlet} = \frac{P_{inlet}}{RT_{inlet}} \ (Kg/m^3) \qquad (2.19)$$

$$Q_{inlet} = \frac{\dot{m}}{\rho_{inlet}} \qquad (m^3/s)$$

(2.20)

$$Q_{inlet} = V_{inlet}\frac{\pi D^2}{4}$$

$$D_{inlet} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} x \sqrt{\frac{Q}{V_{inlet}}}$$

(2.21)

Church'e göre kanat giriş çapı daha büyük olmalıdır.

$$D_1 = 1.02D_{inlet} \quad (2.22)$$

$$u_1 = \frac{\pi D_1 N}{60}$$

(2.23)

D_1 : Kanat giriş çapı (m)

N : Çark devri (rpm)

Church'e göre kanat giriş radyal hızı V_1 %5 $V_{giriş}$'ten fazla olmalıdır.

$$V_1 = V_{r1} = 1.05V_{inlet}$$

(2.24)

$$\tan\beta_1 = \frac{V_{r1}}{u_1}$$

(2.25)

$$v_1^2 = (u_1^2 + V_1^2)^{\frac{1}{2}}$$

(2.26)

$$A_1 = \frac{1.03\ Q_{inlet}}{V_1}$$

(2.27)

Kanat giriş bölgesindeki kanat kalınlıklarını dikkate alarak bir kalınlık düzeltme faktörü ($\acute{\varepsilon}_1$) tanımlamak için, kanat kalınlıklarının

alanlarını kanat giriş alanından çıkararak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$A_1\dot{\varepsilon}_1 = A_1 - \frac{t}{\sin\beta_1} b_1 Z \qquad (2.28)$$

$\acute{\varepsilon}_1$: Kanat giriş alanı kalınlık düzeltme faktörü

b_1 : Kanat giriş kalınlığı (m)

t : Kanat kalınlığı (mm)

β_1 : Kanat giriş açısı (^{0})

Z : Kanat sayısı

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{A_1}{A_1} - \frac{tb_1 Z}{\sin\beta_1 A_1} = 1 - \frac{tb_1 Z}{\sin\beta_1(\pi D_1 b_1} = 1 - \frac{tZ}{\sin\beta_1 \pi D_1}$$

(2.29)

$$b_1 = \frac{A_1}{\pi D_1 \dot{\varepsilon}_1}$$

(2.30)

$$w = \frac{kR(T_{inlet} - T_2)}{k-1} = \frac{kRT_{inlet}}{k-1}\left[\left(\frac{P_2}{P_{inlet}}\right)^{k-1/k} - 1\right]$$

(2.31)

$$\frac{w}{v_{inlet}} = H_{ad}$$

(2.32)

$$H_{ad} = \frac{\frac{kRT_{inlet}}{k-1}\left[\left(\frac{P_2}{P_{inlet}}\right)^{k-1/k} - 1\right]}{\frac{RT_{inlet}}{P_{inlet}}} = \frac{P_{inlet}}{\frac{k-1}{k}}\left[\left(\frac{P_2}{P_{inlet}}\right)^{k-1/k} - 1\right]$$

(2.33)

$$\epsilon_{p_{impeller}} = \frac{P_2}{P_{inlet}}$$

(2.34)

$$H_{ad} = \frac{RT_{inlet}}{0.283g}\left[\epsilon_{P_{impeller}}^{0.283} - 1\right]$$

(2.35)

$$H_{ad} = \frac{K' u_2^2}{g}$$

(2.36)

$$u_2 = \frac{\pi D_2 N}{60}$$

(2.37)

H_{ad} : Adyabatik Düşü [m]

u_2 : Kanat çıkış hızı [m/s]

D_2 : Çark dış çapı [m]

N : Çark devri [rpm]

K^1 : Sabit. Church yapmış olduğu deneyler neticesinde bu değeri 0,5 ile 0,65 arasında olduğunu tespit etmiştir. Hesaplamalar gerçekleştirirken bu değer 0,58 olarak kullanılacaktır.

$$H_{ad} = \frac{K'}{g}\left(\frac{\pi D_2 N}{60}\right)^2$$

$$D_2 = \frac{60}{\pi N}\,{}^{2}\sqrt{\frac{gH_{ad}}{K^1}}$$

(2.38)

$$u_2 = \frac{\pi D_2 N}{60}$$

(2.39)

Church'e göre kanat çıkış radyal hızı (V_{r2}) kanat boyunca hız değişikliğinden kaynaklı olarak giriş radyal hızından (V_{r1}) %15 daha yavaştır.

$$V_{r_2} = 0.85V_{r_1}$$

$$V_{u_2} = u_2 - \frac{V_{r_2}}{\tan\beta_2}$$

(2.40)

Dönme etkisi kaybını dikkate alarak Stodola'nın kayıp formülünü V_{u2}'den çıkardığımızda, kayıp teğetsel çıkış hızı aşağıdaki gibi bulunur.

$$V'_{u_2} = V_{u_2} - W_z$$

$$V'_{u_2} = V_{u_2} - \frac{\pi u_2 \sin\beta_2}{z}$$

(2.41)

Şekil 2.5'daki hız üçgenindeki doğruların, dönüşle değişen vektörler (üzerinde üst simgelerle temsil edilen kayıp hızlar) olduğunu hatırlayarak, çıkıştaki mutlak hızlar ($V_{2'}$, v_2) ve açıların ($\alpha_{2'}$) sırasıyla şu şekilde formüle edildiği ifade edilebilir.

$$V_2'^2 = V_{r_2}^2 + V_{u_2}'^2$$

$$V'_2 = \sqrt[2]{V_{r_2}^2 + V_{u_2}'^2}$$

(2.42)

$$v_2^2 = V_{r_2}^2 + \left(u_2 - V_{u_2}\right)^2$$

$$v_2 = \sqrt[2]{V_{r_2}^2 + \left(u_2 - V_{u_2}\right)^2}$$

(2.43)

$$\tan \alpha_2' = \frac{V_{r_2}}{V_{u_2}'}$$

Çark tarafından oluşturulan sürtünmesiz, türbülanssız teorik düşü aşağıda belirtilen denklem ile ifade edilmektedir.

$$H_{theorical} = \frac{1}{2g}(u_2^2 - u_1^2 + v_1^2 - v_2^2)$$

(2.44)

Çark içerisindeki dönme etkisinin teorik basıncın %15'i, sürtünme ve türbülans etkisi nedeniyle kaybolur (Church, 1947).

$$H_{effective} = 0.85\ H_{theorical}$$

(2.45)

$$\left(\epsilon_{P_{impeller}}^{0.283} - 1\right) = \frac{0.283g(H_{effective})}{RT_{inlet}}$$

(2.46)

$\epsilon_{P_{impeller}}$ *: Çark giriş çıkış arasındaki efektif basınç oranı*

$$\epsilon_{P_{impeller}} = \frac{P_2}{P_{inlet}} \Longrightarrow P_2 = \epsilon_{P_{impeller}} x P_{inlet}$$

(2.47)

Sürtünme ve türbülans kayıpları ısıya dönüştüğü için bu durum akışkanın sıcaklığını hafifçe artırır. Eğer bu kayıpları ihmal edersek, çark çıkış sıcaklığı çarktaki adyabatik basınç oranında artar.

Adyabatik yükseklik, Denklem (2.44)'e uygulanarak $\epsilon_{P_{impeller}}^{0.283}$ değeri hesaplanır.

$$\left(\epsilon_{P_{impeller}}^{0.283} - 1\right) = \frac{0.283gH_{ad}}{RT_{inlet}} \quad (2.48)$$

Çıkış sıcaklığını bulmak için eşitlik 2.18 kullanılmaktadır.

$$T_2 = \epsilon_{P_{impeller}}^{0.283} x T_{inlet}$$

(2.49)

Çark çıkışında akışkanın yoğunluğunu bulmak için aşağıda belirtilen eşitlik kullanılmaktadır.

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2} \quad (2.50)$$

Eğer %3 sızdırmazlık kayıplarını dikkate alarak çark çıkışındaki debiyi %3 artırırsak (Church, 1947), çıkıştaki hacimsel debi aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$Q_{çıkış} = 1.03xQ_{giriş}/\rho_2 \quad (2.51)$$

Çark çıkışındaki alanı hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$A_2 = \frac{Q_{outlet}}{V_{r_2}}$$

(2.52)

Kanat çıkış kalınlık faktörü eşitlik 2.28 kullanılarak elde edilmektedir.

$$\dot{\varepsilon_2} = 1 - \frac{tZ}{\sin\beta_2 \pi D_2}$$

(2.53)

Kanat çıkış yüksekliği b_2 için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$b_2 = \frac{A_2}{\pi D_2 \varepsilon_2'}$$

(2.54)

2.3.2 Verim Kayıpları

Church'e göre çark ile salyangoz arasında %3 oranında boşluktan dolayı kayıp söz konusudur. (Church,1947)

- Sızıntı kaybı QL = 0.003 x Q (2.55)

Çark girişinde türbülans ve sürtünme dolayısı ile kayıp mevcuttur. Kayıp kat sayısı (k_i)0.5 ile 0.8 arasındadır. (Osborne, 1977)

- Emiş basıncı kaybı

$$dP_{suction} = \frac{1}{2} x k_i x \rho_{inlet} x V_{inlet}^2$$

(2.56)

Sac metal dizaynından kaynaklı oluşacak kayıp k_{ii} 0,2-0,3 aralığında seçilmektedir. (Osborne,1977)

- Çark basınç kaybı

$$dP_{impeller} = \frac{1}{2} k_{ii} \rho_{inlet} (v_1 - v_2)^2$$

(2.57)

- Sürtünme kaybı

$$T_{df} = \pi f \rho w_2^2 \frac{R_2^5}{5} = \pi f \rho_2 (\frac{U_2}{R_2})^2 \frac{R_2^5}{5}$$

(2.58)

f : Sürtünme katsayısı

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m³)

ω : Açısal hız (rad/s)

R_2 : Çark çıkış yarı çapı (m)

U_2 : Çark çıkışındaki tanjant hız bileşeni (m/s)

Malzeme sürtünme katsayısı metal saclar için 0,005 olarak alınmaktadır. Buna göre, sürtünmeden dolayı oluşan güç kaybı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$P_{df} = \frac{2\pi N(T_{df})}{60}$$

(2.59)

2.3.3 Verim

- Hidrolik Verim

$$\eta_{hyd} = \frac{\Delta P}{\Delta P + dP_{suc.} + dP_{imp.} + dP_{.Volute}}$$ (Church, 1947)

(2.60)

- Hacimsel Verim

$$\eta_{volumetric} = \frac{Q}{Q + Q_L}$$ (Church,1947)

(2.61)

- Toplam Verim

$$\eta_{total} = \eta_{hyd.} + \eta_{volumetric}$$ (Church, 1947)

(2.62)

2.3.4 Çarkı çevirmek için gerekli güç

$$W = \frac{(\Delta P + dP_{suc.} + dP_{imp.} + dP_{volute})(Q + Q_L)}{\eta_{total}} + P_{df} \quad \text{(Church,1947)}$$

(2.63)

$$\tau_{df} = \frac{Wx60}{2\pi x2800} \quad \text{(Church, 1947)}$$

(2.64)

2.4 Fan Dizaynı

Kar küreme ve üfleme aracının mevcut değerleri aşağıda belirtilmektedir.

Hacimsel debi (Q) : 8,255 m^3/s

Çark çapı ($D_{çark}$) : 800 mm

Hava yoğunluğu (ρ_{air}) : 1,02 kg/m^3

Atmosferik basınç (Pa) : 101325 Pa

Emiş static basıncı (Pa) : 2300 Pa

İdeal gaz sabiti (R) : 287 (N.m)/(mol.K)

Hava sıcaklığı (C^0) : 25^0

Yer çekimi kuvveti (g) : 9,81 m/s^2

Çark devri (N) : 3200 rpm

Bıçak kalınlığı (t) : 4 mm

Bıçak sayısı (Z) : 13

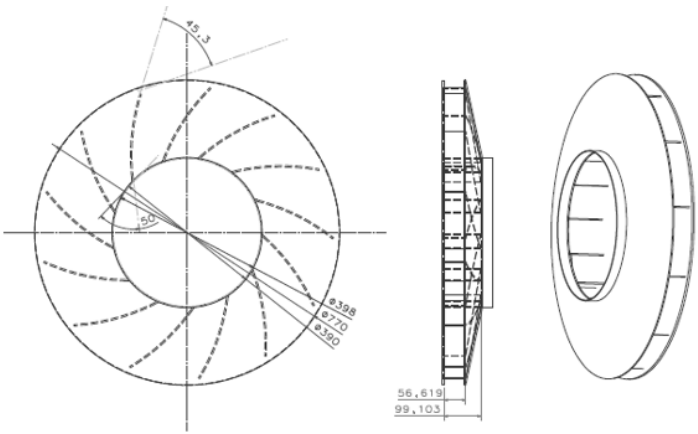
Bıçak çıkış açısı (β_2) : 45,3 ^{0}

2.4.1 Hesaplamalar

Mevcut kar küreme aracının değerleri bölüm 2.3'te verilen denklemler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde iterasyon gerçekleştirilmiştir. İterasyonlar kayıplar arasında %1 değerin altına düşene kadar devam ettirilmiştir. Sonuçlar arasında değer %1'in altına 3.iterasyon sonucunda düşmüş olduğu için hesaplamalar sonlandırılmıştır. Church hesabına göre elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda belirtilmektedir.

Table 2.1 Church hesabına göre dizayn edilen fan çarkı

	SEMBOL	BİRİM	
Kanat çıkış açısı	β2	0	45.3
Kanat giriş açısı	β1	0	50.054
Giriş çapı	Dinlet	mm	390
Kanat giriş çapı	D1	mm	398
Kanat çıkış çapı	D2	mm	770
Kanat giriş genişliği	b1	mm	99.193
Kanat çıkış genişliği	b2	mm	56.619



Şekil 2.6 Church hesabına göre dizayn edilen çarkın CATIA V5 programı aracılığı ile model çizimi

Table 2.2 Çarkların kıyaslaması

	SEMBOL	BİRİM	CHURCH	FAN
Kanat çıkış açısı	β2	0	45.3	45.3
Kanat giriş açısı	β1	0	50.054	44.4
Giriş çapı	Dinlet	mm	390	414
Kanat giriş çapı	D1	mm	398	408
Kanat çıkış çapı	D2	mm	770	800
Kanat giriş genişliği	b1	mm	99.193	162
Kanat çıkış genişliği	b2	mm	56.619	95

Bleier'a göre fan kanununa göre aşağıda belirtilen eşitlikler aracılığı ile sonuçlar kıyaslanmıştır.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

(2.65)

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

(2.66) $\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5$

(2.67)

$$Q_{Church} = Q_{MF} x \left(\frac{D_{Church}}{D_{MF}}\right)^3 = 9.417x\left(\frac{0.770}{0.8}\right)^3 = 8.40\frac{m^3}{s} \Rightarrow$$

%10.76

$$P_{Church} = P_{MF} x \left(\frac{D_{Church}}{D_{MF}}\right)^2 = 4200x\left(\frac{0.770}{0.8}\right)^2 = 3892.95 \text{ Pa}$$

$$\Rightarrow \%7.31$$

$$W_{Church} = W_{MF} x \left(\frac{D_{Church}}{D_{MF}}\right)^2 = 107x\left(\frac{0.770}{0.8}\right)^5 106.33 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow \%0.014$$

Elde edilen sonuçlara göre çarklar karşılaştırıldığında, çark giriş çaplarında %11'lik bir fark, kanat giriş çaplarında yaklaşık %6'lık bir kayıp, çarkların dış çapları analiz edildiğinde %4'lük bir fark, kanat çıkış genişliklerinde %66'lık bir değer ve kanat giriş açılarında %39'luk bir değişim gözlemlenmiştir. Çark geometrileri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Ayrıca, bu hesaplamalar, akışın fana girişinden çarka kadar olan yol ile çark çıkışından salyangozdan dışarı atılana kadar olan yol üzerindeki kayıpların eşit olduğu kabul edildiğinde geçerlidir.

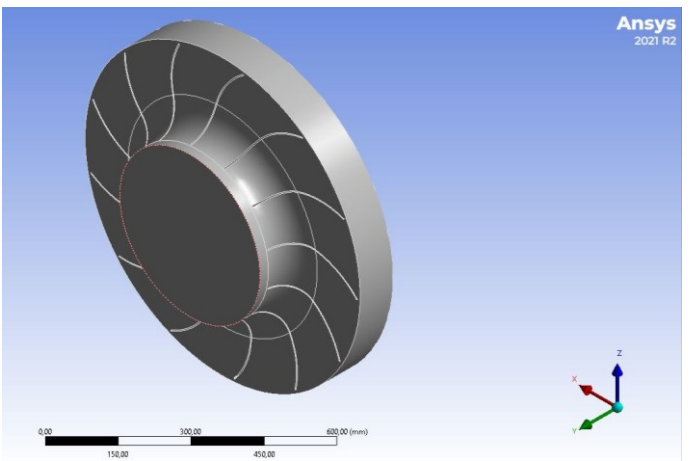
2.4.2 Method

Mevcut kar küreme ve üfleme aracına ait geriye eğimli kanatlı santrifüj fanın teknik çizimleri ile karşılaştırılmıştır. Ürün, 2D teknik çizim kontrolü ile doğrulanmış ve sonuç olarak CATIA V5 programının Part Design, Sheet Metal Design ve Surface Design modülleri kullanılarak 3D olarak modellenmiştir. 3D modellenen fan, Ansys yazılımına entegre edilmiştir.

Ansys yazılımındaki Space Claim ve Design Modeler modüllerinde, katı model üzerinde akış analizine uygun düzenlemeler yapılmıştır. Akışı etkilemeyen ve analiz programının performansını düşürme potansiyeline sahip parçalar ve montaj grupları modelden çıkarılmıştır. İlgili kar küreme aracının fanı üretime uygun şekilde tasarlandığı ve kaynak bölgelerinin çizim programında belirtilmediği göz önünde bulundurularak, bu alanların kesitleri alınarak bir yüzey oluşturulmuş ve 'extrude' komutuyla katılaştırılarak kaba hacim elde edilmiştir. Daha sonra, katı bölgeler olan sac malzemeler, 'interference' komutuyla akış hacimlerinden çıkarılmıştır.

Analiz ortamına uygun olarak, fan içerisindeki akış hacmi çark, fan girişi ve çıkış muhafazası olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. 'Share Topology' komutuyla birbirine temas eden bölgeler belirlenmiş ve yapısal meshleme sırasında bu bölgelerde ortak düğüm noktalarının kullanılması sağlanmıştır. Oluşturulan geometri, SpaceClaim'deki 'Stitch, Gap, Missing Face and Other Repair' komutları ile kontrol edilmiş ve yüzeysel topoloji hatalarının bulunduğu bölgeler düzeltilmiştir. Oluşturulan yapı, 'Design Modeler' programına aktarılmış ve tüm bölgelerde 'Fluid' tanımlanarak çizim aşaması tamamlanmıştır.

Şekil 2.7, SpaceClaim'de hazırlanmış ve Design Modeler'da akış hacmi olarak tasarlanmış olan, mevcut değerlerle mevcut kar küreme aracının çarkının bir görüntüsünü göstermektedir.

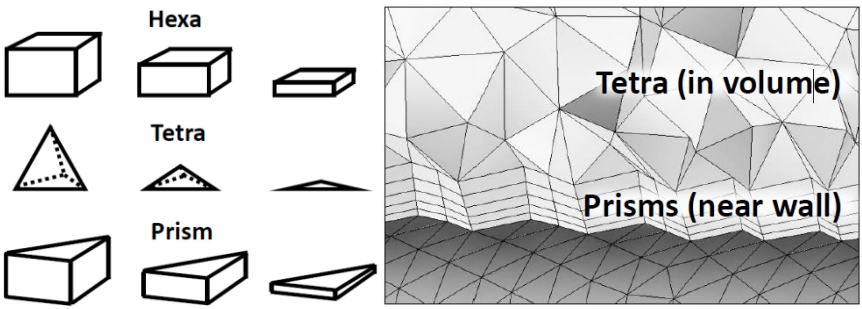


Şekil 2.7 Mevcut fanın akış hacmi

Uyarlama işlemi sonucunda model, Ansys Workbench'teki Meshing modülüne aktarılmıştır. Bu yapısal mesh modelleme modülünde, oluşturulan akış hacmi, bilinen geometri ve boyutlara

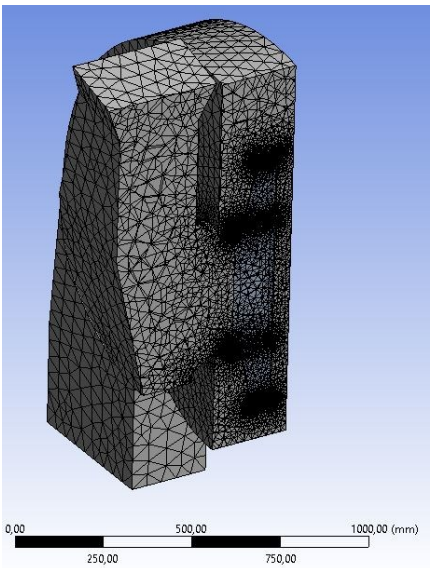
sahip küçük geometrik elemanlara bölünmüştür. Analiz programları, bu yapısal mesh elemanlarını, akışkanlar mekaniği ile ilgili denklemleri farklı algoritmalarla iterasyona tabi tutarak çözmekte ve akış hacminin istenen bölgelerinde sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Temel olarak, mesh elemanları analiz türüne bağlı olarak iki boyutlu ve üç boyutlu olarak değişiklik göstermektedir. İki boyutlu elemanlar üçgen ve dörtgen, üç boyutlu elemanlar ise tetrahedron, hexahedron, prizma/kişi, piramit ve çokyüzlüdür. Şekil 2.8'de mesh türü gösterilmiştir (Ansys INC, 2017).



Şekil 2.8 Mesh modeli

Kaynak : Ansys INC,2017



Şekil 2.9 Mevcut fanın mesh modeli

Tablo 2.3 Mevcut fanın skewness değeri

Minimum	Maksimum	Ortalama
2.5996e-007	0.79413	0.23626

Tablo 2.4 Mevcut fanın orthogonal quality değeri

Minimum	Maksimum	Ortalama
0.20587	0.99496	0.7628

Deneysel çalışmalar sonucunda, bu kalite değerlerinde (kaliteli mesh elde edilmesi) pozitif bir artış, analiz sonuçlarının doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Analiz kapsamında oluşturulan toplam mesh sayısı 5.807.006'dır. Meshleme işleminden sonra, mesh sayısı ve kalite değerleri optimize edilmiştir. Sınır koşulları olarak tanımlanacak bölgeler, 'Named Selection' bölümünde adlandırılmıştır.

Bir sonraki adımda, 'Setup' ve 'Solution' aşamalarında oluşturulan geometrik yapı ile birlikte analiz ortamı koşulları, kullanılacak çözüm algoritmaları ve yöntemler seçilmiştir. Fan içerisindeki akışın Mach sayısı 0.3'ün altında kalacağı öngörüldüğünden, çözümleyici türü olarak 'Pressure-Based' seçilmiştir. Analizin zamana bağlı olmamasını ve sonuçların belirli bir açısal hız değerinde elde edilmesini sağlamak için çözüm zamanı 'Steady' olarak seçilmiştir. Yerçekimi etkisi ihmal edilmiştir. Türbülans modeli olarak 'k-epsilon, Realizable, Enhanced Wall Treatment' seçilmiş ve duvar sınır koşullarında (kanat yüzeyi ve salyangoz duvarları) akış ayrılmaları dikkate alınmıştır. Akışkan malzemesi olarak 'Air' seçilmiştir.

Çark akış hacmi, 'Impeller' olarak tanımlanarak oluşturulmuş ve 'Cell Zone Condition' bölümünde 'Frame Motion' tanımlanarak Çoklu Referans Çerçevesi (MRF) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, akış hacmindeki dönen hacimlerin 'hareketli' olarak tanımlanmasını sağlar ve Durağan Durum (Steady State) koşulları için önerilmektedir. Sınır koşulları giriş ve çıkışta atmosferik koşullar (101.325 kPa atmosferik koşullar) olarak tanımlanmıştır. Hız ve momentum denklemlerini aynı anda çözerek zaman tasarrufu

sağlamak için çözüm algoritması olarak 'Coupled' seçilmiştir. 1000 iterasyon adımı girilmiş ve analiz gerçekleştirilmiştir.

Analizde kullanılan bilgisayar özellikleri aşağıda verilmiştir.

Software: Ansys Fluent 2021 R2, CATIA V5

İşletme sistemi: Windows 10, 64 Bit

Bilgisayar donanım özellikleri:

Processor: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v4 @ 3.60GHz (12CPUs) ~3.6GHz

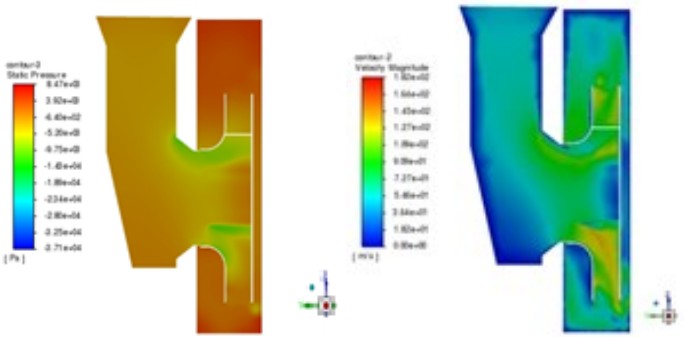
Dâhili hafıza 32.0 GB

3.Sonuçlar ve Öneriler

Öncelik olarak mevcut fan özelinde hesaplamaları akışkanlar dinamiği programı ortamında method kısmında belirtilen yöntem ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç analiz ortamı ile test verilerinin birbirini doğruladığını tespit etmektir. Analiz sonucu ile test sonuçlarının karşılaştırması Tablo 3.1'de belirtilmektedir.

Tablo 3.1 Mevcut fanın test değerleri ile analiz verilerinin karşılaştırılması

	Birim	Mevcut fan verileri	Mevcut fan analiz verileri	Mevcut fan test verileri
Emiş basıncı	Pa	4200	4485.23	-
Çark giriş hızı	m/s	72,026	79.078	-
Debi	m3/h	33900	33700	32506
Güç tüketimi	kW	107	105.81	118.2

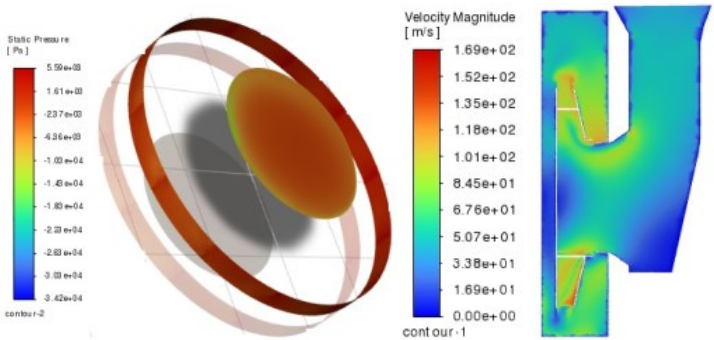


Şekil 3.1Mevcut fanın basınç ve hız konturu

Karşılaştırma tablosu analiz yönteminin gerçek veriler karşısında kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu minvalde analitik hesaplamalar sonucu elde edilen çark özelinde analiz ortamında yapılacak değişikliklerin doğru sonuç göstereceği kabul edilebilir niteliktedir.

3.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İyileştirme Çalışmaları

Church hesaplamasına göre geliştirilen fan çarkı, mevcut fanın test değerleri, mevcut veriler ve CFD analiz sonuçlarının karşılaştırılmasının ardından aynı çözüm yöntemleri ve çevresel koşullar kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımında analiz edilmiştir. Şekil 3.2'de, Church yöntemine göre tasarlanan çarkın basınç ve hız konturunda görüldüğü üzere, çark girişindeki basınç dağılımı, kar küreme aracının çark girişindeki basınç dağılımına göre daha tutarlıdır. Bu tutarlılığın, hesaplanan çark giriş çapının daha dar bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 3.2’de mevcut fan ile hesaplanmış fanın analiz sonuçlarının kıyaslaması bulunmaktadır.



Şekil 3.2 Church hesabına göre tasarlanan çarkın basınç ve hız konturları

Tablo 3.2 Mevcut ile hesaplanmış çarkların analiz verilerinin karşılaştırılması

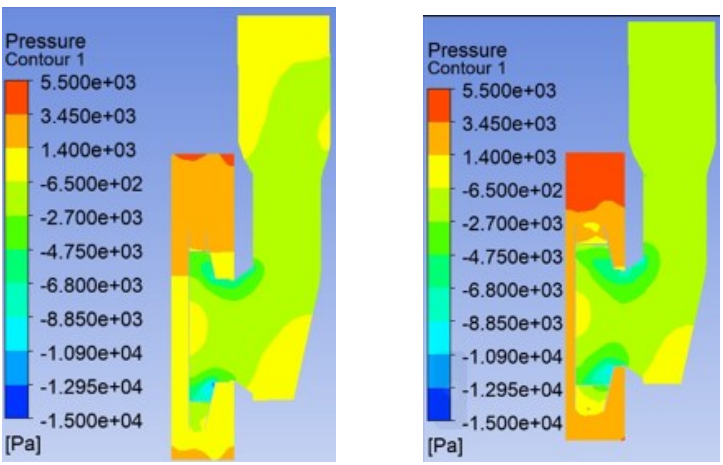
	Birim	Mevcut çark analiz verisi	Hesaplanmış çark analiz verisi
Çark giriş emiş basıncı	Pa	4485.23	4035
Çark giriş hızı	m/s	79.078	71.8
Debi	m3/h	33700	30598
Enerji tüketimi	kW	105.81	78.9

3.1.1 Kanatların çark performansına etkisi

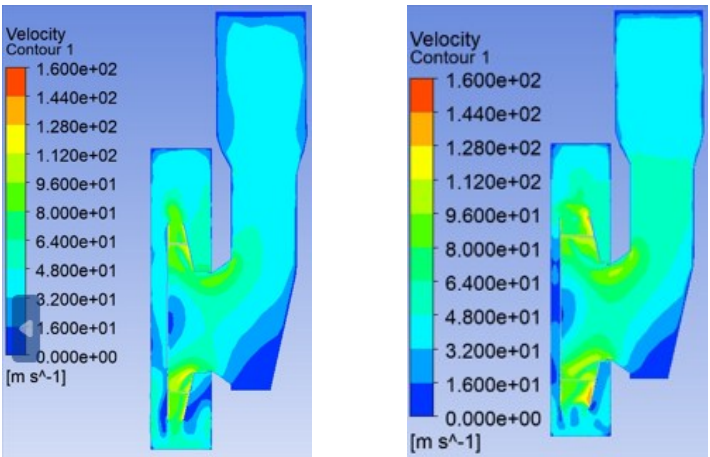
Yapılan çalışma kapsamında, akış üzerinde en büyük etkiyi oluşturan kanat yapısı öncelikli olarak incelenmiştir. Sistemin birçok bileşenini etkileyen kar temizleme ve üfleme cihazının salyangoz yapısındaki değişikliklerin zorluğu nedeniyle, özellikle türbin için geliştirme çalışmaları yürütülmüştür. Bu bağlamda yapılan ilk değişiklik, hesaplanan Church türbin genişliğinin mevcut salyangoz yapısıyla uyumlu hale getirilmesidir. Church hesaplamasına göre türbin genişliği w=57 mm olarak elde edilmiş, ancak mevcut türbinin genişliği w=80 mm'dir. Uygulanan orantı sonucunda türbin genişliği

w=113 mm olarak belirlenmiş ve aynı koşullar altında bir CFD analizi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, türbini döndürmek için gereken torkta T=19.8% oranında bir azalma ve giriş basıncında ΔP=2.7% oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu değişiklik, kütlesel debide Q=8.5% oranında bir azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, verimde η=6.9% oranında bir artış sağlanmıştır. Şekil 3.3 & Şekil 3.4 farklı genişlikteki çarkların basınç ve hız konturlarını göstermektedir. Tablo 3.3'te analiz neticesinde elde edilen verilerin farklarını ve iyileşme oranını göstermektedir.



Şekil 3.3 Genişliği 57mm ve 113mm olan çarkların basınç konturları



Şekil 3.4 Genişliği 57mm ve 113mm olan çarkların hız konturları

Tablo 3.3 57 & 113 mm genişlikteki çarkların analiz verilerinin kıyaslanması

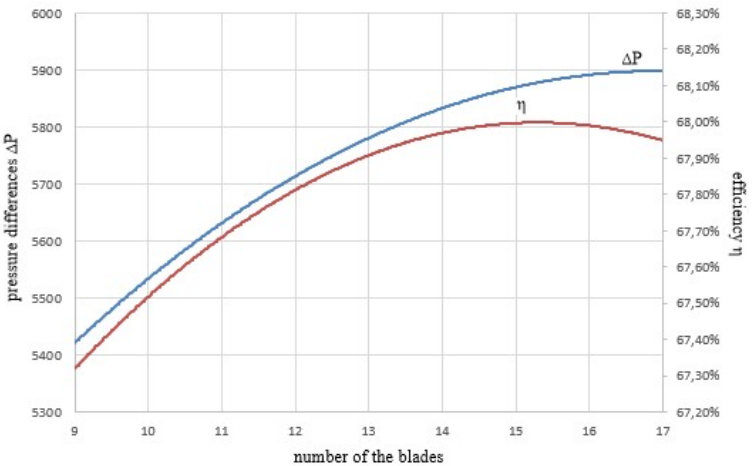
Parametre	57mm Çark genişliği	113mm Çark genişliği	Oran
Tork (Nm)	187.831	260.459	+%38.7
Çark giriş basıncı (Pa)	2902	4089	+%40.9
Debi (m3/h)	26542.210	31254.42	+%17.7
Verim (η)	%41.6	%49.8	+%19.7

3.1.2 Kanat Sayısının Etkisi

Hesaplamalardan elde edilen veriler farklı kanat sayılarıyla revize edilmiş ve her bir geometrinin analizi aynı CFD ortamında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, Z=9 kanatlı bir geometri oluşturulmuştur. Ardından sırasıyla Z=11, Z=14, Z=15 ve Z=17 kanatlı geometriler oluşturulmuş ve bu geometriler CFD ortamında analiz edilmiştir. Analiz değerlendirmelerinde giriş basıncı, türbini döndürmek için gereken tork, kütlesel debi ve verim gibi parametreler karşılaştırılmıştır.

Kanat sayısının artmasıyla birlikte türbini döndürmek için gereken torkun da arttığı, ayrıca giriş basıncı ve kütlesel debi değerlerinin de yükseldiği gözlemlenmiştir. Ancak, aynı durum verim değeri için geçerli değildir. Z=9 kanatlı türbinin analiz verilerine göre, mevcut Z=13 kanatlı türbinle karşılaştırıldığında, gerekli torkta T=9.5% azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, giriş basıncında ΔP=5.9% oranında bir kayıp görülmüştür. Hacimsel debi Q=3% azalırken, verimde η=0.3% oranında bir kayıp yaşanmıştır.

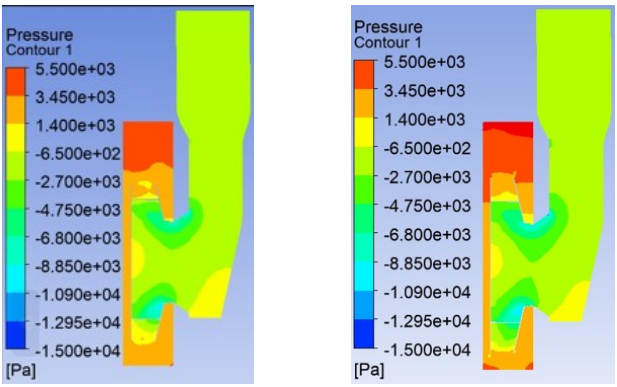
Z=15 kanatlı türbinin analiz verileri, mevcut Z=13 kanatlı türbinle karşılaştırıldığında, türbini döndürmek için gereken torkta T=3.11% oranında bir artış gözlemlenmiştir. Giriş basıncında ΔP=2.47% oranında bir artış meydana gelmiş ve akış hızında Q=1.14% oranında bir kazanç sağlanmıştır. Bu veriler sonucunda verimin η=0.51% oranında arttığı gözlemlenmiştir. Z=17 kanatlı türbinin analiz verileri incelendiğinde, türbini döndürmek için gereken torktaki artışın aşırı derecede olması nedeniyle verim üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu nedenle, geliştirme çalışmaları Z=15 kanatlı türbin üzerinden devam ettirilmiştir. Grafik 3.1 kanat sayısının verime etkisini göstermektedir.



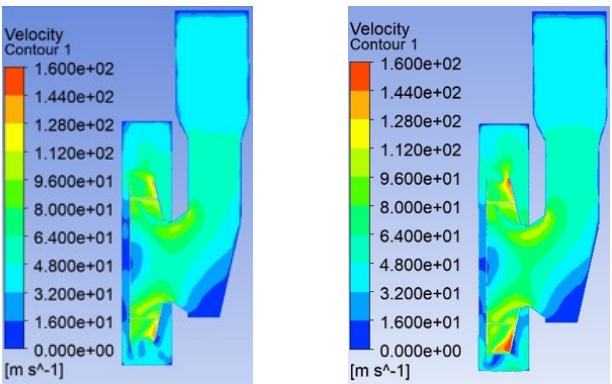
Grafik 3.1 Kanat sayısının basınç farkı ile verim arasındaki ilişkisi

3.1.3 Çark Çapının Etkisi

Sonraki çalışmada, türbin giriş çapı ve rotor genişliği sabit tutulurken, türbinin dış çapı düzenlenmiştir. Church hesaplamasına göre oluşturulan türbin çapı, salyangoz ile orantılı hale getirilmiştir. 840 mm çapında bir türbin modeli oluşturulmuş ve aynı çözüm koşullarıyla CFD analizine tabi tutulmuştur. Önceki en uygun şekle sokma sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, türbini döndürmek için gereken torkta T=21.32% oranında bir artış gözlemlenmiştir. Türbin giriş basıncında ΔP=17.62% oranında bir artış meydana gelmiştir. Kütlesel debi Q=7.73% oranında artarken, verimde η=4.45% oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Şekil 3.5 ve şekil 3.6 770mm ve 840mm dış çapa sahip çarkların basınç ve hız konturlarını göstermektedir.



Şekil 3.5 Dış çapı 770mm ve 840mm olan çarkların basınç konturu



Şekil 3.6 Dış çapı 770mm ve 840mm olan çarkların hız konturu

3.1.4 Bıçak Çıkış Açısının Etkisi

Bu çalışmada, üç farklı kanat çıkış açısının fan performansı üzerindeki etkisi analiz ortamında karşılaştırılmıştır. Church hesaplamasına göre tüm değerler sabit tutulurken, β2=35° ile β2=55° arasında değişen farklı kanat çıkış açıları girilmiş ve ilk olarak hesaplama grafiğinde kontrol edilmiştir. 35° açıda verimde bir düşüş gözlemlenmiştir. Hesaplama grafiğinde, 35°'den mevcut kanat çıkış açısı olan β2=45°'e doğru gidildikçe verimin arttığı görülmüştür.

Analiz yapıldığında, β2=35° açısında verimin düştüğü doğrulanmıştır. Kanat çıkış açısını hesaplama grafiğine göre artırmaya devam edildiğinde, fan performans verimindeki değişimin çok küçük olduğu görülmüş ve kanat çıkış açısı β2=52° olarak yeniden tasarlanarak türbin geometrisi güncellenmiştir. β2=52° kanat çıkış açısının performansı aynı çözüm koşulları altında değerlendirilmiştir. Analiz verilerine göre, türbini döndürmek için gereken torkta T=26.1% oranında bir artış meydana gelmiştir. Türbin giriş basıncı ΔP=11.3% oranında artmıştır. Kütlesel debi karşılaştırıldığında Q=5.5% oranında bir artış gözlemlenmiştir. Ancak, tüm bu veriler göz önüne alındığında, fan türbini performans veriminin η=6.9% oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, β2=52° açılı türbinin yüksek debi ve giriş basıncının önemli olduğu durumlar için uygun olduğu, ancak verim açısından bir kayıp yaşandığı görülmüştür. Yüksek tork gereksiniminin yüksek enerji ve yakıt tüketimine yol açacağı düşünüldüğünde, türbinin kanat çıkış açısı β2=45° olarak sabit tutulmuştur.

4.Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, belirli bir tasarım yöntemi kullanılarak sıfırdan bir fan tasarlanmış ve CFD yöntemi ile güncellenmiştir. CFD yönteminin doğruluğunu ve hassasiyetini değerlendirmek amacıyla, mevcutta bulunan ve bilinen değerlere sahip bir kar küreme ve üfleme aracında kullanılan bir santrifüj fan seçilmiş ve CFD yöntemi ayarlarıyla elde edilen sonuçlar tasarım noktasındaki statik basınç ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %6.39'luk bir hata payı ile tatmin edici bulunmuştur. Mesh ayarları ve kaliteleri

kullanılarak bir mesh yapısı oluşturulmuş ve geometri analiz edilmiştir. En uygun mesh ayarları belirlenmiştir. Bu süreçte, doğrulama yapmak için aracın yakıt tüketimi test edilmiştir. Sistemde hidrolik kayıpların varlığı tespit edilmiş ve hidrolik basınç kaybını önlemek için iyileştirme adımları uygulanmıştır.

Bir sonraki aşamada, rotor yapısı ve salyangoz Church yöntemine göre hesaplanmıştır. Analize hazırlanmış ve programda çözülmüştür. Analiz sonuçlarına göre olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan çarkın statik basıncı ile mevcut ürünün statik basıncı karşılaştırıldığında, ΔP = %3.92'lik bir sapma gözlemlenmiştir.

İyileştirme çalışmaları kapsamında, en ideal kanat sayısının Z=15 olduğu belirlenmiştir. Salyangoz ve türbin genişliği ile salyangoz ve türbin yüksekliği arasında önemli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Türbin genişliğinin hesaplamaya göre güncellenmesi ile η = %6.9 oranında bir verim artışı sağlanmıştır. Türbin çapının hesaplamaya göre artırılması sonucunda ek olarak η = %4 oranında bir verim artışı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak başlangıçta Q = 33918 m^3/s olan kütlesel debi, çalışmalar sonucunda Q = 37245 m^3/s'ye yükseltilmiştir. Toplam verimde %6 oranında artış sağlanmıştır. Tüm bu iyileştirmeler, yalnızca T = 10 Nm'lik bir artışla elde edilmiştir.

Farklı bir çalışmada çark girişi akış yönlendirme özelinde çalışma gerçekleştirilebilir. Salyangoz yapısının etkisinin incelendiği ayrı bir çalışma gerçekleştirilebilir. Ayrıca kanat kalınlığının etkisi ve kanat malzemesi üzerinde çalışma gerçekleştirilebilir.

5. Kaynakça

Aydın, Ü., 2020. Türkiye Enerji Görünümü. TMMOB, Ankara, 482p

Bleier, F., P., 1998. Fan Handbook. McGrawHill, Chicago, 397p.

Bulgurcu, H., 2015. Havalandırma Tesisatı. TMMOB MİEM, İstanbul, 672p.

Church, A., H., 1947. Centrifugal Pumps and Blowers. John Wiley & Sons, New York, 308p.

Encyclopaedia Wikipedia : https://en.wikipedia.org/wiki/Fan_(machine) [last access date: 06.01.2024]

Enerdata : https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html [last access date: 05.01.2024]

Kearton, W., J., 1942. Influence of Number of Impeller Blades on the Pressure Generated in a Centrifugal Compressor and on its General Performance. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers 124(1): 481-568.

Osborne, W., C., 1977. Fans. Pergamon Press, New York, 228p.

Stodola, A., 1945. Steam and Gas Turbines. Peter Smith Publications, New York, 1356p.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı : https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik [last access date: 07.01.2024]

BÖLÜM X

Rüzgar Türbini Kanatlarının Aeroakustik İncelenmesi

Haydar KEPEKÇİ[1]
Hasan Rıza GÜVEN[2]

1. Giriş

Enerji ihtiyacı, teknoloji ve sanayi alanındaki hızlı gelişmelerle beraber giderek artmaktadır. Dünya enerji tüketiminin büyük bir kısmının fosil yakıtlardan sağlanması, bu kaynakların hızla tükenmesine ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Fosil yakıtların yapısındaki zararlı elementler, insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olurken, küresel ısınmanın temel sebebi olarak da öne çıkmaktadır (Aggarwal, 2024). Petrol sızıntıları ve kazaları gibi örnekler, bu kaynakların tüm canlı yaşamı üzerinde

[1] Dr. Haydar Kepekçi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0037-8332, hikepekci@gelisim.edu.tr
[2] Prof. Dr. Hasan Rıza Güven, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0820-4927, hrguven@istanbul.edu.tr

uzun vadeli etkiler yarattığını göstermektedir. Bu sorunlar neticesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, sınırsız olmaları, çevre kirliliği yaratmamaları ve enerji bağımsızlığına katkı sağlamaları nedeniyle avantajlıdır. Dünya enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı henüz düşük olmasına rağmen, özellikle rüzgâr enerjisi günümüzde en ekonomik ve en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü bakımından Çin lider konumda yer almaktadırlar (Lou & ark., 2025).

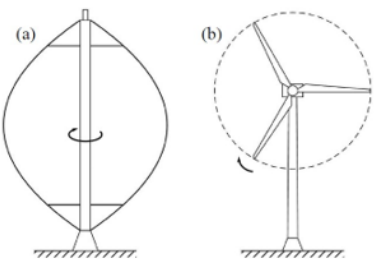
Türkiye de son yıllarda kurulu gücünü arttırarak önemli bir gelişim göstermiştir. Türkiye'nin coğrafi konumu, rüzgâr enerjisinden faydalanmak için oldukça elverişlidir (Tagliapietra, Zachmann & Fredriksson, 2019). Ancak, rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşmasındaki en büyük sorunlardan biri çalışma sırasında üretilen gürültüdür (Pourrajabian & ark., 2023). Bu gürültü, türbinlerin yaşam alanlarından uzak kurulmasına yol açmakta ve ekolojik dengeyi etkileyerek kuş göç rotalarını değiştirmektedir (Guan, Hu & Li, 2024). Çalışmalar, rüzgâr türbinlerine yakın yaşayan bireylerde uyku bozuklukları ve ruh sağlığı sorunları yaşandığını göstermiştir. Yapılan bazı akademik çalışmalar sonucunda, gürültü seviyesinin artışıyla rahatsızlık düzeylerinin arttığı ortaya çıkmıştır (Godono & ark., 2023). Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinin gürültüsünü azaltmaya yönelik aeroakustik çözümler geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, rüzgâr türbinlerinin gürültü mekanizmalarını incelemekte ve kanat bölgesinin gürültü üretimine olan etkisinden bahsetmektedir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri kullanılarak farklı parametrelerin (hücum açıları, zaman adımları ve

mesh sayıları) gürültü analizleri sırasındaki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sayısal veriler, deneysel bulgularla karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ayrıca, analiz sonuçlarından elde edilen grafikler kullanılarak regresyon denklemleri türetilmiş ve literatüre ampirik formülasyonlar kazandırılması hedeflenmiştir. Bu formülasyonlar, rüzgâr türbini kanatlarının akustik performansını değerlendirme açısından pratik bir araç sunmaktadır. Yapılan tüm akustik analizlerde Ffowcs Williams ve Hawkings (FW-H) denklemi kullanılmıştır. Geometrik modellemeler CAD programlarıyla oluşturulmuş, CFD analizleri ile elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, rüzgâr türbini kanatlarının farklı parametrelere göre gürültü performansının belirlenmesi sağlanmış ve elde edilen bulgular enerji verimliliği ve çevresel uyum açısından önemli bir katkı sunmuştur.

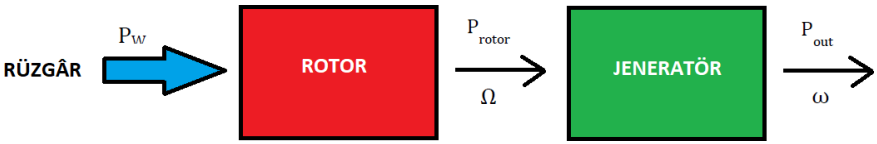
1.1.Rüzgâr Türbinlerine Genel Bakış

Rüzgâr türbinleri Dikey Eksenli ve Yatay Eksenli olmak üzere iki ana tipe ayrılır. Dikey eksenli türbinler rüzgâra dik dönerek, yatay eksenli türbinler ise rüzgâra paralel dönerek elektrik üretir. Bu çalışmada Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini kullanılmıştır.



Şekil 1. (a) Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini, (b) Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

Rüzgâr türbinlerinde, rotorun dönme hareketi dişli çark, şaft ve destek yatağı ile jeneratöre iletilerek kinetik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülür. Daha yüksek rüzgâr hızlarına ulaşmak için rotorlar, yirmi metre veya daha yüksek kulelerin tepesine monte edilir. Kule inşa edilirken titreşim, güç dalgalanması ve gürültü üretimi gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2. Rüzgâr türbininin güç üretme süreci

İlk olarak, gelen rüzgâr gücü (P_w) rotora taşınır. Dönen rotor kanatlarının oluşturduğu kinetik enerji gücü (P_{rotor}) jeneratöre dönüş torku sağlar. Jeneratör kendisine gelen mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürür (P_{out}).

1.2.Literatür Taraması

Rüzgâr türbinlerinin yaygın kullanımıyla birlikte ortaya çıkan gürültü sorunu, araştırmacıların üzerinde yoğunlaştığı önemli bir konudur. Bu alandaki çalışmaların temel hedefi, gürültü seviyelerini azaltarak rüzgâr türbinlerinin yaşam alanlarına yakın bölgelerde daha yaygın kullanılmasını sağlamaktır. Literatürde, rüzgâr türbinlerinden kaynaklanan gürültünün nedenleri ve çözümleri üzerine birçok araştırma mevcuttur. Bu çalışmalardan öne çıkan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Oerlemans ve Migliore (2004), rüzgâr tünel testlerinde uç şekli rotasyonunun gürültü azaltımında etkili olduğunu belirtmiştir. Düşük hızlarda kanat parametrelerinin değiştirilmesiyle 3.8 dB'lik,

yüksek hızlarda ise 1.3 dB'lik fark görmüşlerdir (Oerlemans & Migliore, 2004). Kim ve diğ. (2010) ise optimize edilmiş bir kanat tasarımı üzerinde çalışarak, SPL'de 2.9 dB genel bir azalma sağlandığını belirlemişlerdir (Kim & ark., 2010). Lee ve diğ. (2012), modern rüzgâr türbinlerinin gürültü mekanizmalarını analiz ederek, giriş türbülansı gürültüsünün 1.5 MW türbinlerde baskın olduğunu ifade etmişlerdir (Lee & ark., 2012). Rogers ve Omer (2012), türbülansın gürültüye etkisini incelemiş ve türbülans yoğunluğunun iki katına çıkmasıyla ses enerjisinin de aynı oranda arttığını gözlemlemişlerdir (Rogers & Omer, 2012). Mohamed (2014), Darrieus türbinlerinde katılık oranının düşürülmesinin gürültü emisyonlarını 7.6 dB azalttığını göstermiştir (Mohamed, 2014). Sobotta (2015) çalışmasında, kanat eğimi ve kalınlığının optimize edilmesiyle türbinlerin enerji verimliliğinin artırılabileceğini ve küçük çaplı rotorların türbülansa karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar, rüzgâr türbinlerinde gürültü azaltımı için kanat tasarımı, türbülans kontrolü ve arka kenar modifikasyonlarının önemli çözüm yolları sunduğunu göstermektedir (Sobotta, 2015). Buck ve diğ. (2016) ise türbülansın düşük frekansta baskın bir gürültü kaynağı olduğunu ve bu durumda 6 dB'lik artış gözlendiğini belirtmişlerdir (Buck, Oerlemans & Palo, 2016). Lee ve diğ. (2019), yarım yassı uçlu kanatların tırtıklı ve düz uçlara göre daha iyi performans sergilediğini ve 5.8 dBA'ya kadar gürültü azalttığını bulmuşlardır (Lee & ark., 2019). Carpio ve diğ. (2019), gözenekli arka kenar eklerinin gürültü azaltımında etkili olduğunu, düşük geçirgenliğe sahip eklerin 11 dB'ye kadar azalma sağladığını ölçmüşlerdir (Carpio & ark., 2019).

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Akustiğin Temelleri

Ses, ortamda dalga şeklinde yayılan bir basınç salınımıdır. Üretimi çeşit mekanizmalarla gerçekleşebilir. Bunlara örnek olarak; titreşen yüzey tarafından ses üreten hoparlörü verebiliriz. Ses dalgalarının boyu λ, hızı c, frekansı f ile gösterilir. Ses hızı Denklem 1'de verilen formülle hesaplanır.

$$c = \lambda . f \tag{1}$$

20 ºC'deki kuru havada ses hızı c=340 m/s iken, suda 1500 m/s 'lik bir değere sahiptir. İnsan kulağının algılayabileceği frekans aralığı Denklem 2'de verilen bağıntıda gösterilmiştir.

$$20\ Hz \leq f \leq 20\ kHz \tag{2}$$

Ortamdaki ses, rahatsız edici hale gelirse buna gürültü denir. Gürültü; istenmeyen sestir. İstenmeyen ses olarak tabir edilen gürültüye uzun süre maruz kalmak, kardiyovasküler ve metabolik sistem üzerindeki olumsuz etkilerin yanı sıra insanlarda bilişsel bozukluk gibi ciddi sağlık sorunlarına sebep olabilir. Gürültü kirliliği hava kirliliğinden sonraki en büyük toplumsal problemdir. Sesin gürültü olarak sınıflandırılması; dinleyicinin duyarlılığı, sesin seviyesi ve süresi gibi farklı nedenlere bağlı olduğu için öznel bir durumdur (Rodrigues, 2012).

2.1.1. Ses basıncı ve Güç Seviyeleri

İnsan kulağının ses basıncının genliğine tepkisi lineer değildir. Örneğin, ses basıncının genliği iki katına çıkarılırsa, daha yüksek bir ses hissi yaratır, ancak hissedilen ses iki katından çok daha düşük

olur. Bu, durum ses basıncı genliklerini karakterize etmek için bir logaritmik ölçeğin tanımlanmasına yol açar.

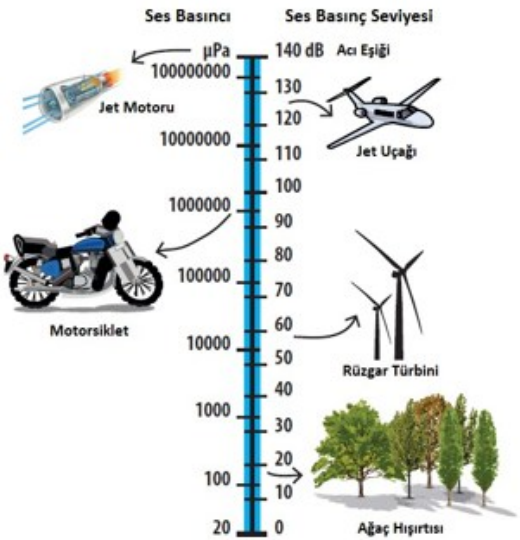
Akustik sinyallerin karılaştırılmasında kullanılan genel ölçek Ses Basınç Seviyesi (SPL) olarak tanımlanmıştır. Bu büyüklüğün hesaplanması için kullanılan bağıntı Denklem 3'te verilmiştir.

$$SPL = 20\, log_{10}\left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}}\right) \tag{3}$$

SPL desibel (dB) biriminden Ses Basınç Seviyelerini temsil eder. p akış alanı içinde zamana bağlı olarak hesaplanan basınç değerinin çözüm süresi içinde alınan ortalama değeri iken p_{ref} referans ses basıncı ($2x10^{-5}$ Pa) olarak belirlenmiştir. Bu referans değeri insan kulağının duyabileceği en düşük ses basıncını işaret etmektedir. Bu değerin altındaki sesler insan kulağı tarafından duyulmamaktadır. p_{rms} ses kaynağının ortalama basıncı, p_{ref} $2x10^{-5}$ değerinde kabul edilen referans basınçtır. p_{rms} değerinin hesaplanması Denklem 4'te verilmiştir.

$$p_{rms}{}^2 = \lim_{T\to\infty}\left(\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)dt\right) \tag{4}$$

Bu tanıma göre, ses kaynağının ikiye katlanması, ses basınç seviyesinde 3 dB'lik bir artışa neden olur. Şekil 3'te ses basınç seviyesi ile gerçek ses basıncı arasındaki ilişki, bazı ses kaynakları örnekleri ve bunların ortalama ses seviyeleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Ses Basınç Seviyesi Örnekleri

Ses basınç seviyesi, gözlemcinin ses kaynağına göre konumuyla değişiklik gösterir. Bir ses kaynağının gücünü karakterize etmek için, o kaynak tarafından yayılan ses gücünü kullanmak yaygındır. Ses gücü seviyesi LW, Denklem 5'te verilen formülle hesaplanır.

$$L_W = SPL + 10\,log_{10}\left(\frac{4\pi R^2}{s_0}\right) \qquad (5)$$

R kaynağa olan uzaklık, S_0 ise genelde 1 m^2 olarak sayılan referans alanıdır (Rodrigues, 2012).

2.1.2. Ses Hızı

Ses hızını kütlenin korunumundan yola çıkarak hesapladığımızı kabul edebiliriz. Ancak bazı durumlarda ses hızının

yayılımı homojen değildir. Ses hızı; havanın sıcaklığına ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Frekansa bağlı olarak ise değişmez. Ses, her frekansta aynı hızda hareket eder. Atmosferik basınçtaki hava ideal bir gaz gibi davranır. İdeal bir gaz için durum bağıntısı Denklem 6'da verilmiştir.

$$p = \rho . R . T \tag{6}$$

Burada; p basınç, ρ yoğunluk ve T mutlak sıcaklıktır. R, Boltzmann sabiti ve Avogadro sayısı ile ilişkili olan spesifik gaz sabitidir. Boltzmann sabitinin kB = 1.38066.10^{-23} J/K ve Avogadro sayısının NA = 6.022.10^{23} olduğunu göz önünde bulundurursak, R formülünü Denklem 7'de gösterildiği gibi yazabiliriz.

$$R = k_B . N_A / M \tag{7}$$

Formülde görülen M gazın molar kütlesi (kg/mol) olarak açıklanabilir. Hava için R=286.73 J/KgK 'dır. İdeal bir gaz için ayrıca Denklem 8'de verilen ilişkiye sahibiz.

$$R = C_P - C_V \tag{8}$$

Burada $C_p$ve C_V, sırasıyla sabit basınç ve sabit hacimdeki spesifik ısılardır. İdeal bir gaz için iç enerji e sadece sıcaklığa bağlıdır. İç enerji denklem 9'da verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$de = C_V dt \tag{9}$$

Denklem 9'dan yola çıkarak Denklem 10'da verilen bağıntıyı yazabiliriz.

$$C_V dt = -p d(\rho^{-1}) \tag{10}$$

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{C_V} \frac{d\rho}{\rho} \tag{11}$$

Denklem 10 ve Denklem 11'de verilen denklemleri birleştirirsek,

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} = \frac{dp}{p} = \gamma\gamma \frac{d\rho}{\rho} \quad (12)$$

Denklem 12'yi elde ederiz. Burada özgül ısı oranı Denklem 13'te gösterdiği gibi elde edilir;

$$\gamma\gamma = C_P / C_V \quad (13)$$

Elde edilen bu özgül ısı oranı formülünü, ses tanımı ile karşılaştırırsak, Denklem 14 elde edilir (Rienstra & Hirschberg, 2004).

$$c = (\gamma\gamma RT)^{1/2} \quad (14)$$

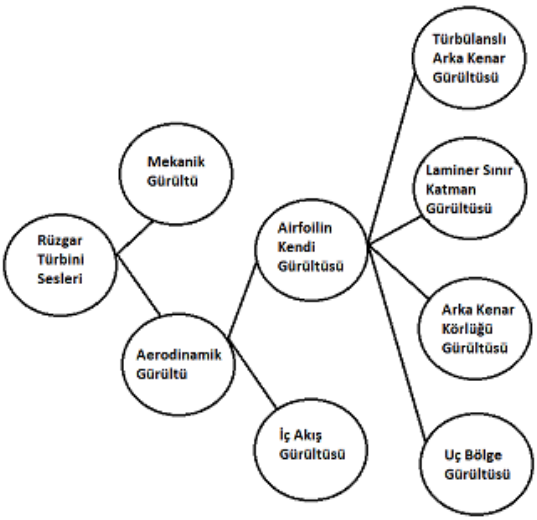
2.1.3. Gürültü Türleri

Rüzgâr türbininin çalışması sırasında, temel olarak dört tür gürültü üretilir. Bunlar; tonal gürültü, geniş bantlı gürültü, dürtüsel gürültü ve düşük frekanslı gürültüdür. Farklı frekanslardaki gürültüye tonal gürültü denir. Bu tür gürültüler; arka kenar körlüğünden girdap dökülmesiyle, türbin kanadı ile ilgili sınır tabakasının dengesiz davranışıyla, türbin kanadının üzerindeki çatlaklar üzerindeki düzensiz akışla oluşur. Geniş bantlı gürültü, sabit bir ses basıncı dağılımı ile ayırt edilir. Geniş bant gürültüsünde ses basınç frekansları 100 Hz'den büyüktür. Genellikle rüzgâr türbini kanatları çevresel türbülans ile etkileşime girdiğinde üretilir. Hışırtı sesi olarak da bilinir. İmpulsif gürültü zamanla genliği değişen kısa akustik darbelerle oluşur. Bu tür gürültünün nedeni, türbin kanatlarının rüzgâr yönündeki türbin kulesinin etrafında bulunan

hava akışı ile etkileşimidir. Düşük frekanslı gürültü, 20 Hz ile 100 Hz arasındaki frekanslarda tanımlanır ve genellikle rüzgâr türbinlerinin arka tarafından esen rüzgarlarla oluşur (Kurultay, 2016).

2.2. Rüzgâr Türbinlerinde Gürültü Mekanizmaları

Rüzgâr türbininde gürültünün üretildiği mekanizmalar, Şekil 4'te gösterildiği gibi mekanik ve aerodinamik olarak ayırt edilebilir.



Şekil 4. Rüzgâr Türbinlerinde Ses Oluşumu

2.2.1. Mekanik Gürültü

Mekanik gürültü; mekanik bileşenlerin hareketinden ve aralarındaki dinamik tepkiden üretilir. Mekanik gürültünün ana kaynakları dişli kutusu, jeneratör, soğutma fanları ve kanat eğimi için yağ soğutucuları gibi yardımcı maddelerdir. Bu gürültü kaynaklarından dişli kutusu ve jeneratör en yüksek gürültü

emisyonunu üretenlerdir. Modern büyük rüzgâr türbinleri, akustik izolasyonu ve yük damper sistemleri gibi birçok gürültü azaltma tekniğine sahiptir.

2.2.2. Aerodinamik Gürültü

Esas olarak türbülansın kanat yüzeyi ile etkileşimi ile ilişkili olan aerodinamik gürültü; iç akış (türbülanslı giriş) gürültüsü ve kanadın kendi gürültüsü olmak üzere iki ana türe ayrılır. İç akış (türbülanslı giriş) gürültüsü; gelen akışın türbülansının türbin kanatları ile etkileşimi nedeniyle üretilir. Kanadın kendi gürültüsü, kanat ile akışın sınır katmanında üretilen türbülans arasındaki etkileşimin sonucudur. Kanadın kendi gürültüsü; Türbülanslı Sınır Katmanı Arka Kenar gürültüsü, Laminar Sınır Katman gürültüsü, Arka Kenar Körlüğü Gürültüsü ve Uç Bölge Gürültüsü olmak üzere dört farklı mekanizmaya ayrılır.

2.2.2.1. İç Akış Gürültüsü

Atmosferik türbülans kanatla karşılaştığında, iç akış veya türbülanslı giriş gürültüsü adı verilen geniş bantlı bir gürültü yayılımına neden olur. Atmosferik türbülansın; aerodinamik ve termal olmak üzere iki nedeni vardır. Aerodinamik türbülans, akışın yer yüzeyi ile etkileşimi ile oluşurken, termal türbülans güneşin yerel ısınmasına bağlı olarak havanın taşıma kuvveti ile üretilir. Türbülansın en önemli iki özelliği, türbülans dalgalanmalarını gösteren türbülans yoğunluğu ve türbülans uzunluk ölçeğidir. Türbülans yoğunluğu; standart sapma ile ortalama rüzgâr hızının oranı olarak tanımlanırken, türbülans uzunluk ölçeği girdapların boyutunu gösterir. Girdapların boyutu, bu mekanizma tarafından üretilen gürültünün frekansı ile ilgilidir. Kanat profili kirişinden

daha büyük girdaplar, kanat profilinin yükünü bir bütün olarak değiştirdikçe düşük frekanslı gürültü üretirken, kanat profili kirişinden daha küçük girdaplar yerelleştirilmiş basınç dalgalanmalarına neden olacak ve böylece yüksek frekanslı gürültü üretecektir.

2.2.2.2. Kanadın Kendi Gürültüsü

Türbülanslı sınır tabakası arka kenar gürültüsü, kanat yüzeyi üzerinde gelişen türbülanslı sınır tabakası ile arka kenar arasındaki etkileşimin sonucudur. Hava akışıyla karşılaşan kanat profilinde, ön kenara yakın durgunluk noktasından başlayarak yüzeyinde bir sınır tabakası oluşur. Belirli hücum açısı ve Reynolds sayısı koşulları karşılandığında, sınır tabakası belirli bir kiriş yönünde laminerden türbülansa geçiş yapar. Bu sınır tabakasının altında türbülans dalgalı bir basınç alanı oluşturur. Türbülanslı sınır tabaka arka kenar gürültüsü bir hışırtı sesi olarak algılanır. En yüksek frekansı tipik olarak 500-1500 Hz. civarındadır.

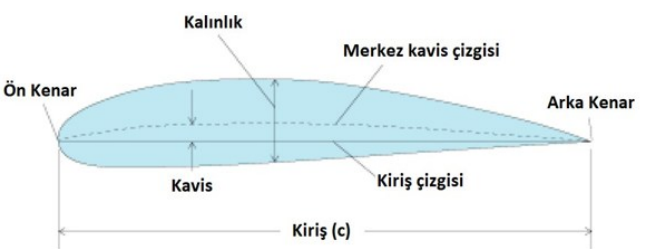
Laminer sınır katman gürültüsü; laminer sınır tabakası kararsızlıkları ve arka kenardan dökülen girdaplar arasındaki etkileşim nedeniyle meydana çıkar. Çoğu modern rüzgâr türbini çok daha yüksek yerel Reynolds sayılarında, yani $Re > 3x10^6$ 'da çalışır. Bu nedenle bu gürültü mekanizması çok da önemli değildir.

Firar Kenar Körlüğü Gürültüsü, Van Karman tipi girdap tabakası olarak da bilinen kör arka kenarlardan girdap dökülmesinin sonucudur. Birbiriyle uyumlu girdaplar döküldükçe, arka kenarda dalgalı bir yüzey basıncı farkına neden olurlar. Bu da arka kenarda tonal radyasyonla sonuçlanır. Bu gürültü mekanizması, arka kenar kalınlığı ve açısı ile arttığı için; arka kenar geometrisine büyük

ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, bu tür gürültüyü azaltmak için; kanat profillerinin arka kenar açısı ve kalınlığı olabildiğince küçük olmalıdır. (Rodrigues, 2012). Uç bölge gürültüsü; kanadın ucundan dökülen girdaplar ile uç yüzey arasındaki etkileşimden dolayı meydana gelmektedir. Bu girdaplar, kanadın emme ve basınç tarafları arasındaki basınç farkından dolayı oluşur. Bu gürültünün seviyesi kanat uç bölge geometrisine bağlıdır.

2.3. Kanat Profilinin Aerodinamiği

Rüzgâr türbininin güç elde etme kapasitesi, hava akışı sırasında temas yüzeyi olduğu için, türbin kanatlarının özelleşmiş şekle sahip kanat profiline bağlıdır. Kanat profilinin yapısı Şekil 5'te gösterilmektedir. Bir kanat profili; üst yüzey ve alt yüzeyden oluşur. Üst ve alt yüzeylerin ortasında merkez kavis çizgisi yer alır. Bu çizginin keskin tarafı arka kenar; geniş tarafı ön kenar olarak adlandırılır. Ön ve arka kenarları birleştiren düz çizgiye kiriş çizgisi denir. Bağıl rüzgâr ve kiriş çizgisi arasındaki açıya; hücum açısı denir (Anderson, 2017).



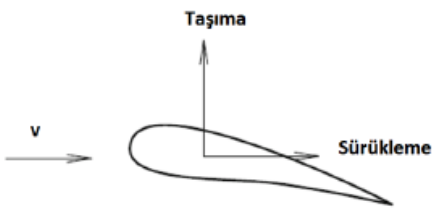
Şekil 5. Kanat profili

Hava akımı kanat yüzeyinden geçtiğinde, kanat profilinin geometrik şeklinden dolayı alt ve üst yüzeyler arasında bir hız farkı ortaya çıkar. Emme tarafı olarak da adlandırılan üst yüzeyin eğriliği daha hızlı hareket eden hava akışı üretir. Basınç tarafı olarak da adlandırılan alt yüzeyin eğriliği ise daha yavaş hareket eden hava akışı üretir. Denklem 15'te verilen Bernoulli denklemine göre akışkanın hızı arttığında basınç düşer ve akışkanın hızı azaldığında basınç artar.

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p = sabit \qquad (15)$$

Kanat profilinin alt ve üst tarafları arasındaki basınç farklılıklarının nedeni de budur. Bu denklemdeki ρ yoğunluk, U akışkan hızı ve p basınçtır.

Kanat profilinin iki tarafındaki bu basınç farkı, iki karakteristik kuvvet ve moment kuvvetini oluşturur. Bu kuvvetler Şekil 6'da gösterilmiştir. Karakteristik kuvvetlerden ilki, gelen hava akımının yönüne dik ve emme tarafına doğru olan taşıma kuvvetidir. İkinci kuvvet ise, gelen hava akışının yönüne paralel olan ve akış yönüne doğru etki eden sürükleme kuvvetidir. Sürükleme kuvveti hem basınç farkının hem de sürtünmenin bir sonucudur (Schaffarczyk, 2020).



Şekil 6. Kanat profilinde oluşan kuvvetler

Rüzgâr türbini kanat profili ile ilgili aerodinamik ve aeroakustik problemleri analiz etmek için temel olarak dört katsayı kullanılır. Bunlar; taşıma katsayısı, sürüklenme katsayısı, moment katsayısı ve basınç katsayısıdır (Schaffarczyk, 2020). Sırasıyla Denklem 16, Denklem 17, Denklem 18 ve Denklem 19'da verilen formüllerle hesaplanırlar.

$$C_l = \frac{L/l}{1/2\rho U^2 c} = \frac{Taşıma\ kuvveti/Birim\ uzunluğu}{Dinamik\ kuvvet/Birim\ uzunluğu} \tag{16}$$

$$C_d = \frac{D/l}{1/2\rho U^2 c} = \frac{Sürükleme\ kuvveti/Birim\ uzunluğu}{Dinamik\ kuvvet/Birim\ uzunluğu} \tag{17}$$

$$C_m = \frac{M}{1/2\rho U^2 Ac} = \frac{Atış\ momenti}{Dinamik\ moment} \tag{18}$$

$$C_p = \frac{\rho - p_\infty}{1/2\rho U^2} = \frac{Statik\ basınç}{Dinamik\ basınç} \tag{19}$$

2.4. Rüzgâr Türbinlerinde Gürültü Hesabı

Rüzgâr türbinlerinin gürültüsü, Lighthill'in akustik analojisi ve Ffowcs Williams ve Hawkings (FW-H) denklemi kullanılarak hesaplanır. Akustik analojide, akustik dalgalanmaların, ortalama aerodinamik akış üzerinde herhangi bir etkisi olmayacak şekilde yeterince küçük olduğu varsayılır.

2.4.1. Lighthill Akustik Anolojisi

Lighthill (1952) yılında yayınladığı bir çalışmada, Navier-Stokes denklemini homojen olmayan bir dalga denklemi olarak yeniden formülüze ederek; Lighthill akustik analojisini oluşturdu (Lighthill, 1952). Bu analoji aeroakustik alanındaki tüm çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Hava akışının yan ürünü olarak üretilen ses üzerine yapmış olduğu çalışmasında, katı sınırların titreşimini gerektiren etkileri göz ardı etmiştir. Sesin, dış kuvvetler olmaksızın, muntazam bir ortamda yayılmasını Denklem 20 ile ifade etmiştir.

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - {a_0}^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \qquad (20)$$

Denklem 20 türetilirken viskoz etkiler ihmal edilmiştir. Denklem 20'nin sol tarafı sesin yayılımını, sağ tarafı ise sesin oluşmasını tanımlar. Lighthill (1952), kinetik enerjinin akustik enerjiye dönüştürülebileceği üç mekanizmayı şu şekilde tanımlamaktadır:

-Büyük bir bölmeye gömülü bir hoparlör diyaframında olduğu gibi, kütlenin sabit bir uzay bölgesinde harekete geçmeye zorlanmasıyla oluşur.

-Uzayın sabit bir bölgesindeki momentumu harekete geçirmeye zorlayarak veya sabit yüzeyler boyunca kütle akısı oranlarını değişmeye zorlayarak oluşur. Bunların her ikisi de sert bir nesne vurulduktan sonra titreştiğinde meydana gelir.

- Katı sınırların hareketi olmadan, ses aerodinamik olarak üretildiğinde olduğu gibi; sabit yüzeyler boyunca momentum akısı oranlarını değişmeye zorlayarak oluşur.

Başka bir deyişle, Lighthill'in akustik anololojisi sadece herhangi bir katı sınır içermeyen üçüncü mekanizma ile ilgilidir (Lighthill, 1952).

2.4.2. FW-H Denklemleri

Lighthill'in akustik analojisine; hareketli katı cismin etkisi dâhil edilerek FW-H denklemleri türetilmiştir. FW-H denklemi; süreklilik denkleminin ve Navier-Stokes denklemlerinin yeniden düzenlenmesiyle elde edilmiştir. İlk olarak, kanat yüzeyinin, sınırlanmamış akış alanında hareketli bir kontrol yüzeyi olarak temsil edilmesiyle türetilir. Kontrol yüzeyinin şekli ve hareketi $f(x,t)$=0 olarak tanımlanır. Bu durumda; kontrol yüzeyinin iç bölgesi f<0 olarak; kontrol yüzeyinin dış bölgesi f>0 olarak ifade edilir. Bu kontrol yüzeyinin içindeki akışın, bozulmamış ortam ile aynı akış durumuna sahip olduğu varsayılmıştır. FW-H denklemi, Denklem 21'de verilmiştir (Wang & Chen, 2023).

$$\frac{1}{{c_o}^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \overline{\nabla^2} p' = \frac{\partial}{\partial t}[(\rho_0 v_n)\delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i}[l_i \delta(f)] + \frac{\overline{\partial^2}}{\partial x_i \partial x_j}\left[T_{ij} H(f)\right] \quad (21)$$

Denklemin sağ tarafının ilki monopol (kalınlık), ikincisi dipol (yükleme), üçüncüsü ise quadrupol terimidir. Monopol ve dipol olarak adlandırılan ilk iki terim; kontrol yüzeyi hariç diğer tüm f değerlerinde 0'a eşit olan Δ fonksiyonuna sahip olmasından dolayı; yüzey kaynakları olarak belirlenebilirler. Üçüncü terim olan quadrupol terimi; sadece yüzeyin dışındaki bölgede 1 değerine eşit olan $H(f)$ fonksiyonuna sahip olduğu için; bir hacim kaynağı olarak belirlenebilir. Hacim integrali hesaplamasının karmaşıklığından

dolayı, üçüncü terim genellikle ihmal edilebilir olarak kabul edilir (Brentner & Farassat, 2003).

FW-H denkleminin terimleri daha detaylı olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir:

-Denklemin sağ tarafındaki ilk terim olan monopol; rüzgâr türbini kanadı dönerken, üretilen akıştaki bozulma nedeniyle oluşan gürültüyü temsil eder. Bunun sebebi ön taraftaki havanın itilmesidir. FW-H denklemlerinde, bu şekilde oluşan gürültüye "thickness noise (kalınlık gürültüsü)" denir. Bu gürültü sadece geometriye bağlıdır. Daha kalın kanat geometrisi daha çok gürültü çıkarır, daha ince kanat geometrisi daha az gürültü çıkarır (Tadamasa & Zangeneh, 2011).

-İkinci terim, yerel kuvvet yoğunluğu ile orantılı olan gürültü kaynağını belirtir. Bu tür bir kaynak, ilişkili basınç alanının neden olduğu akıştaki bozulma nedeniyle oluştuğu için dipol gürültüsü olarak tanımlanabilir. Teknik terim karşılığı; loading term'dir. Bunun sebebi; dipol bölümün içerdiği Pij teriminden dolayıdır. Dönmekte olan türbin bıçağı, ittiği hava ile akış alanını bozar. Herhangi bir katı yüzey varsa; bunun üzerine gelen kuvvetler 2 tiptir. Normal yönde gelenlere basınç kuvvetlere; yüzeye teğet gelenlere viskoz kuvvetler denir. Bu 2 kuvvetin toplamına tork denir. Dik gelen kuvvetler daha önemlidir. Bu kuvvetler FW-H denklemlerinde; Pij olarak tanımlanır (Tadamasa & Zangeneh, 2011). Yükleme gürültüsü, hareketli rotor kanadı yüzeyinin neden olduğu sıvı üzerindeki hızlanan kuvvet tarafından üretilir. Bıçak girdap etkileşim gürültüsü ve geniş bant gürültüsü, önemli yükleme gürültüsü türleridir. Bıçak girdabı etkileşim gürültüsü, sonraki bir

bıçakla etkileşime girdikten sonra açılan bir girdaptan kaynaklanır (Brentner & Farassat, 2003).

-Üçüncü terim, quadrupol kaynağı belirtir. Bu terim, hacim integrali hesaplamasının karmaşıklığından dolayı genellikle ihmal edilebilir olarak kabul edilir. Bu nedenle, orijinal FW-H denkleminde, quadrupol gürültü terimini tahmin edilememektedir. Quadrupol, 4 monopol veya 2 dipolün birleşmesiyle oluşur. İçerdiği; Tij terimi, Lighthill gerilme tensörüdür.

3. Bulgular

3.1. Farklı Hücum Açılarının İncelenmesi

Bu bölüm kapsamında yapılan uygulamalarda; hücum açısının, aeroakustik etkisini görmek amaçlanmıştır. Bunun için 3 boyutlu analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde kanat profili olarak NACA 0012 kullanılırken, hesaplarda kullanılan hücum açıları 0, 2 ve 4 derece olarak seçilmiştir. Uygulamalarda türbülans metodu olarak SST $k-\omega$ yöntemi seçilmiştir. Akustik model olarak ise Ffowcs-Williams ve Hawkings metodu tercih edilmiştir. Analiz sonunda, 0 derece hücum açısı için yapılan analizin sonunda elde edilen basınç dağılımı (cp) diyagramı, literatürdeki veriyle karşılaştırılmıştır. Ardından farklı hücum açılarıyla yapılan analizlerden elde edilen ses basınç seviyesi değerleri, frekansa göre grafikleştirilmiştir. Bu grafikteki eğrilerle beraber, hücum açısının ses basınç seviyesi üzerindeki etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, bu grafikteki eğriler kullanılarak iki boyutlu regresyon polinom denklemleri türetilmiştir. Hem grafikler hem de denklemler karşılaştırılmalı olarak yorumlanmıştır. İlgili türbin kanat profillerinin çizimi ve mesh atılma işlemi sırasında Pointwise

yazılım programı tercih edilmiştir. Pointwise programı; NASA ve ABD Hava Kuvvetleri tarafından ortaklaşa finanse edilerek geliştirilen Gridgen yazılımının özelleştirilmesi sonucu doğmuştur. 2007 yılından beri piyasada olan Pointwise programı havacılık çalışmalarında en sık kullanılan programlarından birisidir (Pointwise, 2009).

Yapılan analizlerde, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) programı olarak ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanmıştır. ANSYS Fluent yazılımı geniş bir fiziksel modelleme kapasitesine sahip olup akış, türbülans, ısı transferi hesaplarının yanı sıra uçak kanadı üzerinden olan akış hesaplamalarında da sıklıkla kullanılan bir yazılımdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği; bir sistemin etrafından veya içinden geçen akışkanın bilgisayar modellemesidir. Bir uçak kanadının üzerinden geçen hava veya boru içerisinde akan su buna örnek olarak verilebilir. Havacılık endüstrisindeki mühendisler aerodinamik taşıma, sürükleme ve motor performansını tahmin etmek için HAD programları kullanmaktadırlar. HAD programları; otomotiv sektöründe, sürtünme tahmini, motor bölgesindeki ısıtma koşullarının tahmini ve motorun emme manifoltundaki debinin hesabı için kullanılabilir. HAD, pahalı testlere olan ihtiyacı azalttığından ve mühendislere tasarımlarını hayata geçirmeden önce öngörme imkânı tanımasından mütevellit hem paradan hem de zamandan tasarruf etmelerine imkân sağlar. HAD analiz süreci; analiz edilen parçanın bilgisayar destekli tasarım modeliyle başlar. Daha sonra, bölümün etrafındaki veya içinden geçen akış bölgesi, bir ızgara veya ağ adı verilen çeşitli ayrık elemanlara bölünür. Daha sonra akış alanını belirlemek maksadıyla, elemanlar arasındaki herhangi bir etkileşimde dâhil olmak üzere, yönetim denklemleri

çözülür. Son adım olarak; kuvvetler, momentler, ısı transferi ve vortekslerin görselleştirilmesi gibi istenen teknik veriler sayısal akış alanından çıkarılır (Fluent, 2017).

Akış alanına ait zamana bağlı bünye denklemlerinin sayısal ayrıklaştırması ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Mekansal ayrıklaştırmalar için sonlu hacim yaklaşımı kullanılacakken zamansal ayrıklaştırma için kapalı zaman ilerlemeli çözücü (Implicit time advancement) tercih edilmiştir. Kapalı zaman ilerlemeli çözücüler teorik olarak sonsuz kararlılık düzlemi tanımlamaktadır. Bu durum pratikte zaman adımı ile mekansal ayrıklaştırma arasındaki koşula bağlılığı gevşetmektedir. Böylece zaman adımı mertebe olarak 10^{-5} s alınabilmektedir. Büyük Girdap Benzeşimi (LES) şemaları için bu adım değerleri bile oldukça yüksek hesaplama sürelerine karşılık gelmektedir, bu sebeple LES yerine SST k−ω türbülans modeli kullanılmıştır. Sıkıştırılamaz akış alanı çözümlerinde basınç – hız bağlaşıklığını ayrıklaştırmak için farklı durumlarda sonlu hacimler çözücüsünün sağladığı SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Mekansal ayrıklaştırma da ise, farklı durumlarda momentum bağıntıları için ikinci mertebeden ileri gidişli şema (Second Order Upwind Scheme) kullanılmıştır. Zamansal ayrıklaştırmalarda ise, tüm analizlerde sınırlandırılmış ikinci mertebeden ileri gidişli şema (Bounded Second Order Implicit) program içinde ayarlanmıştır.

3.1.1. Kanat Geometrileri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Kiriş uzunluğu 0.3048 m ve kanat genişliği 0.1143 metre olan 3 boyutlu NACA 0012 kanat profilinin ağ yapısı, yaklaşık 3 milyon hücre içermektedir. Analizlerde kullanılan NACA 0012 kanadının

geometrik ölçüleri, hesaplamaların neticesinde elde edilen verilerin karşılaştırılacağı literatürdeki çalışmadan alınmıştır (Wasala & ark., 2015). Oluşturulan ağ yapısı, kanadın yakın alanında oluşturulmuştur. NACA 0012 kanat profili kullanılan 3 boyutlu olarak yapılan analizde hava akışkan hızı 71.3 m/s ve Reynolds Sayısı 1.5×10^6 'dır. Ancak, yapılan her analizde hız değerleri, kanat profilinin hücum açısına göre değişiklik göstermektedir. Bu değişiklik Denklem 22 ve 23'te verilen formüllerle hesaplanabilir.

$$u = u_{\infty}.\cos(\alpha) \tag{22}$$

$$v = u_{\infty}.\sin(\alpha) \tag{23}$$

u_{∞} , hava akış hızını, α hücum açısını temsil etmektedir. Yakınsama kriterinin 10^{-6} olarak belirlendiği ve SST $k-\omega$ türbülans yöntemiyle hesaplanan analizler 0.35 s sürdürülmüştür. NACA 0012 kanat profili etrafında gerçekleştirilen aeroakustik analizlerde kullanılan mikrofonların konumları Şekil 7'de gösterilmektedir.

Şekil 7. Analizlerde kullanılan mikrofonların konumları

NACA 0012 kanat profili etrafında gerçekleştirilen aeroakustik analizlerde kullanılan mikrofonların konumları Şekil 7'de gösterilmektedir. Mikrofonlar, kanadın hem üst yüzeyinde hem de alt yüzeyinde simetrik olarak yerleştirilmiştir ve belirli bir mesafede konumlandırılmıştır. Bu düzen, akustik gürültünün doğru ve kapsamlı bir şekilde ölçülmesine olanak tanır. Kanat profili üzerindeki mikrofonların temel amacı, hava akışından kaynaklanan

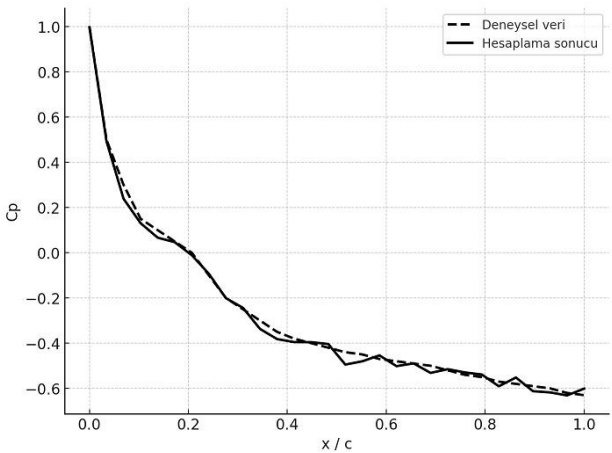
basınç dalgalanmalarını ölçerek kanadın etrafında oluşan akustik gürültüyü analiz etmektir. Akışın kanat yüzeyi ile etkileşimi sırasında, özellikle ön kenar ve arka kenar bölgelerinde basınç değişimleri meydana gelir. Bu değişimler, aerodinamik performansı doğrudan etkileyen türbülans ve akış ayrılması gibi olayları oluşturur. Mikrofonlar sayesinde, bu olayların oluşturduğu ses basınç seviyeleri detaylı bir şekilde incelenebilir.

Ön kenar (leading edge), akışın kanatla ilk temas ettiği bölgedir ve burada basınç ani olarak yükselir. Mikrofonlar bu bölgede, yüksek basınç değişimlerini ve akışın kanat yüzeyine çarptığı noktadaki etkilerini ölçer. Akış, kanat yüzeyi boyunca ilerledikçe hızlanır ve basınç azalır. Bu durum, kanadın orta bölgelerinde daha stabil bir basınç dağılımına neden olur. Ancak arka kenar (trailing edge) bölgesine gelindiğinde, akışın yüzeyden ayrılması sonucu türbülanslı yapılar oluşur. Türbülans, özellikle yüksek frekansta gürültü oluşturan önemli bir kaynaktır ve mikrofonlar bu bölgede türbülansın akustik etkilerini tespit edebilir. Mikrofonların simetrik yerleşimi, kanadın üst ve alt yüzeyi arasındaki basınç farklarının ölçülmesini sağlar. Aerodinamik olarak simetrik bir profil olan NACA 0012, düşük hücum açılarında simetrik bir akış davranışı sergiler. Ancak hücum açısı arttıkça, kanadın üst ve alt yüzeyleri arasındaki basınç farkı büyümeye başlar. Mikrofonlar yardımıyla bu farklar detaylı olarak ölçülerek, akış simetrisinin bozulduğu bölgeler ve gürültü kaynakları belirlenebilir. Ayrıca mikrofonların kanat yüzeyine olan mesafesi, ses dalgalarının serbestçe yayılmasını sağlamak amacıyla dikkatlice seçilmiştir. Bu düzenleme, mikrofonların kanat yüzeyindeki basınç değişimlerini doğrudan ölçebilmesini ve serbest alan koşullarında çalışmasını

sağlar. Böylece ölçülen gürültü değerleri, kanat yüzeyinden kaynaklanan basınç dalgalanmalarının bir yansıması olur. Sonuç olarak, bu mikrofon yerleşim düzeni, NACA 0012 kanat profili etrafındaki aerodinamik akışın oluşturduğu akustik gürültüyü detaylı bir şekilde analiz etmek için tasarlanmıştır. Simetrik dağılım sayesinde hem üst hem de alt yüzeydeki basınç değişimleri karşılaştırılabilir ve kanadın akustik performansı değerlendirilebilir. Özellikle ön kenar ve arka kenarda yapılan ölçümler, türbülans oluşumu ve akış ayrılması gibi kritik aerodinamik olayların anlaşılmasını sağlar. Bu tür veriler, sayısal analizlerin doğrulanması ve gelecekteki kanat tasarımlarının iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

3.1.2. Sonuçlar ve Değerlendirme

Yapılan analizleri doğrulamak için hücum açısı 0 derece olan analizden elde edilen basınç katsayısı deneysel veriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 8'de verilmiştir.

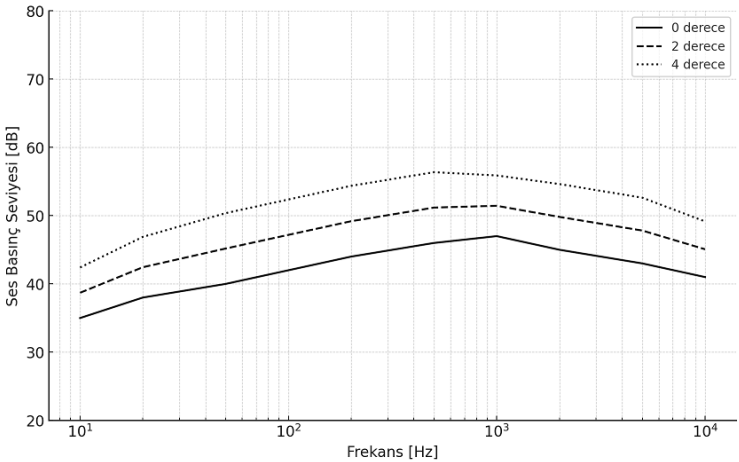


Şekil 8. 0º hücum açısı için cp sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 8’de, NACA 0012 hava profilinin yüzeyi boyunca basınç katsayısı dağılımı (Cp) sonuçlarını gösteren bir karşılaştırma verilmiştir. Grafikte deneysel veri ve hesaplama sonucu olmak üzere iki veri seti yer almaktadır. Yapılan analizlerdeki Cp diyagramları, sayısal hesaplamaların doğruluğunu test etmek ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Basınç katsayısı (Cp), akışın hız ve basınç değişimlerini temsil etmektedir. Bu değer, bir kanat üzerinde yüksek basınç bölgeleri ile düşük basınç bölgeleri arasındaki farkı ortaya koymakta ve aerodinamik performansın anlaşılmasında kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Grafikte x ekseni, kanat üzerindeki göreceli uzunluğu (x/c) temsil ederken; y ekseni, basınç katsayısı değerlerini (Cp) ifade etmektedir. Grafiğin başlangıç noktasında (x/c=0) ön kenar bölgesi yer almaktadır. Burada Cp değeri maksimum seviyeye, yani yaklaşık 1.0’e ulaşmıştır. Bu durum, akışın kanadın ön kenarına çarptığı ve basıncın en yüksek olduğu bölgeyi ifade etmektedir. Deneysel veri ile hesaplama sonucu bu noktada neredeyse birebir örtüşmekte ve sayısal modellemenin doğruluğunu göstermektedir. Kanat yüzeyi boyunca ilerledikçe (x/c=0.1−0.4) basınç katsayısı hızla düşüş göstermektedir. Pozitif değerlerden negatif değerlere geçiş, akışın kanat yüzeyi boyunca ivmelenmesiyle ilişkilidir. Bernoulli ilkesi gereği akış hızı arttıkça basınç azalır. Bu bölgede deneysel veriler ve hesaplama sonuçları büyük oranda uyumlu olsa da küçük sapmalar dikkat çekmektedir. Hesaplama sonucu, deneysel veriye kıyasla biraz daha düşük Cp değerleri göstermektedir. Bu farklılığın, sayısal analiz sırasında kullanılan ağ yapısının çözünürlüğü ve türbülans modelinin hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Orta

bölgeyi geçtikten sonra (x/c=0.4−1.0) Cp değeri daha yavaş bir düşüş eğilimi göstererek “-0.4 ile -0.6” arasında sabitlenmiştir. Bu durum, akışın kanat üzerinden geçerek arka kenara ulaştığını ve basınç farklarının stabilize olduğunu göstermektedir. Deneysel veri ile hesaplama sonucu burada oldukça yakın bir uyum göstermektedir. Ancak arka kenara doğru (x/c 0.8-1.0 arasında), deneysel veriler ile hesaplama sonucu arasında küçük farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıklar, viskoz etkilerin ve akış ayrılmalarının sayısal çözümde tam olarak yakalanamamasından kaynaklanabilir. Genel olarak, bu grafik deneysel veriler ile sayısal hesaplama sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Özellikle kanadın ön kenarı ve arka kenarındaki küçük sapmalar haricinde, iki veri seti arasındaki farklar oldukça küçüktür. Bu durum, sayısal analiz yöntemlerinin güvenilirliğini desteklemektedir. Ancak türbülans etkilerinin ve viskoz akış ayrılmalarının tam olarak çözülebilmesi için ağ çözünürlüğünün artırılması ve daha karmaşık türbülans modellerinin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

NACA 0012 kanat profili için farklı hücum açıları (0°, 2°, ve 4°) kullanılarak elde edilen ses basınç seviyelerinin (dB) frekansla ilişkisini gösteren grafik Şekil 9’da verilmiştir. Bu şekil frekans aralığının logaritmik ölçekte (10 Hz- 10^4 Hz) analiz edildiği bir akustik değerlendirme sunmaktadır.



Şekil 9. Farklı hücum açıları ile yapılan analizlerinden elde edilen akustik sonuçların karşılaştırılması

Hücum açısının 0'dan 2°'ye çıkmasıyla birlikte akışın stabilitesi kısmen bozulmuş ve türbülans oluşmaya başlamıştır. Bu durum, ses basınç seviyelerinde belirgin bir artışa neden olmaktadır. Ses basınç seviyesi, düşük frekanslarda 43 dB seviyesinden başlayarak frekansın artışıyla birlikte daha hızlı bir şekilde yükselmiştir. Orta frekanslarda (yaklaşık 1000 Hz civarı) maksimum seviyeye ulaşarak 50-51 dB seviyesine kadar çıkmıştır. Bu, türbülansın yoğunlaştığı bölgelerde gürültü oluşumunun arttığını göstermektedir. Yüksek frekans bölgesinde ise ses basınç seviyesi, tıpkı 0° hücum açısında olduğu gibi, azalma eğilimi gösterse de 0°'ye kıyasla daha yüksek bir değerde (45-46 dB) kalmaktadır. Bu bulgular, 2° hücum açısında kanadın üzerinde oluşan türbülanslı akışın daha fazla enerjiye sahip olduğunu ve gürültü seviyesini yükselttiğini ifade etmektedir.

Hücum açısının 4°'ye çıkarılması, kanat yüzeyi üzerinde türbülansın ve akış ayrılmasının daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır. Ses basınç seviyesi düşük frekanslarda 45 dB civarında başlayarak, frekansın artmasıyla birlikte belirgin bir artış göstermektedir. Orta frekans bölgesinde (yaklaşık 1000 Hz) maksimum seviyeye ulaşan ses basınç seviyesi, 55 dB civarına yükselmiştir. Bu değer, 0° ve 2° açılarına göre önemli ölçüde daha yüksektir ve akışın türbülanslı doğasının akustik gürültüyü ciddi oranda artırdığını göstermektedir. Yüksek frekanslarda ise ses basınç seviyesi hafif bir azalma eğilimi göstermesine rağmen, diğer açılara göre hâlâ yüksek bir seviyede kalarak 50 dB civarına gerilemiştir. Bu sonuçlar, 4°'lik hücum açısında akış ayrılmasının yoğunlaştığını ve yüksek frekanstaki gürültü kaynaklarının daha etkin olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu analizden elde edilen bulgular, hücum açısının artmasıyla birlikte ses basınç seviyelerinde belirgin bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, hücum açısının büyümesinin aerodinamik performans üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ve özellikle akustik gürültü açısından dikkat edilmesi gereken bir faktör olduğunu göstermektedir. Orta frekanslardaki artış, türbülansın etkisini kanıtlamakta; yüksek frekanstaki azalmalar ise enerji dağılımının değiştiğini ortaya koymaktadır. Aeroakustik tasarımlarda, gürültüyü minimize etmek için akış stabilitesinin korunması ve hücum açısının optimum seviyede tutulması gerektiği sonucuna varılabilir.

Hücum açısının ses basınç seviyesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan bu analizde, 0°, 2° ve 4° hücum açıları için elde edilen ses basınç seviyeleri frekans ile ilişkilendirilerek

regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Her açı için yapılan 2. derece polinom regresyonu, frekansın logaritmik değerine dayalı olarak ses basınç seviyelerinin değişimini matematiksel olarak tanımlamaktadır. 0° hücum açısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 24'te verilmiştir.

$$y=-2.9727\cdot\log10(x)^2+17.8272\cdot\log10(x)+19.0135 \quad (24)$$

Denklem 24, 0°'de düşük frekanslarda ses basınç seviyesinin nispeten düşük bir değerle başladığını ve orta frekanslara doğru yavaş bir artış gösterdiğini ifade etmektedir. Orta frekanslarda bir tepe noktasına ulaşan ses basınç seviyesi, yüksek frekanslarda ise azalma eğilimine girmektedir. Bu davranış, 0° hücum açısında aerodinamik akışın daha stabil olması ve kanat yüzeyinde önemli ölçüde türbülans oluşmamasından kaynaklanmaktadır. Stabil akış, akustik gürültünün daha düşük seviyelerde kalmasını sağlamaktadır. 2° hücum açısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 25'te verilmiştir.

$$y=-3.3017\cdot\log10(x)^2+19.1100\cdot\log10(x)+23.6175 \quad (25)$$

Bu durumda ses basınç seviyesi, 0°'ye kıyasla daha yüksek değerlerle başlamaktadır. Özellikle düşük ve orta frekanslarda belirgin bir artış gözlenmektedir. Orta frekanslarda zirve değerine ulaşan ses basınç seviyesi, yüksek frekanslara doğru azalma eğilimi göstermeye başlamıştır. Bu artış, 2°'lik hücum açısında akışın daha türbülanslı bir hale gelmesi ve yüzey üzerinde basınç dağılımının daha dengesiz olmasıyla açıklanabilir. Türbülansın artması, özellikle düşük ve orta frekanslardaki akustik gürültüyü yükseltmektedir. 4°

hücum açısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 26'da verilmiştir.

$$y=-3.3005\cdot\log10(x)^2+18.5304\cdot\log10(x)+29.1944 \quad (26)$$

Bu denklem, 4°'lik hücum açısında ses basınç seviyesinin düşük frekanslarda en yüksek değere ulaştığını göstermektedir. Bu durum, akışın kanat yüzeyinden daha fazla ayrılması ve türbülans oluşumunun maksimum seviyeye ulaşması ile ilgilidir. Yüksek frekanslarda ise ses basınç seviyesi düşüşe geçer, ancak bu düşüş daha önceki açılara göre daha yüksek bir seviyeden başlamaktadır. Bu da akış ayrılmasının yarattığı türbülanslı yapıların akustik gürültüyü artırdığına işaret etmektedir.

Genel olarak, hücum açısının artması, özellikle düşük ve orta frekanslardaki ses basınç seviyelerini artırmaktadır. Bu durum, aerodinamik akışın stabilitesini kaybetmesi ve kanat yüzeyinde türbülans etkilerinin artmasına bağlıdır. 0°'lik açıda akış daha stabil ve basınç dağılımı daha düzenli iken, 2° ve 4°'lik açılarda akış ayrılmaları ve basınç farklılıkları önemli ölçüde artmakta ve bu da akustik seviyelerin yükselmesine neden olmaktadır. Hücum açısının büyümesiyle orta frekanslardaki zirve değerlerin belirginleşmesi ve yüksek frekanslara doğru azalma eğiliminde bir fark oluşması, aerodinamik ve akustik etkileşimin kompleks doğasını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, hücum açısındaki artışın, ses basınç seviyeleri üzerindeki etkisi hem frekans bazında hem de genel akustik performans açısından değerlendirilmiş, akış stabilitesinin bozulmasının gürültü seviyelerini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu analiz, kanat üzerindeki aerodinamik akışın

akustik performansı nasıl etkilediğini anlamak adına önemli bir veri sunmaktadır.

3.2. Farklı Mesh Sayısı ve Zaman Adımı Durumlarının İncelenmesi

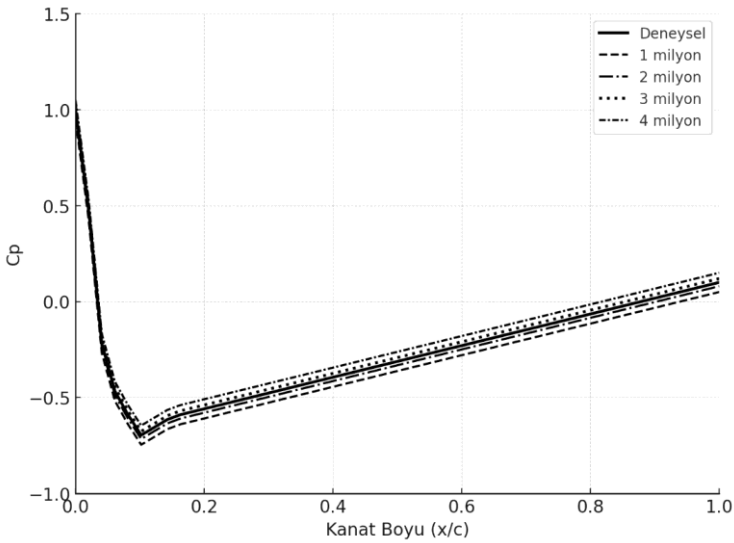
Bu bölüm kapsamında yapılan uygulamalarda; 0 derece hücum açısında farklı parametrelerin SPL üzerine etkisini görmek maksatlı bir dizi HAD analizi yapılmıştır. Bu bölümde incelenen parametreler mesh sayısının ve zaman adımının aeroakustik sonuca etkisi olmuştur. Yapılan hesaplamalarda 3 boyutlu NACA 0015 kanat profili kullanılarak yapılmıştır. Rüzgâr türbini kanadının durağan olduğu varsayılmıştır. Uygulamalar ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılarak yapılırken; akustik model olarak Ffowcs-Williams ve Hawkings metodu tercih edilmiştir. Analiz sonunda elde edilen çözümler, literatürdeki verilerle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. İlgili türbin kanat profillerinin çizimi ve mesh atılma işlemi sırasında; bir önceki bölümde olduğu gibi burada da Pointwise yazılım programı tercih edilmiştir.

3.2.1. Kanat Geometrileri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Kiriş uzunluğu 0.61 m ve kanat genişliği 1.8 metre olan NACA 0015 kanat profilinin ağ yapısı, yapılan uygulamalarda farklı sayılarda mesh hücresi içermektedir. Yapılan analizlerde hava akışkan hızı 30 m/s ve Reynolds Sayısı 1.3x106'dır. Yapılan bu analizler sonucu cP ve SPL grafikleri elde edilerek hem yapılan diğer analizler ile hem de deneysel sonuçlar ile ortak grafik üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Ardından, elde edilen grafiklerdeki eğriler için iki boyutlu polinom denklemleri elde edilmiş ve yorumlanmıştır.

3.2.2. Sonuçlar ve Değerlendirme

İncelenen ilk parametre değişikliği; HAD programı ile yapılan analizlerde kullanılan geometrinin mesh sayısı olmuştur. Pointwise programı kullanılarak 1 Milyon, 2 Milyon, 3 Milyon ve 4 Milyon olmak üzere; 4 farklı mesh sayısına sahip 3 boyutlu NACA 0015 kanat profili ağ yapısı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu mesh dosyaları Fluent programı vasıtasıyla, LES yönteminin Smagorinsky-Lilly türbülans modeli kullanılarak 0.7 s boyunca analize tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılarak grafikler şeklinde verilmiştir (Zhang & ark., 2016). Yapılan hesaplamaları doğrulamak için yapılan farklı mesh sayıları kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen basınç katsayısı eğrileri, deneysel veriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 10'da verilmiştir.



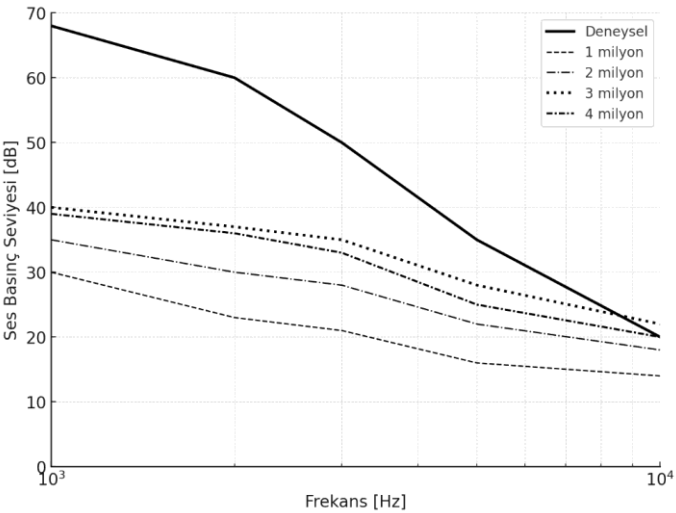
Şekil 10. Farklı mesh sayıları analizleri için cp sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 10, NACA 0015 kanat profili üzerinde yapılan basınç katsayısı (Cp) dağılımını hem deneysel veriler hem de farklı ızgara sayılarına sahip mesh yapılarının sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Yatay eksen (x/c) kanat boyunun normalize edilmiş uzunluğunu temsil ederken, dikey eksen basınç katsayısı değerlerini göstermektedir. Analizde, 1 milyon, 2 milyon, 3 milyon ve 4 milyon elemanlı ağ yapıları kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir ve bu sonuçlar, deneysel verilerle doğrulama amacıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 10'da, kanadın ön kenarı (x/c=0) bölgesinde hava akışının kanat yüzeyine çarptığı noktada, Cp = 1.0 değerine yakın bir basınç katsayısı görülmektedir. Bu bölge, akışın sıkıştığı ve basıncın en yüksek olduğu noktadır. Deneysel veriler ve sayısal analiz sonuçları, bu bölgede oldukça tutarlı bir şekilde ilerlemektedir. Ancak çözünürlük farkları, 1 milyon elemanlı ağ yapısında hafif sapmaların oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle kanadın ön kenarından hemen sonra (x/c≈0.1) Cp değerinde hızlı bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş, hava akışının hızlanması ve basıncın azalmasıyla ilişkilidir. Ağ çözünürlüğünün etkisi bu bölgede net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. 1 milyon elemanlı ağ yapısı, düşük çözünürlüğü nedeniyle akış detaylarını yeterince yakalayamamış ve basınç dağılımında küçük sapmalar göstermiştir. Bu sapmalar, kanadın yüzeyi boyunca ilerledikçe (x/c=0.1−0.3) belirgin hale gelmekte, ancak genel eğilim deneysel veriyi takip etmektedir. 2 milyon elemanlı ağ yapısı ise bu durumu bir miktar iyileştirmiş, ancak hala çözünürlüğün yetersiz kaldığı bazı bölgelerde küçük farklar oluşmuştur. Bu durum, düşük çözünürlükte hesaplama ağlarının akışın inceliklerini yakalayamamasından

kaynaklanmaktadır. Çözünürlük arttıkça (3 milyon ve 4 milyon elemanlı ağ yapıları) deneysel verilere olan uyum belirgin şekilde artmıştır. Özellikle kanat yüzeyinin orta kısmından arka kenara ($x/c=0.3-1.0$) doğru ilerledikçe basınç katsayısı değerleri, deneysel verilerle neredeyse tamamen örtüşmektedir. Bu durum, yüksek çözünürlüklü ağ yapılarının, akış ayrıntılarını daha iyi çözebildiğini ve doğru sonuçlar elde edilebildiğini göstermektedir. 3 milyon ve 4 milyon elemanlı ağlar, özellikle kanadın arka kenarında ($x/c\approx1.0$) basınç katsayısının düzenli artışını doğru bir şekilde yakalamış ve deneysel verilerle paralel ilerlemiştir. Kanat yüzeyi boyunca basınç katsayısının değişimi incelendiğinde, ön kenardan başlayarak hızlı bir düşüş yaşandığı, ardından orta bölgelerde stabil bir şekilde ilerlediği ve arka kenara doğru düzenli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu davranış, kanat yüzeyinde oluşan hızlanma bölgesi, basınç ayrışması ve akışın yeniden birleşme etkilerini açıklamaktadır. Sayısal çözünürlüklerin artışı ile bu akış bölgeleri daha hassas bir şekilde modellenebilmiş ve sonuçlar deneysel veriye yaklaşmıştır. Sonuç olarak, grafik, sayısal analizlerde çözünürlük farklarının doğruluk üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. 1 milyon elemanlı ağ yapısı, hesaplama maliyeti düşük olsa da doğruluk konusunda sınırlı kalmaktadır. 2 milyon elemanlı yapı daha tutarlı sonuçlar verirken, 3 milyon ve 4 milyon elemanlı ağ yapıları deneysel verilerle en iyi uyumu sağlamıştır. Bu durum, yüksek çözünürlüklü ağların, akış detaylarını ve kanat profili boyunca basınç dağılımını daha doğru şekilde yakalayabildiğini kanıtlamaktadır. Bu tür analizler, CFD çalışmalarında çözünürlük seçiminin kritik önemini vurgulamakta ve deneysel verilerle doğrulama yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

NACA 0015 kanat profili için farklı ızgara sayılarına sahip mesh dosyaları kullanılarak elde edilen ses basınç seviyelerinin (dB) frekansla ilişkisini gösteren grafik Şekil 11'de verilmiştir. Bu şekil frekans aralığının logaritmik ölçekte (10^3 Hz- 10^4 Hz) analiz edildiği bir akustik değerlendirme sunmaktadır.



Şekil 11. Farklı mesh dosyaları ile yapılan analizlerinden elde edilen akustik sonuçların karşılaştırılması

Şekil 11, NACA 0015 kanat için farklı mesh sayılarıyla yapılan ses basınç seviyesi (dB) analizlerinin sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Yatay eksende frekans (Hz) değerleri logaritmik bir ölçekte yer alırken, dikey eksende ses basınç seviyesi (dB) değerleri gösterilmektedir. Grafik, özellikle düşük mesh sayılı yapıların, türbülanslı akış kaynaklı aeroakustik gürültüyü doğru bir şekilde modelleme konusundaki yetersizliklerini ortaya koyarken, mesh sayısının artışıyla birlikte sayısal analizlerin deneysel verilere yaklaştığını da açıkça göstermektedir.

Deneysel veri eğrisi, frekans arttıkça ses basınç seviyesinde belirgin bir düşüş göstermektedir. Özellikle düşük frekans bölgelerinde (10^3 Hz) ses basınç seviyesi 70 dB civarından başlamakta ve frekans değerinin artışıyla birlikte, yüksek frekanslarda 20 dB seviyesine kadar azalmaktadır. Bu eğilim, düşük frekanslarda türbülanslı akışın etkisinin daha baskın olduğunu, yüksek frekanslarda ise enerji yoğunluğunun azaldığını göstermektedir. Farklı ızgara sayısına sahip ağ yapılarından elde edilen sonuçlar, deneysel veri ile karşılaştırıldığında ızgara sayısı farkının doğruluğa etkisini açıkça ortaya koymaktadır. 1 milyon elemanlı ağ yapısı, en düşük çözünürlüğe sahip olduğundan deneysel verilere kıyasla önemli sapmalar göstermektedir. Özellikle düşük frekanslarda ses basınç seviyesi 30 dB civarında başlayarak yüksek frekanslarda 20 dB'ye doğru azalmaktadır. Bu durum, en az elemana sahip olan mesh yapısının türbülanslı akışın detaylarını doğru bir şekilde çözümleyemediğini ve akustik hesaplamalarda doğruluktan uzaklaştığını göstermektedir. 2 milyon elemanlı ağ yapısı, 1 milyon elemanlı yapıdan daha iyi sonuçlar verse de hâlâ belirli bölgelerde deneysel veriden sapmalar göstermektedir. Özellikle frekansın orta bölgelerinde (1000-2000 Hz) ses basınç seviyesi 35 dB civarlarında seyretmekte ve yüksek frekanslarda düşüş eğilimi devam etmektedir. Bu mesh yapısında türbülansın çözümü daha iyileşmiş olsa da, hesaplama ağının hâlâ yeterince hassas olmadığını göstermektedir. 3 milyon elemanlı ağ yapısı, eleman sayısı arttıkça sayısal analiz sonuçlarının deneysel verilere yaklaşmaya başladığını göstermektedir. Düşük frekanslarda 38-39 dB seviyelerinde başlamakta ve yüksek frekanslara doğru ilerledikçe 25 dB seviyelerine kadar düşüş göstermektedir. Bu ağ yapısı, türbülanslı

akış detaylarını daha iyi çözümleyebilmiş ve aeroakustik gürültü sonuçlarında doğruluk artmıştır. 4 milyon elemanlı ağ yapısı, en iyi mesh yapısına olarak deneysel verilere en yakın sonuçları sunmaktadır. Bu ağ yapısında düşük frekanslarda 40 dB seviyesinden başlayan ses basınç seviyesi, frekans arttıkça düzenli bir düşüş eğilimi sergilemekte ve yüksek frekansta 22-23 dB seviyelerine kadar gerilemektedir. Bu durum, yüksek sayıda eleman içeren ağ yapısının türbülanslı akışın etkilerini ve akustik gürültüyü daha hassas bir şekilde çözebildiğini göstermektedir.

Genel olarak, Şekil 10, mesh yapısındaki eleman sayısı arttıkça sayısal analiz sonuçlarının deneysel verilere olan yakınlığının arttığını açıkça ortaya koymaktadır. 1 milyon elemanlı ağ yapısı doğru sonuçlardan uzak kalırken, 2 milyon elemanlı ağ ile doğruluk bir miktar iyileşmiştir. 3 milyon ve 4 milyon elemanlı ağ yapıları ise türbülansın ve akustik dalgaların detaylarını daha iyi çözerek deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar üretmiştir. Bu bulgular, sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) analizlerinde mesh yapısındaki ızgara elemanı sayısının doğruluk üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Yüksek sayıda elemana sahip olan mesh yapıları, hesaplama maliyetini arttırsa da aeroakustik analizlerde güvenilir ve doğru sonuçlar elde etmek için gereklidir. Özellikle türbülansın etkili olduğu bölgelerde, çözünürlüğün artırılması akustik gürültü tahminlerinde doğruluğu önemli ölçüde iyileştirmektedir.

1 milyon, 2 milyon, 3 milyon ve 4 milyon elemana sahip mesh yapıları kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen ses basınç seviyeleri frekans ile ilişkilendirilerek regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Her mesh yapısı için ayrı ayrı yapılan 2. derece

polinom regresyonu, frekansın logaritmik değerine dayalı olarak ses basınç seviyelerinin değişimini matematiksel olarak tanımlamaktadır. Deneysel verilerden elde edilen regresyon polinomu, Denklem 27'de verilmiştir.

$$y=-0.0008x^2-0.02x+69 \quad (27)$$

Bu denklem, deneysel verilerin frekans arttıkça ses basınç seviyesinin belirgin bir şekilde azaldığını göstermektedir. Başlangıçta 70 dB civarında olan ses basınç seviyesi, 10^4 Hz frekansında 20 dB seviyelerine kadar düşmektedir. Bu doğrusal olmayan yapı, deneysel verilerin güvenilir referans niteliği taşıdığını göstermektedir. 1 milyon elemana sahip mesh yapısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 28'de verilmiştir.

$$y=-0.0009x^2-0.05x+39 \quad (28)$$

Bu denklem, düşük çözünürlüklü mesh yapısının analiz doğruluğunu etkilediğini ifade etmektedir. Özellikle frekans arttıkça deneysel verilere kıyasla önemli sapmalar gözlenmektedir. Başlangıç ses basınç seviyesi 39 dB'den başlamakta ve analiz ilerledikçe hatalar büyümektedir. Negatif katsayının büyüklüğü, eğrinin hızlı bir düşüş sergilediğini ve çözümün yetersizliğini vurgulamaktadır. 2 milyon elemana sahip mesh yapısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 29'da verilmiştir.

$$y=-0.0007x^2-0.04x+32 \quad (29)$$

Bu denklemle birlikte, çözünürlük artışının doğruluk üzerindeki iyileştirici etkisi gözlemlenmiştir. Frekans arttıkça ses basınç seviyesindeki azalma daha kontrollü hale gelmiştir. Başlangıç değeri 32 dB'de başlamakta ve eğri, deneysel verilere kıyasla daha

tutarlı bir eğilim göstermektedir. 3 milyon elemana sahip mesh yapısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 30'da verilmiştir.

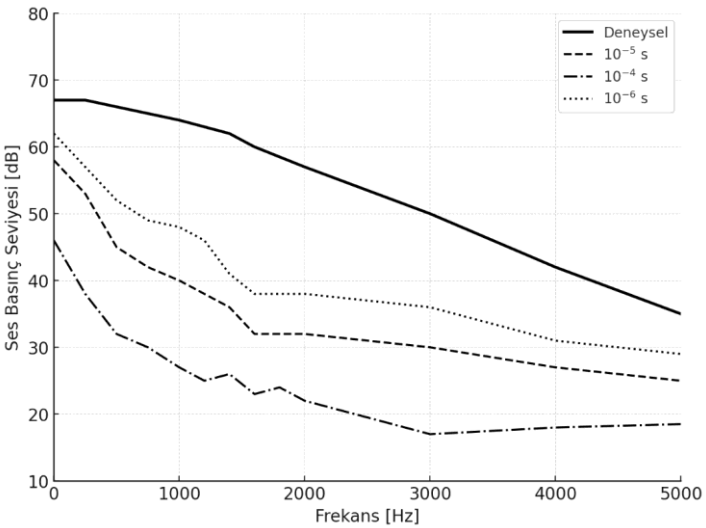
$$y=-0.0006x^2-0.03x+36 \quad (30)$$

Bu çözümde, başlangıç ses basınç seviyesi 36 dB'de başlamakta ve frekansla birlikte kontrollü bir düşüş sergilemektedir. 3 milyon mesh kullanımı, çözüm doğruluğunu önemli ölçüde artırmış ve deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Regresyon katsayıları, çözümün doğrusal olmayan yapısını ve eğrinin giderek daha iyi uyum sağladığını ortaya koymaktadır. 4 milyon elemana sahip mesh yapısı için elde edilen regresyon polinomu, Denklem 31'de verilmiştir.

$$y=-0.0005x^2-0.02x+38 \quad (31)$$

Bu denklem, analiz sonuçlarının deneysel verilere en yakın olduğunu göstermektedir. Başlangıç ses basınç seviyesi 38 dB'den başlamakta ve frekans arttıkça azalma eğilimi deneysel verilerle neredeyse örtüşmektedir. Bu regresyon denklemleri ve grafik analizleri, mesh sayısının çözüm doğruluğu üzerindeki etkisini net bir şekilde göstermektedir. 1 milyon mesh çözümü, deneysel verilere kıyasla önemli sapmalar göstermekte ve yetersiz kalmaktadır. Çözünürlük artırıldıkça, 2 milyon ve 3 milyon mesh kullanımı doğruluğu iyileştirmiştir. Ancak en doğru sonuçlar, 4 milyon mesh çözümünde elde edilmiştir. Deneysel verilerin eğrisi ile 4 milyon mesh çözümünün eğrisi arasındaki benzerlik, yüksek çözünürlüklü mesh yapıların aeroakustik analizlerde kritik bir rol oynadığını kanıtlamaktadır.

NACA 0015 kanat profili için farklı zaman adımlarına analizlerin sonucunda elde edilen ses basınç seviyelerinin (dB) frekansla ilişkisini gösteren grafik Şekil 12'de verilmiştir. Bu şekil frekans aralığının logaritmik ölçekte (0 Hz- 5000 Hz) analiz edildiği bir akustik değerlendirme sunmaktadır.



Şekil 12. Farklı zaman adımları ile yapılan analizlerinden elde edilen akustik sonuçların karşılaştırılması

Şekil 12'de NACA 0015 kanat profili için farklı zaman adımları kullanılarak yapılan aeroakustik analizlerin sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırması verilmiştir. Yatay eksende frekans (Hz), dikey eksende ise ses basınç seviyesi (dB) logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Grafik, zaman adımının sayısal çözüm doğruluğuna etkisini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Deneysel eğri incelendiğinde, düşük frekanslarda 70 dB seviyelerinden başlayan ses basınç seviyesinin, frekans arttıkça düzenli bir şekilde azaldığı ve 5000 Hz'de 40 dB civarına kadar düştüğü görülmektedir. Bu

eğilim, düşük frekanslarda türbülanslı akıştan kaynaklanan enerji yoğunluğunun yüksek olduğunu, yüksek frekanslarda ise enerji dağılımının azalarak akustik etkinin sınırlı hale geldiğini göstermektedir. Zaman adımının büyütülmesi, çözüm doğruluğunu azaltmakta ve hesaplama maliyetini düşürmektedir. 10^{-4} s zaman adımı çözümünde ses basınç seviyeleri düşük frekanslarda 30-35 dB civarında seyretmekte ve yüksek frekanslarda 20 dB'ye kadar gerilemektedir. Özellikle düşük frekans bölgesinde türbülanslı akışın detaylarının yeterince çözülmemesi, akustik gürültü seviyesinin doğru tahmin edilmesini engellemektedir. Bu durum, büyük zaman adımlarının hassas analizlerde kullanıldığında doğruluktan ödün verildiğini göstermektedir. 10^{-5} s zaman adımı, türbülanslı akışın çözümünde nispeten yüksek doğruluk sağlamış ancak deneysel verilere tam anlamıyla ulaşamamıştır. Özellikle düşük frekanslarda 60 dB seviyelerinden başlamakta ve frekans arttıkça 25-30 dB seviyelerine kadar düşmektedir. Zaman adımının küçültülmesi, türbülanslı akışın ve akustik dalgaların daha detaylı çözülmesine imkân tanısa da, çözüm hâlâ orta frekans bölgesinde deneysel verilere belirli bir sapma göstermektedir. 10^{-6} s, en küçük zaman adımı olarak en doğru sayısal sonuçları sunmaktadır. Düşük frekanslarda 50 dB seviyelerinden başlayan ses basınç seviyesi, yüksek frekanslarda 30 dB seviyelerine doğru düzenli bir düşüş göstermektedir. Bu zaman adımı ile türbülansın etkileri ve akustik dalgaların detaylı çözümü daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Özellikle düşük ve orta frekans aralıklarında, deneysel verilerle büyük ölçüde örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, bu doğruluk artışının hesaplama süresinde önemli bir maliyet getirdiği unutulmamalıdır. Şekil 12'den elde edilen sonuçlar, zaman

adımının küçültülmesinin çözüm doğruluğu üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Sonuç olarak, aeroakustik analizlerde zaman adımı seçiminde doğruluk ve hesaplama maliyeti arasında bir denge sağlanması gerekmektedir. Küçük zaman adımları, yüksek doğruluk sağlamasına rağmen, hesaplama maliyetini artırır. Büyük zaman adımları ise hesaplama süresini azaltır ancak doğruluk açısından deneysel verilerden sapmalara neden olur. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında belirli bir doğruluk hedefi doğrultusunda uygun zaman adımının seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

10^{-4} s, 10^{-5} s ve 10^{-6} s zaman adımlarına sahip analizlerden elde edilen ses basınç seviyeleri frekans ile ilişkilendirilerek regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Her zaman adımı çözümü için ayrı ayrı yapılan 2. derece polinom regresyonu, frekansın logaritmik değerine dayalı olarak ses basınç seviyelerinin değişimini matematiksel olarak tanımlamaktadır. 10^{-4} s analizinden elde edilen regresyon polinomu, Denklem 32'de verilmiştir.

$$y=0.000001x^2-0.006755x+46.136 \quad (32)$$

Denklem 32'de başlangıç SPL değeri yaklaşık 46.1 dB olup, düşük bir başlangıç seviyesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, büyük zaman adımının çözüm hassasiyetinin az olduğunu ve enerji dağılımının tam anlamıyla yakalanamadığını göstermektedir. Frekans arttıkça eğim daha yumuşak hale gelmektedir ve 2000 Hz'den sonra daha stabil bir düşüş gözlenmektedir. Burada, düşük zaman adımına sahip çözümün yetersizliği net bir şekilde ortaya

çıkmaktadır. 10^{-5} s analizinden elde edilen regresyon polinomu, Denklem 33'te verilmiştir.

$$y=0.000002x^2-0.008479x+57.643 \quad (33)$$

Denklem 33, zaman adımının daha küçük olduğu durumda, ses basınç seviyesinin (SPL) frekans ile hızlı bir şekilde düştüğünü göstermektedir. Başlangıç değeri yaklaşık 57.6 dB iken, frekans arttıkça eğri hızla aşağı yönlü bir eğilim göstermektedir. Özellikle 3000 Hz sonrası azalma daha yavaş hale gelmekte ve stabil bir seyre dönüşmektedir. Bu durum, çözünürlük yetersizliğinin, akustik dalga yayılımının doğru hesaplanmasını sınırladığına işaret etmektedir. 10^{-6} s analizinden elde edilen regresyon polinomu, Denklem 34'te verilmiştir.

$$y=0.000002x^2-0.010843x+61.756 \quad (34)$$

Denklem 34, zaman adımının daha küçük olduğu durumda SPL'nin deneysel verilere en yakın sonuçları verdiğini göstermektedir. Başlangıç değeri 61.8 dB olup, yüksek çözünürlükle yapılan hesaplamalar sonucunda enerji dağılımı daha doğru yakalanmıştır. Frekans arttıkça eğim daha yumuşak bir azalma göstermekte ve yaklaşık 3000 Hz sonrası eğrinin düşüş hızı stabilize olmaktadır. Bu, zaman adımının küçültülmesiyle çözüm hassasiyetinin ve akustik dalga yayılımının daha doğru hesaplandığını göstermektedir. Sonuç olarak, zaman adımı küçüldükçe, ses basınç seviyesi eğrilerinin deneysel verilere yakınsadığı gözlenmiştir. 10^{-6} s zaman adımı, akustik analizlerde en hassas sonuçları sunarak deneysel veriye en yakın eğriyi elde

etmiştir. Bu durum, zaman adımının küçültülmesinin çözüm hassasiyetini artırdığını ve hesaplamalarda enerji dağılımının daha doğru temsil edildiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, 10^{-5} s ve 10^{-4} s zaman adımlarında çözümün hassasiyeti düşmekte ve elde edilen SPL değerleri deneysel verilerden belirgin şekilde sapmaktadır. Dolayısıyla, rüzgar türbini kanatlarının aeroakustik hesaplamaları gibi yöntemlerde doğru zaman adımı seçiminin, akustik analizlerde çözüm kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışma, rüzgâr türbini kanatlarının aeroakustik performansını etkileyen temel parametreleri kapsamlı bir biçimde incelemiş ve elde edilen bulgular, hem aerodinamik hem de akustik optimizasyonlara önemli katkılar sağlamıştır. Özellikle CFD analizleri ve deneysel verilerin karşılaştırılması, gürültü seviyelerini etkileyen kritik faktörlerin daha iyi anlaşılmasına olanak tanımıştır. Çalışmanın ana bulguları şu şekilde özetlenebilir:

- Hücum açısı arttıkça, ses basınç seviyelerinde belirgin bir artış meydana geldiği görülmüştür. 4° hücum açısında, düşük ve orta frekanslarda gürültü seviyelerinin maksimuma ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, akış ayrılması ve türbülansın etkisinin artmasıyla ilişkili bulunmuştur.

- Daha yüksek çözünürlükte (3 milyon ve 4 milyon elemanlı mesh yapıları) deneysel verilerle uyumun arttığı görülmüştür. 1 milyon elemanlı mesh yapısı, düşük hesaplama maliyetine rağmen doğruluktan ödün vermektedir. Bu bulgu, CFD analizlerinde çözünürlüğün kritik önemini vurgulamaktadır.

- Daha küçük zaman adımlarının kullanılması, aeroakustik analizlerde çözüm hassasiyetini iyileştirmiştir. Bununla birlikte, artan zaman adımları hesaplama maliyetlerini önemli ölçüdé arttırmış, ancak akustik performans analizi için daha hassas çözümler elde edilmiştir.

- Ffowcs-Williams ve Hawkings (FW-H) denklemleri, aeroakustik analizlerde etkili bir yöntem olarak kullanılmış ve özellikle kanat geometrisi ile akış etkileşiminden kaynaklanan gürültülerin belirlenmesinde önemli katkılar sağlamıştır.

Bu çalışmanın sonunda, rüzgâr türbini kanatlarının akustik ve aerodinamik performansını optimize etmek için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Akustik gürültünün minimize edilmesi için optimum hücum açılarının belirlenmesi,

- Yüksek çözünürlükte mesh yapılarının tercih edilmesi,

- Daha stabil ve düşük türbülans etkilerine sahip kanat tasarımlarının geliştirilmesi,

- Enerji verimliliği ve çevresel etkiler açısından akustik performansın öneminin dikkate alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, hem mevcut aeroakustik analizlere bilimsel bir katkı sunmuş hem de gelecekteki kanat tasarımları ve gürültüyü azaltmaya yönelik çözümler için temel oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

Aggarwal, R. (2024). Carbon offsets compatible with the Paris Agreement to limit global warming: Call for a direct action. Environmental Challenges, 17(101034), 1-8.

Anderson, J. D. Jr. (2017). Fundamentals of Aerodynamics (6th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Brentner, K. S., & Farassat, F. (2003). Modeling aerodynamically generated sound of helicopter rotors. Progress in Aerospace Sciences, 39(2-3), 83-120.

Buck, S., Oerlemans, S., & Palo, S. (2016). Experimental characterization of turbulent inflow noise on a full-scale wind turbine. Journal of Sound and Vibration, 385, 219-238.

Carpio, A. R., Martínez, R. M., Avallone, F., Ragni, D., Snellen, M., & van der Zwaag, S. (2019). Experimental characterization of the turbulent boundary layer over a porous trailing edge for noise abatement. Journal of Sound and Vibration, 443, 537-558.

Fluent, A. (2017). Fluent 12. Theory guide. Ansys Inc.

Godono, A., Ciocan, C., Clari, M., Mansour, I., Curoso, G., Franceschi, A., Carena, E., De Pasquale, V., Dimonte, V., Pira, E., Dallapiccola, B., Normanno, N., & Boffetta, P. (2023).

Association between exposure to wind turbines and sleep disorders: A systematic review and meta-analysis. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 254(114273), 1-15.

Guan, J., Hu, J., & Li, B. (2024). How to restore ecological impacts from wind energy? An assessment of Zhongying Wind Farm through MSPA-MCR model and circuit theory. Ecological Indicators, 163(112149), 1-12.

Kim, T., Lee, S., Kim, H., & Lee, S. (2010). Design of low noise airfoil with high aerodynamic performance for use on small wind turbines. Science in China Series E: Technological Sciences, 53(1), 75-79.

Kurultay, A. (2016). Prediction and improvement of wind turbine acoustics for aerodynamic noise reduction (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Lee, G., Cheong, C., Shin, S., & Jung, S. (2012). A case study of localization and identification of noise sources from a pitch and a stall regulated wind turbine. Applied Acoustics, 73(8), 817-827.

Lee, H. M., Lu, Z., Lim, K. M., Xie, J., & Lee, H. P. (2019). Quieter propeller with serrated trailing edge. Applied Acoustics, 146, 227-236.

Lighthill, M. J. (1952). On sound generated aerodynamically I. General theory. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 211(1107), 564-587.

Lou, J., Yu, S., Cui, R. Y., Miller, A., & Hultman, N. (2025). A provincial analysis on wind and solar investment needs towards China's carbon neutrality. Applied Energy, 378(124841), 1-10.

Mohamed, M. (2014). Aero-acoustics noise evaluation of H-rotor Darrieus wind turbines. Energy, 65, 596-604.

Oerlemans, S., & Migliore, P. (2004). Aeroacoustic wind tunnel tests of wind turbine airfoils. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 10-12 May, Manchester, UK, pp. 1-20.

Pointwise. (2009). Computational Fluid Dynamics- A Virtual Wind Tunnel. (20.10.2020 tarihinde http://www.pointwise.com/about/index.html adresinden ulaşılmıştır.)

Pourrajabian, A., Rahgozar, S., Dehghan, M., & Wood, D. (2023). A comprehensive multi-objective optimization study for the aerodynamic noise mitigation of a small wind turbine. Engineering Analysis with Boundary Elements, 155(7), 553–564.

Rienstra, S. W., & Hirschberg, A. (2021). An Introduction to Acoustics. Holland: Eindhoven University of Technology.

Rodrigues, S. S. (2012). Aeroacoustic optimization of wind turbine blades (Yüksek lisans tezi). Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Rogers, T., & Omer, S. (2012). The effect of turbulence on noise emissions from a micro-scale horizontal axis wind turbine. Renewable Energy, 41, 180-184.

Schaffarczyk, A. (2020) Introduction to Wind Turbine Aerodynamics.(2. Baskı). ABD:Springer Nature.

Sobotta, D. (2015). The aerodynamics and performance of small scale wind turbine starting (Yüksek Lisans Tezi). University of Sheffield, İngiltere.

Tadamasa, A., & Zangeneh, M. (2011). Numerical prediction of wind turbine noise. Renewable Energy, 36(7), 1902-1912.

Tagliapietra, S., Zachmann, G., & Fredriksson, G. (2019). Estimating the cost of capital for wind energy investments in Turkey. Energy Policy, 131(7), 295–301.

Wang, H., & Chen, B. (2023). Investigation on aerodynamic noise for leading edge erosion of wind turbine blade. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 240(105484), 1-11.

Wasala, S. H., Storey, R. C., Norris, S. E., & Cater, J. E. (2015). Aeroacoustic noise prediction for wind turbines using Large Eddy Simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145, 17-29.

Zhang, N., Hua, X., Xing, W., & Wu, B. (2016). Computation of vortical flow and flow induced noise by large eddy simulation with FW-H acoustic analogy and Powell vortex sound theory. Journal of Hydrodynamics, 28(2), 255-266.

BÖLÜM XI

Metal Tozu Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi

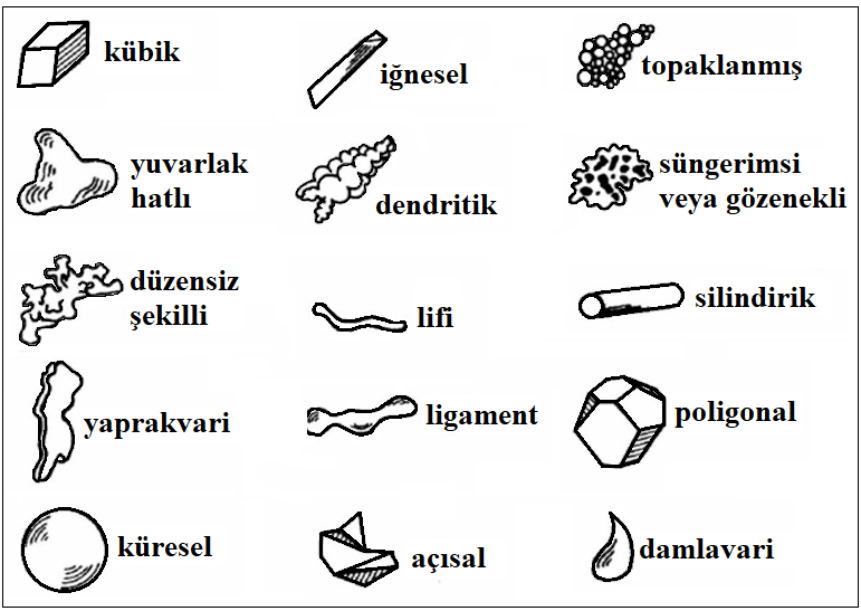
Naci KURGAN[1]

Giriş

Toz metalürjisinde parça üretimi tozun üretilmesi ile başlar. Toz metalürjisi ile imal edilen parçanın yapısı, parçayı oluşturan tozun özelliklerine direkt olarak bağlıdır ve özellikle tozların kimyasal bileşimi, şekli ve boyutları çok önemlidir. Metalik malzemelerin birkaç mikrondan, birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış parçacıkları toz olarak tanımlanmaktadır. Hemen hemen bütün malzemeler özelliklerine uygun bir yöntem kullanılarak toz haline getirilebilir, fakat tozları üretmek için seçilen yöntemler malzeme özelliklerine bağlıdır (Çivi, 2011; Yıldız, 2007). Metal tozlarının üretiminde kullanılan yöntemler, tozların birçok özelliklerini tayin eder. Bir tozun üretim yöntemi, özellikle o tozun

[1] Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye, Orcid: 0000-0001-7297-7249, naci.kurgan@omu.edu.tr

boyut ve şekil gibi özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. (Aydın, 2005; German, 1994; Lawley, 1992; Sajjad, 2017). Tozların maliyet, boyut, mikroyapı, yüzey durumu ve geometrik şekli gibi bazı özellikleri, toz üretim yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir. Tozların geometrik şekilleri üretim yöntemine bağlı olarak küreselden dendritik formlara kadar çok farklı olabilmektedir. Şekil 1'de çeşitli üretim yöntemleriyle üretilen tozların şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 1: Çeşitli üretim yöntemleriyle üretilen şematik toz şekilleri

Kaynak: German, 2007

Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört toz üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

1. Mekanik yöntemler

Talaşlı üretim yöntemi

Öğütme yöntemi

Darbe yöntemleri

Mekanik alaşımlama

2. Kimyasal yöntemler

Oksit indirgeme

Sıvı fazdan çökeltme

Isıl bozunma

3. Elektroliz yöntemi

4. Atomizasyon yöntemleri,

Sıvı ve su atomizasyon yöntemi

Gaz atomizasyon yöntemi

Savurmalı atomizasyon yöntemi

Döner disk yöntemi

Döner elektrot yöntemi

Vakum atomizasyon yöntemi (Yıldız, 2007)

Endüstride kullanılan tüm metallerin ve seramiklerin, uygun bir toz üretim yöntemi seçilerek toz haline getirilebilmeleri mümkündür. Malzemeler birbirlerinden çok farklı özelliklere sahip oldukları için, tek tip toz üretim yöntemi ile üretilmeleri mümkün değildir. Bir toz üretim yönteminin diğerlerine göre tercih edilebilir olması, yöntemin ekonomikliğine, uygulanabilirliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne

ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır (German, 1994). Geleneksel toz üretim yöntemlerine ilave olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılmaktadır. Günümüzde endüstride kullanılan tozların yaklaşık olarak %70'den fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Toz metalürjisinde kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Toz metalürjisinde kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları

Üretilen Miktar	%70	%15	%15			
Toz Malzeme	Atomizasyon	Kimyasal İndirgeme	Öğütme	Elektrolitik Çökelme	Isıl Ayrışma	Sıvı veya Gazdan Çökeltme
Alüminyum/ Al Alaşımları	√					
Berilyum			√	√		
Bakır/Bakır Alaşımları	√	√		√		√
Cu-Al	√					
Cu Pb	√					
Cu Sn (bronz)	√					
Cu-Zn (pirinç)	√					
Cu-Ni-Zn	√					
Demir/Demir Alaşımları	√	√	√	√	√	
Düşük Alaşımlı Çelik	√					
Paslanmaz Çelik	√					
Takım Çeliği	√					
Molibdenim		√				
Nikel		√			√	√

Nikel Alaşımları	√		√			
Gümüş	√			√		√
Tantalum		√		√		
Kalay	√					
Titanyum	√	√			√	
Tungsten		√				
Zirkonyum	√				√	

Kaynak: Kurt, 2004

1. Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemler ile toz üretimi, genel olarak darbeli bir öğütücü içerisinde metal tanelerinin kırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemle elde edilen metal tozlar genellikle pul şeklindedir. Elde edilen tozlar kullanılmadan önce tavlanarak, gerilimleri giderilmelidir. Mekanik toz üretim yöntemleri, talaşlı üretim, öğütme, darbe ve mekanik alaşımlama olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. (German, 2007).

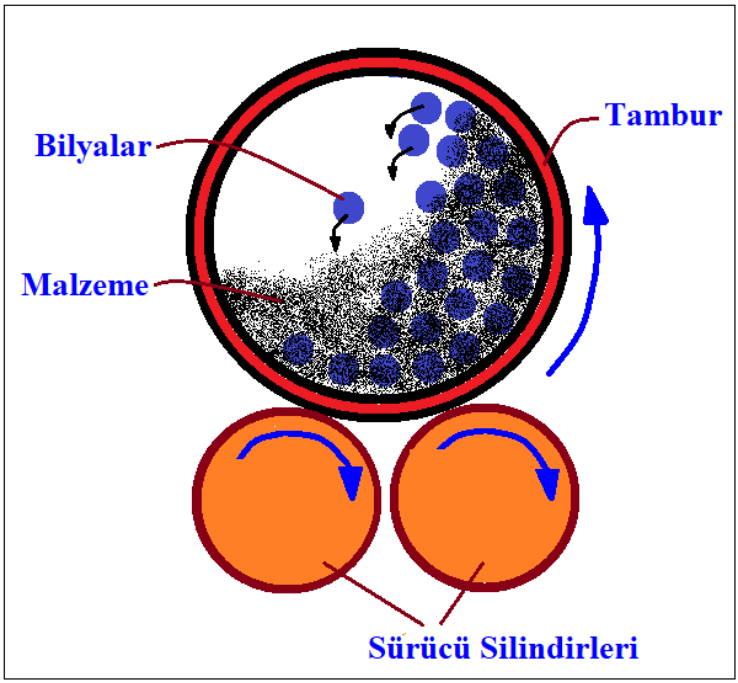
1.1. Talaşlı Üretim Yöntemleri

Frezeleme, tornalama ve taşlama gibi geleneksel talaş kaldırma yöntemleri kullanılarak çok iri ve karmaşık şekilli tozlar üretilmektedir. Talaşlı imalat işlemlerinden sonra ortaya çıkan çok miktarda talaş hurdası sayesinde, metal tozlarının geri dönüşümü ve kaba tozların üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen hurda talaşlar, çeşitli kimyasal tekniklerle temizlenir ve daha sonra iri ve karmaşık şekilli üretilen tozlar, öğütülerek ince taneli tozlar haline getirilmektedir. Yüksek karbonlu çelik tozlar bu yöntemle üretilmektedir (German, 1994). Talaşlı imalat yöntemi, küçük ölçekli tozların üretiminde kullanışlıdır. Ortam şartlarından ve

işleme sıvılarından kaynaklanan kimyasal kirlilikler nedeniyle toz özelliklerinin kontrolünün zayıflığı bu yöntemin olumsuz tarafını oluşturmakla birlikte, aynı zamanda verimsiz ve yavaştır. (Özaydın, 2015).

1.2. Öğütme Yöntemi

Öğütme yönteminde temel prensip, parçalanacak malzeme ile bilyeler, çekiçler ve çubuklar gibi sert cisimler arasında bir mekanik darbe meydana getirilerek, metal malzemelerden ince taneli tozların üretilmesini sağlamaktır. Talaşlı imalat veya diğer darbeli yöntemlerden elde edilen kaba taneli tozların küçültülmesinde öğütme yöntemi aygın kullanılmaktadır. Şekil 2'de öğütme işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi öğütme işleminde ilk olarak, bir öğütme kabına (öğütme hücresi) aşınmaya dayanıklı bilyeler ile birlikte kaba taneli tozlar yerleştirilir (Lu & ark., 1998).



Şekil 2. Öğütme yönteminin şematik olarak gösterimi

Kaynak: Cambronero & ark., 2003, German, 2007

Sürücü silindirik miller vasıtasıyla dönen öğütme kabı içerisinde bulunan aşınmaya dayanıklı bilyeler, iri taneli öğütülecek toz malzemeye sürekli çarparak veya birlikte titreştirilerek darbe etkisiyle tozları daha küçük boyutlu hale getirmektedir. Öğütme kabının hızı, öğütme sırasında çok önemli etken bir parametredir. Eğer öğütme kabının hızı çok yüksek ise, merkez kaç kuvvetinin etkisiyle bilyelerin hareketi sınırlanır ve kabın alt kısmına düşmeden kap ile beraber dönmesine sebep olur ve dolayısıyla malzeme ve bilyeler arasındaki bağıl hareket azalarak topaklaşma meydana gelir. Diğer taraftan öğütme işlemi düşük hızlarda yapıldığında ise,

bilyeler yatayda oldukları kısımda yuvarlanma hareketi yaptıkları için tozlar öğütülememektedir (Sıralı, 2018). Bu nedenle öğütme işleminde optimum dönme hızı belirlenerek, bilyelerin ve malzemenin öğütme kabının en üst kısmına kadar yükselerek, geriye kalan malzemenin üzerine düşmesi sağlanmalıdır.

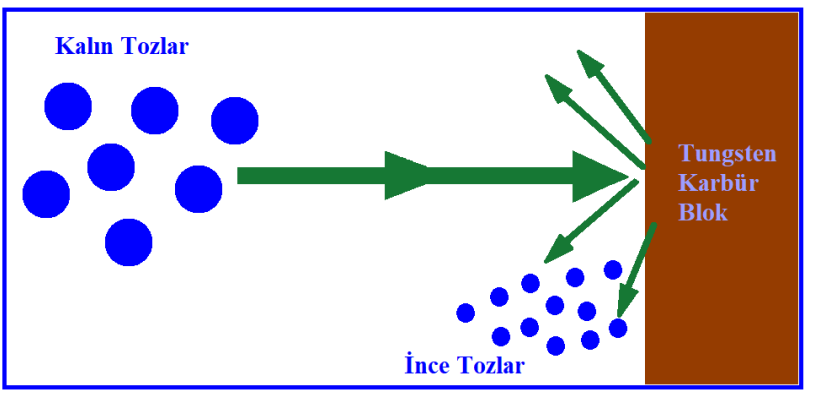
Öğütme işleminde homojen bir karışım elde edebilmek için kaba konulacak bilyelerin hacmi ve öğütülecek malzeme miktarı çok önemlidir ve belirli oranlar kullanılmaktadır. Bilye çapı öğütülen malzemenin çapının en az 30 katı olmalıdır. İdeal bir öğütme ortamında, bilyeler bulundukları kabın hacminin %50'sini, öğütülen malzeme ise %25'ini geçmemelidir (Turan, 2005). Öğütme işleminde eğer tozlar gevrek yapılı ise malzeme, bilyelerle olan temas ile küçülmektedir. Fakat malzeme sünek yapıda ise çok küçük boyutlara parçalanamamakta ve yassılaşmaktadır. Bu nedenle, öğütme işlemi sünek metaller için uygun değildir. Çünkü sünek metaller kolayca kırılmaz ve kırılma yerine birbirleri ile soğuk kaynaklanma ile daha büyük tozlar oluşturmaktadır. Öğütme işlemi, sünek metallerden pul toz üretiminde de kullanılmaktadır. Bu işlem sırasında birleşme ve soğuk kaynaklanmayı engellemek amacıyla, işlem kontrol kimyasalları kullanılmaktadır (Sikka, 1990).

Öğütme işleminde, özellikle demir alaşımları, demir-krom, demir silisyum v.b. kırılganlığı yüksek olan malzemeler, mekanik olarak bilyeli değirmenlerde öğütülmektedir (Sarıtaş, 1994; Suryanarayana, 2001). Öğütme işleminde titreşimli öğütücüler de kullanılmaktadır. Döner tip öğütücülere oranla daha kısa sürede aynı özelliklerde toz elde edilebilmesi açısından, daha verimli oldukları kabul edilmektedir. Öğütme işleminde sonra elde edilen tozlar sert, farklı şekillerde, düşük akma ve paketlenme özellikleri sebebi ile

öğütme işleminin ardından tavlanması gerekebilmektedir (Turan, 2005).

1.3. Darbe Yöntemi

Darbe yöntemi ile toz üretiminde temel prensip, diğer toz üretim yöntemleri ile üretilen büyük boyutlu tozların yüksek basınçla sert bir yüzeye çarpmasıyla tane boyutlarının daha da küçültmesinin sağlanmasıdır. Bu toz üretim yönteminde, Şekil 3'de gösterildiği gibi büyük taneli tozlar, yüksek basınç altında oldukça sert Tungsten Karbür (WC) bloklara çarptırılmakta ve böylece bloğa çarpan büyük taneli tozların küçülmesi sağlanmaktadır. Darbe ile malzemeye ani bir kuvvet uygulanır ve böylece öncelikli olarak oluşan çatlak sonucu kırılma gerçekleşir ve bunun sonucu olarak toz boyutsal bir küçülmeye uğrar. Ancak bu çarpışmaların etkisi ile ortamda bir ısı oluşmaktadır. Bu nedenle, darbe yöntemi ile toz üretimi, koruyucu gaz ortamında kontrollü bir şekilde yapılmaktadır (Sıralı, 2018).



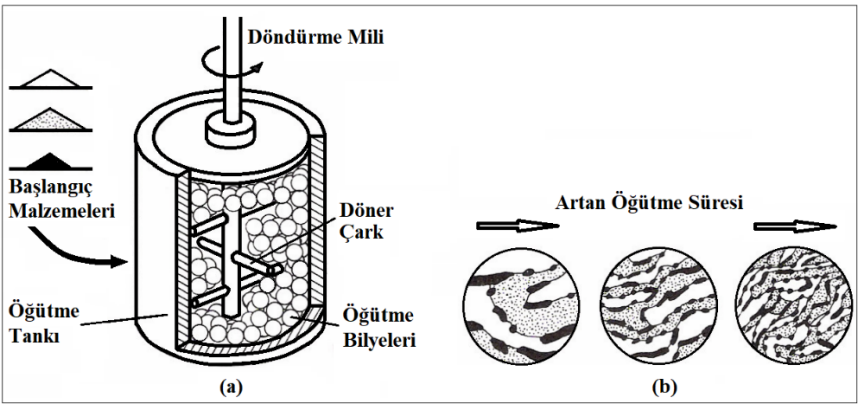
Şekil 3. Darbeli yöntem ile toz üretimi şematik gösterimi

Kaynak: Sıralı, 2018

1.4. Mekanik Alaşımlama

Katı hal alaşımlaması olarak adlandırılan mekanik alaşımlama/öğütme yöntemi, kontrollü mikroyapıya sahip ve tane boyutu oldukça ince tozlardan oluşan kompozit metal alaşım tozları üretiminde kullanılan kuru ve yüksek enerjili bir öğütme işlemidir. Yüksek enerjili öğütme sırasında, toz parçacıklar hızla yassılaşır, soğuk kaynaklanır, kırılır ve tekrar kaynaklanır (Aslanoğlu, 1994). Mekanik alaşımlama yöntemi, kuru ve katı haldeki tozların birbirleri ile periyodik olarak kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlamaktadır. Mekanik alaşımlama daha ince ve homojen mikroyapıya sahip yüksek dayanımlı ve parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır (ASM, 1998; Suryanarayana, 2001).

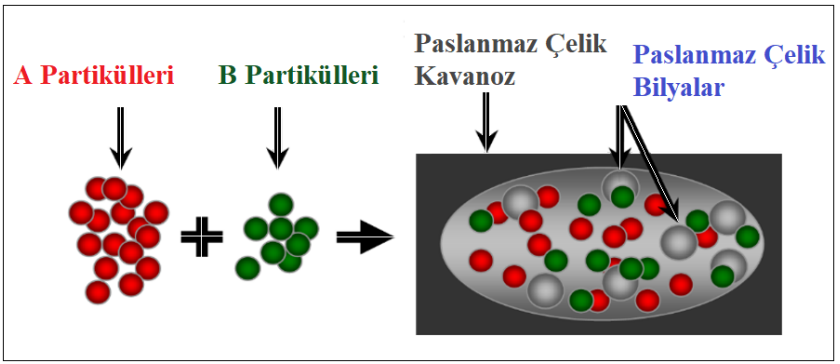
Mekanik alaşımlama işlemi bilyeler ile atritor etkisi yaparak alaşımlanmış kompozit toz üretme tekniğidir. İşlem bir miktar bilye ve elementel tozun karıştırıcı içerisinde karıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu karıştırma esnasında mikroskobik boyutta tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynama ve kırılma işlemleri sayesinde istenilen özellikte kompozit tozunun üretilmesini sağlanır. Şekil 4 a)'da mekanik alaşımlamada kullanılan karıştırıcının şematik gösterimi, b)'de öğütme sırasındaki mikroskobik boyutta meydana gelen homejenizasyon gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere başlangıç tozları lamine hale gelerek pekiştirici faz ana matris fazı içerisinde homojen bir şekilde dağılmıştır.



Şekil 4. a) Mekanik alaşımlamada kullanılan karıştırıcının şematik gösterimi, b) Öğütme sırasındaki mikroskobik boyutta meydana gelen homejenizasyon

Kaynak: German, 1994

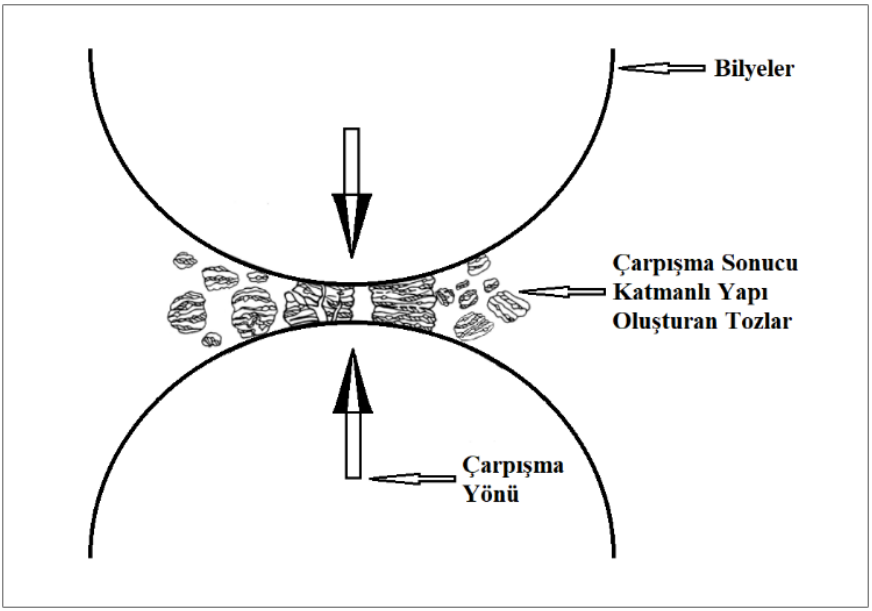
Mekanik alaşımlamada kirlenme önemli bir problemdir ve bu problem, aynı malzemeden bilye ve karıştırıcı tank kullanılarak azaltılabilmektedir. Bu durum için tasarlanan kavanoz sisteminin şematik gösterimi şekil 5'de verilmiştir. Bu işlem esnasında organik bir sıvı ortamı kullanmak, öğütme ve kaynama işlemleri arasındaki dengeyi kurmaya yardımcı olmaktadır. (German, 1994; Söyler, 2008).



Şekil 5. Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan kavanoz sisteminin şematik gösterimi

Kaynak: Söyler, 2008.

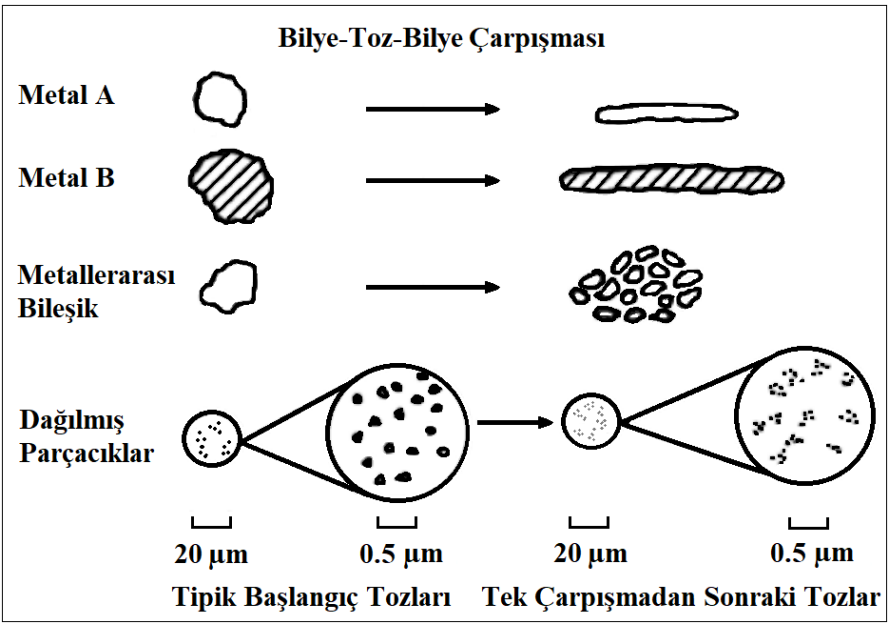
Mekanik alaşımlama prosesi üç aşamada incelenirse, işlem esnasında meydana gelen fiziksel değişimi anlamak daha kolay olacaktır. İşlemin ilk kademelerinde tozlar daha yumuşak olduğundan, birbiri ile kaynayarak daha büyük boyutlu parçalar oluşturma eğilimleri daha yüksektir. Bu aşamada, başlangıç tozlarına oranla üç kat daha büyük boyutlu parçalar meydana gelebilmektedir. Kompozit partiküllerinin bu aşamada karakteristik yapısı katmanlı görüntü şeklinde oluşmaktadır. Bu aşamada, bilyelerin tozlar ile çarpışma şekli (bilye-toz-bilye çarpışması) Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir (Suryanarayana, 2001; Söyler, 2008).



Şekil 6. Mekanik alaşımlama işleminde bilye-toz-bilye çarpışmasının şematik gösterimi (Suryanarayana, 2001'den adapte edilmiştir).

Kaynak: Suryanarayana, 2001

Bu aşamadaki metalik faz, bilye-toz-bilye çarpışmaları esnasında düzleşip üst üste bindikçe atomik düzeyde yeni temiz yüzeyler birbiri ile temas eder ve birbirine soğuk şekilde kaynar. Aynı aşamada kırılgan fazlar ise bu kaynayan yüzeyler arasında sıkışarak kaplanır ve yapıya karışır. Şekil 7.'de bu işlemde kullanılan başlangıç tozlarının mekanik alaşımlama esnasında uğradıkları deformasyon karakteristikleri gösterilmiştir (Suryanarayana, 2001).



Şekil 7. Mekanik alaşımlamada kullanılan başlangıç tozlarının deformasyon karakteristiklerinin gösterimi

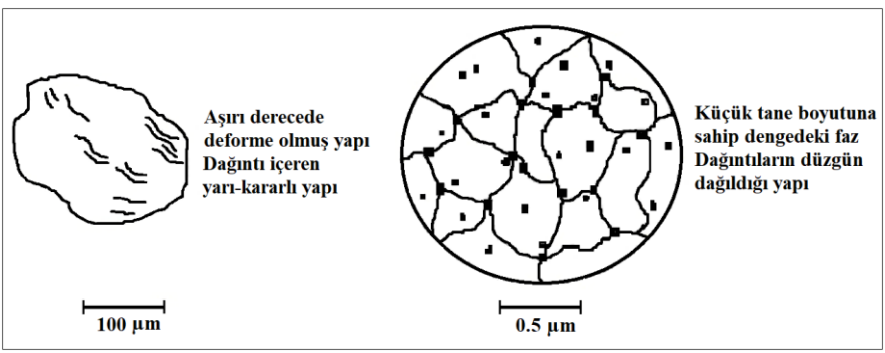
Kaynak: Suryanarayana & Al-Aqeeli, 2013

Bu kaynaklanma ve tekrar deformasyona uğratma işlemleriyle daha küçük boyutlarda, homojen yapıya ve yüksek dayanıma sahip tozlar elde edilmektedir. Bu işlemde kaynaklanma ve öğütme arasındaki dengeyi korumak için farklı ortamlar da kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Orta kademede belirli bir alaşımlama/öğütme ile devamlı tekrarlanan kırılma ve soğuk kaynaklanma sonucu tozlar deformasyon sertleşmesine maruz kalmış ve pekiştirici fazlar sürekli bir hal almıştır. Bu kaynaklanma ve tekrar deformasyona uğratma işlemleriyle daha küçük boyutlarda, homojen yapıya ve yüksek

dayanıma sahip tozlar elde edilebilmektedir. Tozların tane boyutlarında meydana gelen azalma, mikroyapıdaki karışmayı da hızlandırmaktadır. Mekanik alaşımlamada sistemin sürekli hareketiyle bilyeler tarafından absorblanan kinetik enerjinin etkisi ve ısı artışı ile metalik matriste çözünmeler meydana gelmektedir. Bu kademede atomik düzeyde difüzyonun artması sonucu, yeni fazların oluşumu da görülebilmektedir (Keçeli, 2007; Suryanarayana ve Al-aqeli, 2013).

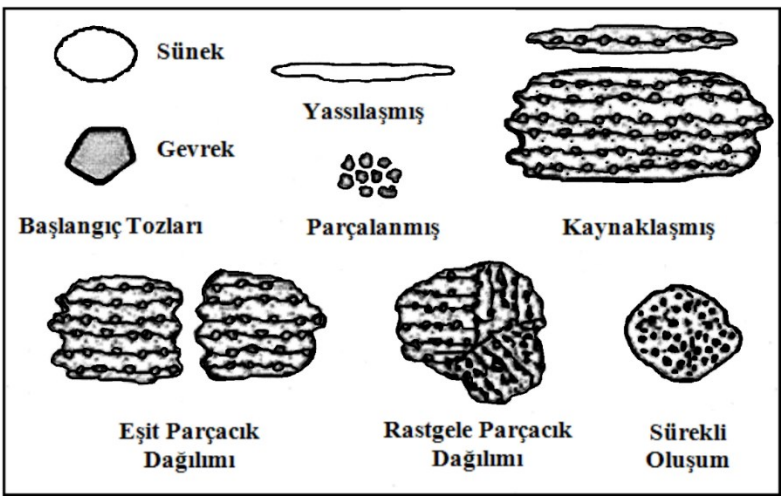
Son kademede, düzenli yapı elde edilmiş ve tane boyutunun yükselmesine sebep olan kaynama seviyesi ile tane boyutunu düşürücü etkiye sahip kırılma mekanizmaları arasında dengeye ulaşılmıştır. Sonuçta, küçük boyutlu taneler ile büyük boyutlu taneler birbiri ile karışarak boyutsal olarak homojenleşmiş bir yapıyı elde edilmiştir (Suryanarayana, 2001; Sıralı, 2018). Şekil 8'de mekanik alaşımlama işleminin başlangıç ve son kademesinde oluşan mikroyapı görüntüleri verilmiştir (Keçeli, 2007).



Şekil 8. Mekanik alaşımlama işleminin başlangıç ve son kademesinde oluşan mikroyapı görüntüleri

Kaynak: Suryanarayana, 2001

Bu kademeden sonra elde edilen yapı başlangıç bileşimi ile aynı olup, ilk kademelerde ortaya çıkan lamelli yapı artık kaybolmuştur. Bu aşamadan sonra daha fazla mekanik alaşımlama yapmanın dispersoidlerin (dağıntıların) daha homojen dağılmasına etkisi olmayacaktır. Partikül boyut dağılımı aralığı daralmıştır. Büyük partiküller ortalama boyuta indirgenmiş, küçük boyutlu partiküller de aglomere (yığın) olarak bu seviyeye yükselmiştir (Suryanarayana, 2001; Keçeli, 2007; Söyler, 2008). Mekanik alaşımlama işleminde tozların birleşme süreçleri şematik olarak Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Mekanik alaşımlamada tozların birleşme süreçlerinin şematik gösterimi.

Mekanik alaşımlama işlemi teknik üstünlüklerinden dolayı oldukça verimli ve etkili bir toz üretim yöntemidir. Bu yöntemin en önemli üstünlüğü, yeni alaşımların sentezlenebilmesi veya normal eritme teknikleriyle alaşımlanamayacak (birbiri içerisinde katı veya sıvı fazda çözünmeyen) sistemlerin alaşımlanabilmesidir. Bu durum,

mekanik alaşımlamanın tamamıyla katı halde meydana gelen bir işlem olmasından ve faz diyagramlarında belirtilen sınırlamaların mekanik alaşımlama işleminde geçerli olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca son zamanlarda bu yöntem ile nano boyutlu malzemeler de üretilebilmektedir (Suryanarayana, 2001; Şimşek & ark., 2018). Mekanik alaşımlama işleminin sağladığı olumlu ve olumsuz yönler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Olumlu yönleri;

1. Normal ergitme teknikleriyle elde edilmesi zor olan (çözünürlük açısından) alaşımlar ve ergime sıcaklıkları birbirinden farklı elementler kullanılarak üretilmek istenen alaşımların bu yöntemle kolaylıkla üretilebilmektedir.
2. Bileşimi oluşturan farklı alaşım elementlerinin ergime sıcaklıklarının ve matris faz içerisinde bu alaşım elementlerinin sınırlı çözünürlüklerinden kaynaklanan problemler elemine edebilmektedir.
3. Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen tozların homojenliğinin yüksek olması ve aynı zamanda karmaşık şekilli, hassas toleranslı ve ergime noktalarına yakın sıcaklıklarda çalışabilen parçaların da bu yöntem ile üretilebilmesi mümkündür.
4. Yapıda homojen dağılmış matris içerisindeki parçacıkların yardımıyla dislokasyon hareketlerini engelleyen bariyerler meydana getirilebilmektedir.
5. Bu toz üretim yöntemiyle uygulama sırasında tozun şekli, boyut dağılımı ve bunun gibi bir takım özelliklerinin de kontrol

edilebilmesi mümkündür (German, 2007; Ataç & Güral, 2013; Safa, 2020).

Olumsuz yönleri;

1. En büyük olumsuzluklardan birisi, işlem sırasında sürekli olarak oluşan temiz toz yüzeylerinde meydana gelen oksidasyondur. Ayrıca işlem sırasında kullanılan ekipmanlardan kaynaklı kirlenmeler de oluşmaktadır.
2. Homojen bir yapı elde etmek için gerekli olan öğütme süresi uzundur.
3. Mekanik alaşımlama işlemi yüksek maliyet gerektirmektedir.
4. Alaşımı oluşturan elementlerin toz boyutlarının birbirinden farklı olduğu durumlarda bölgesel segregasyonlar oluşmaktadır. (German, 2007).

1.4.1. Mekanik Alaşımlama İşlem Parametreleri

Mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen malzemelerde elde edilmek istenen optimum faz ve mikro yapı gibi özelliklerin sağlanması için bazı işlem parametrelerinin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Mekanik alaşımlama karmaşık bir işlem olup, bu işlem parametreleri birbirleri ile bağımlı olarak değerlendirilmelidir. Mekanik alaşımlama işlem parametreleri;

- Öğütme tipi (spex tipi, planeter tipi, artritör tipi)
- Öğütme kabı
- Öğütme hızı
- Öğütme süresi

- Öğütücü malzemelerin tipi ve şekli
- Bilya-toz ağırlık oranı
- Kabın doldurulma miktarı
- Öğütme atmosferi
- İşlem kontrol kimyasalları ve
- Öğütme sıcaklığıdır (Suryanarayana, 2001).

1.4.1.1. Öğütme tipi

Mekanik alaşımlamada öğütme işleminin amacı tane boyutunu küçültme, karıştırma ve alaşımlamadır. Bu işlemleri gerçekleştirmek için yaygın olarak, spex tipi, planeter tipi ve atritör tipi farklı öğütücüler kullanılmaktadır. Bu değirmenlerin kapasitesi, uygulama hızı, minimum kirlenme miktarı ve öğütme sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Uygun bir değirmen seçimi tozun tipine, miktarına ve istenen son bileşime bağlıdır.

Spex tipi titreşimli öğütücüler genellikle laboratuvar çalışmalarında kullanılır ve bir defada 20 gr kadar toz karıştırılabilmektedirler. Bu tip öğütücülerde bilyaların vuruş kuvveti çok büyüktür. Planeter tip öğütücüler dönen bir disk üzerine yerleştirilir ve kendi eksenleri etrafında dönmeyle birlikte oluşan merkez kaç kuvveti ile dönen destek diski tarafından oluşturulan bir kuvvetle birlikte haznede öğütülen malzemeler ve bilyelere etki eder. Bir defada 100-200 gr toz alaşımlanabilir. Atritör tip öğütücülerde, kazanın içerisine katılan bilyalar ve toz karışımı, dönen bir şaft koluna bağlı dikey bir mil ucundaki karıştırıcı ile hareket ettirilir ve kazan içerisinde oluşan çarpışmalar toz tane boyutunun küçülmesine sebep olur. Öğütme sırasında ısınmayı

önlemek amacıyla kazan etrafında bir soğutma sıvısı dolaştırılır ve kazan içerisinde oluşabilecek oksitlenmeyi ortadan kaldırmak için koruyucu gaz atmosferi kullanılmaktadır. Atritörler büyük miktarlarda yaklaşık 45 kg toz öğütebilen değirmenlerdir. Tungsten karbürden yapılmış SPEX tipi karıştırıcı Şekil 10'da gösterilmiştir (Suryanarayana, 2001).

Şekil 10. Tungsten karbür' den yapılmış SPEX tipi karıştırıcının; öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme hücresi

Kaynak: Suryanarayana, 2001

1.4.1.2. Öğütme kabı

Mekanik alaşımlama işleminde, öğütücü bilyaların kabın iç çeperlerine çarparak aşındırdığından ve ayrıca iç çeperlerden kopan parçalar tozun kimyasal kompozisyonunu değiştirdiğinden ve kirlettiğinden dolayı, öğütme kabı malzemesinin seçiminde dikkat

edilmesi gerekmektedir. Eğer öğütme kabının yapımında kullanılan malzeme, toz malzemesinden farklı ise, kabın iç çeperlerinden kopan parçacıklar tozun kirlenmesini sağlayabilir. Öğütme kabı imalatında; sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, tungsten karbür-kobalt (WC-Co), WC kaplı çelik ve yatak çeliği gibi aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan malzeme kadar kabın şekli ve özellikle iç tasarımı da önemli olup, hem düz kenarlı hem de yuvarlak kenarlı öğütme kapları kullanılmaktadır. Mekanik alaşımlama işleminde, düz kenarlı kaplar yuvarlak kenarı kaplara göre daha fazla kullanılmaktadır. (Suryanarayana, 2001).

1.4.1.3. Öğütme hızı

Değirmenlerin yüksek devirlerde çalışması sırasında toz içine bir enerji girişi olmaktadır. Bu nedenle değirmenin çalışabileceği maksimum devir sınırı, tasarımda göz önünde bulundurulmalıdır. Geleneksel bir bilyalı değirmende dönme hızının artmasıyla, bilyaların hareket hızı da artacak ve belli bir kritik hızın üzerinde bilyalar kabın içi duvarlarına çarparak yapışacak ve çarpma kuvveti etkisiyle aşağı düşmeyeceklerdir. Bu nedenle, maksimum hızda, maksimum çarpma enerjisi üretmek için, maksimum yükseklikten bilyaların aşağı düşmesi sadece kritik hız değerinin altında olmasıyla mümkündür. Çok yüksek öğütme hızlarında, öğütme kabının sıcaklığı da yüksek bir değere ulaşabilir ve bu olay, tozlarda alaşımlama ve/veya homejenizasyonu sağlamak için avantajlı bir durum oluşturabilir. Fakat bazı durumlarda sıcaklık artışı, dönüşüm işlemini hızlandırarak, aşırı doymuş katı çözeltilerin veya öğütme sırasında oluşan diğer kararlı fazların bozulmasına sebep olurken,

ayrıca ortaya çıkan yüksek sıcaklık da tozları kirletebilmektedir (Suryanarayana, 2001).

1.4.1.4. Öğütme süresi

Öğütme süresi, mekanik alaşımlama parametrelerinin en önemlilerinden birisi olup, parçacık boyutu ve incelmesi gibi toz özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Toz parçacıklarında soğuk kaynak ve kırılma arasında düzenli bir durum elde etmek için gerekli en önemli işlem parametrelerinden birisi de öğütme süresidir. Öğütme süresi kullanılan değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilya-toz oranına ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak belirlenir. Mekanik alaşımlama işlem parametrelerinin her bir kombinasyonuna göre öğütme süreleri değişmektedir. Öğütme süresi gereğinden daha uzun olursa kirlenme seviyesinin artması ve istenmeyen fazların oluşması gibi beklenmeyen sonuçların ortaya çıkabileceği ve bu yüzden tozun gerekli süre kadar öğütülmesi gerektiği unutulmamalıdır (Suryanarayana, 2001).

1.4.1.5. Öğütme malzemeleri

Mekanik alaşımlama işleminde yaygın olarak kullanılan öğütme malzemeleri, takım çeliği, sertleştirilmiş krom çeliği, temperlenmiş çelik, sertleştirilmiş çelik, tungsten karbür-kobalt, rulman çeliği ve paslanmaz çelikten yapılmış bilyeler olmakla birlikte, özel amaçlı üretilmiş seramik esaslı bilye kullanımı da yaygındır. Tozların üzerinde yeterli vuruş kuvvetinin oluşturulabilmesi için, bilyelerin yoğunluğunun yeterince yüksek olması gerekmektedir. Toz öğütülürken karşılıklı kirlenme olduğundan, alaşımlanan tozun fazla kirlenmesini önlemek için, mümkün olduğunca her zaman öğütme kabı ve öğütme

elemanlarının aynı malzemeden olması gerekmektedir. Genellikle alaşımlama yapılacak tozun yapısına ve kimyasal özelliklerine göre bilye seçimi yapılmakta olup, kullanılan bilyeler tek tip olabileceği gibi farklı boyutlarda da olabilmektedir. Ayrıca, öğütme kabında olduğu gibi öğütücü elemanlar için de, bakır, titanyum, niyobyum, zirkonyum oksit, akik taşı, yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya, kısmi kararlaştırılmış zirkonya-yitriya, safir, silisyum nitrat ve bakır-berilyum gibi bazı özel malzemeler kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

1.4.1.6. Bilye-toz ağırlık oranı

Mekanik alaşımlama işleminde dolum oranı olarak da tanımlanan bilye-toz oranı (BTO), öğütme işleminde en önemli parametrelerden biridir. Bu oran farklı araştırmacılar tarafından, 1:1 gibi düşük bir değerden, 220:1 gibi büyük değerlere kadar değişen aralıklarda kullanılmaktadır (Miki 1992). Mekanik alaşımlama işleminde, tozların istenen boyutta elde edilebilmesi, bilye-toz oranına bağlıdır. Bilye-toz ağırlık oranı arttıkça, homojen bir toz karışımı elde etmek için gereken süre de azalmaktadır. Titreşimli öğütücüler gibi küçük kapasiteli bir değirmende toz öğütülürken yaygın olarak 10:1 oranı kullanılırken, atritör tipi geniş kapasiteli öğütücülerde ise, 50:1 veya 100:1 gibi yüksek oranlar kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Bilye-toz ağırlık oranı, öğütülen tozda özel bir faz elde etmek için gerekli olan öğütme zamanına önemli bir etkide bulunmaktadır. Yüksek bilye-toz ağırlık oranında, bilyelerin ağırlık oranındaki artıştan dolayı, birim zamandaki yüzde çarpışma sayısı artar ve sonuçta toz parçacıklarına daha fazla enerji transfer edilir ve böylece

alaşımlama daha hızlı gerçekleşir. Ancak daha yüksek enerjiden dolayı, daha fazla ısı üretimi mümkün olduğundan, bu durumun da toz bileşimini değiştirebileceği unutulmamalıdır (Dörtbölük, 2006).

1.4.1.7. Kabın doluluk oranı

Öğütme kabında bilyelerin ve toz parçacıklarının rahat ve serbest hareket edebilmesi için yeterince boşluk olması gerekmektedir. Mekanik alaşımlama, bilye-toz-bilye ile bilye-toz-öğütme kabı çarpışmaları sonucu oluşan darbe kuvvetleriyle oluştuğundan, bilyelerin ve tozların öğütme kabı içinde serbestçe hareket edebilmeleri gerekmektedir. Öğütme kabındaki yeterli boşluk, tozların üzerine etkiyen vurma kuvvetlerini artırarak toz parçacıklarının alaşımlanma hızını arttırmaktadır. Bu nedenle bilyeler ve tozlarla öğütme kabının doldurulma miktarı önemlidir. Bilye ve toz miktarının çok fazla olması, bilyelerin öğütme kabı içerisinde dolaşmasını kısıtlayarak, vurma enerjisini düşürür ve mekanik alaşımlamayı engeller. Öte yandan, bilye ve toz miktarı çok küçükse elde edilen ürün miktarı da az olacaktır. Bu nedenle, tedbir olarak öğütme kabının %50'sinin boş bırakılması önerilmektedir (Suryanarayana, 2001).

1.4.1.8. Öğütme atmosferi

Mekanik alaşımlama esnasında tozun kirlenmesine etki eden en önemli parametre, öğütme atmosferidir. Bu nedenle, öğütme sırasında kabın ya havası boşaltılmalıdır ya da argon ve helyum gibi asal gazlarla doldurulmalıdır. Azot gazı metal tozlarıyla reaksiyona girerek nitrür fazı oluşturabildiğinden dolayı çok fazla kullanılmamaktadır. Ancak tozlar nitrür fazı oluşturmak için öğütülüyorsa o zaman azot gazı kullanılabilir. Yüksek saflıktaki

argon, oksitlenmeyi ve tozun kirlenmesini engellemek için en yaygın kullanılan atmosfer ortamıdır. Tozların öğütme kabına yüklenmesi ve boşaltılması atmosfer kontrollü kapalı ortam kutularında yapılır (Suryanarayana, 2004).

1.4.1.9. İşlem kontrol kimyasalları

Mekanik alaşımlama işlemi, deformasyona bağlı kaynaklanma ve kırılma seklinde gerçekleşmektedir. Toz parçacıkları sünek ise öğütülmesi sırasında ağır plastik deformasyondan dolayı birbirlerine soğuk kaynaklanmaktadırlar. Toz parçacıkları arasında sağlıklı bir mekanik alaşımlama işleminin gerçekleşebilmesi için, soğuk kaynaklanma ve kırılma basamakları arasında iyi bir dengenin sağlanması gerekmektedir. Toz parçacıklarının soğuk kaynaklanma eğilimini azaltmak için, toz karışımı içine bir miktar katkı malzemesi eklenir ki, bunlara "işlem kontrol ajanı" adı verilir. İşlem kontrol kimyasalları katı, sıvı veya gaz halde olabilirler ve genellikle, öğütülecek toz ağırlığının %1-5'i kadar ilave edilir. Bu kimyasallar sinterleme esnasında çoğunlukla bünyeden atılırlar. Ancak yapı içerisinde sürekli olarak kalanları da mevcuttur (Soni, 2001).

Mekanik alaşımlama işlemi sırasında, işlem kontrol kimyasalları öğütülen tozların yüzeyine tutunur ve parçacıklar arası soğuk kaynaklanmayı yavaşlatarak, tozların topaklaşmasını önler ve kırılmayı arttırır. Toz yüzeylerine tutunan işlem kontrol kimyasalları sert olan tozların yüzey gerilmesini düşürerek, soğuk kaynaklanma eğilimini azaltır. Tozların yüzey enerjisindeki bu düşüş, öğütme süresini kısaltır ve tozların daha küçük boyutlu olmasını sağlar (Suryanarayana, 2004).

1.4.1.10. Öğütme sıcaklığı

Mekanik alaşımlamada nihai ürünün özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri de öğütme sıcaklığıdır. Difüzyon, sıcaklık ile doğrudan etkilendiği için, öğütme sıcaklığının alaşımlama sistemlerinde çok etkili olduğu unutulmamalıdır. Difüzyon işlemi, son ürün fazı katı çözelti, intermetalik faz nano yapı veya amorf faz olup olmadığına bakmaksızın, alaşım fazlarının teşekkülünde gerekli olduğundan dolayı, her alaşım sisteminde öğütme sıcaklığı önemli bir etkendir. Mekanik alaşımlama esnasında oluşan sıcaklık artışının iki önemli nedeni vardır. Birincisi, bilyelerin kinetik enerjileri nedeniyle oluşan sıcaklık artışı, ikincisi ise, öğütme işlemi sırasında toz parçacıklarının yanmasıyla oluşan ekzotermik reaksiyonlardır. Sıcaklık artışıyla difüzyon ve alaşımlama hızı da artarken, aynı zamanda tozların oksitlenme ve kirlenme miktarları da artmaktadır. Bu yüzden sıcaklık artışını çeşitli yöntemlerle düşürmek mümkündür ki, fan ile soğutma en pratik yöntemlerden biri olup, sıcaklık etkili bir şekilde düşürülebilir. Diğer yöntem ise, kademeli öğütmedir ki, tozlar belli bir süre öğütüldükten sonra işlem durdurulur, öğütme sıcaklığının düşmesi beklenir ve yeterli soğuma sağlandıktan sonra da tekrar işleme devam edilir. Ayrıca öğütme kabının dışından soğutucu gaz veya sıvılar geçirilerek de soğutulması mümkündür (Suryanarayana, 2004).

2. Kimyasal Yöntemler

Genellikle tüm metal malzemeler, kimyasal yöntemlerle toz halinde üretilebilmektedirler. Kimyasal yöntemle toz üretimi, katı, sıvı veya buhar fazı tepkimeleriyle gerçekleştirilir. Bu yöntemde toz tane boyutu ve şekli tepkime değişkenlerinin ve üretim

parametrelerinin kontrolü ile kolaylıkla belirlenmektedir (German, 1994). Kimyasal yöntemle üretilen tozların kimyasal saflıkları, elektroliz ve atomizasyon yöntemlerine oranla daha yüksektir ve genellikle ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır, kolayca preslenebilir ve böylece ham mukavemeti daha iyi olan ürünler elde edilebilir. Bu yöntemle üretilen tozların tane boyutları 5-10 μm ile 100-500 μm arasında değişmekte ve değişik geometrik şekillerde olabilmektedir (Öveçoğlu, 1997).

Kimyasal yöntemle toz üretiminde, katı redüktif olarak kullanılan karbon maliyetinin daha ucuz olması, metal oksitlerin piyasada kolaylıkla bulunabilmesi, gözenekli tozların üretilebilmesi ve metal ve oksitlerin istenilen boyut kontrolünün yapılabilmesi gibi üstünlükler öne çıkmaktadır (Lenel, 1993). Bunlarla birlikte, alaşım tozlarının üretiminin mümkün olmaması, redüktif olarak gaz kullanıldığı takdirde saf haldeki gazın maliyetinin yüksek olması ve metal oksit saflığının toz saflığını etkilemesi gibi sınırlamaları (dezavantajları) da bulunmaktadır (Kayış, 2005). En çok kullanılan kimyasal toz üretim yöntemleri oksit indirgeme, ısıl bozunma, sıvı fazdan çökeltme ve gaz fazdan çökeltmedir (German, 2007).

2.1. Oksit İndirgeme

Kimyasal yöntemle metal tozu üretiminin en klasik şekli, metal oksitleri indirgeyici gaz ortamında indirgeyerek ayrıştırmaktır. Oksit indirgeme bilinen en eski metal tozu üretim tekniğidir. Oksit indirgeme yöntemiyle metal tozlarının üretimi, demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt gibi metal oksitlerin, hidrojen (H_2) veya karbonmonoksit (CO) gibi indirgeyici gazlarla kimyasal

olarak indirgenmesi ile yapılmaktadır. Katının gazla bozunması olarak da bilinen oksit indirgeme yöntemi, metal cevherlerinin ergitilmeden katı şartlarında indirgeyici olan CO, H_2 gibi gazlarla kimyasal olarak indirgenerek saf metal tozu elde etme tekniğidir. Bu yöntemde, toz haline öğütülen saf metal oksitler, karbonmonoksit veya hidrojen gibi indirgeyici atmosfer ortamında, uygun sıcaklıklara kadar ısıtılarak indirgenmektedirler. Bu işlemde indirgeyici olarak karbonmonoksit en ucuz ortam olmakla birlikte, hidrojen de bu amaçla kullanılabilmektedir. Bu yöntemde meydana gelen reaksiyon eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$MeO_{2\,(k)} + CO_{(g)} \text{ veya } H_{2\,(g)} \longrightarrow Me_{(k)} + CO_{2\,(g)} \text{ veya } H_2O_{(g)} \qquad (1)$$

Oksit indirgeme işleminde indirgeme ortamı olarak, hidrojen, karbonmonoksit ve karbon, indirgeme reaksiyonunda dengeleyici olarak kullanılmaktadır. Hidrojenin suya, karbonmonoksitin karbondioksite oranı ve oksijenin kısmi basıncı, verilen sıcaklıkta indirgeme reaksiyonu şartlarını muhafaza etmek için gerekli minimum oranı belirlemeye izin verirler. Ancak pratikte indirgeme sıcaklığı termodinamik verilerin gösterdiğinden genellikle daha yüksek olmaktadır. Toz akışı, görünür yoğunluk, sıkıştırma ve sinterleme gibi performans özelliklerini önemli ölçüde etkileyen, toz tane boyutu, gözeneklik ve hidrojen kaybı gibi son toz özellikleri, öncelikle saflığa, başlangıç malzemenin boyutuna ve indirgeme reaksiyonunun kinetiğine bağlıdır. Reaksiyonun kinetiği ise; eğer indirgeme durağan bir sistemde gerçekleştirilirse, kompozisyona, indirgeme gazının akış oranına, indirgeme sıcaklığına, fırındaki sıcaklık profiline ve oksitin yatak derinliğine bağlı olarak değişmektedir. (ASM, 1998; Yılmaz, 2006).

Oksit indirgemede en önemli işlem değişkeni indirgeme sıcaklığıdır. Düşük indirgeme sıcaklığında, yüksek spesifik yüzey alanı ve yüksek ham mukavemete sahip tozlar elde edilir. Yüksek indirgeme sıcaklığında (> 0.6 T_m), yüksek sıkıştırılabilirlik gösteren, büyük partiküller arası gözenek ve küçük spesifik yüzey alanına sahip tozlar üretilir. Aşırı düşük indirgeme sıcaklığında (< 0.3 T_m) ise, kolayca kendiliğinden tutuşan (piroforik) tozlar üretebilmektedir. Yüksek sıcaklıklar, aşırı sinterleme ve topaklanmaya sebep olup, bunun neticesinde sinter keklerin kırılması gibi problemlere neden olmaktadır (ASM, 1998; Yılmaz, 2006).

Oksit indirgeme yöntemiyle üretilen sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulaması olup, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen sünger demir külçeleri yüksek sıcaklığa bağlı olarak, birbirine kaynaklanmış büyük boyutlu tozlardan oluştuğundan, öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilebilmektedir (Turan, 1993).

2.2. Isıl Bozunma

Kimyasal yöntemle toz üretiminin bir diğer şekli olan ısıl bozunma ile buhar fazında ayrışma ve yoğuşturma süreçlerinin birleşimi ile metal tozlarını üretmek mümkün olmaktadır. Bu süreçlerin birleşimdeki en temel örnekleri demir karbonil $Fe(CO)_5$ veya nikel karbonil $Ni(CO)_4$ tepkimelerini içeren üretim yöntemidir. Diğer metallerden; bakır, krom, platin, radyum, altın ve kobalt karbonil üretim işleminin termal ayrışması için gereken yüksek enerji gereksinimi ile karbondioksit sirkülasyonunun beraberinde

getireceği potansiyel tehlikelerden ve çok pahalı bir yöntem olmasından dolayı dünyada sadece nikel ve demir karbonil üretimi tam olarak benimsenmiştir (Öveçoğlu, 1997; Odabaşı, 2017).

Bu yöntemde, metallerin yüksek ısı ve basınç altında CO gazı ile tepkimeye girerek karbonillerin oluşması sonucunda yüksek saflıkta metal tozlarının üretilmesi sağlanır. Karbonil işlemi ilk olarak nikeli rafine etmek için geliştirilmiştir. Ni metali ısı ve basınç altında CO gazı ile reaksiyona sokularak gaz halinde nikel karbonil elde edilir ve sıcaklığın yükselmesi ve basıncın azalması ile ayrışır. Bu moleküller yoğuşturulup damıtıldıktan sonra kontrollü olarak buharlaştırılır. Bu işlemler sonucunda saf nikel metal tozu elde edilir ve toz tane boyutu reaksiyon şartlarına bağlı olarak 0,2 µm ila 20 µm arasında değişmektedir. Aynı işlemler demir için de uygulandığında, yüksek saflıkta demir karbonil tozları elde edilir ve tipik demir karbonil tozlarının tane boyutu 1 mm ile 5 mm aralığındadır. İnce boyutlu tozlara olan gereksinim, karbonil işlemini önemli hale getirmiştir (Yılmaz, 2006; Kevenlik, 2013).

Isıl bozunma yönteminde karboniller, belli sıcaklık ve basınç altında karbonmonoksitin süngerimsi metal üzerinden geçirilmesiyle elde edilirler. Demir pentakanbonil $Fe(CO)_5$, oda sıcaklığında sıvı haldedir ve 103°C'da kaynar durumdadır. Nikel tetrakarbonil $Ni(CO)_4$, 43°C'da kaynamaktadır. Bu durumda basınç 1 atmosfere düşürülüp ve sıcaklık da paralel olarak arttırıldığında, bu karbonillerin her ikisi de dekompoze olarak metali ve karbonmonoksiti yeniden oluştururlar. Çevrimin devamında daha fazla karbonil oluşturulur ve işlem tamamlanır. Bu yöntemde meydana gelen reaksiyonlar eşitlik 2'de gösterilmiştir.

$$Fe + 5CO \longleftrightarrow Fe(CO)_5 \qquad (2)$$

$$Ni + 4CO \longleftrightarrow Ni(CO)_4$$

Tozlar, buharın ısıtılmış ortamda çökelmesine ve kabın kenarlarına etkilemeyen şartlar altında atmosferik basınçta ısıtılan kaplar içerisinde karbonillerin kaynatılmasıyla üretilmektedir. Bu şekilde üretilen tozlar toplanabilir, elenebilir ve öğütülüp takiben hidrojende tavlanabilir. Tozların kimyasal saflığı, karbon, nitrojen ve oksijenin gibi ana impüritelerle beraber % 99.5 gibi oldukça yüksek bir değerdedir. Toz tane boyutu oldukça hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Nikel tozları düzensiz şekilli, gözenekli ve ince olurken, demir karbonil tozları, genellikle küresel şekilli ve oldukça incedir (ASM, 1998).

2.3 Sıvı Fazdan Çökeltme

Hidrometalürjik işlemler ile metal tozları üretme olarak da bilinen sıvı fazdan çökeltme yöntemi, bir cevher veya cevher konsantresinin sıvıdan özütleme çözeltileri ile çökeltilmesine dayalıdır. Sıvı fazdan çökeltme yöntemi ile yüksek saflıkta tozlar üretilebilmektedir. Sıvı fazdan çökeltme yönteminde, öncelikle yapıda istenilen malzemeleri içeren bir çözelti hazırlanarak, bu çözeltiye çöktürme işlemi veya çözücünün buharlaştırılması işlemleri uygulanmasıyla toz elde edilmektedir. Çökelme işleminin gerçekleşmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Çözeltideki çöktürücü miktarının, basıncın veya sıcaklığın arttırılması ile çökelme işlemi yapılabilmektedir (ASM, 1998)

Bu yöntemde, sıvı çözeltide nitrat, klorür ve sülfatlar olarak bulunan metalik tuzlar metalik çökelti veya çökelti oluşturan metali üretmek için işleme tabi tutulurlar. Çökeltilen ya da çökelti fazı

haline getirilen metalik tuzlar ısıtılarak parçalanır ve toz üretimi için uygun kaynak teşkil ederler. Tuz suda eritilir ve ikinci bileşik yardımı ile çökeltme işlemi gerçekleştirilir. Bu işleme örnek olarak, gümüş nitratın potasyum karbonhidrat ile reaksiyonu eşitlik 3'de verilmiştir. Bu reaksiyonda son ürün olan katı gümüş çözeltisi öğütülerek toz ürün haline getirilir (Boz, 1999).

$$AgNO_3 + NaCO_3H \rightarrow Ag^+ + NO^-_3 + Na^+ + CO_3^{-2} + H \quad (3)$$

$$Ag^+ + NaNO_2 + CO_2 + 0.5H_2O$$

Sıvı fazdan çökeltme ile geliştirilen toz üretim teknikleri özellikle kompozit tozların üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle üretilen tozların özellikleri, kullanılan çözelti, çöktürücü, ortamın basıncı ve sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır ve üretilen tozlar süngerimsi, kübik ve düzensiz şekilde olabilmektedir. Bu yöntem, küçük taneli tozların üretiminde kullanılmakta olup, üretilen tozların şeklinden dolayı, paketlenme ve akış özellikleri düşüktür (German, 2007). Bu yöntemle, kobalt, nikel veya demir ile kaplanmış toryum oksit (ThO_2), titanyum oksit (TiO_2), tungsten karbür (WC) ve süper alaşım malzemeleri üretilebilmektedir (Boz, 1999). Bu kompozit tozlar dağılımla güçlendirilmiş alaşımlarda ve aşınmaya dayanıklı kaplamalarda kullanılmaktadır (İncekara, 2008).

2.4 Gaz Fazdan Çökeltme

Gaz fazdan çökeltme işlemi, gaz bileşiklerinin oluşturduğu kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçek reaktif metallerden ve nano ölçekli partiküllerden tozların üretildiği bir yöntemdir. Bu yöntemde gaz esaslı reaksiyonların en büyük üstünlüğü, toz üretiminde reaksiyon sırasında ergitmenin ortadan kalkması sonucu potanın

kirlenmemesi ve yeniden kullanılabilir olmasıdır (Odabaşı, 2017). Gaz fazdan çökeltme yöntemiyle toz üretimine örnek olarak, molibden trioksitin (MoO_3) saf hidrojen ile reaksiyona girerek metalik molibden tozunun üretilmesi verilebilir ve bu reaksiyon eşitlik 4' verilmiştir.

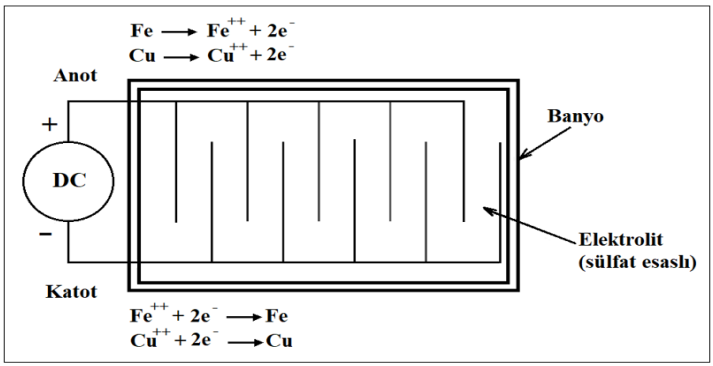
$$MoO_{3\,(g)} + 3H_{2\,(g)} \longrightarrow Mo_{(k)} + 3H_2O_{(g)} \qquad (4)$$

Bu yöntemle, niyobyum, vanadyum, hafniyum, volfram, nikel, zirkonyum ve gümüş metallerinin florürleri, klorürleri ve hatta oksitleri gazdan çökeltme işlemi ile çok küçük toz tane boyutlarında, az kirlilikle ve %99,6 saflığında üretilebilmektedir (Roll, 1984). Bu işlemde uçucu klorürler veya diğer tuz buharları kullanıldığında metal tozları yüksek sıcaklıkta hidrojen tepkimesi ile üretilebilmektedir. Gaz fazdan çökeltme, pahalı bir toz üretim yöntemi olmasına rağmen, toz tane boyutu ve şekli, saflığı ve topaklanması buhar tepkimesi koşulları ile ayarlanabilir olduğundan tercih edilebilir. Elde edilen ürünler çoğunlukla sünger parçacık şeklindedir ve bununla birlikte küresel çok kristalli topaklar da elde edilebilmektedir (Weimer, 1997; German, 2007).

3. Elektroliz Yöntemi

Elektroliz bir elektrik akımı tarafından aşılan bir elektrolitin uğradığı ayrışma olarak tanımlanır. Elektroliz işlemi, Şekil 11'de demir ve bakıra ait elektroliz hücresinde şematik olarak gösterildiği gibi, akımın elektrolit içinde iletilmesiyle birlikte gerçekleşir. Elektroliz sistemi, elektrolit, elektrotlar ve üreteç olmak üzere üç temel öğeden oluşmaktadır. Elektrolit, elektrolizde kullanılan elektrik akımını ileten sıvı olup, çoğunlukla bir tuz eriyiğinin sulu çözeltisi halindedir. Erimiş tuzlar ve asit, baz ve tuz çözeltileri

elektrolit olarak kullanılmaktadır. Elektrotlar, katı iletkenlerdir ve genelde, grafit ve platin gibi asal elektrotlar kullanılır. Anot ve katot olmak üzere iki tane olup, anot, yükseltgenmenin gerçekleştiği elektrot, katot ise, indirgemenin gerçekleştiği elektrottur. Üreteç (Pil), dış devrede elektrik enerjisini sağlayan doğru akım kaynağıdır. Üretecin negatif kutbuna bağlı elektrot katot, pozitif kutbuna bağlı elektrot anottur.



Şekil 11 Demir ve Bakır için elektroliz işleminin şematik gösterimi

Kaynak: German, 2007; İncekara, 2008

Elektroliz işleminde, + yüklü iyon halinde olan katyonlar indirgenerek katotta, - yüklü iyon halinde olan anyonlar da yükseltgenerek anotta açığa çıkarlar. Bu işleme örnek olarak, bakır ve demir için anot ve katot tepkimeleri şekil 11'de verilmiştir. Elektroliz kabında birden fazla tür katyon varsa, ilk önce indirgenme potansiyeli en büyük olan katyon indirgenir ve daha sonra sırası ile indirgenme işlemi devam eder. Elektroliz kabında birden fazla cins anyon varsa, anotta ilk önce yükseltgenme potansiyeli en büyük olan anyon toplanır. Aktifliği az olan anyon öncelikle anotta, aktifliği az olan katyon da öncelikle katotta açığa çıkmaktadır.

Kısaca açıklanan elektroliz işlemi, belirli metallerin tozlarının üretilmesinde de kullanılmaktadır. Bu işlemde, bir elektroliz hücresinin katodu üzerinde belirli çalışma şartlarında element tozlarının biriktirilmesiyle metal tozu üretmek mümkündür. Yüksek iletkenliğe sahip metal tozlarının üretiminde kullanılan elektroliz yönteminde, elektrolitin kimyasal bileşimi, mukavemeti, sıcaklığı ve akım yoğunluğu gibi gerekli çalışma şartları uygun seçilerek, elektrolitik bir hücrenin katot çubuğunda metal tozlarının çöktürülmesiyle toz üretimi mümkündür. Tozların özellikleri büyük ölçüde biriktirme sırasındaki banyo şartları ve sonraki işlem basamaklarına bağlıdır. (German, 2007; İncekara, 2008)

Bu yöntemde, üretilmek istenen tozların yapısında bulunan malzeme elektroliz banyosunun içerisine yerleştirilerek, sonrasında bu banyoya elektrik akımı uygulanmaktadır. Çözelti içerisine uygulanan elektrik akımı etkisiyle, anottan çözünerek iyonize olan metal parçaları katot üzerinde toplanır veya elektrolitik banyoda çökertilir. Elektrolitik banyoda çökertilen veya katot üzerinde biriktirilen metal alınarak elektrolitten ve tuzlardan temizlenmesi için yıkanır, oksitlenmenin önlenmesi için inert gaz altında kurutma işlemine tabii tutulur ve kurutulduktan sonra ince taneli toz haline gelinceye kadar öğütülür (Ersümer, 1970; Sıralı, 2018).

Elektroliz yöntemiyle üretilen tozlar, genellikle düzensiz, gözenekli, süngerimsi şekilde ve dendritik yapıda olup, düşük paketlenme özelliği gösterirler. Tozların parçacık boyutu ve şekli önemli ölçüde kontrol edilebilmektedir. Elektrolizle üretim yöntemi sadece metal tozlarının üretiminde kullanılmakta olup, alaşım veya bileşiklere uygulanamamaktadır. Bu yöntemle üretilen tozların en büyük üstünlüğü, yüksek ürün saflığı ve dolayısıyla iyi

sıkıştırabilme özelliklerine sahip olmalarıdır. Ancak maliyetinin yüksek olması nedeniyle elektroliz yöntemiyle toz üretim sınırlı kalmaktadır. Elektroliz yöntemi ile bakır, demir, çinko, krom, mangan ve gümüş tozları %94'e varan saflıkta üretilebilmektedir. (German, 1994; Aydın, 2005).

Bunlarla birlikte, elektroliz yöntemiyle üretilen tozların kalitesini birçok faktör etkilemektedir. Bu faktörlerin önemli olanları, toz büyüklüğü, akım yoğunluğu, elektrolitin konsantrasyonu, anot-katot tip ve büyüklüğü, anot-katot arası mesafe, elektrolitin sirkülasyonu ve sıcaklığı, toz kaldırma süresi ve yabancı iyonların varlığı gibi sıralanabilir. Burada sayılan değişkenleri kontrol altında tutarak, belirli bir dizi fiziksel özelliğin dışına çıkmadan kaliteli elektrolitik toz üretmek mümkün olmaktadır. (İncekara, 2008). Elektroliz yöntemiyle bakır tozu üretimi için gerekli olan önemli parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Elektroliz yöntemiyle bakır tozu üretimi için gerekli olan önemli parametreler

Parametre	Tipik Koşullar
Elektrolitteki Bakır Derişimi	30 g/l
Elektrolitteki H2SO2 Derişimi	150 – 250 g/l
Anot Akım Yoğunluğu	300 – 600 A/m2
Katot Akım Yoğunluğu	600 – 4000 A/m2
Banyo sıcaklığı	40 – 60 °C
Banyo Voltajı	1-2 V
Katot Bileşimi	%800 Pb – % 12 Sb

Kaynak: United Stated Patent, 2001

4. Atomizasyon Yöntemleri

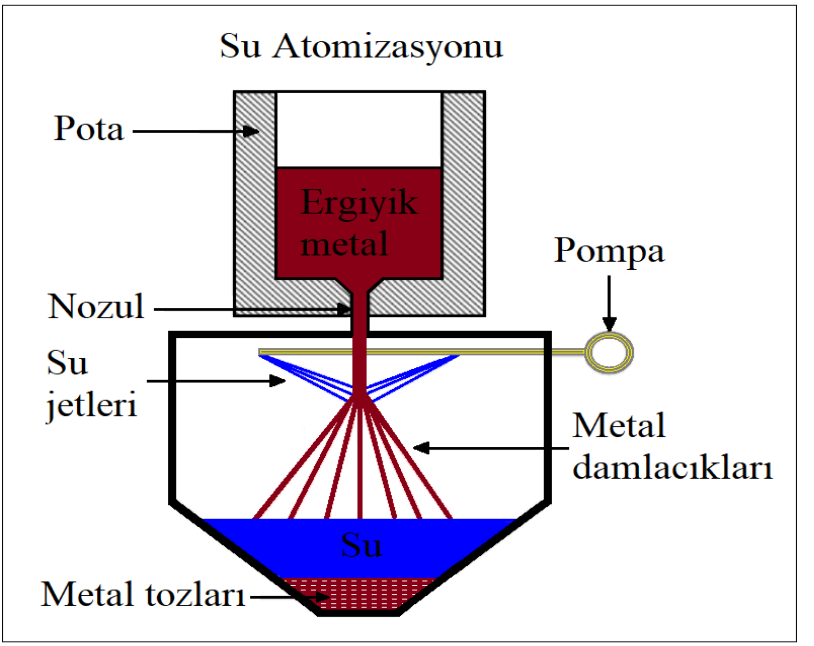
Atomizasyon yöntemi, günümüzde de önemli yere sahip olan ve yaygın olarak kullanılan bir toz üretim yöntemidir. Ergiyik haldeki metalin çok ince şerit halinde akıtılması ve bu sırada su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulması esasına dayanmaktadır (Onur ve Arslan 1996). Atomizasyon işleminde ergimiş metal, küçük damlacıklara parçalanır ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeyle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Atomizasyon, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırma işlemidir. Bu işlemde, ayırıcı olarak hava, azot ve argon en çok kullanılan gazlardır. Su ise sıvılar içinde en çok kullanılandır. Bu toz üretim yöntemi ergitme, atomizasyon ve katılaşma soğuma aşamaları ile gerçekleştirilir (Somunkıran ve Çelik 2007). Bu işlemlerden sonra ürünün istenen niteliklere getirilmesi için, genellikle yüzeyde oluşan oksitlerin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ek işlemler uygulanmaktadır (Şimşek, 2017).

Atomizasyon yönteminde, nozulun tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılaşma hızı ile belirlenir, düşük soğutma kapasiteli gazlar için küresel şekilden yüksek soğutma kapasiteli su için karmaşık şekle dönüşür. Genelde bu toz üretim metodu ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır. Krom içeren alaşımlar gibi kolayca

oksitlenen metallerde atomizasyon, argon gibi asal gazlar yardımıyla gerçekleştirilir. Atomizasyon, alaşımı oluşturan tüm metallerin ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, özellikle alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntemdir. Böylece her toz taneciği aynı kimyasal bileşime sahip olur. Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir, bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır (Akpınar, 2011). Atomizasyon tekniğinde kullanılan yöntemler; sıvı ve su atomizasyonu yöntemi, gaz atomizasyonu yöntemi, savurmalı atomizasyon yöntemi ve vakum atomizasyon yöntemi olarak sınıflandırılabilir.

4.1 Sıvı ve Su Atomizasyon Yöntemi

Gaz atomizasyon yönteminde, gaz yerine su veya sıvı kullanılarak tozların parçalanmasıyla üretiminin gerçekleştiği yönteme sıvı veya su atomizasyonu adı verilir. Sıvı veya su atomizasyon yöntemi su veya yağ jeti tarafından erigiyik metal demetinin parçalanması işlemidir. Su atomizasyon yönteminin, genellikle 1600°C'den düşük sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemelerin tozlarının üretiminde kullanımı oldukça yaygındır. Su atomizasyon yönteminde, su genellikle özel tasarımlı ve yüksek basınçlı su jetleri ile düşey yönde akıtılan ergiyik metal demetine yönlendirilerek, onun parçalanmasını ve hızla katılaşmasını sağlamaktadır. Bu yöntemde, atomizasyon sıvısı çok daha yüksek verimle hızını küçük tozlara aktararak, bu parçacıkların daha hızlı soğumasını sağlamaktadır (German, 2007). Şekil 12'de su atomizasyon yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

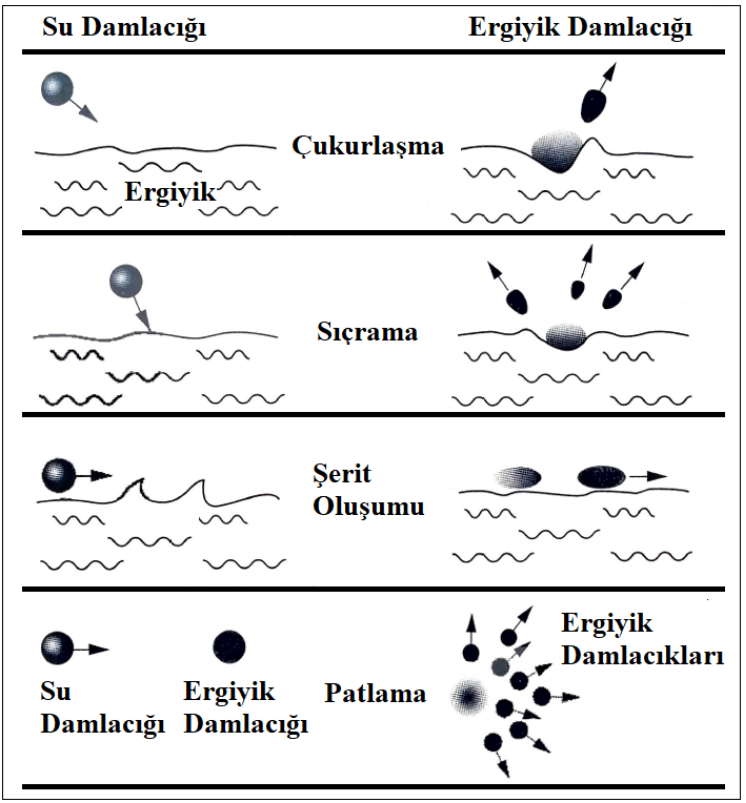


Şekil 12. Su atomizasyon yönteminin şematik gösterimi

Kaynak: Kopeliovich, 2012

Su atomizasyonu ile toz üretiminde, parçacık oluşumu aşamaları; çukurlaşma, sıçrama, şerit oluşumu ve patlama mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. Bu yöntemdeki en son aşama olan patlama mekanizması ile en küçük tozlar elde edilir. Parçacık oluşum aşamaları Şekil 13'de şematik olarak gösterilmiştir (German, 2007). Su atomizasyonu yönteminde hızlı soğutma sebebiyle üretilen tozların parçacık şekli düzensiz ve pürüzlü olmakta, ancak bu tozların sıkıştırma sonrası ham dayanımları yüksektir. Atomizasyon işlemi su ile gerçekleştirildiği için birçok malzeme su ile reaksiyona girdiğinden, işlem sonrası tozların mutlaka temizlenmesi gerekmektedir. Yine bu işlem esnasında, ergiyik metal

sudaki oksijeni ayırarak yan ürün olarak tehlikeli hidrojen gazını oluşturabilmektedir. Bu problemleri ortadan kaldırmak sentetik yağlar kullanılabilir ancak bu durumda toz üretimi daha pahalı olmaktadır. Su atomizasyonunda, ergiyik metal atomizasyon öncesi sıvılaşma eğrisinin çok üzerine ısıtılırsa, daha küresel tozların elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntem maliyetin düşük olmasından dolayı, toz üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (German, 2007).



Şekil 13. Su atomizasyonunda parçacık oluşumu şematik gösterimi

Kaynak: German, 2007

Su atomizasyon yönteminde temel parametre su basıncıdır. İşlem esnasındaki yüksek su basıncı, daha yüksek su hızı meydana getirmekte ve bu olayın neticesinde daha küçük parçacık boyutlarında toz üretimi yapılabilmektedir. Toz tane boyutu ve şekli kullanılan sıvının basıncına ve malzemenin kompozisyonuna bağlıdır. Toz tane boyutunun küçülmesi istendiğinde, kullanılan su basıncının arttırılması gerekmektedir. Bu konu ile ilgili olarak, 2008 yılında yapıla bir çalışmada, su atomizasyonunda kullanılan su basıncının 50, 100 ve 195 bar olduğu durumlarda, toz tane boyutu üzerindeki etkileri Tablo 3'de verilmiş olup, artan basınç ile toz tane boyutunun önemli ölçüde küçüldüğü görülmüştür.

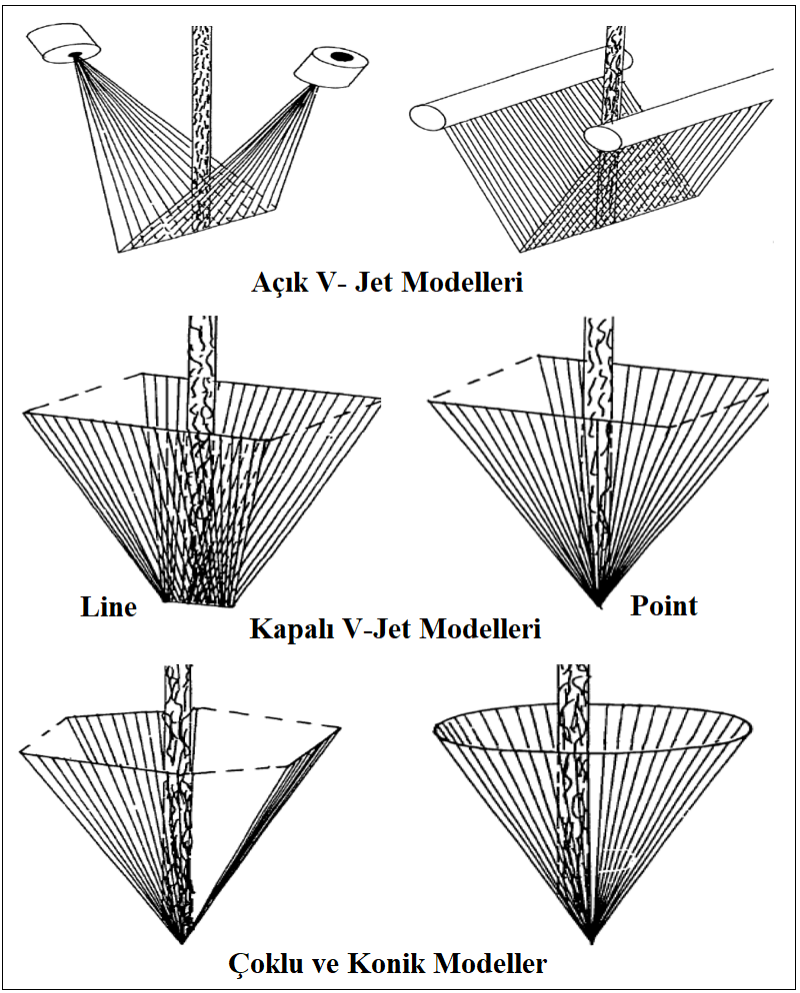
Tablo 3. Farklı basınçlarda yapılan su atomizasyon işlemi sonuçları

	Deney 1	Deney 2	Deney 3
Su Basıncı	50 bar	100 bar	198 bar
Partikül Boyutu (D10) µm	28.3	14.2	7.8
Partikül Boyutu (D50) µm	90.5	44.1	22.5
Partikül Boyutu (D90) µm	238	121.6	67.3

Kaynak: Yamanoğlu, 2011

Su atomizasyonu ile üretilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına, suyun basıncı ve hızı, sıvı metal akış açısı, viskozitesi, yoğunluğu, yüzey gerilimi ve sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi önemli parametreler etki etmekte olup, su jeti geometrileri de tozun şekil ve boyutunda etkilidir. Su atomizasyonunda, açık V-jet, kapalı V-Jet, ve çoklu/konik modeller olmak üzere üç çeşit su jeti geometrisi kullanılmaktadır. Bu su jeti geometrilerinin şematik gösterimi Şekil 14'de verilmiştir. Su atomizasyon yöntemi üretilen tozların genelde ortalama tane boyutu

30-1000 µm arasında değişmektedir. İşlem parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle farklı şekillerde toz üretimi mümkün olabilmektedir. (Baksan, 2003; Sarıtaş, 1994).



Şekil 14. Su jeti geometrileri

Kaynak: Sarıtaş, 1994

4.2 Gaz Atomizasyon Yöntemi

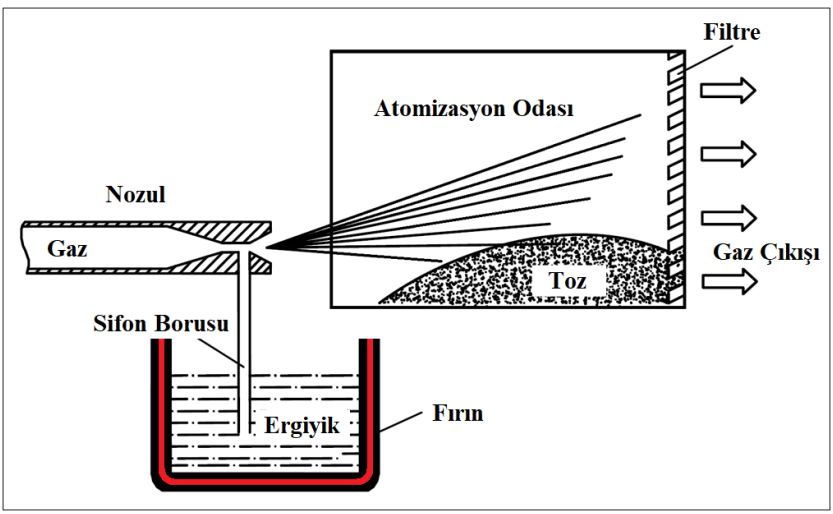
Gaz atomizasyon işlemi, sıvı metal demetinin yüksek hızlı gaz akışı etkisiyle parçalanarak toz haline gelmesi olarak tanımlanır. Gaz atomizasyonu metal ergiyik ve atomizasyon gazının birbiri ile etkileşimini içeren iki akışkanlı bir atomizasyon işlemidir. Bu işlemde, sıvı metal akışına hava, nitrojen, argon ya da helyum gibi yüksek hızlı atomizasyon gazlarının çarpması ile gazın kinetik enerjisinin sıvı metale aktarılması sonucunda damlacıkların oluşması ve sonrasında katılaşması ile metal tozları elde edilir. Bu yöntemde temel amaç yüksek hızda genleşen gazın, kinetik enerjisini sıvı metale aktararak metali küçük damlacıklara ayırmaktır. Sıvı metal damlacıkları parçalanma sonrasında küreselleşir, soğur ve katılaşarak, tane boyutu dağılımları 1 μm'den 1mm'ye kadar değişen metal tozları üretilir. Gaz atomizasyonu ile üretilen küresel alaşım tozları, işlem esnasında gösterdiği hızlı katılaşma karakteristiğinden dolayı üstün özelliklere sahiptir ve bu da gaz atomizasyon yöntemini cazip kılmaktadır (Akpınar, 2011; Güleşen, 2013; Tabona, 2019).

Düzenli bir gaz atomizasyon işleminde, yüksek gaz kinetik enerjisi, metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu ve metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı gibi koşullar sağlanmalıdır (Ünal, 2008). Atomizasyonda gaz jeti; başlangıçta sıvı metal demetini kesip parçalamak için gerekli kinetik enerjiyi damlacıklara aktarır, daha sonra damlacıkları gaz akışı içinde ivmelendirir ve son olarak uçuşma esnasında onların soğumasına neden olur (Singh, 1992). Gaz atomize tozlar, küresel toz şekli, temizlik, özellikle küçük çaplı tozlarda hızlı katılaşmış yapılar ve yüksek üretim hızı gibi üstün özelliklere sahip olup, bu özellikler gaz atomize tozların

birçok uygulama ve üretim alanında tercih edilmesine neden olmaktadırlar (Ünal, 2008).

4.2.1. Gaz atomizasyon üniteleri

Gaz atomizasyon üniteleri, metal besleme mekanizmaları, ergitme ve toz toplama bölümlerinin yapısı bakımından farklılık gösterirler. Fakat hepsinde sıvı metal demetine enerji aktarmak suretiyle toz üretilmektedir. Şekil 15'de gösterildiği gibi, düşük ergime sıcaklığındaki metaller için gaz atomizasyon üniteleri yatay şekilde tasarlanmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, nozuldan çıkan yüksek hızlı gaz, sifon etkisi meydana getirerek sıvı metali gaz genleşme bölgesine çekmektedir. Burada metal demetinin püskürtülüp parçalanmasıyla elde edilen damlacıklar, toz toplama odasındaki uçuşma esnasında ısı kaybına uğrayarak katılaşırlar (German,1994).

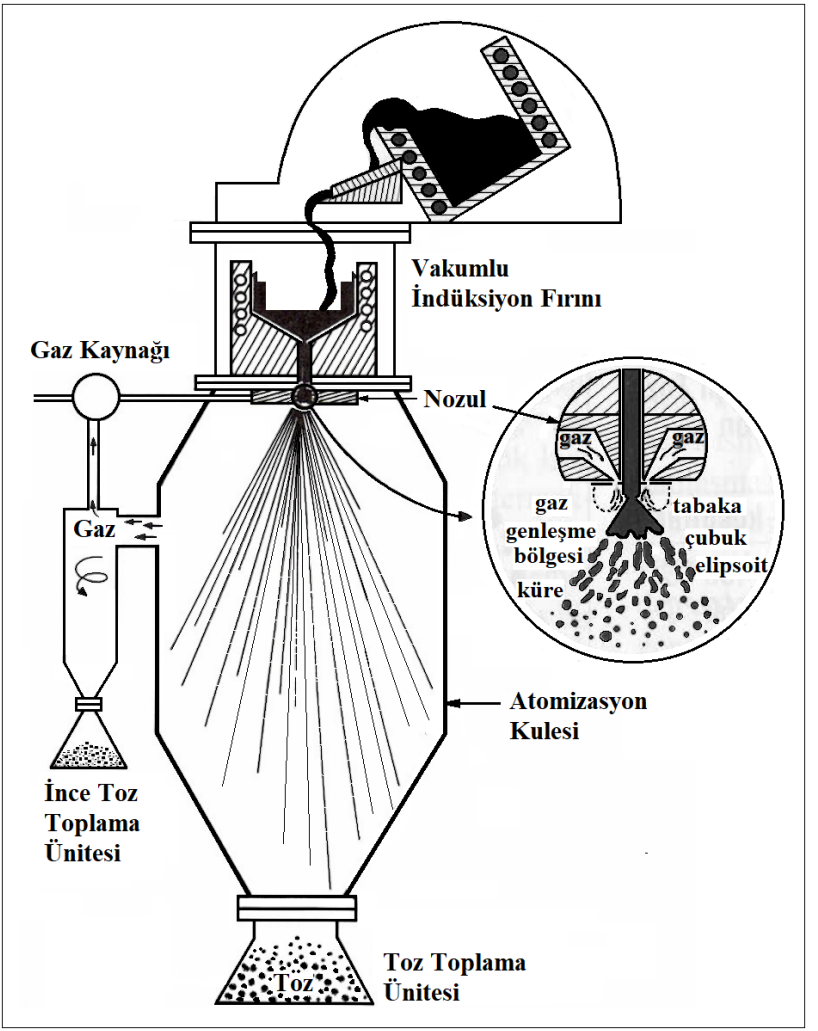


Şekil 15. Yatay gaz atomizasyon ünitesi şematik gösterimi

Kaynak: German,1994

Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin atomizasyonunda, içi asal gaz ile doldurulan kapalı bir kuleye sahip, düşey gaz atomizasyon üniteleri kullanılır ve böylece oksidasyon önlenir. Bu tip ünitelerde metal, indüksiyon fırını ile ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve ergiyik metal nozul içerisine akıtılır. Atomizasyon kulesi boyutu en büyük damlacıkların kule çeperine çarpmadan katılaşmasına imkân verecek şekilde olmalıdır. Kuleler genellikle paslanmaz çelikten imal edilir ve iç yüzeyi minimum toz kirletmesi (tutunması) için parlatılır. Atomizasyon işleminde kullanılan gazın kule iç basıncını yükseltmesine engel olmak için bu gazın kule dışına tahliyesi önemlidir. Bu amaçla siklon kullanılır. Siklon aynı zamanda ince tozların tutulması amacıyla da kullanılır (German,1994).

Şekil 16'da yüksek sıcaklıkta ergiyen metaller için kullanılan düşey gaz atomizasyon yönteminin şematik gösterimi yer almaktadır (Özaydın, 2015). Yatay ünitede atomize edilmiş tozlar, düşey olarak atomize edilmiş tozlara göre daha iridir ve daha geniş aralıkta bir toz dağılımına sahiptir (Hohmann,1990).



Şekil 16. Düşey gaz atomizasyon yönteminin şematik gösterimi

Kaynak: German, 1994

Gaz atomizasyonunda sıvı metal demetini parçalamada kullanılan gaz jetini, Ar, N_2, CO_2 ve He gibi gazlar veya hava oluşturabilir. Bu gazların sıvı metal demetini parçalamada

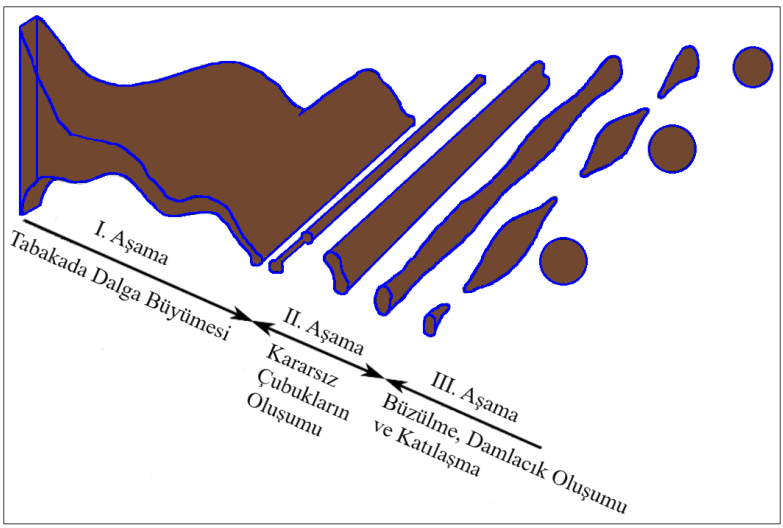
kullanılması çok yönlü toz üretim tekniği sağlamaktadır. Asal gazlar, süperalaşımlar ve titanyum gibi reaktif metallerin atomizasyonunda veya düşük oksijen içermesi gereken uygulamalarda tercih edilir ve küresel tozlar üretilir. Küresel toz şekli, ticari toz metal uygulamalarında gruplandırma ve karıştırma kolaylığı açısından tercih edilen bir özelliktir. Hava atomize tozlar ise karmaşık şekillidir (Uslan, 1999).

Gaz atomizasyonunda toz karakteristiklerini belirleyen çok sayıda üretim değişkenlerini, sıvı metal ve gaz sistemi ile ilgili olmak üzere iki ana grupta toplanmak mümkündür. Sıvı metal ile ilgili olanlar; ergiyik metalin alaşım türü, sıcaklığı, viskozitesi, yüzey gerilimi ve akış debisidir. Gaz sistemi ile ilgili olanlar ise; gazın cinsi, basıncı, debisi, hızı, sıcaklığı ve nozul geometrisidir (German, 1994; Klar,1984). Burada belirtilen üretim değişkenlerinin kontrolü ile kullanım alanlarına göre gerekli özelliklerde tozlar üretilebilmektedir. Gaz atomizasyon yöntemi, ürün homojenliği ve üretilen tozun küresel şekilli olmasının sağladığı iyi paketlenme özellikleri ile öne çıkmaktadır (German, 207).

4.2.2. Gaz Atomizasyon Mekanizmaları

Atomizasyon mekanizmaları ile ilgili literatürde geniş çalışmalar bulunmakla birlikte, damlacık oluşumu tam olarak açıklanamamıştır. Ancak genel olarak kabul gören iki değişik atomizasyon mekanizması mevcut olup, bunlardan birincisi Dombrowski ve Johns tarafından ileri sürülen mekanizmadır (Dobrowski & Johns, 1963). Bu mekanizmada, önce tabaka üzerinde kritik bir genliğe ulaşana kadar dalgalar büyür, sonra dalganın tepe ve dip bölgelerinde yırtılmalar oluşur ve yarım dalga boyuna karşılık

gelen kısımlardan kırılır. Kırılan bu kısımlar yüzey gerilmelerinin etkisiyle karasız çubuk haline gelerek, damlacıkları oluştururlar. Bu damlacık şekillenme mekanizmalarının fiziksel modeli sırasıyla; hızla artan genlikteki sinüs dalgasının başlamasıyla sıvı metalden tabakaların oluşması, dalganın büyümesiyle tabakalardan çubuk oluşması ve çubukların bölünmesiyle küresel damlacıkların oluşması ve katılaşma aşamalarını içermektedir (Lawley, 1992). Şekil 17'de sıvı metal tabakadan damlacık oluşumu aşmaları görülmektedir.

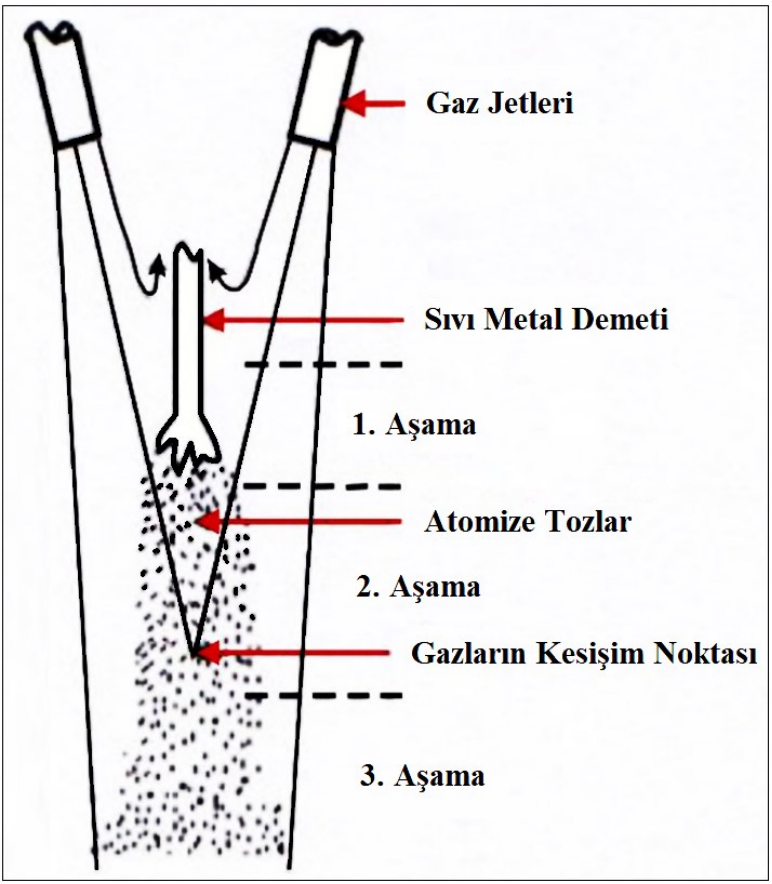


Şekil 17. Gaz atomizasyonunda sıvı metal tabakasının bölünmesiyle damlacık oluşumunun şematik gösterimi

Kaynak:Dobrowski & Johns, 1963

Atomizasyon mekanizmalarından ikincisi See ve Johnston tarafından önerilmiş olup, yaptıkları çalışmalar sonucunda ergiyik metallerin gaz ile atomizasyonunda üç aşamayı birincil bölünme, ikincil bölünme ve katılaşma şeklinde tanımlamışlardır. See and

Johnston tarafından önerilen ikinci mekanizmadaki mevcut üç aşamanın şematik gösterimi Şekil 18'de gösterilmiştir. Birincil bölünme aşamasında sıvı metal demeti, yüzeyinde kararsızlığın başlayıp büyümesinde etkili olan türbülans sebebiyle dinamik basıncın değiştiği yüksek hızlı gaz akış bölgesine girer ve artan dinamik basınç, sıvı metal demetinden malzeme kopmasına sebep olur. Burada eğer dinamik basınç, yüzey kuvvetinden kaynaklanan yeniden yapılanma kuvvetini aşarsa ikincil bölünme aşaması meydana gelir. Üçüncül aşamada ise, katılaşma ve küreselleşme zamanına bağlı olarak metal parçacıkları şekillenir (See ve Johnston, 1978).

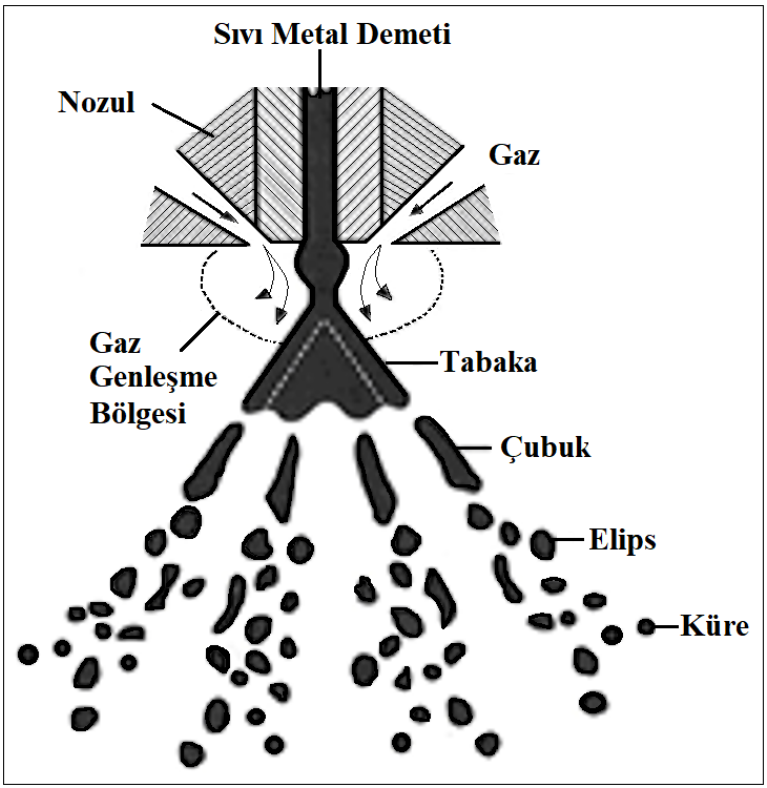


Şekil 18. Gaz atomizasyonunda See and Johnston tarafından önerilen ikinci mekanizmadaki mevcut üç aşamanın şematik gösterimi, See modeli

Kaynak: See ve Johnston, 1978

Şekil 18, See ve Johnston tarafından önerilen atomizasyon mekanizması, 1. aşama, birincil atomizasyon, 2. aşama, ikincil atomizasyon ve 3. aşama katılaşmadır. See ve Johnston'ın gaz atomizasyonu ile metal tozu oluşum modelinin aşamaları Şekil 19'da

olduğu gibi German tarafından daha açık bir şekilde gösterilmiştir. Burada, sıvı demetinin çevresinde genleşen gazlar önemli basınç düşmesine ve sıvı demetinin parçalanmasına yol açmaktadır. Gaz genleşme bölgesindeki emme basıncı sebebiyle ergiyiğin, önce içi boş ince bir konik tabaka şeklini, daha sonra da çubuk, elips ve küre şeklini aldığı görülmektedir. Atomizasyon sırasında gazın, sıvı metal demetine aktarılabilmesi nispetinde, üretilen parçacıklar da o nispette küçük olmaktadır. Ergiyik metalin sıvılaşma sıcaklığının üzerinde aşırı şekilde ısıtılmasıyla viskozite azalır ve atomizasyon sonrası katılaşma süresi uzar ve uzun katılaşma süresi de toz tanelerinin küreselleşmesine katkı sağlar. Burada katılaşma, aşırı ısıtma işleminin miktarına bağlı olarak farklı toz şekillerinden birini meydana getirir (German, 2007).



Şekil 19. Gaz atomizasyonunda sıvı metal demetinin parçalanmasının şematik gösterimi

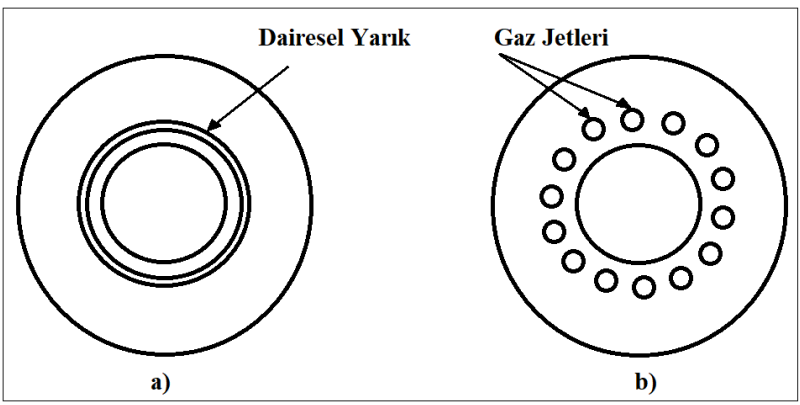
Kaynak: German, 2007

Atomizasyon mekanizmaları ile ilgili yapılan çalışmaların ortak noktası, atomizasyon işleminin birkaç safhada meydana geldiği, birinci safhada sıvı metalin tabaka ve/veya çubuksu yapıya dönüştüğü, daha sonra bunu ikincil bölünmenin takip ettiği ve en son safhada ise damlacıkların katılaştığıdır. Tozların soğuma ve katılaşması atomizasyon kulesi içinde havada uçarken meydana gelir. Sıvı metal damlacıklarının katılaşma hızı önemlidir, çünkü bu

hız tozların şeklini belirlemektedir. (Biancaniello & ark., 1990; Akpınar, 2011).

4.2.3. Gaz Atomizasyonunda Nozul Tasarımı

Nozullar gaz atomizasyon ünitesinde, yüksek hızlı gaz jetlerini sıvı metal ile temas ettirip, sıvı metalin parçacıklara ayrılmasını sağlayan önemli bir parçadır. Nozullar, yüksek hızlı gaz jetlerinin akışını kontrol ederek istenilen özelliklerde tozun üretilmesini sağlayan geometrik yapılardır. Nozul tipi ve şekli, üretilen tozların boyutunu ve şeklini önemli derecede etkileyen bir parametredir. Nozullar Şekil 20'de gösterildiği gibi; sahip oldukları gaz çıkış geometrilerine göre dairesel yarıklı ve dairesel delikli olarak üretilebilirler. (Ünal, 2008; Akpınar, 2011).



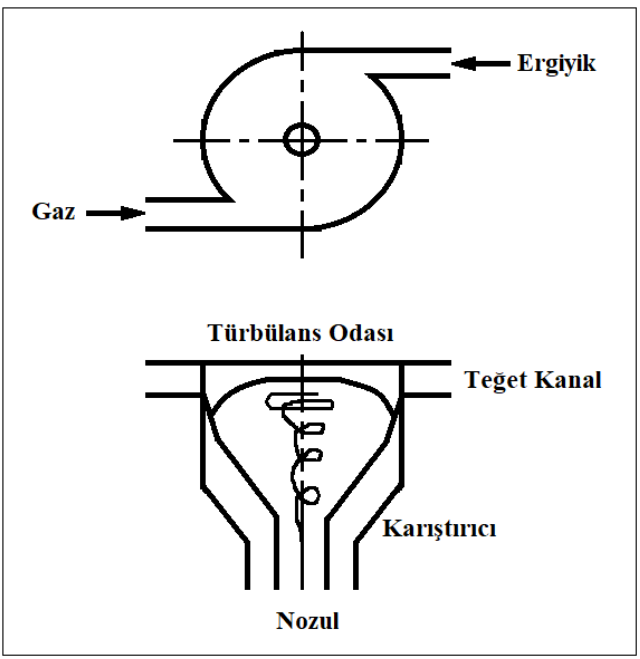
Şekil 20. Şematik nozul resimleri: a) Dairesel yarıklı, b) Dairesel delikli

Kaynak: Matei, 1996

Toz boyut dağılımını kontrol etmek ve ince toz verimini arttırmak için günümüzde farklı nozul tasarımları geliştirilmeye devam etmektedir. Ergiyik atomizasyonunda kullanılan gaz

nozulları atomizasyon esnasında sıvı metal ile atomizasyon gazının birbiriyle etkileşimine göre iç karışım ve dış karışım olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir.

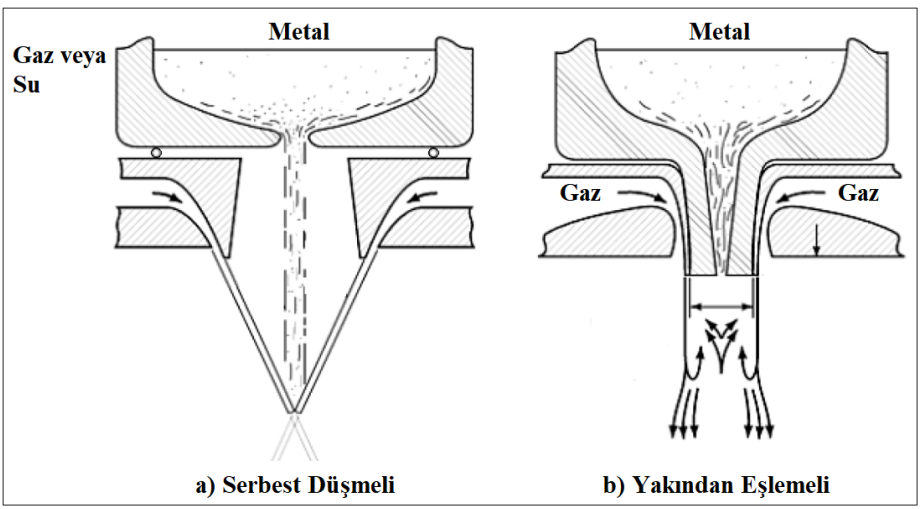
İçten karışımlı atomizasyonda sıvı metal ve gaz, Şekil 21'de görüldüğü gibi jet nozul yüzeyine basınç altında girer (Sheikhaliev, 1996). İki akışkan dönerken karışır ve ivmelenir. Güçlü santrifüj kuvvetinden dolayı sıvı metal, gazın tesiri olmaksızın nozul çıkışında bir film tabakası oluşturur. Sıvı metal filmi uygulanan gaz ile nozul çıkışında ince toz tanelerine ayrışmasıyla atomizasyon gerçekleşir.



Şekil 21. Atomizasyonda içten karışımlı nozulun şematik gösterimi

Kaynak: Liu, 2000

Dıştan karışımlı atomizasyon ise, nozuldan çıkan sıvı metal akımının nozul dışında bir atomize gaz ile çarpıştırılması işlemidir. Farklı nozul tasarımları, çeşitli dizilimli veya çevre boyunca dairesel yarık veya ayrı orifislere sahip gaz jetlerinden meydana gelir. Sıvı metal ve gazın birbiriyle olan etkileşim geometrisi ve konfigürasyonuna göre dıştan karışımlı nozullar, serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki önemli tipe ayrılırlar. Serbest düşmeli nozullarda Şekil 22 a'da görüldüğü gibi, sıvı metal ile gazın etkileşimi, gaz ile sıvı metal demeti potadan ayrıldıktan sonra gerçekleşir. Yakından eşlemeli nozullarda ise, Şekil 22 b'de görüldüğü gibi sıvı metal demeti, metal akış borusunun hemen ucunda ince bir tabaka halinde gaz jetleri ile karşılaşarak atomize olur (Ünal, 1990).



Şekil 22. Serbest düşmeli nozul (a) ve yakından eşlemeli nozulun (b) şematik gösterimi

Kaynak: ASM, 1976

Yakından eşlemeli nozul işçilik ve maliyetin artmasına rağmen nispeten yüksek atomizasyon verimi ve toz veriminden dolayı tercih edilirken, serbest düşmeli nozul geleneksel gaz atomizasyonuna uygunluğundan dolayı daha çok kullanılmaktadır. Nozulların her ikisi içinde gaz basıncına, nozul geometrisine ve konfigürasyonun uygunluğuna bağlı olarak, gaz hızı ses altı veya ses üstü hızlara ulaşabilir. Ses üstü yakından eşlemeli nozullar, ses altı nozullara göre daha yüksek verimli olup, ince tozların elde edilmesinde verimli bir üretim metodu olarak kullanılmaktadır (Güleşen, 2013). Yakından eşlemeli nozulların hemen hepsi dairesel yarıklı gaz jetleri ile kullanılır.

Atomizasyon gazının enerjisinden maksimum oranda yararlanmak ve gaz atomizasyonunda maksimum verime ulaşmak için, gaz jetinin çekirdeğinde yüksek hızlı laminer bir akışın olması istenir. Başka bir ifade ile maksimum verim için, nozuldan çıkan gazın sıvı metale maksimum hızda ve minimum mesafede çarpması gerekir. Çünkü jet merkezinden akış yönündeki mesafenin artması ile gaz hızı ve kinetik enerji hızlı bir şekilde bozulabilir. Bu nedenle yakından eşlemeli nozullar, serbest düşmeli nozullardan ve içten karışımlı atomizerler de, yakından eşlemeli nozullardan daha verimlidirler. Genellikle, içten karışımlı atomizasyon sistemleri dıştan karışımlı atomizasyon sistemlerinden daha verimlidirler. Gaz atomizasyonunda kontrol edilen değişkenler, nozul geometri değişkenlerini ve pek çok işlem değişkenlerini içermektedir. Bu kapsamda, gaz atomizasyonunun geometrik değişkenleri, parametre dizileri ve tipik değerleri ile Tablo 4'de, metal tozu üretimi için gaz atomizasyon değişkenleri ise, değerleri ile birlikte Tablo 5'de verilmiştir (Liu, 2000).

Tablo 4. Gaz atomizasyonunun geometrik değişkenleri

	Parametreler	Değer/Aralık
Nozul Yapısı	Nozul Sayısı	1, 2, 4, 12, 16, 18, 20, 24 veya Dairesel
	Nozul Çapı (mm)	0.25 – 0.5 – 0.7 – 0.8 – 1 - 3
	Gaz ile Metal Akışı Arasındaki Açı (°)	7 – 45 (Düşey) 90 (Yatay)
	Konfigürasyon	Dıştan Karışmalı: Yakından Eşlemeli: SIGMA HPGA USGA Ünal Tepesi Kesik Tapa Annüler Serbest Düşmeli: Yatay Ospery Ultrasonik İçten Karışmalı: Santrifüj – Pnömatik
	Nozul Tipleri	Düz Daralan Daralan – Genişleyen (Laval) Şok Dalgalı (Ultrasonik)
Metal Akış Borusu	Çap (mm)	1 – 15
	Konfigürasyon	Daire Kesitli Sıvı Demeti Halka Şekilli Tabaka

Kaynak: Lui, 2000

Tablo 5. Metal tozu üretimi için gaz atomizasyon değişkenleri

Değişkenler	Değerler
Sıvı Metal Sıcaklığı	Alaşım ergime sıcaklığının (75 – 150)°C üzeri (aşırı ısıtma)
Atomizasyon Basıncı	0.5 – 9 MPa
Atomizasyon Gazı	Hava, azot, argon ve helyum
Gaz Akış Debisi	1 – 50 m3/dk
Nozul Çıkışında Gaz Hızı	50 – 150 m/s (1 – 3 Mach)
Sıvı Metal Debisi	1 – 90 kg/dk
Ortalama Parçacık Boyutu	10 – 300 µm

Kaynak: Lui, 2000

Gaz atomizasyonunda metal akış debisi normalde 1-70 kg/dk, metal akış çapı 2-15 mm aralığında değişmektedir. Ergime sıcaklığı düşük olan metallerin akış debisi, sürekli atomizasyon işlemi sırasında 8 ila 33 kg/dk aralığında değişmektedir. Geleneksel gaz atomizasyon işleminde, gaz basıncı 0,5-9 MPa, gaz akış debisi ise 0,02-0,24 m^3/s aralığındadır. Gaz hızı nozul geometrisi ve konfigürasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Yapılan çalışmalarda, yakından eşlemeli nozul tasarımları ile 18 MPa ve üzeri yüksek gaz basınçlarına kadar toz üretimi araştırılmış ve yüksek basınçlı gaz atomizasyon işlemi ile 10 µm altı ortalama toz boyutuna sahip ince tozların üretilebilirliği gözlemlenmiştir (Güleşen, 2013).

Atomizasyon işleminde nozul geometrisi oldukça önemli bir yere sahiptir. Nozul toz üretim ünitesine monte edildikten sonra geometrisinde herhangi bir değişiklik oluşmadığı için atomizasyon ünitesinin sabit parçalarından bir tanesidir. Bu yüzden atomizasyon işlemi gaz basıncı, gaz tipi, sıvı metal akış oranı, akış borusunun çıkıntı mesafesi ve sıvı metalin aşırı ısıtılması gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilir (Matei, 1996).

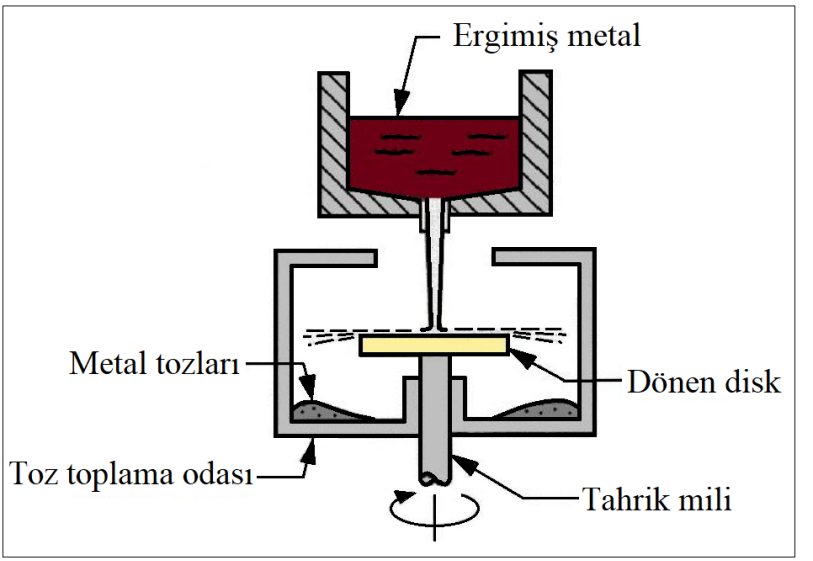
4.3. Savurmalı Atomizasyon Yöntemi

Savurmalı atomizasyon, ergiyik sıvı metalin merkez kaç kuvvetinin etkisiyle savrulması sonucu sıvı metal damlacıklarının parçalanıp katılaşmasıyla toz üretme yöntemidir. Burada temel işlem, merkezkaç kuvvetinin ergimiş malzemeyi damlacıklar halinde fırlatması ve damlacık halindeki parçacıkların soğuyarak katılaşmasıdır. Reaktif malzemeler ve ergime sıcaklığı çok yüksek olan malzemelerin tozlarının üretiminde kullanışlı bir yöntemdir. Savurmalı atomizasyon yöntemiyle temiz ve küresel şekilli tozlar, kolay akış özelliklerine ve yüksek paketlenme yoğunluğu sahip olarak üretilebilmektedir. Ancak düşük üretim hızı, yüksek donanım, yüksek işletme maliyeti ve büyük parçacık boyutu elde edilebilmesi yöntemin olumsuz yönleri olarak öne çıkmaktadır. Savurmalı atomizasyon yöntemi, döner disk atomizasyonu ve döner elektrot atomizasyonu olmak üzere ikiye ayrılır.

4.3.1. Döner Disk Atomizasyon Yöntemi

Döner disk atomizasyon yönteminde iki ayrı üretim tekniği kullanılmaktadır. Birincisi, belli bir miktarda sıvı metalin, toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvetine tabi tutularak, saçılan metalin toz haline gelmesi sağlanır. İkinci yöntemde ise, ergimiş sıvı metal veya alaşımın sürekli olarak yüksek hızda dönmekte olan disk veya koni üzerine akıtılıp, merkezkaç kuvvet etkisiyle saçılan metalin parçalanarak toz haline gelmesi sağlanır (Öztürk, 2003; Gökmeşe, 2010). Bu işlem esnasında disk üzerine düşen ergimiş sıvı metal damlacıkların katılaşması büyüklüklerine bağlı olarak dönen disk üzerinde veya diskten savrulduktan sonra gerçekleşmektedir. Tozların birbirine yapışmadan katılaşmasını hızlandırmak ve ısının

süratle uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı soğutma ortamı kullanılmaktadır (Angers & ark., 1996; Öztürk, 2012). Şekil 23'de döner disk atomizasyon yöntemi şematik olarak verilmiştir.



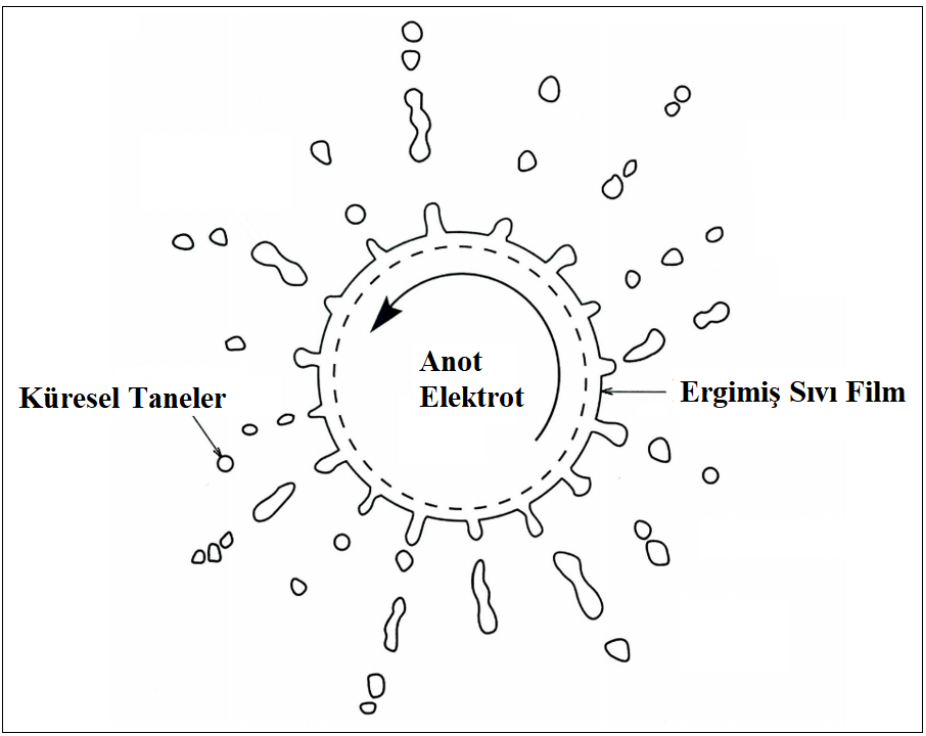
Şekil 23. Döner disk atomizasyon yönteminin şematik gösterimi

Kaynak: Baksan & Gürler, 2003; Öztürk, 2012

4.3.2. Döner Elektrot Atomizasyon Yöntemi

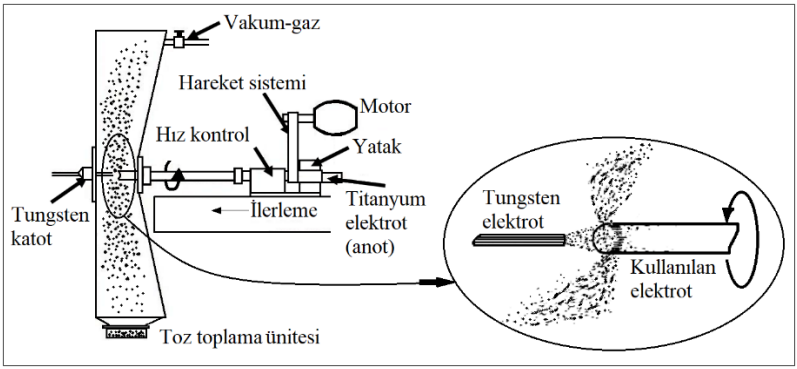
Bu yöntemde tozu elde edilecek malzemeden yapılmış elektrot ile ergimeyen tungsten elektrot kullanılır ve bu elektrotlar arasında ark oluşturulur. Ergime ile birlikte elektrotun döndürülmesiyle oluşan metal damlaları, merkezkaç kuvvetinin de etkisiyle savrularak parçalanır ve tankta toplanır. Yani tozlar, anot milden ergiyen malzemenin savrularak parçalanmasıyla elde edilir. İşlem esnasındaki oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı genellikle

argon ve helyum gibi bir asal gazla doldurulur. Bu yöntem ile reaktif malzemelerin ve ergime sıcaklığı çok yüksek olan malzemelerin tozları, küresel şekilde ve oldukça eşit tane aralığında üretilebilmektedir (Karagöz ve Yamanoğlu, 2005). Şekil 24'de döner elektrot atomizasyonunda parçacık oluşumunun şematik gösterimi ve Şekil 25'de ise, döner elektrot atomizasyon sistemi gösterilmiştir.



Şekil 24. Döner anot elektrotta sıvı filmin parçalanması ve küresel tane oluşumunun şematik gösterimi

Kaynak: German, 2007

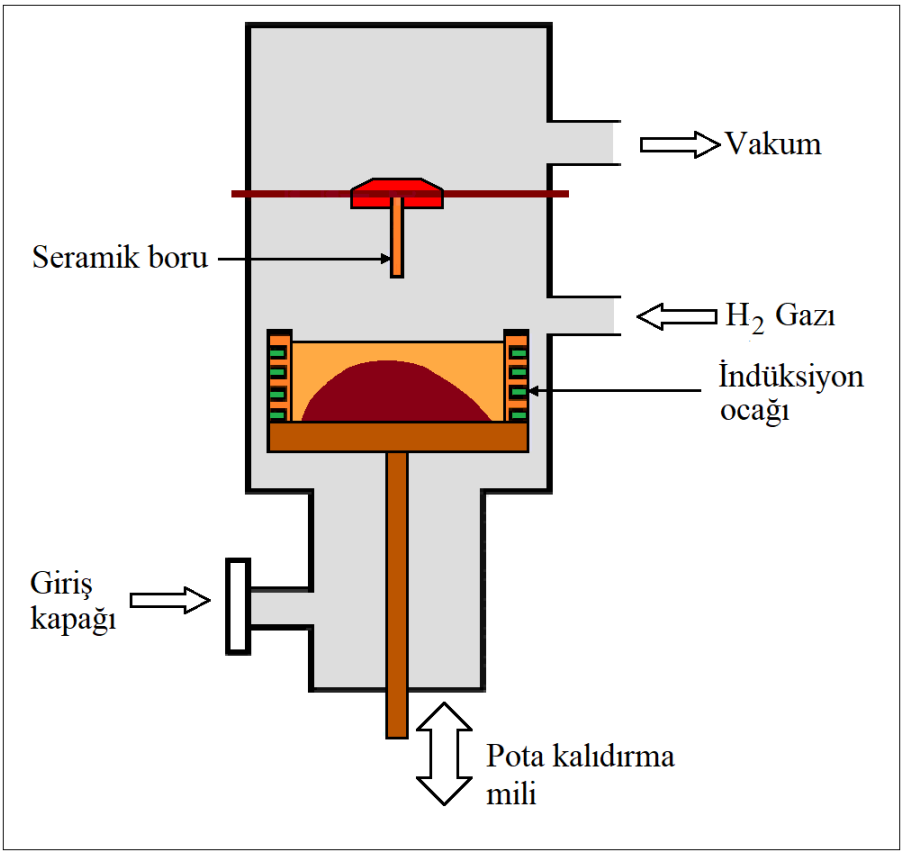


Şekil 25. Döner elektrot atomizasyon sisteminin şematik gösterimi

Kaynak: German, 2007 den adapte edilmiştir

4.4 Vakum Atomizasyon Yöntemi

Vakum atomizasyon işlemi, basınçlı gaz altında bulunan ergiyik metale ani vakum uygulanması sonucu, gazın genleşmesi ile birlikte metalin atomize olarak toz haline geldiği bir toz üretim yöntemidir. Vakum atomizasyon sisteminin şematik gösterimi Şekil 26'da verilmiştir. Bu yöntemle bakır, kobalt, alüminyum ve nikel esaslı küresel alaşım tozlarının yüksek saflıkta temiz olarak elde edilmesi mümkündür (Baksan ve Gürler, 2003).



Şekil 26. Vakum atomizasyon sisteminin şematik gösterimi

Kaynak: Baksan & Gürler, 2003

Vakum atomizasyon sistemi, şekilde de görüldüğü gibi silindirik bir tank, bu tankın alt kısmında bulunan ergiyik metal potası ve üst kısmında bulunan vakum atomizasyon odasından oluşmaktadır. Her iki bölüm ergiyiğin geçeceği memeyi (akış borusunu) taşıyan bir plaka tarafından bölünmüş olup, memenin alt kısmında ona bağlı bir seramik boru bulunmaktadır. Vakum altında bulunan ergiyik metal önce belirli bir sıcaklığa kadar indüksiyon

akımı ile ısıtılır, sonra bu bölüme hidrojen gazı doldurulur. Hidrojen gazı, potadaki ergiyik metalde çözündükten sonra, pota kaldırma mili, potayı yukarı doğru hareket ettirerek, üstteki seramik borunun potaya daldırılmasını sağlar. Silindirik tankın üst kısımda vakum olduğu için ergiyik metal memeden geçerek parçalanır, pülverize olur ve soğuyarak toz haline gelir. Bu işlem sonunda, metal ve alaşımlarından ince ve küresel tozlar üretilmiş olur (Baksan & Gürler, 2004; Aydın, 2005).

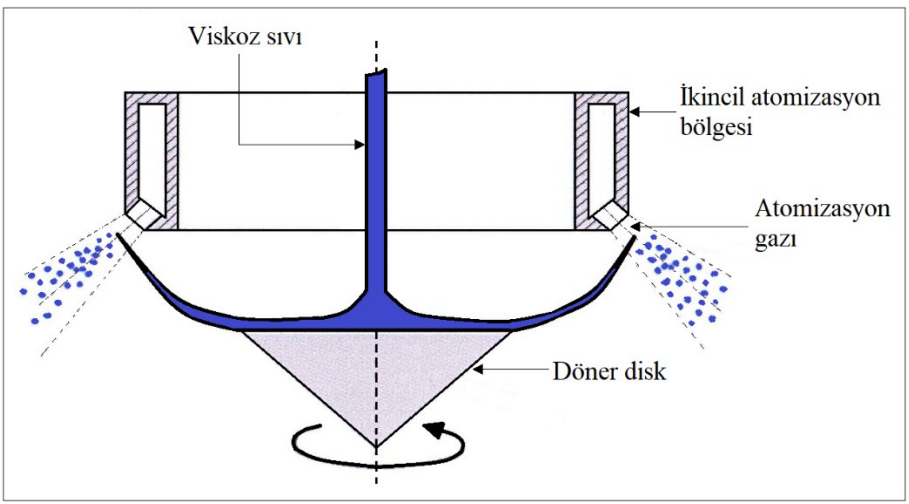
4.5 Atomizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Genel olarak atomizasyon yöntemleri değerlendirildiğinde, tozun şekli, ortalama boyutu, boyut dağılımı, yüzey kompozisyonu da dâhil olmak üzere kimyasal bileşimi ve mikroyapısı kontrol edilebilmektedir. Ede edilen bu temel özellikler, tozların ve bitmiş parçaların görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve tokluk gibi önemli özelliklerini belirlemektedir (Klar ve Fesko, 1984). Bu özelliklerle birlikte, atomizasyon yöntemlerindeki yüksek toz üretim hızı da, ekonomik olarak bir üstünlük olarak öne çıkaktadır. Her atomize toz tanesi, bir ön alaşım veya küçük bir kütük gibidir ve her toz tanesinde kimyasal bileşim aynıdır (Lawley, 1992). Atomizasyon yöntemlerinde çarpışma hızı genellikle sesten yavaş olduğundan, çarpışma hızı bütün atomizasyon tekniklerinde ısı çekilmesini, parçacık boyutunu ve enerji verimini sınırlamaktadır ve dolayısıyla verimi düşüktür. Atomizasyonda akışkanının debisi arttıkça oluşan parçacık boyutunda çok az küçülme gerçekleşir ve özellikle debi ve basınç her ikisi de arttıkça yöntemin verimi düşmektedir (German, 2007).

Atomizasyon yöntemleri ekonomiklik açısından karşılaştırıldığında, su atomizasyonu bu konuda oldukça avantajlı bir yöntem olmasına rağmen, temiz ve küresel tozların üretiminde yetersiz kalmaktadır. Su atomizasyonunda, diğer yöntemlere göre genellikle daha homojen mikroyapı elde edilir, fakat işlemde kullanılan su, üretilen tozların oksijen seviyesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle su atomizasyonu ile üretilmiş yüksek alaşımlı tozlarda yüzey oksitleri ve düzensiz tane şekli yaygın problem olarak ortaya çıkmaktadır. Su ve gaz atomizasyon yöntemleri arasındaki en önemli farklardan birisi, üretilen toz parçacıklarının şekilleridir. Gaz atomize tozlar küresel karakterde iken, su atomize tozlar düzensiz şekillere sahiptirler. Su ve gaz atomizasyon yöntemleri, ergiyik demetini parçalaması, küreselleşme ve zamanlı hızlı soğutma temin etmek için birlikle kullanılabilmektedir. Su atomizasyon yönteminde, küçük toz taneleri üretmek için çok yüksek basınç kullanmak verimsiz olmaktadır. Bu nedenle, küçük toz taneleri oluşturabilmek için çok yüksek gaz yoğunluğu ve hızına gerek duyulur ve imkân dâhilinde roket nozul teknolojisi kullanılabilir. Ayrıca alternatif olarak, iki aşamalı atomizasyon kullanılarak, birincil ergiyik demeti gaz, plazma ve savurma teknikleri kullanılarak atomize edilir ve damlacıklar katılaşmadan önce ikinci atomizasyon düzeneği ile çarpışarak daha küçük toz taneleri elde edilebilir. Döner elektrot atomizasyon yöntemi hem şekil hem de içerdiği safsızlıklar nedeniyle su ve gaz atomizasyonuna göre daha üstün bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Döner elektrot atomizasyon yöntemiyle üretilen tozlar, gaz atomizasyon tozlarına göre tamamen küresel bir

şekle sahiptirler (Lagutkin & ark., 2004; Krajnikov & ark., 2003; German, 2007; Yamanoğlu, 2011).

Atomizasyon yöntemleri üstünlük ve sınırlamaları ile birlikte değerlendirilerek geliştirilme çalışmaları devam etmektedir. Bu kapsamdaki çalışmalara örnek olarak, viskoz metallerin üretimi sırasındaki sahip oldukları düşük yüzey gerilimleri ve hızlı soğuma nedenli oluşan ligament şekilli toz tanelerinde fibersi yapıların oluşumunu engellemek için sıvı metal önce dönen bir diske akıtılmış ve saçılan kısmın gaz jetleri parçalanması sağlanmıştır (Czisch ve Fritsching, 2008; Yamanoğlu, 2011). Bu çalışma örneği Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 27. Döner disk ve gaz atomizasyonunun birlikte kullanımı

Kaynak: Czisch & Fritsching, 2008; Yamanoğlu, 2011

Geleneksel atomizasyon tekniklerinin karşılaştırılması, ortalama toz boyutu, uygulanan metal/alaşımlar, soğuma hızları,

dakikada elde edilen ürün miktarı, kapasite, üstünlükler ve sınırlamalar şeklinde Tablo 6'da verilmiştir (Liu, 2000).

Tablo 6. Geleneksel atomizasyon yöntemlerinin kıyaslanması

Yöntem	Toz Boyutu	Metal/Alaşım	Soğuma Hızı (°C/s)	Metal Debisi (kg/dk)	Kapasite (ton)	Üstünlükler	Sınırlamalar
Gaz Atomizasyonu	50-300 µm yakından eşlemeli nozul ile yüksek gaz basıncında 10-50 µm standart sapma 1.9-2.5	Lehim malzemeleri, değerli metaller, Cu, Fe, Al, Mg, Co, Ti, Zn, alaşımlar, yüksek hız çelikleri, intermetalikler	103-105	1-70	~6	Küresel & pürüzsüz partikül, temiz, hızlı katılaşmış yapı, kabul edilebilir üretim miktarı	Yüksek maliyet, düşük hacim, enerji verimliliği düşük, gözenekli tane oluşumu
Ultrasonik Gaz Atomizasyonu	<30 µm	Düşük ergimeye sahip alaşımlar, Fe, paslanmaz çelik, Ni, Co alaşımları, karbonlu çelikler	104-106	2.4-15	Çelik için ~2.4 Al için ~0.45	İnce pürüzsüz taneler, yüksek gaz verimi	Yüksek maliyet
Su Atomizasyonu	~100 µm standart sapma: 1.7-2.4	Fe, Cu, Cu alaşımları, paslanmaz çelikler, takım çelikleri, Ni alaşımları, değerli metaller	104-106	≤400	15-60 çelik & demir, 0.5-5 paslanmaz çelik & Cu alaşımları	Yüksek hacim, düşük maliyet	Toz saflığı ve şekli, düşük enerji verimliliği
Yağ Atomizasyonu	50-70 µm	Yüksek hız çelikleri	103-105	>125	~3	Düşük oksijen içermesi	Şekil, topaklanma, orta enerji verimliliği
Vakum Atomizasyonu	40-70 µm	Ni, Co süperalaşımlar	~102	5-100	~0.9	Küresel, pürüzsüz,	Kontrolü zor, orta

		, Al, Cu, Fe alaşımları				temiz partikül	enerji verimliliği
Döner Elektrot Atomizasyonu	~20 µm standart sapma: 1.3-1.5	Fe, Cu, Al, Zn, Co-Cr, Ti, Zr, Ni alaşımları, düşük karbonlu çelikler	≤102	1-10	~0.04	Küresel, çok pürüzsüz partikül, ultra temiz, enerji verimi iyi	Yüksek maliyet, düşük kapasite ve hacim, kaba taneler

Kaynak: Lawley, 1992; Yule & Dunkley, 1994

Atomizasyonla toz üretim yöntemleri çok geniş bir aralıkta üretim değişkenlerine sahip olduğundan, yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması sadeleştirilerek, bazı atomizasyon yöntemlerinin parçacık boyutu, parçacık şekli ve bağıl maliyet açısından karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiş olup, bu karşılaştırma her tekniğin uygulanabilirliği hakkında bağıl bir fikir vermektedir (Yule & Dunkley, 1994; German, 2007).

Tablo 7. Atomizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması

İşlem	Boyut Aralığı (µm)	Parçacık Şekli	Dağılım	Maliyet
Döner Elektrot	200-600	Küresel	İki modlu	Yüksek
Döner Disk	50-300	Küresel	Orta	Yüksek
Döner Pota	200-1000	Çubuk	Dar	Düşük
Ergiyik Savurma	200-1000	Pul	Orta	Düşük
Su Atomizasyonu	5-800	Düzensiz, nodüler	Geniş	Düşük
Gaz Atomizasyonu	15-300	Küresel	Orta	Orta
Ergiyik Patlama	150-500	Küresel	Orta	Orta
Plazma atomizasyonu	5-80	Küresel	Dar	Yüksek
Kıvılcım Erozyonu	1-20	Küresel	Orta	Yüksek

Kaynak: German, 2007

5. Sonuç

Günümüzde yaygın olarak kullanılan metal tozu üretim yöntemlerinden başka yeni metal tozu üretim yöntemleri bulunmakla birlikte, bu alandaki geliştirilme çalışmaları da devam etmektedir. Bu kapsamda, yeni ve geliştirilen toz üretim yöntemlerinden aşağıda kısaca bahsedilmiş olup, bu çalışmalar daha çok atomizasyon yöntemi üzerinde yoğunlaşmıştır.

Kılcal dalga atomizasyonu, ultrasonik gaz atomizasyonu ve çift ultrasonik atomizasyon gibi farklı bazı ultrasonik atomizasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Kılcal dalga atomizasyonunda, sıvı metal ultrasonik frekanslarda titreşimli bir yüzeye akıtılmaktadır. Ultrasonik gaz atomizasyonunda, erimiş metal akımı, çok yüksek hızlı gaz darbeleriyle parçalanmaktadır. Yüksek basınçlı gaz bir şok dalgası tüpü ile 60-120 kHz arasında değişen frekanslara hızlandırılmaktadır. Parçacık büyüklüğü genellikle 30 μm'den küçüktür. Ticari olarak alüminyum alaşımları gibi düşük erime sıcaklığına sahip alaşımların ve paslanmaz çeliklerin üretiminde kullanılmaktadır. Çift ultrasonik atomizasyonda, metal akışı iç tarafa doğru yönlendirilerek, sıvı metal bu titreşimli duvarı ıslatır ve kılcal dalga atomizasyon işlemine göre parçalanır. Ultrasonik gaz atomizasyonunda olduğu gibi basınç darbeleri, damlacıkları daha da parçalamaktadır (Upadhyaya, 2002).

Plazma atomizasyon, başka bir atomizasyon tekniği sağlar. Geleneksel potalı toz üretim tekniklerinden olan gaz, sıvı ve döner disk atomizasyonu gibi yöntemler yüksek ergime sıcaklığına sahip reaktif malzemelerden kaliteli tozları üretmek oldukça zordur. Örneğin, potada ergitilmiş haldeki titanyum hem potanın iç kısmı

hem de nozul ile reaksiyona girer böylece elde edilen tozlar istenilen kalitede değildir. Geliştirilen yeni yöntemlerde, üretilen tozların kirliliğinden sorumlu olan potalı ergitme işlemi tercih edilmemektedir (Boulos & ark., 2017). Plazma atomizasyon (PA), bir reaktif metal tel veya çubuk formuna sahip malzemenin en az bir plazma üreten tabanca ile hizalanmış bir şekilde temas ettirilmesi ve malzemenin atomize edilmesi şeklinde sonuçlanan bir işlemdir (Fang & ark., 2018; Larouche & ark., 2017; Dawes & Bowerman, 2015; Dumitras & ark., 2014). Bu yöntem özellikle diğer atomizasyon yöntemleri ile ergime sıcaklıklarının yüksekliği, yüksek enerji sarfiyatına karşılık düşük verim veya çeşitli reaksiyonlar gereği üretilmesi elverişli olmayan titanyum, zirkonyum, magnezyum, niyobyum, alüminyum, molibden, tungsten ve bunların alaşımları gibi reaktif metal malzemelerden küresel toz üretilmesinde önemli avantajlara sahiptir (Yurtkuran, 2019).

Ergiyiği enerji aktararak parçalamak için kullanılan diğer atomizasyon yöntemleri de mevcut olup, bunlar arasında titreşen teller, yüksek hızlı haddeler, dönen potalar ve ergiyik patlamalı atomizasyon üniteleri sayılabilir. Bir telin ucunda ark meydana getirilerek yağ içerisinde kıvılcım erozyonu ile parçacık üretilebilir. Hadde atomizasyon ünitelerinde, hızla dönen bir merdane ergiyik demetini pul şeklinde parçalar. Bu yöntemin ana avantajı amorf malzeme üretmek için gerekli yüksek soğuma hızlarını sağlamasıdır. Hadde ile atomize edilmiş tozların önemli olumsuzluğu üretilen tozların pul şeklinde olmasıdır. Düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerden iri parçacıklar dönen yarıklı pota kullanılarak üretilebilir. Açıklık boyutunun kontrol edilmesi elde edilen

damlacıkların boyut kontrolünü sağlar. Damlacıklar potadan çıktıktan sonra çok az bir bölünmeye uğrar, çünkü damlacıklar üzerinde kayma kuvveti etkisi yoktur (German, 2007)

Ayrı bir toz üretme yöntemi olan buhar fazından homojen çekirdeklenme ile de tozların oluşturulmasında oldukça ilerleme kaydedilmiştir. Bu tip yaklaşımlar nano ölçekli parçacıkların oluşturulmasında çok yararlıdır. Günümüzde 10 nm (0.01µm) boyuta kadar çeşitli tozlar bu yöntemle üretilmektedir. Atmosfer basıncının %10'u civarında düşük basınçlı argon içinde malzemeler buharlaştırılır. Düşük basınçta, ısı kaynağından uzaklaştıkça sıcaklık hızla düşer, böylece buharlaşan malzeme ısı kaynağından uzaklaştıkça soğur ve aşırı soğutulmuş olur. Sonuçta küçük katı parçacıklar buhardan doğrudan çekirdeklenir. Bu parçacık dumanı soğuk bir altlık üzerine toplanır. Buhardan üretilen parçacıkların ilgi çekici tarafı yüksek saflık ve küçük boyutu bir arada sunmasıdır. Bu yaklaşım bakır, gümüş, altın platin, kobalt ve çinko gibi birçok metalin oluşturulmasında uygulanmaktadır (Ring, 1996; German, 2007).

Nano ölçekli toz oluşturulmasının bir yolu da buhar fazından yoğuşturmadır. Buhar türleri altlık ısıtılarak, elektron ışın, lazer, plazma, alev veya çözelti, toz, sıvı veya buhar gibi girdi malzemeleri etkileyen endüksiyon alanları ile üretilir. Malzeme kaynama noktasına ısıtılır ve sonra 10 nm - 1 µm boyut aralığında parçacık topak halinde çekirdeklendirmek üzere yoğuşturulur. Bu tozlar ortam atmosferi ile tepkimeye girerek oksitler ve nitrürler oluşturabilir. Bu yöntemler pahalı toz üretim yöntemleridir ((Ring, 1996; German, 2007)

Mühendislikte kullanılan malzemelerin hemen hepsi toz haline getirilebilmektedir. Malzemelerin termodinamik özelliklere bağlı olarak, bazı yöntemler belirli malzemeler için daha kolaydır, fakat temel olarak bütün yaygın malzemelerin tozları üretilebilmektedir. Yaygın kullanılan üretim yöntemleriyle birlikte, bazı örnekler Tablo 8'de listelenmiştir. Genellikle, toz üretim teknikleri hedeflenen uygulama ve yoğunlaştırma yöntemine göre değerlendirilmektedir. Örnek olarak, iri, ön alaşımlı savurma atomize tozlar sıcak izostatik presleme için uygundur. Küçük, su atomize küresel veya yuvarlak parçacıklar toz enjeksiyon kalıplama için uygundur. Düzensiz, öğütülmüş ve topaklanmış tozlar ise, kalıpta sıkıştırma için uygundur (German, 2007).

Tablo 8. Çeşitli tozların üretim yöntemleri

Malzeme	Yaygın Yöntemler
Alaşım Çelikleri (Örnek, Takım Çeliği)	Su Atomizasyonu, Gaz Atomizasyonu, Savurmalı Atomizasyon
Alümina	Öğütme
Alüminyum	Hava Atomizasyonu, Gaz Atomizasyonu, Öğütme
Berilyum	Öğütme, Gaz Atomizasyonu
Sert Metal (WC-Co)	Öğütme, Aşındırarak Öğütme
Kobalt	Oksit İndirgeme, Kimyasal Çökertme
Kompozitler (Örnek, A-SiC)	Mekanik Alaşımlama, Plazma Atomizasyonu
Bakır	Elektrolitik, Su Atomizasyonu, Gaz Atomizasyonu, Kimyasal Çöketlme, Oksit İndirgeme, Tuz Bozunması
Bakır Alaşımları (Örnek, Pirinç)	Su Atomizasyonu, Hava Atomizasyonu
Altın	Elektroliz, Hava Atomizasyonu, Kimyasal Çöketlme
İntermetalikler (Örnek, Nial)	Gaz Atomizasyonu, Tepkimeli Sentez, Savurmalı Atomizasyon
Demir	Oksit İndirgeme, Su Atomizasyonu, Elektroliz, Karbonil Bozunma, Gaz Atomizasyonu, Savurmalı Atomizasyon
Nikel Alaşımları	Asal Gaz Atomizasyonu, Su Atomizasyonu, Savurmalı Atomizasyon
Nikel	Karbonil Bozunma, Elektrolizle Biriktirme, Su Atomizasyonu
Değerli Metaller (Örnek, Ag)	Hava Atomizasyonu, Elektrolitik Biriktirme, Kimyasal Çöketlme
Reaktif metaller (Örnek, Ti)	Klorür İndirgeme, Savurmalı Atomizasyon, Kimyasal Çöketlme, Hidrojenleme-Hidrojen Giderme
Isıya Dayanıklı Metaller (Örnek, W)	Oksit İndirgeme, Kimyasal Çöketlme, Plazma Atomizasyonu, Savurmalı Atomizasyon
Özel Alaşımlar (Örnek, Co-Cr)	Gaz Atomizasyonu, Su Atomizasyonu, Plazma Atomizasyonu, Savurmalı Atomizasyon
Süperalaşımlar	Gaz Atomizasyonu, Mekanik Alaşımlama, Savurmalı Atomizasyon
Uranyum	Oksit İndirgeme, Hidrojenleme-Hidrojen Giderme

Kaynak: German, 2007

Tablo 8, en tipik malzeme ve üretim yöntemi bileşimleri hakkında ön bilgi vermektedir, ancak kapsamlı değildir. Tozların ve üretim yöntemlerinin çeşitliliğini daha ileri düzeyde göstermek için, Tablo 9, bazı ticari tozların üretim yöntemini ve özelliklerini özetlemektedir. Tabloda bileşim, toz şekli, ortalama boyut, görünür ve vurgu yoğunluğu, oksijen seviyesi ve akış süresi (çok küçük tozların serbest olarak akmadığı durum için "akmaz" yazılmıştır) verilmiştir. Daha çok verinin girilmesi mümkün olmasına rağmen, tabloda verilen bilgiler mevcut çeşitli tozları ve özelliklerini temsil etmektedir. ((Rhodes, 1990; German, 2007)

Tablo 9. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş örnek tozlar ve özellikleri

Toz	İşlem	Şekil	D50,	O2 (ppm)	Görünür Yoğunluk (gr/cm3)	Vurgu Yoğunluğu (gr/cm3)	Akış Süresi (s)
Al	Gaz atomize	Küresel	30	6000	1.3	1.4	Akmaz
Al Alaşımı	Hava atomize	Yuvarlak	65	11000	0.9	1.4	–
Ag	Öğütülmüş	Pul	10	100	1.5	-	Akmaz
Au	Hava atomize	Küresel	130	50	7.8	11.9	-
Pirinç	Su atomize	Düzensiz	38	800	2.7	3.3	35
Bronz	Hava atomize	Küresel	125	700	5.0	5.4	-
Co Alaşımı	Gaz atomize	Küresel	90	400	4.3	5.2	-
Cu	Su atomize	Nodüler	62	3300	2.3	3.4	48
Cu	Elektroliz	dendritik	40	1700	2.8	3.6	29
Fe	Su atomize	Düzensiz	75	1100	2.9	3.4	26
Fe	Gaz atomize	Küresel	66	1500	4.5	5.0	9
Fe	Karbonil	Küresel	5	3800	2.7	4.3	Akmaz

Fe	Oksit indirgeme	Gözenekli	50	10000	1.9	3.0	35
Fe	Savurmalı	Küresel	75	1000	4.7	5.0	14
Hf	Öğütülmüş	Açısal	9	1200	4.2	6.5	Akmaz
Mo	Oksit indirgeme	Açısal	6	1200	2.0	3.1	Akmaz
Nb	Hidrür öğütme	Açısal	10	3800	0.9	1.0	Akmaz
Ni	Hidromet	Küresel	1	4000	1.3	2.6	Akmaz
Ni	Karbonil	Sivri	5	1500	2.5	3.3	Akmaz
Ni3Al	Tepkimeli	Yuvarlak	14	2000	3.1	3.8	Akmaz
Pb	Su atomize	Çubuksu	42	3000	5.2	-	24
Sn	Hava atomize	Çubuksu	18	7000	3.3	-	Akmaz
Paslanmaz Çelik	Gaz atomize	Küresel	12	1000	3.8	4.7	38
Paslanmaz Çelik	Su atomize	Düzensiz	60	2000	2.6	3.7	30
Ta	Hidrür öğütme	Açısal	9	1700	3.7	5.8	50
Ti	Klorür	Sünger	75	1500	2.0	2.5	Akmaz
TiAl	Gaz atomize	Küresel	180	800	2.2	2.4	30
Ti Alaşımı	Savurmalı	Küresel	175	1300	2.6	2.9	28
Takım Çeliği	Su atomize	Nodüler	70	1000	1.8	2.4	50
WC-Co	Aşındırarak öğütme	Açısal	0.7	800	2.5	4.3	Akmaz
W	Oksit indirgeme	Poligonal	3	640	3.4	6.7	Akmaz

Kaynak: German, 2007

Kaynakça

Akpınar, İ. Ş. (2011). Atomizasyon Yöntemiyle Toz Metal Üretimi ve Tozların Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

Aydın, M. (2005). Gaz Atomizasyon Yönteminde Yeni Bir Nozul Tasarımı ve Toz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Kütahya.

Aydın, M. (2005). Gaz Atomizasyon Yönteminde Yeni Bir Nozul Tasarımı ve Toz Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Kütahya.

Aliakbarlu, S. (2017). Ötektiküstü Alüminyum-Silisyum Alaşımından Toz Metalurjisi Yöntemiyle Yapısal Parça Üretiminin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen ilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Aslanoğlu, Z. (1994). Demir-Karbon Sisteminin Mekanik Alaşımlama Tekniği İle Üretim Süreçlerinin İncelenmesi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

ASM International Handbook Committee. (1998). Powder Metal Technologies and Applications. ASM Handbook Volume 7. USA: ASM International.

Ataç, M. A. & Güral A. (2013). Çinko-Alüminyum (ZA) Alaşımlarının Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretilebilirliği Üzerine Bir Çalışma. Politeknik Dergisi, 16 (4), 147-154.

ASM Metals Handbook Committee. (1976). Powder Metallurgy. ASM Handbook Volume 7. Ohio, USA: ASM International.

Angers, R. Tremblay, R. Desrosiers, L. & Dubé, D. (1996). Rotating disk coatings centrifugal atomization of aluminium and magnesium alloys. Metallurgical Quarterly Canadian, 35 (3), 291-297.

Boulos, M. I. Jurexicz, J. W. & Auger, A. (2017). Process and apparatus for producing powder particles by atomization of a feed material in the form of an elongated member. Patent Application Publication Apr. 20, 2017. Sheet 1 of 11 US 2017/0106448 A1, 2-48.

Boz, M. (1999). Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Baksan, B. & Gürler, R. (2003). Toz Metalürjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması, Osmangazi Üniversitesi, Metalürji Enstitüsü, Eskişehir.

Biancaniello, F.S. Conway, J.J. Espina, P.I. Mattingly, G.E. & Ridder, S.D. (1990). Particle size measurement of inert gas atomized powder, Mater. Science and Engineering A, 124, 9-14.

Czisch, C. Fritsching, U. (2008). Atomizer design for viscous-melt atomization, Materials Science and Engineering A, 477, 21-25.

Çivi, C. (2011). Demir Esaslı T/M Parçaların Düşük Frekanslı İndüksiyonla Sinterlenmesinde Sürenin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa.

Cambronero, L.E.G. Sánchez, E. Román, J.M.R. & Prieto-Ruiz, J.Á. (2003). Mechanical Characteizastion Of AA7015 Aluminium Alloy Reinforced With Ceramics. Journal of Materials Processing Technology, 143 (1), 378-383.

Dumitras, C. G. Cernat, R. Stamate, T. & Vardavoulias, M. (2014). Study on highpurity Titanium powder for biomedical application. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 16 (11–12), 1447–1455.

Dawes, B. J. & Bowerman, R. (2015)). Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Johnson Matthey Technology Review, 59 (3), 243– 256.

Dörtbölük, C. (2006). Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Zonguldak.

Ersümer, A. (1970). Toz metalürjisi sert metal sinterleme. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.

Fang, Z. Z. Paramore, J. D. Sun, P. Chandran, K. S. R. Zhang, Y. Xia, Y. (2018). Powder metallurgy of titanium–past, present, and future. International Materials Reviews, 63 (7), 407–459.

German, R. M. (1994). Powder Metallurgy Science, 2nd ed., Metal Powder Industries Federation, USA, 64,65, 74-78, 259-260.

German, R. M. (2007). Powder metallurgy & Particulate Materials Processing 1st ed. (Süleyman Sarıtaş, Mehmet Türker, Nuri Durlu, Çev. Ed.). Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği, 59-94.

Gökmeşe, H. (2010). Gaz Atomizasyonu Yöntemiyle AA 2014 Alaşım Tozunun Üretimi, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.

Güleşen, M. (2013). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Gaz Atomizasyonu Nozulunun Modellenmesi ve Toz Üretiminin Deneysel Araştırılması. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.

Hohmann, M. & Jonsson, S. (1990). New concepts for inter gas atomization Plants. Metal Powder Report, 47-50.

İncekara, M. (2008). Elektroliz Yöntemi İle Bakır Tozu Üretilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.

Krajnikov, A.V. Likutin, V.V. & Thompson, G.E. (2003). Comparative study of moroholgy and surface composition of Al-Cr-

Fe alloy powder produced by water gas atomisation technologies. Applied Surface Science, 210, 318-328.

Klar, E. & Fesko, J.W. (1984). Production of metal powders. Metals Handbook, Powder Metallurgy, 9th ed. Vol. 7, 25-51, Ohio.

Kurt, A. O. (2004). Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme. 1-2, 16, 25.

Keçeli, Z. (2007). Characterization investigations of powder and sintered Al-SiC and Al-B4C composites developed via mechanical alloying. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kayış, V. (2005) Kısmi ve Ön Alaşımlı Demir Tozları içerisine katı B ve FeB ilavelerinin sinterleme davranışları ve mekanik etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Kevenlik, O. F. (2013). Toz Metalürjisi Yöntemi ile SiC Takviyeli Al 2014 Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale.

Kopeliovich, D. (2012). Powder preparation. (2012/05/31 tarihinde http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=powder_preparation&cache=cache&media=atomization.png adresinden ulaşılmıştır.

Karagöz, S. & Yamanoğlu, R. (2005). Prep atomizasyonu ile alaşım tozu üretimi ve karakterizasyonu. *4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*.

Lagutkin, S. Achelis, L. Sheikhaliev, S. Uhlenwinkel, V. & Srivastava, V. (2004). Atomization process for metal Powder. Materials Science and Engineering A, 383, 1-6.

Larouche, F. Balmayer, M. & Trudeau-Lalonde, F. (2017). Plasma atomization metal powder manufacturing processes and systems therefore. International Patent Publication Number WO 2017/011900 A1, 2-53.

Lu, L. Lai, M.O. & Ng, C.W. (1998). Enhanced Mechanical Properties of an Al Based Metal Matrix Composite Prepared Using Mechanical Alloying. Materials Science and Engineering A, 2, 203-211.

Lenel, V. F. (1993). Production of Iron Powder by Reduction of Iron Oxide,. *Metals Handbook* (pp: 79-82). USA.

Liu, H. (2000). Science and engineering of droplets Fundamentals and applications. New Jersey: Noyes publications.

Lawley, A. (1992). Atomization: The production of metal powders. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.

Miki, M. Yamasaki, T. & Ogino, Y. (1992). Preparation of nanocrystalline NbN and (Nb, Al) N powders by mechanical alloying under nitrogen atmosphere. Materials Transactions, JIM, 33 (9), 839-844.

Matei, G. (1996). Studies on the metal and alloys atomization methods, *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 67-89.

Odabaşı, Ç. (2017). Toz Metalürjisi ile Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Bakır İlavesinin Mikroyapı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi,

Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük.

Onur, A. & Arslan, F. (1996). Yağ atomizasyonu yöntemiyle alüminyum alaşımı ve kalay tozu üretimi. *1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, Ankara, 193-206.

Öztürk, S. & ark. (2003). Su soğutmalı döner disk atomizasyonuyla üretilen AA 2014 alaşım tozlarının soğuma hızına atomizasyon parametrelerinin etkisi. Mühendis ve Makine Dergisi, 44 (517), 44-45.

Öztürk, Z. (2012). Gaz Atomizasyon Yöntemi İle Al 2024 Tozu Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.

Öveçoğlu, M. L. (1997). Toz Metalurjisi Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler. 9. Ulusal Metalürji ve Malzeme Kongresi, 449-475, İstanbul, Türkiye.

Özaydın, D. (2015). Toz Metalürjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.

Özaydın, D. (2015). Toz Metalürjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.

Ring T. A. (1996). Fundamentals of Ceramic Powder Processing and Synthesis. San Diego: Ademic Press.

Rhodes, M. J. (1990). Principles of Powder Technology. New York: John Wiley and Sons.

Safa, H. (2020). Yüksek Enerjili Öğütme İşlemi Uygulanan 316L Paslanmaz Çeliğinin Özelliklerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 32 (2), 45-51.

Sarıtaş, S. (1994). Makine Mühendisliği El Kitabı. Ankara: Makine Mühendisleri Odası

Sıralı, H. (2018). Toz Metalurjisi ile Üretilen Tzm Alaşımlarının Karakterizasyonu ve Aşınma Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük.

Sikka, V. K. (1990). Powder production, processing, and properties of Fe_3Al. Advances in Powder Metallurgy, 2, 207-217.

Suryanarayana, C. (2001). Mechanical Alloying and Milling. Progress in Materials Science, 46, 1-184.

Söyler, A. U. (2008). Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y_2O_3 Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Suryanarayana, C. & Al-Aqeeli, N. (2013). Mechanically alloyed nanocomposites. Progress in Materials Science, 58 (4), 383-502.

Suryanarayana, C. (2004). Mechanical Alloying and Milling. New York: Marcel Dekker, Print Book, Internet Resource.

Soni, P. R. (2001). Mechanical Alloying Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge International Science Publishing.

Somunkıran, İ. & Çelik, H. (2007). T/M yöntemiyle üretilmiş Co esaslı Co-Cr-Mo alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özelliklerine Cr oranının etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (2), 235-241.

Sarıtaş, S. & Doğan, C. (1994). Metal powder production by centrifugal atomization. Internetional Journal of Powder Metallurgy, 30, 419-427.

Singh, S. N. & Ojha, S. N. (1992). Microstructural investigation on rapidly solidified cast iron powders. International Journal of Rapit Solidification, 7, 201-217.

Sheikhaliev, S. M. & Dunkley, J. J. (1996). A Novel Internal Mixing Gas Atomiser for Fine Powder Production. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials (Cadle, T. M., & Narasimhan, K. S., eds.). New Jersey: MPIF and APMI International.

Şimşek, İ. Yıldırım, M. Tunçay, T. Özyürek, D. & Şimşek, D. (2018). Mekanik Alaşımlama/Öğütme Yöntemi ile Üretilen Al-Sic Kompozitlerin İncelenmesi. Technological Applied Sciences, 13 (2), 165-171.

Şimşek, İ. (2017). Toz Metalürjisi ile Üretilen Titanyum Alaşımı Biyomalzemelerin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük.

Tabona, T. M. K. (2019). Toz Metalürjisi Yöntemi İle Üretilen Nanopartikül Katkılı Ni-B Alaşımların Mikroyapı Ve Korozyon Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu

Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kastamonu.

Turan, İ. (2005). Toz Metalürjisi ile Üretilen Demir Esaslı Yapısal Parçalar İçerisine Katılan B ve NiB İlavelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Turan, H. (1993). Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

United States Patent (2001). Low Densty High Surface area Copper Powder And Electrodepositon Process For Making Same. US 6322609 B1.

Uslan, İ. (1999). Gaz atomize alüminyum tozlarının özelliklerine üretim değişkenlerinin etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Upadhyaya, G. S. (2002). Powder Metallurgy Technology. England: Published by Cambridge International Science Publishing.

Ünal, A. (1990). Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomization and their applications. Powder Metallurgy, 33 (1), 53-64.

Ünal R. & Aydın, M. (2008). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile gaz atomizasyon nozulu modellenmesi. TÜBİTAK Destekli Proje. Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Kütahya.

Yamanoğlu, R. (2011), Atomizasyon Teknikleri ile Toz Üretimi, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Yurtkuran, E. (2019). Plazma Tabancası Tasarımı, Analizi ve Plazma Atomizasyon Yöntemi İle Ti Alaşım Tozu Üretiminin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.

Yıldız, E. S. (2007). Gaz Atomizasyonu ile Metal Tozu Üretiminde Nozul Geometrisinin Toz Boyutuna Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.

Yılmaz, N. (2006). Demir Esaslı Toz Metal Malzemelerin Talaşlı İşlenebilirliği. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.

Yule, A.J. & Dunkley, J.J. (1994). Atomization of melts. New York: Oxford University Press.

Weimer, A. W. (1997). Carbide, Nitride, and Boride Materials Synthesis and Processing. London: Chapman and Hail

BÖLÜM XII

Dinamik Taşıt Modelinin Simülasyon Ortamında Enerji Tüketim Parametrelerinin İncelenmesi

Tevfik ATAMAN[1]
Mehmet KARAYEL[2]

1.Giriş

Dünya nüfusunun artışı ve sanayi sektörlerindeki genişleme, üretim talebini ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacını önemli ölçüde artırmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisi büyük ölçüde fosil yakıtların kullanımıyla üretilmektedir. Elektrik üretiminin ardından fosil yakıtların en yoğun tüketildiği alan, enerji talep artış oranının en yüksek olduğu ulaşım ve taşımacılık sektörüdür.

Fosil yakıtların yanması sonucunda insan sağlığına zararlı kirleticiler ve atmosferde sera etkisine neden olan karbon dioksit gibi

[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. Dr., Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Çankırı/Türkiye, Orcid: 0000-0001-7155-8288, mkarayel@karatekin.edu.tr

gazlar açığa çıkmaktadır. Küresel ısınma, hava kirliliği ve fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı gibi sorunlar, yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarını öncelikli hale getirmiştir. Şubat 2007'de gerçekleştirilen Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nde, karbon bazlı yakıtların dünya ekosistemi üzerindeki tehditleri nedeniyle, küresel ısınmayı ve atmosfer kirliliğini azaltmak için karbon içeriği düşük veya sıfır olan yakıtların enerji üretiminde kullanılması ve enerji dönüşümlerindeki verimliliğin artırılması gerektiği özellikle vurgulanmıştır (Erdoğan, 2020).

Bu durumdan hareketle, ulaşımın büyük bir kısmının kara yolu taşıtlarıyla sağlanması nedeniyle, hükümetler kara yolu araçlarının egzoz emisyonlarına yönelik giderek daha sıkı düzenlemeler getirmektedir. Bu bağlamda, taşıt üreticileri mevcut teknolojilerini geliştirmek amacıyla araştırma kuruluşlarıyla iş birliği yaparak çeşitli çözüm odaklı projeler üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmaktadır (The & 2014, n.d.).

Petrol türevi yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlar, teknoloji alanındaki ilerlemelere rağmen günümüzde maksimum yaklaşık %40 verimlilikle çalışabilmektedir. Ayrıca, bu motorlarda yakıtın yanmasıyla çevreye ısı ve zararlı gazlar salınmaktadır. Bu durum, modern teknolojiler arasında hibrit elektrikli araçların öne çıkmasına neden olmuştur. Bu araçların tasarımları incelendiğinde, yalnızca batarya ile çalışan, içten yanmalı motorla bataryayı bir arada kullanan ve yakıt pilli sistemlere sahip modeller dikkat çekmektedir. Son yıllarda, büyük otomotiv üreticileri, hidrojenin tükenmeyen bir enerji kaynağı olması ve yakıt olarak kullanıldığında çevreye yalnızca su buharı salmasıyla sıfır emisyon hedefini

desteklemesi nedeniyle, yakıt pilli araçlara yönelik çalışmalarını yoğunlaştırmıştır ("Vehicular Electric Power Systems : Land, Sea, Air, and Space Vehicles," 2003).

Büyük otomotiv üreticilerinin bu alana odaklanması ve çevreye zararlı emisyonların ortadan kalkması nedeniyle elektrikli taşıtların modellenmesine yönelik çalışmalar ivme kazanmıştır.

Elektrikli araçlarda performans ve menzil tahmini kritik bir öneme sahiptir. Bilgisayar tabanlı yöntemler, bu süreci makul bir kolaylıkla gerçekleştirmemizi sağlamaktadır. Özellikle bu yöntemler, aracın motor gücü, batarya türü ve boyutu, ağırlık gibi parametreler üzerinde hızlı bir şekilde simülasyon yapmamıza ve bu değişkenlerin performans ve menzil üzerindeki etkilerini analiz etmemize olanak tanımaktadır (Chan & Wong, 2004). Ayrıca, MATLAB ve Excel gibi yazılımlar, bu tür simülasyonlar için uygun bir temel sunmakta, programlama konusunda ileri düzey bilgiye ihtiyaç duymadan analizlerin yapılmasına imkân tanımaktadır. Elektrikli araçların performansının matematiksel modellenmesini diğer araçlara kıyasla daha kolay hale getiren belirli özellikler de bu bağlamda ele alınacaktır (Boyali, 2009).

Modelleyeceğimiz ilk parametre taşıtın performansıdır. Performansla kastettiğimiz: hızlanma ve en üst hızdır. Bu kısım elektrikli taşıtların çok zayıf olduğu alanlardan biridir. Herhangi bir elektrikli taşıtın en azından sıradan şehir trafiğine güvenle karışmasına olanak veren bir performansa sahip olması gerekir. Pek çok kişi, büyük ölçekli satışların elde edilmesi için performansın en az içten yanmalı motorlar kadar iyi olması gerektiğini iddia eder (Hofman & Dai, 2010).

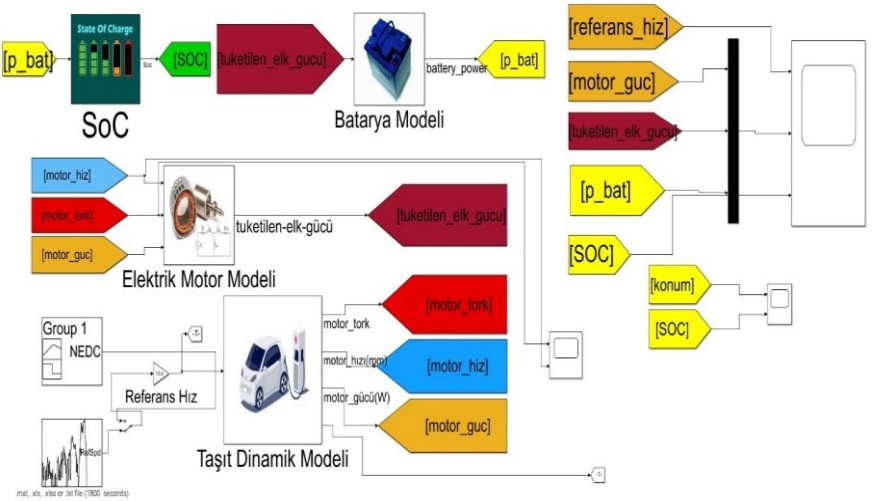
Elektrikli taşıtların tahmin edebileceğimiz bir diğer önemli özelliği de menzilleridir. Bu aynı zamanda matematiksel olarak modellenebilir ve bilgisayar programları bunu oldukça basitleştirir (Kerem, 2014). Geliştirdiğimiz model, pil tasarımı ve kapasitesi gibi değişen şeylerin yanı sıra, araç tasarımının tüm diğer yönlerinin menzil üzerindeki etkilerini görmemizi sağlayacaktır. Bu, araç tasarımcısı için vazgeçilmez bir araçtır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, MATLAB kullanılarak elektrikli araçların (EV) modellemesi ve enerji tüketimi analizini konu almaktadır. Çalışmanın bu bölümü, modelleme ve simülasyon için izlenen adımları, kullanılan matematiksel modelleri ve hesaplama yaklaşımlarını ayrıntılı bir biçimde sunmaktadır.

2.1. Modelleme Yaklaşımı

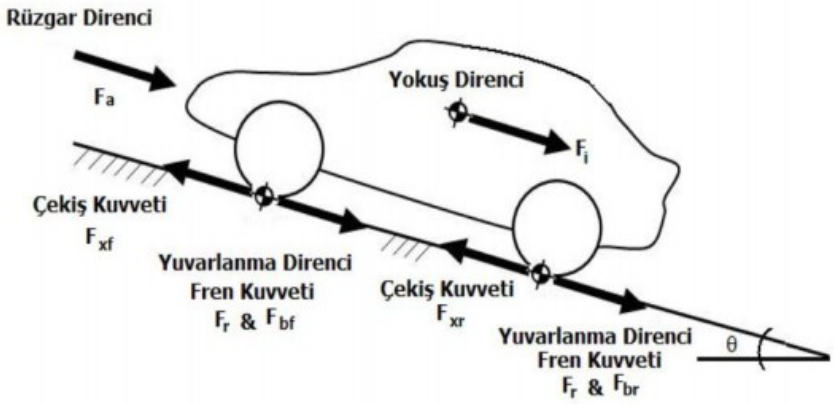
Elektrikli araç modeli, bileşen bazlı bir yaklaşımla oluşturulmuştur (Kıyaklı & Solmaz, 2018). Modelde temel bileşenler şekil 1'de görüldüğü gibi ele alınmıştır. Modelde görülen bileşenlerden elektrik motor modelinde, motorun tork-hız karakteristiği ve verimlilik haritası kullanılmıştır. Batarya modelinde; lityum-iyon bataryalar temel alınarak batarya kapasitesi, gerilim profili ve enerji tüketim modeli tasarlanmıştır. Taşıt dinamik modelinde; araç kütlesi, hava direnci, yuvarlanma direnci ve yokuş çıkma gibi etkiler fiziksel modeller kullanılarak tasarlanmıştır. Kontrol modelinde ise; araç hızının ve enerji kullanımının optimize edilmesi amacıyla kontrol algoritmaları uygulanmıştır.



Şekil 1: Elektrikli araç modeli.

2.2. Taşıta Etkiyen Direnç Kuvvetleri

Taşıtlar hareket halindeyken çeşitli direnç kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler, taşıtın hareket yönüne zıt bir doğrultuda etkide bulunarak hareketini zorlaştırmaktadır (Abe, 2015). Direnç kuvvetlerinin oluşumu, farklı faktörlere bağlıdır ve bu faktörlerin iyileştirilmesi, içten yanmalı motorlu taşıtlarda yakıt tasarrufu sağlarken, elektrikli taşıtlarda menzil artışına katkıda bulunabilir. Özellikle menzili sınırlı olan elektrikli taşıtlarda, bu direnç kuvvetlerinin en aza indirilmesi büyük bir öneme sahiptir. Taşıta etki eden direnç kuvvetleri dört ana kategoriye ayrılmaktadır: aerodinamik direnç, yuvarlanma direnci, yokuş direnci ve ivmelenme direnci. Bir eğimde hareket eden taşıta etkiyen direnç kuvvetleri şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Bir eğimde hareket eden taşıta etkiyen direnç kuvvetleri.

2.2.1. Aerodinamik Direnç

Akışkan içinde hareket eden cisimler, hareket yönlerine zıt bir kuvvetin etkisi altındadır. Hava bir akışkan olarak kabul edildiğinde, durgun hava ortamında belirli bir hızla hareket eden bir taşıt, hareketine ters yönde bir direnç kuvvetine maruz kalır (Abe, 2015). Bu kuvvet, aerodinamik direnç olarak adlandırılmaktadır. Taşıta etki eden aerodinamik direnç temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır:

- Taşıtın arka kısmında meydana gelen türbülans, taşıtın gövdesinin şekliyle doğrudan ilişkili olan bir direnç oluşturur. Bu direnç, aerodinamik sürtünmenin en belirleyici bileşeni olup, toplam aerodinamik direncin yaklaşık %80'ini oluşturur. Özellikle taşıtın arka kısmındaki hava akışının düzensizleşmesi, bu direnç üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

- Taşıtın dış yüzeylerinden geçen hava akışının yol açtığı sürtünme, aerodinamik direncin bir bileşenini oluşturur. Standart bir otomobilde, bu bileşen toplam aerodinamik direncin yaklaşık %10'unu teşkil etmektedir.
- Soğutma ve havalandırma işlevleri için taşıtın radyatör sistemi veya iç bölümlerinden geçen hava akışına bağlı olarak ortaya çıkan iç direnç, aerodinamik direncin bir diğer bileşenini oluşturur. Bu direnç, akışkanın yönlendirildiği kanalların tasarımına bağlı olarak değişmekle birlikte, toplam aerodinamik direncin yaklaşık %10'unu kapsamaktadır.

Toplam aerodinamik direnç: $F_a=0.5*\rho*C_d*A*V^2$

Bu eşitlikte;

C_d: Aerodinamik direnç katsayısı

A: Taşıtın ön iz düşüm alanı (m^2)

V: Taşıt hızı (m/2)

ρ: Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

Aerodinamik direnç katsayısı, bir cismin biçimi sebebiyle hava akımı içinde oluşturduğu süreksizlik ve girdaplar gibi akış

bozulmalarının etkisini ifade eden bir sayıdır. Bu sayının azaltılması, aerodinamik direncin azaltılmasını sağlayacaktır.

2.2.2. Yuvarlanma Direnci

Tekerleğin elastik yapısı nedeniyle, tekerlek temas merkezinin önünde, tekerin dönme hareketine karşı direnç kuvveti oluşmaktadır. Yuvarlanma direnç kuvveti, taşıt kütlesi, lastik cinsi, lastik hava basıncı ve yol şartları gibi parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Yuvarlanma direnci;

$F_r=m*g*C_r*cos\alpha$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte C_r, yuvarlanma direnç katsayısını ifade etmektedir. Farklı yol yüzeyleri için yuvarlanma direnç katsayısı değişmektedir.

Yuvarlanma direncini etkileyen önemli faktörlerden birisi de malzemedeki histerezis kayıplarına bağlı olarak deformasyona uğrayan malzeme miktarıdır. Yükteki bir artış veya lastik iç basıncındaki bir azalma, lastiğin şekil değişimini artırarak yuvarlanma direncinin artmasına neden olmaktadır. Bunun yanında taşıt hızının artması da yuvarlanma direncinin artmasına sebep olur.

2.2.3. Yokuş Direnci

Yokuş direnci, taşıtın eğimli bir yolda hareket ederken, ağırlık kuvvetinin bileşenlerinden kaynaklanan bir direnç türüdür (Lenzo, 2022; Tseng, 2021). Bu direnç, taşıtın kütlesi ve yolun eğimi ile doğrudan ilişkilidir. Yokuş direnci, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$F_t=m*g*\sin(\alpha)$

Burada, α yolun eğim açısını temsil etmektedir. 1990 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan genelgeye

göre, Türkiye'de otoyollarda eğim %10, şehir içi yollarda %15 ve kırsal arazi yollarında %20 olarak belirlenmiştir. Bu %10'luk eğim, her 100 metrelik mesafe için 10 metrelik bir yükselmeye karşılık gelmektedir.

2.2.4. İvmelenme Direnci

Newton'un II. hareket yasasına göre, bir cismin hızlanması veya yavaşlaması sırasında, bu hareketin ters yönünde bir atalet kuvveti meydana gelir. Taşıtın pozitif ve negatif ivmelenme aşamalarında karşılaşılan bu kuvvet, ivmelenme direnci olarak adlandırılmaktadır (Pek & van Waveren, 2024). İvmelenme direnci, aşağıdaki formülle ifade edilir:

$F_i = m*a$

Bu direnç, doğrusal hareket halindeki kütlelerin atalet kuvvetlerinden ve dönme hareketi yapan tekerlekler, aktarma organları ve motorun dönel atalet kuvvetlerinden kaynaklanır. Taşıtın ilk hareketi ve frenleme işlemleri sırasında, büyük ivmeler ve buna bağlı olarak yüksek atalet kuvvetleri ortaya çıkmaktadır.

2.3. Rejeneratif Frenleme

Hareket halindeki taşıt yavaşlarken veya yokuş aşağı inerken, taşıtın sahip olduğu kinetik enerji, elektrik motorunun jeneratör modunda çalıştırılmasıyla frenlemeden dolayı tekrar kazanılabilmektedir. Frenleme başlamadan önce motor ileri doğru dönmektedir. Frenleme esnasında zıt elektromotor kuvvetinden kaynaklanan enerjinin geri kazanılması sağlanmaktadır. Bu sayede daha yüksek sistem verimliliği ve batarya şarjı ile menzil artışı sağlanmaktadır (Hamada & Orhan, 2022).

Bu sistem, özellikle şehir içi sürüşlerde sıkça karşılaşılan durkalk durumlarında önemli miktarda enerjinin geri kazanılmasını sağlamaktadır. Rejeneratif frenlemenin etkin olabilmesi için taşıt hızının belirli bir seviyenin altına düşmemesi gerekmektedir. Ayrıca, rejeneratif frenlemenin ivmesi, kullanılan jeneratör veya elektrik motorunun kapasitesiyle sınırlıdır. Rejeneratif frenleme, taşıtın normal hızlarda gerçekleştirdiği frenleme sırasında en verimli şekilde kullanılmaktadır. Taşıt hızı çok düşük seviyelere indiğinde ve durdurma işlemi için acil frenleme gerektiğinde, hidrolik fren sistemi devreye girmektedir.

2.3. Simülasyon Parametreleri

Modellemesi yapılan taşıtın parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Şehir içi kullanıma yönelik bir taşıt olan Nissan firmasına ait elektrikli bir taşıt olan Leaf modelinin teknik özelliklerinden faydalanılmıştır.

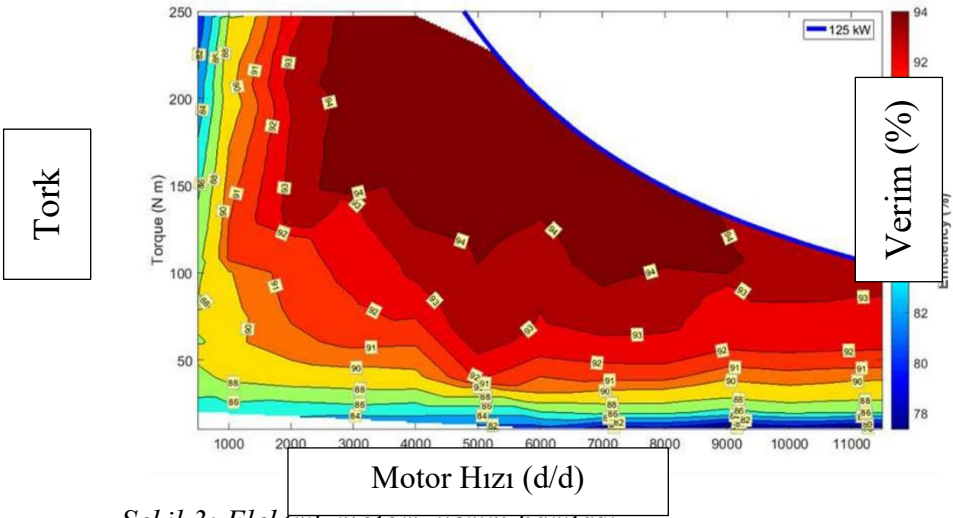
Tablo 1: Simülasyon parametreleri.

Parametre	**Değer**	**Birim**
Taşıt kütlesi (m)	1500	kg
Ön iz düşüm alanı (A)	2.27	m^2
Aerodinamik direnç katsayısı (C_d)	0.28	-
Tekerlek yarıçapı (rw)	0.3	m
Yuvarlanma direnç katsayısı (f)	0.01	-
Yerçekimi ivmesi (g)	9.81	m/s^2
Havanın yoğunluğu (ρ)	1.2	kg/m^3
Efektif atalet kütlesi	1.02*m	kg
Taşıt kütlesi (m)	1500	kg
Ön iz düşüm alanı (A)	2.27	m^2

2.4. Elektrik Motor Modeli

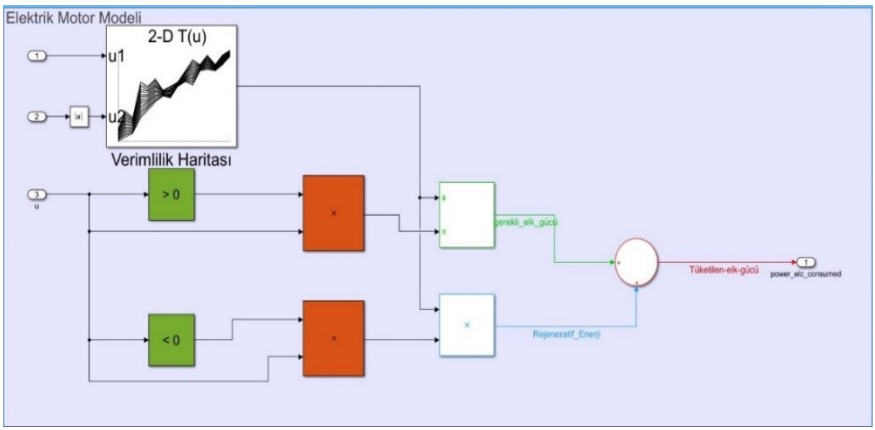
Elektrik motor modellemesi verimlilik haritası kullanılarak yapılmıştır. Bu harita bize bir elektrik motorunun elektrik gücünü hangi verim ile mekanik güce çevirdiğini gösterir. Her motorun kendine özel verimlilik haritası vardır. Veri kullanarak modellemenin iyi tarafı; motorun içerisinde neler olup bittiğini bilmemize gerek yoktur. Gerilim, akım, sargı sayısı bilgilerine ihtiyaç yoktur. Sadece verimlilik haritası ile modellemeyi

gerçekleştirmek mümkündür. Verimlilik haritasının kullanılması daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini de sağlamaktadır. Modelde kullanılan elektrik motoru verim haritası şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3: Elektrik motoru verim haritası.

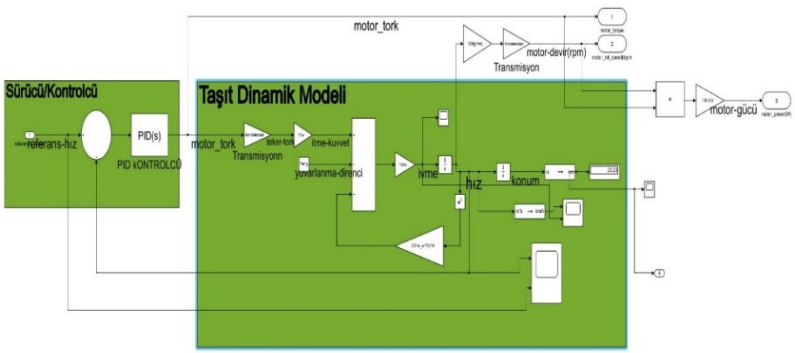
Elektrik motorunun, Simulink modeli şekil 4'te görülmektedir. Bu modellemede, elektrik motorunun devri girilerek, o devirde üretebileceği maksimum tork değeri hesaplanmaktadır. Bu aşamada hesaplanan tork değeri, gaz pedalı ile kontrol edilerek, dinamik modele dahil edilecektir. Elektrik motorunun devri ve torku, verim diyagramına giriş olarak alınıp, elektrik motorunun verimi belirlenmektedir.



Şekil 4: Elektrik motor modeli.

2.5. Taşıt Dinamik Modeli

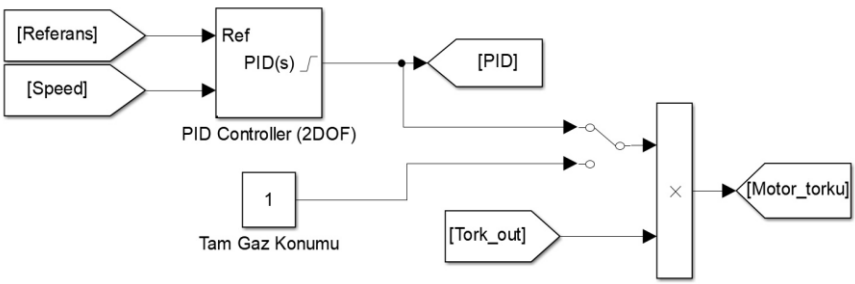
Taşıt dinamik modellemesi yapılırken, transmisyon verimliliği, aerodinamik direnç, yuvarlanma direnci ve ivme direnci modellemeye dahil edilmiştir. Taşıt dinamik modeli şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5: Taşıt dinamik modeli.

2.6. Hız Kontrol Modeli

Taşıtın hızının, belirlenen referans hızına uygun şekilde ayarlanabilmesi için PID kontrolörü kullanılmıştır (Johnson et al., 2005). PID kontrolörüne referans hız ve taşıtın anlık hızı giriş olarak verilmiştir. Kontrolörün çıktısı, -1 ile 1 arasında sınırlandırılmıştır. Bu çıkış değeri, gaz pedalının kontrolü için 0 ile 1 arasında, fren pedalının kontrolü için ise -1 ile 0 arasında kullanılmıştır. Şekil 6'da hız kontrol modeli görülmektedir.



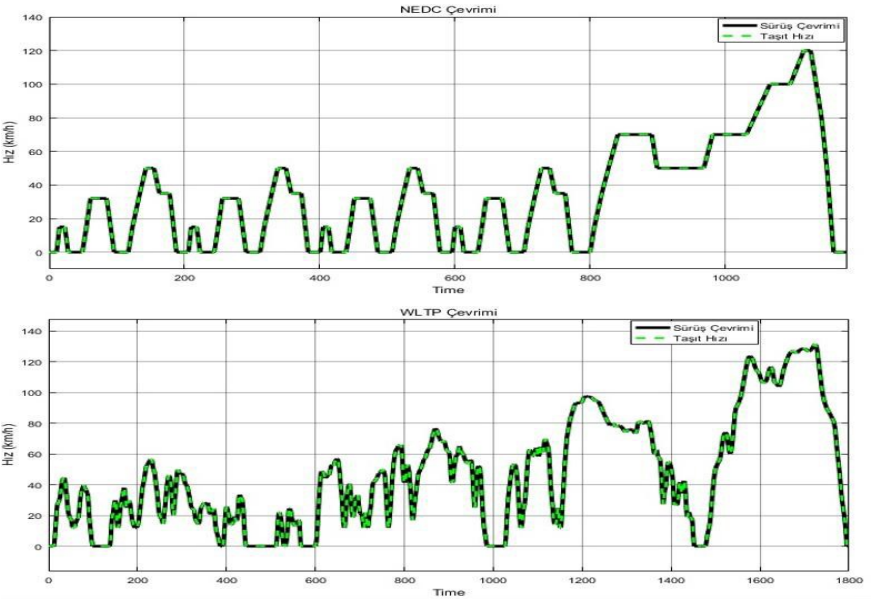
Şekil 6: Hız kontrol modeli.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir elektrikli aracın farklı parametrelerinin menzile olan etkisi; NEDC ve WLTP sürüş çevrimleri boyunca MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen sanal simülasyonlar yoluyla incelenmiştir.

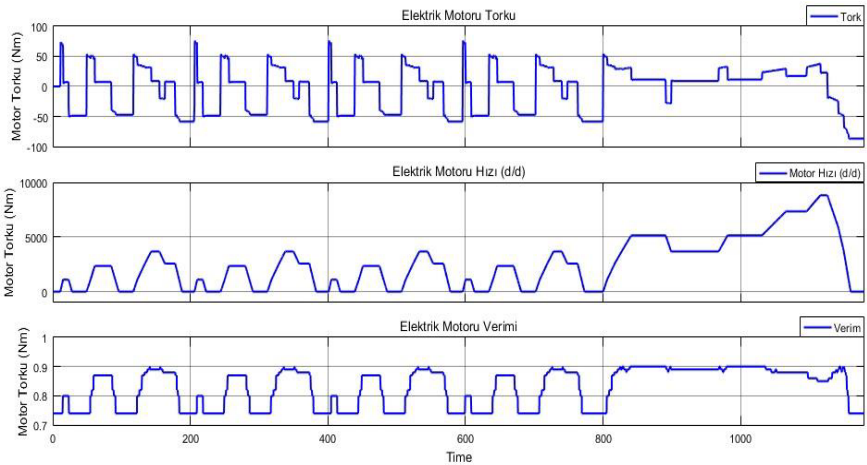
Modelleme aşamalarından sonra taşıt parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelere göre, NEDC ve WLTP çevrimlerindeki enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Bu çevrimlere göre taşıtın aerodinamik direnç katsayısı, yuvarlanma direnç katsayısı, kütle gibi parametreleri değiştirilerek taşıt performansına ve enerji tüketimine etkisi incelenmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

Elektrikli taşıta ait simülasyon sonuç grafikleri çizdirilmiştir. Grafikler, taşıtın sürüş çevrimlerini takip etmesi ile oluşturulmuştur. Şekil 7'de NEDC ve WLTP çevrimleri-taşıt hızları görülmektedir.



Şekil 7:Sürüş çevrimleri ve taşıt hız değerleri.

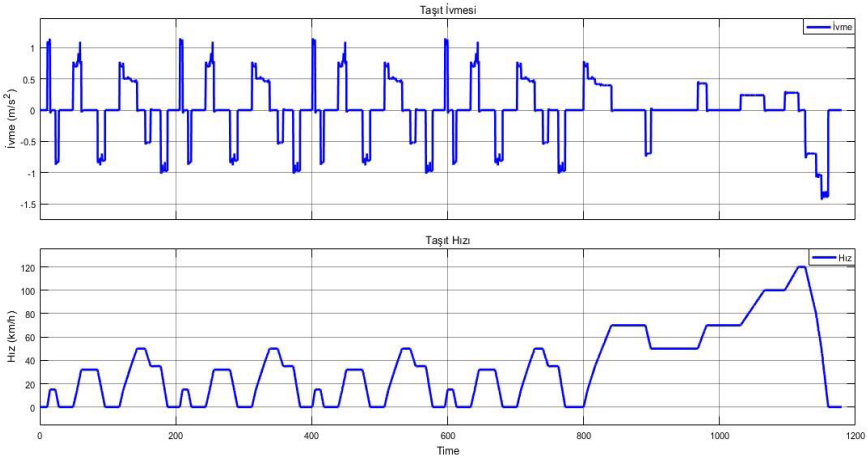
NEDC ve WLTP çevrimlerini içeren simülasyon sonuçlarına göre, taşıt hızı ile çevrim hızının aynı olduğu anlaşılmaktadır. Bu sayede, modelden elde edilen enerji tüketimi verilerinin de doğru olduğu sonucuna varılabilmektedir. Şekil 8'de NEDC çevriminde elektrik motorunun torku, hızı ve verimi görülmektedir.



Şekil 8:NEDC çevriminde elektrik motoru verileri.

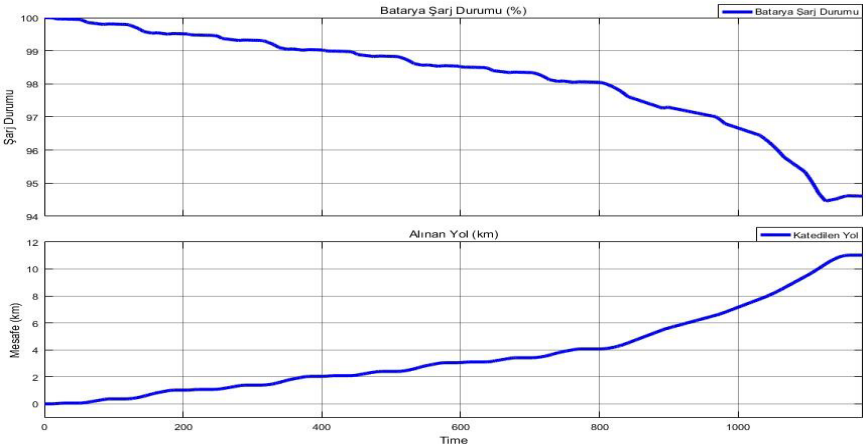
Taşıt NEDC çevrimini referans alarak hareket ederken, elektrik motoru hızı ile sürüş çevrimi benzerlik göstermektedir. Bunun sebebi, elektrik motorunun kullanılmasıyla vites kutusuna ihtiyaç duyulmamasıdır. Taşıtın hızlanma anında ihtiyaç duyduğu tork, yüksek diferansiyel oranı sayesinde elektrik motoru verimi düşük olsa dahi karşılanabilmektedir. Elektrik motoru NEDC çevrimi boyunca %74 ile %90 verim aralığında çalışmaktadır. NEDC çevriminin %25'e yakın rölanti oranına sahip olması nedeniyle elektrik motorunun ortalama verimi düşmüştür.

NEDC çevrimi takip edilirken, taşıtın ivme ve hız grafiği Şekil 9'da görülmektedir. Taşıt ivmesi, hızlanma durumunda 1.1 m/s^2, yavaşlama durumunda -1.4 m/s^2 değerine kadar ulaşmaktadır.



Şekil 9:Taşıt ivme ve hız grafiği.

Şekil 10'da NEDC çevriminin ardından kalan batarya durumu ve toplam mesafe gösterilmektedir. Modele alçak ve yüksek gerilim aksesuarlarının harcadığı güç dahil edildiğinden dolayı, taşıt durgun halde iken enerji tüketimi devam etmektedir. 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.



Şekil 9:NEDC çevrimi sonrası batarya şarj durumu ve alınan yol.

4. Kaynakça

Abe, M. (2015). Vehicle Dynamics and Control. *Vehicle Handling Dynamics*, 1–3. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100390-9.00001-4

Boyali, A. (2009). *Hibrid Elektrikli Yol Taşıtlarının Modellenmesi Ve Kontrolü*. Fen Bilimleri Enstitüsü. http://hdl.handle.net/11527/9681

Chan, C. C., & Wong, Y. S. (2004). Electric vehicles charge forward. *IEEE Power and Energy Magazine*, *2*(6), 24–33. https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1359010

Erdoğan, S. (2020). Enerji, Çevre ve Sera Gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *10*(1), 277–303. https://doi.org/10.18074/CKUIIBFD.670673

Hamada, A. T., & Orhan, M. F. (2022). An overview of regenerative braking systems. *Journal of Energy Storage*, *52*, 105033. https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.105033

Hofman, T., & Dai, C. H. (2010). Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*. https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729082

Johnson, M. A., Moradi, M. H., Crowe, J., Tan, K. K., Lee, T. H., Ferdous, R., Katebi, M. R., Huang, H. P., Jeng, J. C., Tang, K. S., Chen, G. R., Man, K. F., Kwong, S., Sánchez, A., Wang, Q. G., Zhang, Y., Zhang, Y., Martin, P., Grimble, M. J., & Greenwood, D. R. (2005). PID control: New identification and design methods. *PID*

Control: New Identification and Design Methods, 1–543. https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2/COVER

Kerem, A. (2014). Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *5*(1), 1–13. https://dergipark.org.tr/tr/pub/makufebed/issue/19419/206527

Kıyaklı, A. O., & Solmaz, H. (2018). Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink. *International Journal of Automotive Science And Technology*, *2*(4), 9–15. https://doi.org/10.30939/IJASTECH..475477

Lenzo, B. (2022). Vehicle Dynamics. *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*, *603*, v–vi. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75884-4/COVER

Pek, C., & van Waveren, S. (2024). *Autonomous Vehicles: A Technical Introduction*. 35–63. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41992-8_2

The, I. C.-C. of working group I. to, & 2014, U. (n.d.). Mitigation of climate change. *Keneamazon.Net*. Retrieved December 20, 2024, from https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Impacto/157.pdf

Tseng, H. E. (2021). Vehicle Dynamics Control. *Encyclopedia of Systems and Control*, 2409–2418. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44184-5_71

Vehicular Electric Power Systems : Land, Sea, Air, and Space Vehicles. (2003). *Vehicular Electric Power Systems*. https://doi.org/10.1201/9780203913468

BÖLÜM XIII

Plastik Malzemelerin Kaynağı ve Kaynağa Uygun Tasarım Prensipleri

Tuğçe TEZEL[1]
Volkan KOVAN[2]

1. Giriş

Plastikler; düşük maliyeti, kolay şekil verilebilirliği ve hafifliği nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahip bir malzemedir. Birçok endüstriyel uygulama, plastik parçaların birleştirilmesini gerektirir. Kalıplama işlemleriyle üretilen plastik parçalar, bazen daha ayrıntılı ve kalıcı montajlara dönüştürülmek istenir. Bu montajlar, bazı durumlarda, birincil kalıplama işlemleriyle gerçekleştirilemeyecek karmaşık şekillerin oluşturulması, farklı renklerde ya da malzemelerden yapılan parçaların birleştirilmesi,

[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

daha büyük parçaların üretimi veya mevcut parçaların kapatılması amacıyla yapılabilir. Plastik montajlar, ayrıca, çeşitli fonksiyonel özellikler kazandırmak, dayanıklılığı artırmak veya montajı daha verimli hale getirmek amacıyla yapılır. Plastik kaynak işlemleri, bu tür montajların gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynar.

Plastik kaynak işlemleri, termoplastik malzemelere uygulanabilen özel yöntemlerdir. Bu yöntemler, plastik parçaların birbirine kalıcı bir şekilde bağlanmasını sağlayarak güçlü montajlar oluşturur. Plastik kaynak işlemleri, farklı tipleriyle her biri benzersiz avantajlar sunar ve çeşitli uygulamalarda kullanılır. Ultrasonik kaynak, termoplastik parçaların montajında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemde, parçaların birleşim alanına ultrasonik frekanslı titreşimler uygulanır. Bu titreşimler, eklemdeki yüzey ve moleküller arası sürtünmeden kaynaklanarak sıcaklık artışına yol açar. Sıcaklık, plastik malzemeyi eritmek için yeterli seviyeye ulaştığında, malzeme akar ve güçlü bir kaynak meydana gelir. Ultrasonik kaynak işlemi, 20.000 Hz frekansında çalışır ve otomatik işlem yapma imkânı sağlar. Tipik ultrasonik kaynaklı parçalar arasında şeffaf lensler, içecek bardakları ve çeşitli elektronik bileşenler bulunur. Ayrıca, otomobil ısıtıcı kanalları ve stop lambası düzenekleri gibi büyük parçaların kaynaklanmasında da kullanılır.

Titreşimli kaynak, ultrasonik kaynağa benzer şekilde çalışır ancak daha düşük frekansta ve daha büyük genlikte titreşimler kullanır. Bu işlemde, parçalar arasında doğrusal veya açısal titreşimler yaratılır ve parçalar arasındaki sürtünme ısısı ile kaynak yapılır. Titreşimli kaynak, kristalin reçinelerden yapılmış büyük parçaların montajında etkili bir yöntemdir. Titreşimli kaynak makineleri, genellikle 120 Hz frekansa kadar çalışır ve 3 ila 5 mm

arasında değişen genliklere sahiptir. Bu yöntem, özellikle büyük parçalarda gaz geçirmez bağlantılar sağlamada kullanılır.

Döndürme (spin) kaynağı, dairesel bir birleşim hattına sahip termoplastik parçaların montajında kullanılan bir başka sürtünme kaynak türüdür. Bu işlemde, bir parça yüksek hızda döndürülür ve diğer sabit parça ile temas ettirilerek sürtünme ısısı üretilir. Parçaların birleşim alanındaki erimiş malzeme, katılaşana kadar basınç altında tutulur. Döndürme kaynak, genellikle polietilen şişeler, kozmetik kapları ve yakıt pompaları gibi ürünlerde kullanılır. Ancak, bu işlem dairesel bir birleşim hattına sahip olmayan parçalar için uygun değildir.

Sıcak plaka kaynak, plastiklerin birleştirilmesinde kullanılan bir başka yaygın yöntemdir. Bu yöntemde, birleştirilecek yüzeyler sıcak bir plaka ile ısıtılır ve ardından basınç uygulanarak parçalar birleştirilir. Sıcak plaka kaynağı, özellikle büyük plastik parçaların montajında etkilidir ve genellikle polietilen ve polipropilen gibi malzemelerde kullanılır. Bu yöntem, güçlü ve sızdırmaz bağlantı elde etmek için tercih edilir. Sıcak plaka kaynağı, boru bağlantıları ve büyük nakliye paletleri gibi ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Plastiklerin indüksiyon kaynağı, termoplastik parçaların hızlı ve güçlü bir şekilde birleştirilmesini sağlayan bir başka yöntemdir. Bu işlem, elektromanyetik bir alan kullanılarak parçaların birleşim bölgesinde bir ısı oluşumu sağlar. Genellikle, metal bir yerleştirme parçası ya da birleşim bölgesine gömülü bir indüksiyon devresi ile çalışır. Elektromanyetik alanın etkisiyle metal ısınır ve bu ısı, çevresindeki plastik malzemeyi eriterek güçlü bir bağlantı oluşturur.

İndüksiyon kaynağı, özellikle hızlı üretim süreçleri için idealdir ve otomotiv, elektronik ve tıbbi cihaz sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, kaynak bölgesinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır ve sızdırmaz, güçlü bağlantılar sağlamak için etkili bir çözümdür.

Plastiklerin sıcak gaz kaynağı ise, plastik parçaların montajında basit ancak etkili bir yöntemdir. Bu işlemde, bir sıcak hava veya gaz akışı kullanılarak kaynak yapılacak yüzeyler ısıtılır. Eriyik haline gelen plastik, bir dolgu çubuğu ile birleştirilir ve soğuyarak katılaştığında güçlü bir kaynak elde edilir. Sıcak gaz kaynağı, genellikle PVC, PP ve PE gibi malzemelerde kullanılır ve geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Özellikle boru sistemleri, tanklar ve büyük plastik yapılar gibi endüstriyel ürünlerin montajında tercih edilir. Sıcak gaz kaynağının avantajları arasında ekipman maliyetinin düşük olması, yöntemin kolay öğrenilmesi ve taşınabilirliği bulunur. Ancak, kaynak kalitesinin büyük ölçüde operatörün yeteneklerine bağlı olması, yöntemin sınırlayıcı bir faktörüdür.

Plastiklerin kaynak yöntemleri ve tasarım gerekliliklerine dair bu çalışmanın amacı, plastik kaynaklı montajlar için tasarım rehberi sağlamaktır. Tasarımcıların, plastik montajlarını gerçekleştirirken dikkate alması gereken önemli faktörleri ve kullanılabilecek kaynak yöntemlerini anlamalarına yardımcı olacak bir kaynak sunmayı hedeflemektedir. Farklı plastik kaynak tekniklerinin, malzeme türlerine, parça tasarımına ve montaj gereksinimlerine bağlı olarak nasıl seçileceği ve her bir yöntemin avantajları ile sınırlamaları hakkında bilgi verilecektir. Plastik parçaların montajında karşılaşılan zorlukları aşmak ve sağlam, verimli montajlar

gerçekleştirmek için bu rehber, tasarımcılar ve mühendisler için önemli bir referans olacaktır. Böylece, plastik montajlarının verimli ve sağlam bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanırken, üretim süreçlerinde daha verimli ve maliyet etkin çözümler geliştirilmesine katkıda bulunulacaktır.

2. Plastik Kaynağının Özellikleri

Plastik kaynağı, termoplastik malzemelerin birbirine kalıcı bir şekilde bağlanmasını sağlayan önemli bir üretim yöntemidir. Plastik kaynak, farklı malzemeleri birleştirmek, montajları güçlendirmek ve üretim süreçlerini optimize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlemin özellikleri, kullanılan teknikler ve malzemelere bağlı olarak değişir ve her yöntem, belirli üretim gereksinimlerine göre avantajlar sunar.

Bir plastik kaynağının temel özelliği, kullanılan malzemelerin erime sıcaklıklarının ve moleküler yapıların uyumlu olmasıdır. Çoğu termoplastik malzeme, belirli kaynak teknikleriyle bağlanabilir, ancak bu süreç, her iki parça da aynı malzemeden yapılmışsa daha kolaydır. Farklı malzemelerin birleştirilmesi durumunda ise, her iki malzemenin benzer erime sıcaklıklarına sahip olması gerekir. Bu, kaynak işleminin verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür. Ayrıca, erimiş halde birleşen malzemelerin benzer moleküler yapıya sahip olması veya ortak radikalleri taşıması, kaynak başarısını artırır.

Tablo 1: Bazı termoplastiklerin kaynak uyumluluğu

	ABS	ABS-polikarbonat	ABS-PVC	Asetal	Akrilikler	Akrilik multipolimer	Akrilik-PVC	ASA	Bütiratlar	Naylon	Polikarbonat	Polietilen	Polimid	Polipropilen	Polistiren	Polisülfon	PPO	PVC	SAN-NAS
ABS	■	■	¡		■	¡	¡	¡	¡						¡				¡
ABS-Polikarbonat	■	■	¡		¡	¡	¡	¡			■								¡
ABS-PVC	¡	¡	■		¡	¡	¡	¡										¡	
Asetal				■															
Akrilikler	■	¡	¡		■	¡	¡	¡			¡								¡
Akrilik multipolimer	¡	¡	¡		¡	■	¡	¡							¡				¡
Akrilik-PVC	¡	¡	¡		¡	¡	■	¡										¡	
ASA	¡	¡	¡		¡	¡	¡	■							¡				¡
Bütiratlar	¡								■										
Naylon										■									
Polikarbonat		■			¡						■								
Polietilen												■							
Polimid													■						
Polipropilen														■					
Polistiren	¡					¡		¡							■				¡
Polisülfon																■			
PPO																	■		
PVC			¡				¡											■	
SAN-NAS	¡	¡			¡	¡		¡							¡				■

Tablo, termoplastiklerin uyumluluğunu göstermektedir. "■" uyumlu olduğunu, "○" ise bazı kompozisyonların uyumlu olduğunu ancak her zaman uyumlu olmadığını belirtir. Bu tablo yalnızca bir kılavuz olarak kullanılmalıdır.

Plastik kaynağında kullanılan teknikler, malzeme türüne ve istenilen sonuçlara göre farklılık gösterir. Ultrasonik kaynak, termoplastik malzemeler için yaygın olarak kullanılır ve özellikle ABS, akrilik ve polikarbonat gibi malzemelerde başarılı sonuçlar verir. Bu yöntem, malzemenin sertliğiyle doğru orantılı olarak

verimli çalışır; dolayısıyla polietilen ve polipropilen gibi düşük modüllü malzemelerde daha zorlu bir işlem gerektirir. Ultrasonik kaynağın başarısında, katkı maddelerinin (plastikleştiriciler ve dolgu maddeleri) rolü büyüktür; bu maddeler, plastiğin esnekliğini ve kaynağın dayanıklılığını etkiler.

Titreşimli kaynak, kristalin yapıya sahip malzemelerde verimli sonuçlar sağlar. Polietilen, polipropilen ve poliamid gibi malzemeler, bu teknikle kolayca kaynatılabilir. Titreşimli kaynağın avantajı, malzemelerin birleşmesinde erimiş yüzeylerde yayılma ve harmanlama etkisi yaratmasıdır. Ayrıca, dolgu maddelerinin kaynağın kalitesini etkilememesi bu yöntemi avantajlı kılar.

Sıcak plaka kaynağı, polietilen, polipropilen ve akrilik gibi malzemelerin birleşmesinde etkilidir. Bu yöntemde malzemeler, sıcak bir plaka aracılığıyla ısıtılır ve ardından basınç uygulanarak kaynatılır. Başarı, malzemenin dolgu maddelerinin türüne ve miktarına bağlı olarak değişir. Bu yöntem, orta büyüklükteki parçaların montajında yaygın olarak kullanılır.

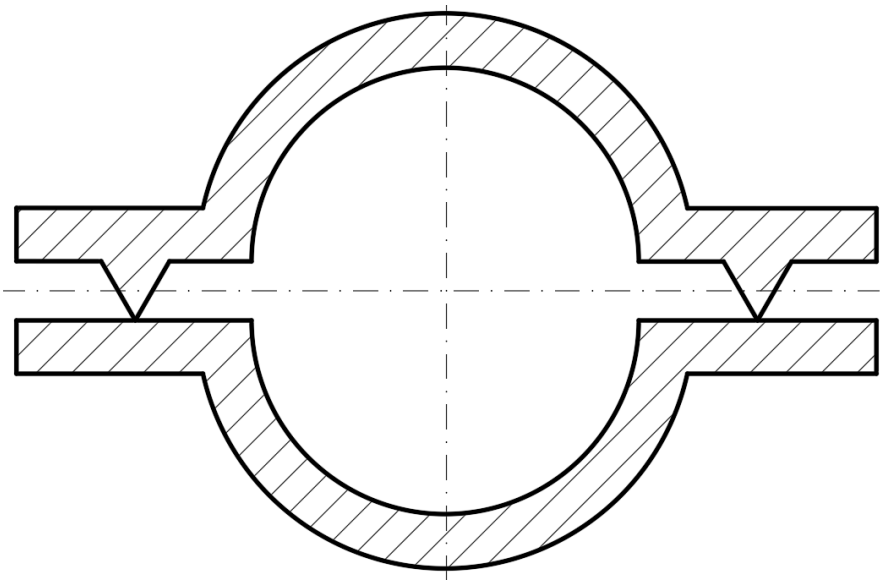
Sıcak gaz kaynağı, düşük maliyetli ekipman gereksinimi ve taşınabilirliği nedeniyle tercih edilir. Bu yöntem, boru sistemleri, tanklar ve büyük plastik levhalar gibi endüstriyel ürünlerin birleştirilmesinde kullanılır. Ancak, kaynak işleminin kalitesi, operatörün deneyimine bağlıdır ve dikkatli uygulanmalıdır.

İndüksiyon kaynağı ise elektromanyetik alan kullanarak plastik parçaları birleştirir ve genellikle polipropilen, polietilen ve PVC gibi malzemelerde etkilidir. Düşük maliyetli dolgu maddeleriyle bile başarılı sonuçlar elde edilebilir.

3. Plastik Kaynağına Uygun Tasarım

Plastiklerin kaynağında, birleştirilecek yüzeylerin mümkün olduğunca düzgün, bozulmamış ve eğrilmeden arınmış olması gerekir. Bu nedenle, tasarımcılar kaburga, çıkıntı gibi elemanların konumlarına özen göstermeli ve birleşim yüzeylerinde çökme veya deformasyona yol açmamalıdır. Eğrilmiş parçalar, yüzeylerin bir araya getirilmesi için aşırı basınç gerektirebilir ve bu durum, tamamlanan montajın deformasyonuna neden olabilir.

Ultrasonik kaynak işlemi sırasında erime, titreşimle üretilen ısı mümkün olan en küçük yüzey alanına odaklandığında çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Bu durum, ısının etkili bir şekilde yoğunlaşmasını sağlar. Buna karşılık, geniş yüzeylerin temas ettiği alanlarda erimenin tamamlanması daha uzun sürer. Bu tür geniş yüzeylerin birleştirilmesini hızlandırmak için genellikle dar ve yükseltilmiş bir çıkıntı tasarımı tercih edilir. Bu çıkıntılara enerji yönlendiricisi adı verilir ve ultrasonik kaynağı önemli ölçüde kolaylaştırır (Şekil 1). Enerji yönlendiricileri, titreşim enerjisinin daha dar bir alana odaklanmasını sağlayarak, malzemenin hızla erimesine ve daha etkili bir birleştirme oluşmasına yardımcı olur. Bu sayede hem işlem süresi kısalır hem de bağlantı kalitesi artar.



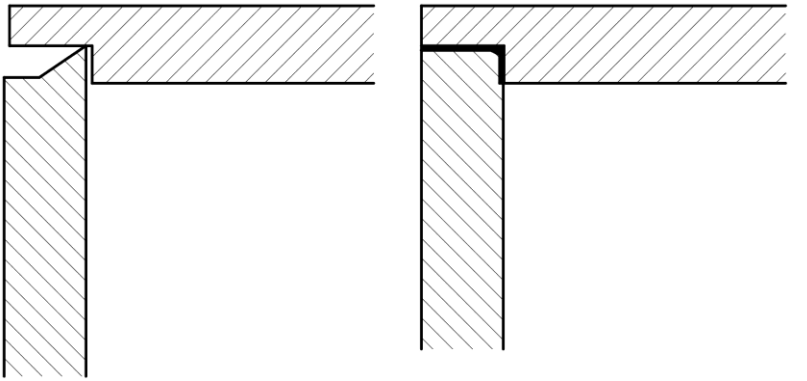
Şekil 1: Ultrasonik olarak kaynaklanacak parçalarda enerji yönlendiricileri (Bode, 1996).

Basit bir ultrasonik birleştirme tasarımında, birleşme alanından bir miktar erimiş malzemenin dışarı taşması ve parçaların kenarlarında çapak oluşması muhtemeldir. Çapağın istenmediği durumlar için, Şekil 2'de verilen basamaklı bir birleştirme tasarımları tercih edilmelidir. Bu tasarımlar, Şekil 1'de gösterilen basit bir birleştirme yöntemine kıyasla daha güçlü bir bağlantı sağlar. Çünkü erimiş malzeme, başlangıçta kayma uyumu için bırakılan boşluğa doğru akarak hem kesme hem de çekme kuvvetlerine dayanıklı bir sızdırmazlık katmanı oluşturur.

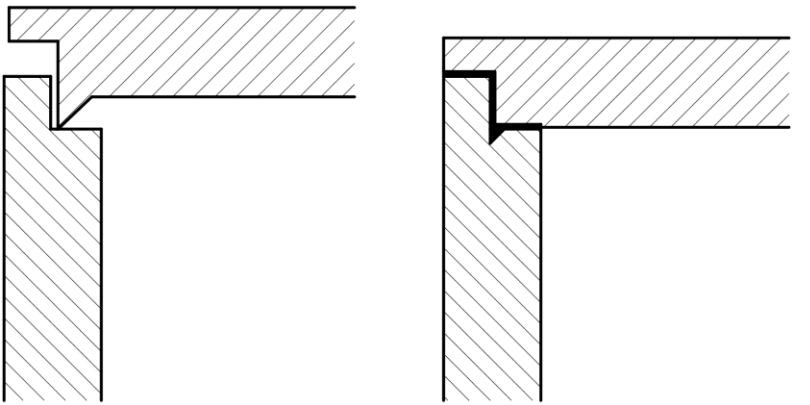
Daha yüksek bir mukavemet gerektiren uygulamalarda, Şekil 2c'de gösterilen dil ve oluk birleştirme tasarımı tercih edilebilir. Bu

tasarım, daha dayanıklı bağlantılar sunar ancak dilin her iki tarafında boşluk bırakılması gerekliliği, kalıplama sürecini daha karmaşık hale getirebilir. Hem basamaklı hem de dil ve oluk birleştirmelerinde, birleşme yüzeyleri arasında uygun boşlukların bırakılması oldukça önemlidir. Bu boşluklar, bir yüzeyin diğerine göre hareketini engelleyebilecek sıkı bağlantıları önler ve ısı birikimini geciktirerek işlemi optimize eder. Şekil 2, diğer birleştirme tasarımı varyasyonlarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi enerji yönlendiricisi dışında kalan bağlantı yüzeyleri düz olmalıdır. Birleştirme tasarımında yapılan tipik bir hata, bu bağlantı yüzeylerinin eğimli yapılmasıdır. Bu tür bir eğim, kaynak işlemi sırasında çeşitli sorunlara yol açabilir.

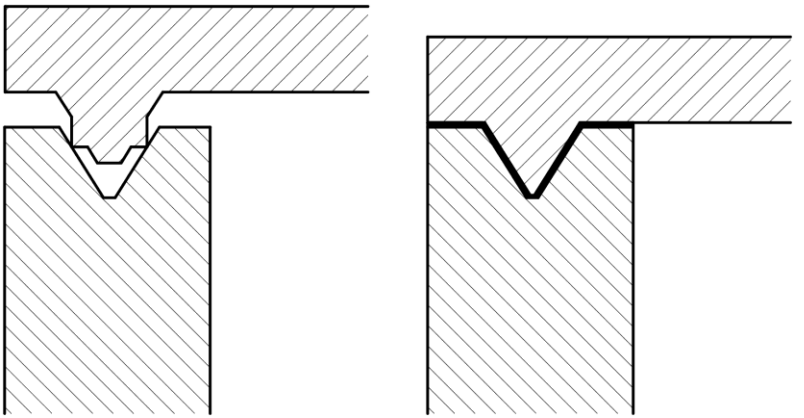
Kristalli termoplastiklerin (örneğin naylon, asetal, polietilen, polipropilen ve termoplastik polyester) katıdan eriyik haline geçişleri hızlıdır. Bu özellikleri, birleştirme tasarımı açısından özel dikkat gerektirir. Şekil 3, bir kapağı bir kaba birleştirmek için kullanılabilecek kayma birleştirme yöntemini göstermektedir. Bu yöntem, iki yüzeyin basınç altında birbirine doğru hareket ettirilmesiyle çalışır. Bu hareket, birleştirme sırasında giderek daha geniş bir yüzey alanını açığa çıkararak tüm erime döngüsü boyunca yüzeyler arasında etkin bir etkileşim sağlar. Böyle bir birleştirmede, kayma sırasında parçanın esnemesini önlemek ve duvarları desteklemek amacıyla bir fikstür içinde tutulması da düşünülebilir.



(a)

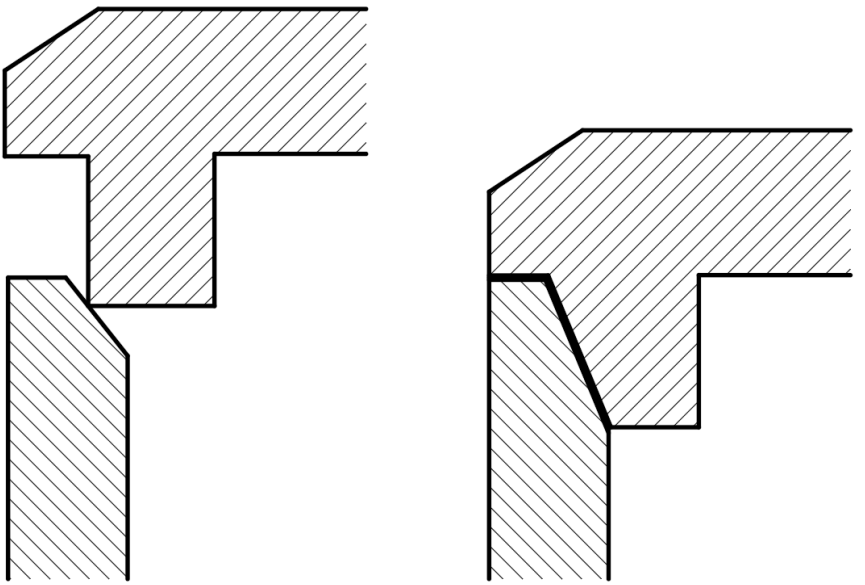


(b)



(c)

Şekil 2: Kaynağa hazırlanan parçalar (solda) ve ultrasonik kaynaklı parçalar (sağda) (Bode, 1996).

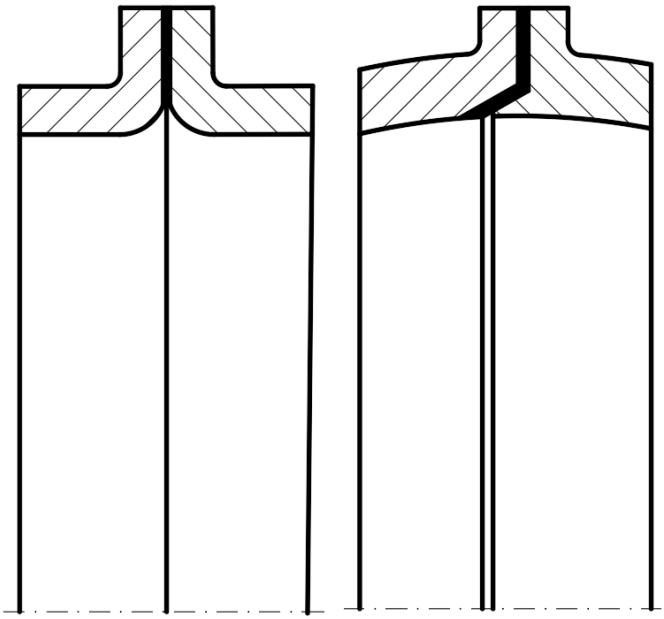


Şekil 3: Kristalli termoplastiklerin ultrasonik kaynaklanması için kayma bağlantısı (Bode, 1996).

Titreşim ve spin kaynaklı montajlar için temel tasarım ilkesi, montajın bir parçasının kaynak düzleminde diğerine göre serbestçe hareket edebilmesidir. Bu serbest hareket, plastiği eritmek için gerekli olan sürtünme ısısını üretir. Titreşimli kaynakta, kaynaklanacak yüzeylerin genişliği çok önemlidir. Yüzeyler arasında yeterli temas alanı sağlanarak, erime etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Spin kaynağında ise, tasarımın doğru parça hizalamasını sağlaması gerekmektedir. Bu hizalama, yüksek kaliteli birleştirmelerin oluşmasına yardımcı olur. Ayrıca, duvar kalınlığı da önemli bir faktördür çünkü ince duvarlar kaynak sırasında esner ve bu durum, bağıl hareketi veya uygulanan basıncı etkili bir şekilde azaltabilir.

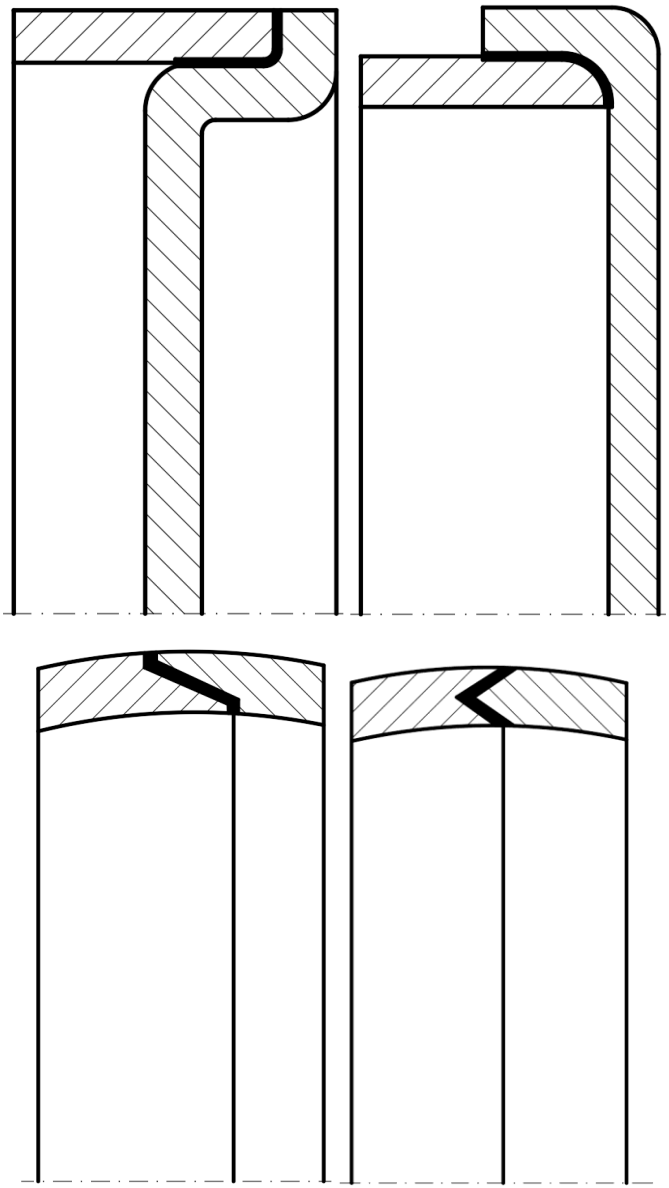
Birleştirme tasarımına bir flanş ekleyerek, parçaların titreşim kaynağı için daha uyumlu hale gelmesi sağlanabilir. Bu, ek kaynak alanı oluşturur ve doğrudan basınç uygulanabilen bir yüzey sağlar (Şekil 4). Flanş, kaynak yüzeylerinde ek bir destek sağlayarak, daha güçlü bir birleştirme alanı sunar.

Parça geometrisi uygun olduğunda, bir parça diğerine karşı hareket ettirilirken birleştirme alanına yeterli basınç uygulanabilmesi için parçanın nasıl sıkıca tutulacağı belirlenmelidir. Bu amaçla, kauçuk bir sürtünme tahrik aleti yeterli olabilir. Ancak, tahrik aletinin parça üzerinde belirli noktalara oturması için bazı anahtar noktalarının parçada kalıplanması gerekebilir. Anahtar noktaları, çıkıntı ya da girinti şeklinde olabilir ve tahrik aletine veya fikstüre sıkıca oturacak şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 4: Kaynak yüzeylerine eklenen flanşlar titreşim kaynağına yardımcı olur (Bode, 1996).

Titreşimle kaynaklanmış bir birleştirmenin maksimum mukavemeti için, kaynak yüzeyinin genişliği, duvar kalınlığının yaklaşık 2 ila 2,5 katı olmalıdır. Ayrıca, birleştirilen yüzeylerin aynı olacağı durumlarda, birleşim genişliği, göreceli tepe-tepe titreşim hareketinin en az yüzde 60'ı kadar olmalıdır. Uzun, ince ve desteksiz duvarlara sahip parçalar, tek düzlemli bir flanşın sağlayabileceğinden daha fazla rijitlik için, birleştirme yüzeyinin uzunluğu boyunca ters flanş veya kanal benzeri bir bölüm gibi özel düzenlemeler gerektirebilir (Şekil 5).



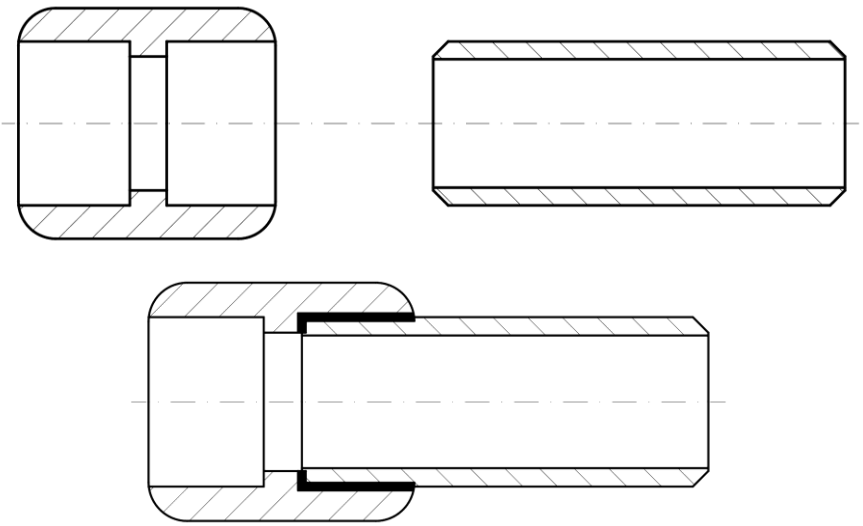
Şekil 5: Tavsiye edilen titreşim ve spin kaynak tasarımları (Bode, 1996).

Kaynak işlemi sırasında parçanın dışına sıkıştırılan çapak veya fazla erimiş malzemeyi tutmak gerektiğinde, özel birleştirme tasarımları devreye girebilir. Estetik nedenlerle çapağı kabul edilemez olduğu durumlarda, çapağı tutmak için birleştirme tasarımına tuzaklar dahil edilmelidir. Çapak, montajda istenmeyen boyut değişikliklerine yol açabileceğinden, bu tür tuzaklar kullanılarak önlenebilir. Çapak oluşturan yerinden oynatılan malzeme, montajın son boyutunu etkileyecektir. Bu boyut değişikliği kritikse, buna dikkat edilmelidir.

Sıcak plaka kaynak işlemi (Şekil 6), kaynak bölgesindeki malzemenin bir kısmının basınç altında erimesini ve dışarı atılmasını gerektirir. Bu nedenle, bu malzeme kaybı parçanın tasarım aşamasında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle, enjeksiyon kalıplama ile üretilen parçalarda yaklaşık 2 mm malzeme kaybı yaşanabileceği öngörülür. Ancak, bu miktar makinenin basıncı, besleme hızı ve mekanik durdurucular gibi faktörlere bağlı olarak kesin bir şekilde kontrol edilebilir.

Sıcak plaka kaynağında başarılı bir birleşim elde etmek için uç birleşim tasarımı gereklidir. Özellikle ince duvarlı parçalarda, birleşim yüzeyine bir flanş eklenmesi önerilir. Bu tasarım yaklaşımı, daha fazla yüzey alanı sağlayarak kaynak bölgesinde daha iyi bir temas ve daha yüksek parça sertliği elde edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, birleşim hattında çökme, eğrilme veya bozulma gibi problemler bulunan parçalarda, bu bölgenin kalınlaştırılması faydalı olabilir. Bu tür bir tasarım, birleşim yüzeyindeki yüksek noktaların erime işlemiyle dengelenmesini ve tüm kaynak bölgesinde homojen bir birleşim elde edilmesini sağlar.

Erimiş malzemenin dışarı atılması, parçanın tasarımında dikkate alınmadığında, bu fazla malzeme genellikle parçanın dış kısmında çapak veya çıkıntı olarak görünür. Bu tür problemleri önlemek için, dışarı taşan malzemenin akışını kontrol eden birleşim tasarımları tercih edilmelidir. Sıcak plaka kaynak işleminde malzeme akışını düzenleyen tasarımlar, birleşim bölgesindeki estetik ve yapısal sorunların önüne geçer. Bu şekilde hem kaynak kalitesi artırılır hem de nihai ürünün görsel ve işlevsel bütünlüğü sağlanır.

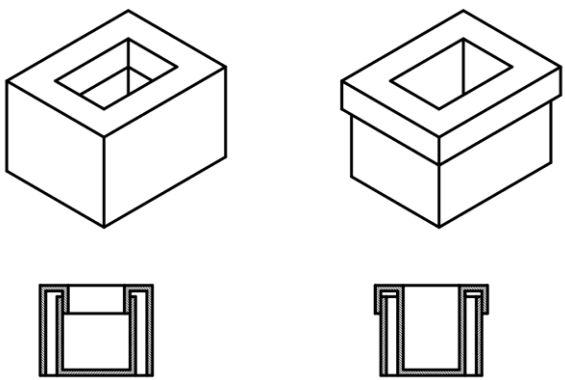


Şekil 6: Boruların sıcak plaka kaynağı ile birleştirilmesi (Üstte pahlanmış ve temizlenmiş parçalar, altta bitmiş kaynak bağlantısı) (Bode, 1996).

İndüksiyon kaynak işleminin başarısı, bileşenlerin doğru geometrik tasarımına ve bağlantı boyutuna büyük ölçüde bağlıdır. Bağlantı hattı, bileşenin dış duvarına göre hassas bir şekilde konumlandırılmalıdır. Bu düzenleme, iş bobini ile bağlantı hattı

arasındaki mesafenin sabit kalmasını sağlar ve ısıl enerji dağılımını optimize eder. Bağlantı geometrisinin mümkün olduğunca düzenli ve simetrik olması, özellikle halka veya silindirik bir yapı tercih edilmesi önerilir. Düzensiz şekilli bağlantılar ise hem daha karmaşık hem de maliyetli iş bobinleri gerektirir. Ayrıca, bu tür tasarımlar, bağlantının düzgün bir şekilde ısıtılmasını zorlaştırabilir (Şekil 7).

Bağlantı hattının, iş bobinine mümkün olduğunca yakın konumlandırılması önemlidir. Bu yakınlık, enerji aktarımını ve kaynak verimliliğini artırır. Ancak bağlantı hattını bobine yakınlaştırmayı engelleyen dış çıkıntılar, düzensizlikler veya diğer fiziksel engeller, tasarımdan çıkarılmalıdır. Özel bobinler, bağlantı hattıyla bobin arasındaki mesafeyi 25 mm'ye kadar çıkarabilir. Ancak bu tür bobinlerin kullanımı geliştirme süreci gerektirir, daha pahalıdır ve genellikle yakın mesafede çalışan bobinler kadar etkili değildir.



Şekil 7: Endüksiyon kaynaklı birleştirmeler için erişilemez birleştirmeler (sol), daha erişilebilir ve daha düzenli bir şekle (sağ) getirilmelidir (Bode, 1996).

İndüksiyon kaynak sırasında eriyen elektromanyetik malzemenin akışı dikkatlice yönetilmelidir. Bu malzeme, en az dirençli yolu takip eder ve tasarlanan boşluk alanlarını doldurur. Ayrıca, büzülme ve çökme kaynaklı yüzey hatalarını gidermek için tasarım sırasında malzeme akışı göz önünde bulundurulmalıdır. Bağlantı tasarımlarının, mümkün olduğunca soyma veya alın alına birleşim yerine, kesme yönünde planlanması önerilir. Bu tür bir tasarım, bağlantının dayanıklılığını ve kararlılığını artırır.

Sac malzemelerin indüksiyon kaynağında, eklenen elektromanyetik malzeme kalınlıkta bir artışa yol açabilir. Bu kalınlık artışı, kullanılan malzemenin miktarına ve kaynak işlemi sırasında uygulanan basınca bağlı olarak nominal seviyede olur. Dolayısıyla, bu faktörlerin dikkate alınması bağlantı bölgesindeki yapısal uyumu optimize edecektir.

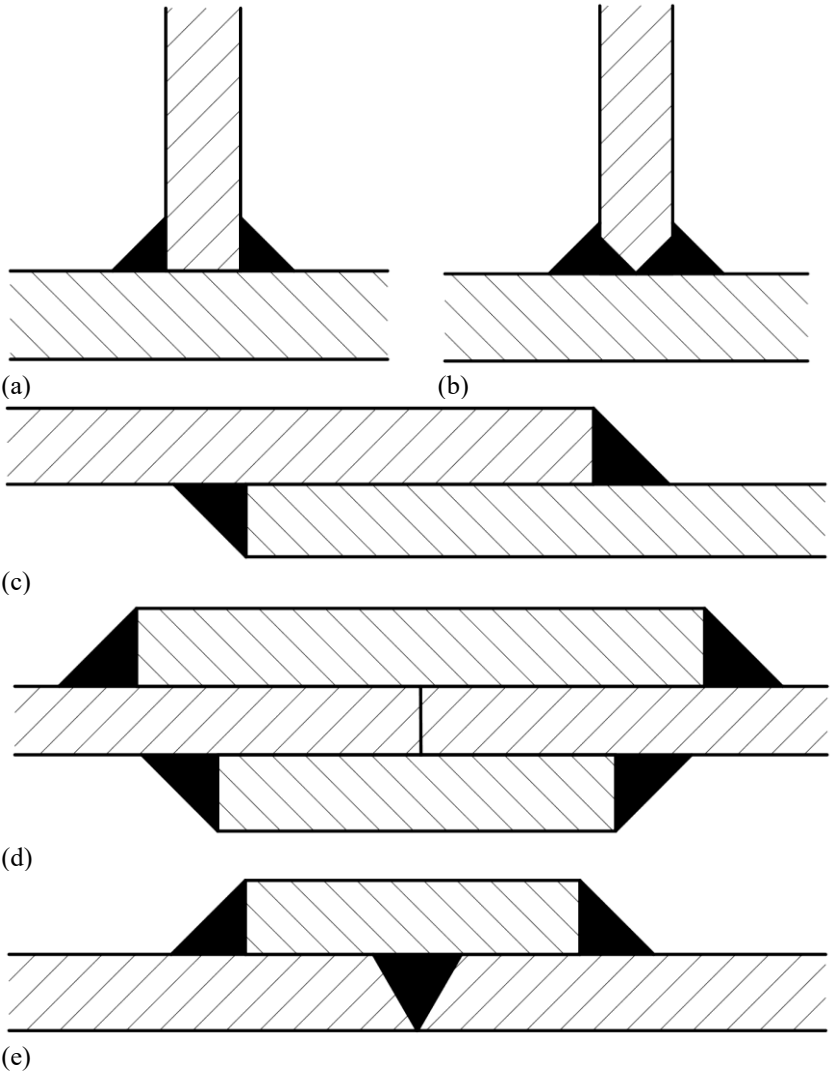
Farklı bağlantı tasarımları, farklı elektromanyetik malzeme formlarını gerektirir. Örneğin, dil ve oluk tasarımında, oluğa yerleştirilen bir conta ya da tel kullanılır. İki düz yüzeyin birleşiminde ise yüzeyler arasına bir şerit veya yine bir tel yerleştirilir. Bu yaklaşım, bağlantının dayanıklılığını artırırken, kaynak işleminin verimliliğini de sağlamaktadır.

Sıcak gaz kaynağı işlemi, genellikle basit birleştirme tasarımlarını içerir, ancak kaynak kalitesi yalnızca kullanılan teknik ve malzeme kadar operatörün deneyimine de bağlıdır. Şekil 8e'de gösterildiği gibi, en yaygın birleştirme yapılandırmaları arasında, yaklaşık 60°'lik bir V kaynak ağzı içeren tasarımlar yer alır. Bu tür birleştirme yapıları, kaynak dikişinin malzeme üzerinde düzgün bir şekilde oluşturulmasını sağlar. Daha kalın malzemeler için ise,

malzemenin her iki tarafına kaynak yapılmasına olanak tanıyan çift V kaynak ağzı bir birleştirme tasarımı tercih edilir. Bu yaklaşım, kalınlığın kaynak işlemine engel olmadan malzemenin tamamen birleştirilmesini sağlar.

Birleştirilecek yüzeylerin kenarlarının uygun bir eğime sahip olması, kaynak işleminin başarısı için kritik öneme sahiptir. Bu eğim genellikle bir testere veya zımpara kullanılarak oluşturulur. Kaynak işlemine başlamadan önce, tertibatın iki parçası sıkıca kelepçelenmeli ve kenarlar arasında 0,4 ila 0,8 mm arasında bir kök boşluğu bırakılmalıdır. Bu boşluk, yumuşamış kaynak çubuğu malzemesinin birleştirme hattından kolayca geçmesine ve düzgün bir bağlantı oluşturmasına olanak tanımaktadır.

Bazı durumlarda, kaynak işlemine başlamadan önce parçaların doğru hizalanmasını sağlamak için geçici bir yapıştırma kaynağı uygulanması gerekebilir. Bu işlem, malzemelerin yerinde sabitlenmesini kolaylaştırarak daha sağlam ve düzgün bir bağlantı elde edilmesini sağlar. Sıcak gaz kaynağı, genellikle basit ve hızlı bir yöntemdir, ancak başarıya ulaşmak için doğru malzeme hazırlığı, uygun ekipman kullanımı ve operatörün tecrübesi bir arada önem taşır. Özellikle kalın veya karmaşık malzemelerde, birleştirme tasarımının optimize edilmesi, işlemin verimliliğini ve bağlantının dayanıklılığını artıracaktır.



Şekil 8: T-bağlantıları için; (a) çift köşe dikişi ve K dikişi (b). Bindirme ve alın alına kaynak için; (c) her iki tarafta köşe dikişi ile bindirme dikişi, (d) alın alına birleşen parçalarla birlikte çift flanş ve köşe dikişi, (e) takviye flanşı ve köşe dikişleri ile birlikte alın alına V dikişi(Bode, 1996).

4. Boyutsal Faktörler ve Tolerans Önerileri

Plastik kaynaklı montajlarda son ürün boyutlarının doğruluğunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında birleştirme bölgesindeki erime miktarındaki değişiklikler, kaynak sırasında parçaları bir arada tutmak için kullanılan basınç miktarı, parçaların üretimden kaynaklanan boyutsal değişimleri, soğuma sırasındaki plastik malzemenin büzülmesi, fikstür desteği ve birleştirme tasarımı yer alır.

Genellikle, kalıplama işlemiyle üretilmiş plastik parçaların doğruluğu, kaynak işleminden kaynaklanan boyutsal değişiklikleri en aza indirir. Ancak, film kartuşları veya kayıt kasetleri gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda, son boyutların kontrolü için özel kaynak fikstürleri kullanılır. Bu tür durumlarda, durdurucular ve sınır anahtarları gibi mekanizmalarla donatılmış fikstürler, boyutsal sapmaların önlenmesine yardımcı olur.

Kaynaklı montajlarda boyutsal toleranslar, kullanılan kaynak yöntemi ve fikstür kontrolüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Küçük ultrasonik kaynaklı montajlarda, birleşim bölgelerindeki boyutlar genellikle ±0,06 mm kadar hassas tutulabilir. Ancak seri üretim koşullarında bu toleransı korumak zordur ve tutarlı sonuçlar için şu öneriler dikkate alınabilir:

Ultrasonik kaynak uygulamalarında, minimum tolerans genellikle ±0,13 mm olmalıdır. Eğer sabitleyici durdurucular kullanılmıyorsa, kaynak boyunca boyutsal toleranslar için ±0,5 mm değerleri önerilir.

Titreşim ve sıcak plaka kaynak uygulamalarında, fikstür kontrollü montajlarda ±0,25 mm tolerans sağlanabilir. Ancak fikstür

desteği olmayan durumlarda bu tolerans ±0,8 mm seviyesine kadar genişletilebilir. Titreşimle kaynaklanmış parçaların yatay hizalaması, parçaların sıkıca sabitlendiği durumlarda ±0,25 mm içinde kalabilir.

İndüksiyon kaynak yönteminde, dairesel veya benzer parçalardaki kaynaklı bağlantılar, eşleşen bileşenlerdeki dudaklar veya durdurucular aracılığıyla kontrol edilebilir. Bu durumda, kaynak boyunca boyut toleransları tamamen bileşen parçalarının toleranslarına bağlıdır.

Sıcak gaz kaynak yöntemiyle üretilen montajlar için önerilen toleranslar, genellikle aynı boyuttaki ark kaynaklı metal montajlar için belirlenen toleranslarla uyumludur.

Sonuç olarak, plastik kaynak işlemlerinde boyutsal kontrol, kaynak yöntemine uygun birleştirme tasarımlarının geliştirilmesi ve dikkatli fikstür kullanımıyla sağlanabilir. Hassas uygulamalarda, süreç boyunca ortaya çıkabilecek boyutsal değişiklikleri minimize etmek için tolerans limitleri dikkatle belirlenmelidir.

5. Sonuçlar

Plastik kaynaklı montajlarda, son ürün boyutlarının doğruluğu, birçok faktörün etkisi altında şekillenir. Bu faktörler arasında kaynak işlemi sırasında kullanılan basınç, erime miktarındaki değişiklikler, soğuma sırasında malzemenin büzülmesi ve fikstür desteği gibi etkenler yer alır. Kaynaklı montajların boyutsal doğruluğunu sağlamak için, kullanılan kaynak yöntemi ve fikstür tasarımının büyük önemi vardır. Özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda, özel kaynak fikstürleri ile boyutsal sapmalar minimize edilebilir.

Kaynak yöntemi seçimi, boyutsal toleransları doğrudan etkileyen bir diğer önemli faktördür. Ultrasonik kaynak gibi hassas yöntemlerde, birleşim bölgelerindeki boyutlar ±0,06 mm'ye kadar hassas bir şekilde kontrol edilebilirken, daha düşük hassasiyet gerektiren durumlarda toleranslar genişleyebilir. Titreşim ve sıcak plaka kaynaklarında ise fikstür desteği ile sağlanan kontrol, boyutsal doğruluğu önemli ölçüde iyileştirir. Fikstürsüz montajlarda ise toleranslar daha geniş bir aralıkta olabilmektedir.

Bu çalışmanın bulguları, plastik kaynaklı montajlarda boyutsal doğruluğun sağlanmasında kullanılan tekniklerin çeşitliliğini ve her bir kaynağın yönteminin boyutlar üzerindeki etkilerini gözler önüne sermektedir. Plastik kaynaklı montajlarda başarı için, kaynak yöntemine uygun birleştirme tasarımlarının geliştirilmesi ve dikkatli fikstür kullanımı kritik öneme sahiptir. Hassasiyet gerektiren uygulamalarda, süreç boyunca oluşabilecek boyutsal değişikliklerin en aza indirilmesi için doğru tolerans limitlerinin belirlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımlar, plastik kaynaklı montajların endüstriyel üretim süreçlerinde etkin bir şekilde uygulanabilmesi için temel adımları oluşturmaktadır.

6. Kaynaklar

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

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

Tyrrell, W.R. (1999). Welded Plastic Assemblies. James G. Bralla (Ed.), *Design for Manufacturability Handbook* içinde (6.119-6148). Boston: McGraw-Hill.

BÖLÜM XIV

Üç Boyutlı Yazıcı İle Üretilmiş Nano Partikül Takviyeli Kompozitlerin İncelenmesi

Umut TANYERİ[1]
Farshıd KHOSRAVI[2]

Giriş

PLA, ABS gibi çeşitli termoplastikler otomotiv, biyomedikal, gıda gibi birçok endüstride kullanılmaktadır. Malzemelerden mekanik anlamda çeşitli performans beklentileri bulunmaktadır. Termoplastikler tek başlarına bu beklentileri karşılayabilmektedir. Fakat daha farklı ve aynı anda daha fazla beklenti olduğunda malzemeye bazı iyileştirme müdahaleleri gerekebilmektedir. Nanopartikül ilavesi bu beklentiler için ciddi iyileştirmeler

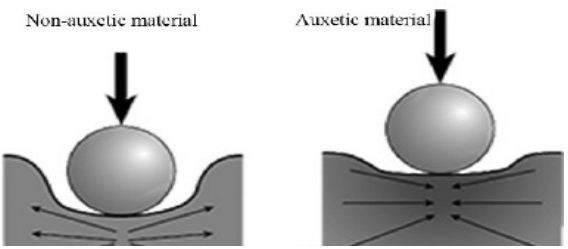
[1] Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye, Orcid: 0009-0002-0669-7796,
umuttanyeri7@gmail.com

[2] Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye, Orcid: 0000-0002-8866-114X ,
farshid.khosravi09@gmail.com

sağlamaktadır. Sertlik, yorulma direnci, termal direnç, akma ve çekme mukavemeti, tokluk gibi özellikler bu beklentilerin başında gelmektedir.

Bu yazıda çeşitli makalelerden derlenen nanopartikül takviyeli termoplastiklerin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Mekanik özellikler olarak elastisite modülü ve darbe emilim enerjisi öne çıkarılmıştır. Günümüz dünyasında hızlı prototipleme ve deneyselleştirme önplana çıktığından 3D yazıcı ile üretilebilme kabiliyeti seçilen polimer malzemede aranan özelliklerden biri olmuştur. Malzemelerde çeşitli metodlar kullanarak mekanik özelliklerin değiştiği bilinmektedir. Örneğin bir metal malzemedeki akma veya kopma mukavemeti, tokluk, sertlik, rezilyans gibi mekanik özellikler malzemeye uygulanan üretim sonrası işlemlerle iyileştirilebilmektedir. Fakat elastisite modülünü değiştirmek veya poisson oranını değiştirmek kolay olamamaktadır. Nanopartikül takviye ile üretilen termoplastikler mukavemet açısından daha istenen düzeye gelen hafif kompakt bir çözüm olacaktır. Fakat auxetic yapı içinde kullanımı ile beraber negatif poisson oranı kazanacaktır.

Negatif poisson oranı darbe açısından avantajlı olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir.



Şekil 24. Auxetic ve non auxetic malzemenin darbe davranışı

(Alderson, 1999)

Auxetic yapı ile tasarlanmış geometrinin darbeye karşı verdiği tepki diğer malzemelere göre farklı olduğu şekil 1'de gösterilmektedir(Alderson, 1999). Diğer malzemeler darbe temas bölgesinden içe doğru girinti oluşturmaktadır. Auxetic yapılı durumlarda ise darbe bölgesine yoğunlaşma görülmektedir. Auxetic yapıların böyle bir avantajına rağmen üretim açısından tasarım kısıtları oluşmaktadır. Bu açıdan 3 boyutlu tasarımlar için 3d yazıcı ile üretilebilmesi ile ilgili araştırmaların değerlendirilmesi gerekmektedir.

3 boyutlu yazıcıların endüstrideki kullanımının artması birçok alandaki performans, fiyat ve kalite gibi beklentileri arttırmıştır. Bu açıdan 3D yazıcı kullanımı ile auxetic tasarımların yaygınlaşması beklenti haline gelmektedir. Günümüzde benzer ihtiyaçların ve taleplerin artması ile tasarımda seçilen malzeme yelpazesi de genişlemiştir. Metal malzemelerin yerine birçok alanda PLA, ABS ve benzeri gibi çeşitli plastikler yaygınlaşmaktadır. Beklenen performansları karşılayabilmesi için bu tür plastikler çeşitli güçlendirici takviyelerle birlikte üretilmektedir. Örneğin cam elyaf takviye ile plastik daha sert bir kompozit hale getirilebilmektedir. Nanopartikül takviyesi plastiklere işlevsellik kazandırmak için kullanılabilmektedir. Bu makale abs ve pla gibi yaygın kullanımı olan plastiklere TiO2, MWCN vb nanopartikül takviyelerinin elastisite modülü, akma dayanımı, sertlik ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklere etkisini irdelemektedir. Nanopartikülün türü, ağırlıkça oranı elastisite modülü, poisson oranı, darbe emiş enerjisini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile çok geniş kullanım alanına sahip nanopartiküllerin auxetic geometrilerde 3d yazıcı ile üretilen parçalarda geliştirme potansiyeline katkıları irdelenmiştir

2- TERMOPLASTİKLER VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Termoplastikler, termoset ve elastomerler gibi polimer grubunda yer almaktadır (Kılınç & Toplan, 2005). Burada termoplastikleri diğerlerinden ayıran özellikleri eridikten sonra yeniden şekil verilebilmeleridir (Goodship, 2007). Bu özelliği üç boyutlu yazıcı ile üretilebilmesi önemlidir. Termoplastiklerde yük altında şekillerini elastomerlere göre koruyabildiklerinden mekanik zorlanmalarda daha az şekil değiştirmeleri söz konusudur. Termoplastikler kendi içinde de gruplanmaktadır. Polipropilen, polistiren, naylon, polivinilklorür, akrilonitril bütadien, stiren akrilonitril, selülozikler termoplastik çeşitleridir (Taşkiran, 2014). Daha genel bir gruplandırmayla termoplastikleri yarı kristalin ve amorf diye ayırmak gerekmektedir. ABS(Akrilonitril butadiene) amorf iken PLA (polilaktik asit) yarı kristalin grubunda yer alır (Demirbaş, Çalışkan, & Sevim, 2021).

2.1 ABS ve PLA üzerine çalışmalar

ABS ve PLA mekanik özellikleri test malzemelerinin porozitesinin ISO294, yoğunluğunun ISO1183 ve geometrilerinin ISO 527 şartnamesine göre hazırlandığı numunelere göre belirlenmektedir. Aşağıdaki tablo1'de ABS ve PLA bazı özellikleri verilmektedir.

Tablo 1 : ABS ve PLA 'nın mekanik özelliklerinin karşılaştırılması
(IEMAI 3D, 2020; NatureWorks LLC, 2024)

Malzeme Cinsi	Kopma Mukavemeti (mpa)	Elastisite Modülü (mpa)	Darbe Enerjisi (J/m)	Yoğunluk (g/cm³)
ABS	46	2270	19	1,06
PLA	59	3500	16	1,25

Üç boyutlu yazıcı ile üretim açısından termoplastiklerden ABS ve PLA öne çıkan avantajları söz konusudur. Ancak üç boyutlu yazıcı ile üretim parametreleri malzeme mukavemetini etkilemektedir. (Bacak, 2022a). ASTM D638 yada ISO527 şartnamesine göre hazırlanan numunelere uygulanan testler sonucu 3D yazıcı parametrelerinin PLA ve ABS'nin elastisite modülü ve kopma mukavemetlerini etkilediği anlaşılmaktadır (Bacak, 2022b; Kamer vd., 2022a). Üç boyutlu yazıcıdaki yazdırma hızı arttırıldığında kütlenin ve porozitenin arttığı görülmektedir. Porozite artışından PLA ABS'ye göre çok daha fazla etkilenmektedir. ABS malzemesi kopma mukavemeti bakımından çokça etkilenmezken PLA malzemede ise kopma mukavemeti negatif yönde korelasyon göstermektedir (Kamer vd., 2022b) . ABS ve PLA termoplastiklerinin dolgu oranlarının etkilediği düşünülen bir başka çalışmada numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi şartları bilgisayar ortamında sonlu eleman programı ile karşılaştırılmıştır (Çiçek, 2019). Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş parçalarda oryantasyon açısının bağımsız değişken olarak alındığı deneysel tasarım ile elde edilmiş sonuçlarda oryantasyon açı arttıkça kopma mukavemetinin düştüğü görülmektedir. Oryantasyon açısı 0-90 derece arasında değer ile kopma mukavemeti arasındaki ilişki irdelenmiştir. En yüksek mukavemet değerlerinin en düşük açıda elde edildiği görülmektedir (Syaefudin, Kholil, Hakim, Wulandari, & Murtinugraha, 2023). Üç boyutlu yazıcı ile enjeksiyon üretimden elde edilmiş parçalarla karşılaştırıldığında 3d yazıcı parçalarının enjeksiyona göre daha az beklentileri karşılamaktadır. Özellikle darbe dayanımı hem ABS hem PLA için enjeksiyonla üretilen parçalarda daha yüksektir. Fakat oryantasyon açısının yatay, dikey veya düz olması pla ve abs için %50 iyileşme yönünden fark yaratabilmektedir (Patterson, Pereira, Allison, & Messimer, 2021; Lay vd., 2019).

3- NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ TERMOPLASTİKLER

PLA ve ABS termoplastiklerinin üç boyutlu yazıcı ile üretilmesi hızlı prototipleme açısından avantajlı durumlar sağlayabilse de statik ya da dinamik bir konstrüksiyon elemanı olarak kullanılmasında zayıf kalmaktadır. Nanopartikül takviyelerin sürekli ortam koşullarında bu termoplastiklere mekanik özellikler kazandırabileceği düşünülmektedir. Böylece 3D yazıcı ile üretilen bir parçanın endüstriyelleşmesinin önü açılabilecektir. ABS ve karbon fiber birleşimi ile yapılan uygulamada kalıptan alınan parça ile 3d yazıcı ile üretilen numuneler karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olabildiği görülmektedir. Karbonfiber oranı arttıkça ABS kopma mukavemeti 70 Mpa'a yaklaşmaktadır. Karbonfiber oranı %40'a yaklaştıkça kopma mukavemeti değişmemeye başlamaktadır (Tekinalp vd., 2014). B-Karbon fiberin sağladığı bu iyileşmeyi ve daha fazlasını 0-100 nm çapındaki nanopartiküllerden beklemek olağandır. Nanopartiküller ile ilgili çeşitli gruplandırmalar yapılabilir ama karbon, seramik, metal, polimerik temelli olanları başta gelenleridir (Khan, Saeed, & Khan, 2017).

3.1. Nanopartiküllü ABS

Birçok araştırma malzemenin, imalat metodunun, proses parametrelerinin mekanik özellikleri etkilediğini göstermektedir. Nanopartikülün termoplastik ile birleşim metodunun, ağırlıkça oranının sonuçları etkilediği görülmektedir (Al Rashid, Khan, Al-Ghamdi, & Koç, 2021; Clarissa, Chia, Zakaria, & Evyan, 2022; Chaikeaw & Srikulkit, 2017a).

Tablo 2 : Nanopartikülün ABS'nin kopma mukavemeti ve darbe dayanımına etkisi

Referans	**Nanopartikül Türü**	**Malzeme**	**En Yüksek Kopma Mukavemeti (MPa)**	**En Yüksek Darbe Enerjisi (J)**	**Nanopartikül Ağırlıkça Oranı**	**Nanopartikül Oranı (Max Değer)**
(Chaikeaw & Srikulkit, 2017)	Hidrofobik Silika Nanopartikülleri	ABS	50 MPa	10 J	%1 - %5	%2
(Kumagai & Takahashi, 2009)	TiO_2	ABS	43.6 MPa	-	%0.5 - %10	%5
(Madan, 2018)	Çeşitli nanopartiküller (grafen, CNT, silika, vb.)	ABS	60 MPa	-	%0.5 - %3	%3
(Uhlmann & Strauss, 2003).	Grafen	ABS	52 MPa	-	%0.5 - %3	%3
(Çetin & Öztürk, 2017).	MWCNT	ABS	-	24 J	%0 - %10	%0

(Yılmaz & Güneş, 2020).	Silika	ABS	48 MPa	-	%0.5 - %3	%3
(Barone & Poggi, 2018).	SiO_2	ABS	-	30 J	%1 - %1.8	%1.1
(Jung & Lee, 2016).	Bor ve Grafen	ABS	61 MPa		%0.5 - %2	%2
(Wang & Lee, 2022).	Karbon Nanotüpleri (CNT)	ABS	52 MPa	24 J	%0.5 - %3	%3

Çeşitli oranlarda silanizasyon ile elde edilen hidrofobik nanosilikanın ABS'nin darbe dayanımı ve sertliğini 29.5 J/m'e yükselttiği, deneylerde birleşim olmayana kıyasla %29.44 iyileşme sağladığı görülmektedir. %2 ağırlıkça oran ile en iyi darbe dayanımı sağlanırken ara yüzey yapışmasının, dolgu matris uyumunun önemi irdelenmektedir. Bunun yanında nanopartikül miktarı artsa da kopma mukavemetinde durağanlık hatta düşme görülmektedir. Yüksek oranlarda aglomerasyondan dolayı homojenlikte de sıkıntılar görülmektedir.

3.2 Nanopartiküllü PLA

Benzer çalışmalar PLA için de mevcuttur. PLA'da ABS' nispeten aglomerasyon etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 3 : Nanopartikülün PLA'nın kopma mukavemeti ve darbe dayanımına etkisi

Referans	**Nanopartikül Türü**	**Termoplastik Malzeme**	**En Yüksek Kopma Mukavemeti (MPa)**	**En Yüksek Darbe Enerjisi (J)**	**Nanopartikül Ağırlıkça Oranı**	**Nanopartikül Oranı (Max Değer)**
(Kim & Lee, 2015).	TiO_2	PLA	61.7	-.	%0 - %15	%0.5
(Dufresne & Kar, 2019).	Karbon Nanotüpleri (CNT)	PLA	18.3	-	%0 - %5	%1
(Shim & Park, 2016a).	Grafen	PLA	40.95	-	%0.1	%0.1
(Shim & Park, 2016b).	CNT	PLA	49.6	-	%0.1	%0.1
(Zhang & Xu, 2021).	HAP	PLA	-	5.5 kJ/m²	%0-%30	%30
Kwon & Hwan	Nanokil (Kil minerali)	PLA	-	-	%1 - %5	%5

g, 2019).						
Kim & Park, 2020)	Silika	PLA	-	-	%0.5 - %3	%2
(Aziz & Arif, 2022)	Grafen Oksit	PLA	40	-	%0.1 - %0.5	%0.1
(He & Yu, 2021).	Karbon Nanotüpleri (CNT)	PLA	-	-	%0.5 - %3	%3

4. SONUÇ

Bu çalışma, 3D yazıcılarla üretilen termoplastik materyallerin mekanik özelliklerini artırmak için nanopartikül takviyesi kullanımını incelemiştir. Özellikle, PLA ve ABS gibi yaygın kullanılan termoplastiklerin TiO2, MWCN ve benzeri nanopartiküllerle güçlendirilmesi, bu malzemelerin elastisite modülü, akma dayanımı, sertlik ve darbe dayanımını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Yapılan testler ve literatür taramaları, nanopartiküllerin ağırlıkça oranı, türü ve dağılımının, malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini doğrudan belirlediğini ortaya koymuştur.

ABS ve PLA termoplastiklerinin nanopartiküllerle güçlendirilmesi, özellikle darbe dayanımının arttığı, sertliğin iyileştiği ve elastik modülün güçlendiği durumları göstermektedir. Özellikle grafen, karbon nanotüpleri ve silika gibi nanopartiküller, bu malzemelere ek fonksiyonellik kazandırmış, aynı zamanda malzemelerin işlevselliğini artırmıştır. Nanopartiküllerin, auxetic geometrilerdeki 3D yazıcı üretimi için potansiyelini daha da

geliştirmesi, bu tür yapılarla yapılan uygulamaların genişlemesini sağlayacaktır.

Auxetic yapıların darbe emme kabiliyetinin artırılması ve negatif Poisson oranı gibi özelliklerin iyileştirilmesi, bu geometrilerin endüstriyel üretimdeki kullanımını daha verimli hale getirecektir. 3D yazıcılar ile bu tür yapıları üretmenin getirdiği esneklik, üretim süreçlerini daha hızlı ve ekonomik hale getirecek, aynı zamanda tasarımlarda daha büyük özgürlük sağlayacaktır.

Sonuç olarak, nanopartiküllerle güçlendirilmiş PLA ve ABS termoplastikleri, 3D yazıcılarla üretimde önemli gelişim fırsatları sunmakta olup, endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulma potansiyeline sahiptir. Nanopartiküllerin doğru seçimi ve uygun oranlarda kullanılması, hem mekanik özellikleri iyileştirirken hem de auxetic yapılarla birleşerek üstün performans sağlayacak yeni nesil malzemelerin üretilmesine olanak tanıyacaktır. Bu çalışmanın, gelecekteki araştırmalara ve uygulamalara önemli bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

Kaynakça

Alderson, A. (1999). A triumph of lateral thought. *Chemistry & Industry, 17*, 384-391.

Al Rashid, A., Khan, S. A., Al-Ghamdi, S. G., & Koç, M. (2021). Additive manufacturing of polymer nanocomposites: Needs and challenges in materials, processes, and applications. *Journal of Materials Research and Technology, 14*, 910-941.

Bacak, S. (2022). ABS, PLA, TPU (Flex) malzemelerden farklı parametreler kullanılarak üretilmiş numunelerin çekme dayanımı özelliklerinin incelenmesi. *Yekarum, 7*(2), 58-64.

Bhasin, A., & Chawla, V. (2016). ABS/PLA blends for fused deposition modelling applications: A comparative study. *Materials Today: Proceedings, 3*(6), 1526-1530. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.047

Chaikeaw, C., & Srikulkit, K. (2017). In situ synthesis of ABS containing hydrophobic silica nanoparticles and their effects on mechanical properties. *Journal of Sol-Gel Science and Technology, 81*(4), 774-781. https://doi.org/10.1007/s10971-017-4401-0

Choi, J., Kim, D. H., & Lee, S. (2012). Effect of silica nanoparticles on mechanical properties of ABS-based nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12*(6), 4733-4737. https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6299

Clarissa, W. H. Y., Chia, C. H., Zakaria, S., & Evyan, Y. C. Y. (2022). Recent advancement in 3-D printing: Nanocomposites with added functionality. *Prog Addit Manuf, 7*, 325–350.

Clarissa, W. H. Y., Chia, C. H., Zakaria, S., & Evyan, Y. C. Y. (2022). Recent advancement in 3-D printing: Nanocomposites with added functionality. *Progress in Additive Manufacturing, 7*(4), 325-350. https://doi.org/10.1007/s40940-022-00447-w

Demirbaş, M. D., Çalışkan, U., & Sevim, Ç. (2021). Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş ABS ve PLA'nın mekanik meta malzeme davranışının belirlenmesi. IV. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi (UMUH BİLMES 2021), Tokat. Erişim adresi: https://avesis.erciyes.edu.tr

Dul, S., Fambri, L., & Pegoretti, A. (2016). Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 85*, 181-191. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.013

Goodship, V. (2007). Plastic recycling. *Science Progress, 90*(4), 245-268.

Hartings, M. R. (2016). The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO2-ABS nanocomposites. *Science and Technology of Advanced Materials, 17*(1), 89-97. https://doi.org/10.1080/14686996.2016.1152879

Jameson, C., Devine, D. M., Keane, G., & Gately, N. M. (2024). Influence of extrusion screw speed and CNT concentration on the mechanical and EMI properties of PC/ABS based nanocomposites. *Materials, 17*(11), 2625.

Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., & Akay, O. R. H. A. N. (2022). Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different

printing speeds in 3D printer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37*(3), 1197-1211.

Kim, I. J., Kwon, O. S., Park, J. B., & Joo, H. (2006). Synthesis and characterization of ABS/silica hybrid nanocomposites. *Current Applied Physics, 6*, e43-e47.

Kim, K., Kim, H., & Lee, Y. (2022). Investigation on the effect of printing speed on the mechanical properties of PLA and ABS. *Additive Manufacturing, 39*, 101868. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101868

Kılınç, Ö., & Toplan, N. (2005). Amorf Polimerler. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 5*(3), 131-148.

Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering, 176*, 107341.

Li, Y., Zhang, X., & Yang, Y. (2019). The effect of nano-clay on the mechanical and rheological properties of PLA nanocomposites. *Polymer Engineering & Science, 59*(9), 1911-1918. https://doi.org/10.1002/pen.25485

Matthew R. Hartings (2016). The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO2-ABS nanocomposites. *Science and Technology of Advanced Materials, 17*(1), 89-97. https://doi.org/10.1080/14686996.2016.1152879

Patterson, A. E., Pereira, T. R., Allison, J. T., & Messimer, S. L. (2021). IZOD impact properties of full-density fused deposition

modeling polymer materials with respect to raster angle and print orientation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235*(10), 1891-1908.

Petrovskaya, T. S., Toropkov, N. E., Mironov, E. G., & Azarmi, F. (2018). 3D printed biocompatible polylactide-hydroxyapatite based material for bone implants. *Mater Manuf Process, 33*, 1899-1904. https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1476764

Rostami, H., Nazockdast, H., & Karimi, M. (2016). Graphene induced microstructural changes of PLA/MWCNT biodegradable nanocomposites: Rheological, morphological, thermal and electrical properties. *RSC Advances, 6*(55), 49747–49759.

Sanjay, M. R., & Naik, S. D. (2019). Development of boron and graphene nanoparticle-based ABS composites: Mechanical, thermal, and electrical properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 32*(3), 360-377. https://doi.org/10.1177/0892705719878251

Syaefudin, E. A., Kholil, A., Hakim, M., Wulandari, D. A., & Murtinugraha, E. (2023, September). The effect of orientation on tensile strength 3D printing with ABS and PLA materials. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2596, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.

Taşkiran, E. (2014). Polimer esaslı malzemelerde dolgu maddelerinin sıcak plaka kaynağı mukavemetine etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye).

Tang, L., Liu, Y., & Wang, C. (2018). Investigation of the effect of carbon nanotubes on mechanical properties and thermal conductivity of ABS composites. *Polymer Composites, 39*(5), 1492-1500. https://doi.org/10.1002/pc.24510

Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology, 105*, 144-150.

BÖLÜM XV

Boraks Dekahidrat Takviyeli Termoplastiklerin Eriyik Akış İndekslerindeki Değişimlerin İncelenmesi

Yılmaz KISMET[1]
Hüseyin İSTEK[2]
Serhat GÜRAY[3]

GİRİŞ

Polimerler günlük yaşantımızda sıklıkla kullandığımız ve çok önemli bir yer tutan malzemelerdir. İnşaat, otomotiv, havacılık, elektrik-elektronik ve daha birçok endüstriyel alanda yaygın kullanım alanına sahiptirler. Polimerlerin sıklıkla bu yaygın kullanımlarının en önemli nedenleri ucuz olmaları, yüksek dayanım özelliklerinin olması, kolay üretilebilmeleri ve temin edilmelerindeki kolaylıklardır. Ayrıca toksik özellik içermemeleri de gıda ambalaj sektöründe sıklıkla tercih edilmelerini sağlamıştır.

[1] Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3145-6214, ykismet@munzur.edu.tr

Basit ev aletlerinden uzay-havacılık ve savunma sanayine kadar önemli birçok teknolojik üründe termoplastik ve termoplastik matrisli malzemelere rastlanılabilmektedir (Eyerer, vd., 2012). İşlenmeleri için gerekli enerjinin diğer yaygın olarak kullanılan metal, cam ve seramik matrisli malzemelere kıyasla daha düşük olması da üretim aşamasında önemli enerji tasarrufu sağlamakta ve bu durum da yine tercih edilmelerini sağlamaktadır. Polimerler fiziksel olarak termoplastikler, termosetler ve elastomerler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Polimerlerin en önemli grubunu ise termoplastikler oluşturmaktadır denilebilir. Termoplastikler ısı ve basınç etkisi ile rahatlıkla yumuşayan, akışkan form aldığında istenilen şekil verilebilen, soğutulduklarında ise yeniden sertleşerek katı hale dönüşebilen malzemelerdir. Mühendislik ve ticari termoplastikler olarak iki gruba ayrılan termoplastikler, kristalin/yarı kristal veya amorf karakterli olabilirler. Termoplastik matrisli kompozitlerde üretim aşamasında karşılaşılan en büyük zorluklardan birisi akışkanlık sorunudur. Matris malzemelerin fiziksel ve işlevsel özelliklerini arttırmak için dolgu parçacıkları, lifler veya bağlayıcı malzemeler kullanılarak polimer matrisli malzeme elde edilir (García ve ark, 2021).

Termoplastikler yaygın olarak ekstrüzyon kalıplama, enjeksiyon kalıplama, basınçla kalıplama, transfer kalıplama, şişirme kalıplama gibi yöntemlerle üretilmekte olup, dolgu maddelerinin eklenmesi genellikle akışkanlığa olumsuz etki oluşturabilmektedir. Akışkanlığın olumsuz etkilenmesi ise parça üretiminin gecikmesine ve ortaya çıkan ürünün kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Eriyik akış indeksi değerlerinin belirlenmesi ile termoplastiğin dolgu maddesi ilavesi neticesinde

akışkanlığında meydana gelen değişimler tespit edilebilmektedir. Eriyik akış analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde, kullanılacak malzemenin üretim prosesleri hakkında ön bilgi elde edilmekte ve üretim için gerekli sıcaklık, basınç gibi parametreler daha net belirlenebilmektedir. Bu çalışmada %3 , %5 ve %7 oranlarında boraks dekahidrat takviyesi ile hem kristal hem de amorf yapıda ki termoplastiklerin hem kütlesel hem de hacimsel akışkanlıklarında ki değişimler incelenmiştir.

Materyal ve Metod

Materyal

Bu çalışmalarda PETKİM firmasının üretmiş olduğu EH-102 ürün numaralı polipropilen (PP), I668 numaralı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), I22-19T alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) ve polioksimetilen (POM) kullanılmıştır. Dolgu maddesi olarak ise boraks dekahidrat kullanılmıştır.

Malzemelerin eriyik akış analizi

Her bir karışım için öncelikle eriyik akış analizleri (MFI) gerçekleştirilerek kütlesel ve hacimsel olarak belirli bir kesitten 10 dakikada akan malzeme miktarı ile bu karışımların yoğunluk değişimleri incelenecektir. Akış analizleri (MFI) Şekil 2'de görünen Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Polimer Teknolojileri Laboratuvarındaki JPT EQUIPMANT XRL-400 MFI cihazı kullanılarak ISO 1133 standartlarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere her termoplastik ve dolgu malzemesi için toplamda 8 gram olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlarda termoplastik içerisinde boraks dekahidratın ağırlıkça oranı %3, %5, %7 olarak belirlendi. MFI deneyinde, öncelikle her

termoplastik için sıcaklık ve yükleme koşulları belirlendikten sonra cihaz ısıtılmaya başlanır ve istenilen sıcaklık değerine ulaşması beklenir. Cihazın besleme bölümüne toplamda 8 gram ağırlığındaki karışım bir huni yardımıyla konulur. Numuneler hazneye döküldükten sonra, bütün deneylerde karışımlar bir piston vasıtası ve piston üzerine konulan ön yükleme ve ana yükleme kütleleri ile cihazın en altında bulunan memeden akmaya zorlanmaktadır. Her bir termoplastik için standartlara uygun olacak şekilde ve Tablo 1'de gösterildiği gibi sıcaklık değerleri girilerek deneyler gerçekleştirilmiş olup her bir termoplastik için uygulanan toplam kütle ise 5 kg olarak belirlenmiştir. Cihazın ısıtma bölgesi içerisinde viskoz hale gelen karışımlar, piston üzerinde bulunan kütlelerin etkisi ile cihazın alt kısmında bulunan memeden akmaktadır. Pistonun üzerinde bulunan 30 mm'lik ölçüm aralığına gelindiğinde ise akan malzemeler cihazın meme kısmında bulunan bir makas ile her 20s de bir kesilmektedir. Kesilen tüm numunelerin önce toplam ağırlıkları hassas terazi ile belirlenir ve bu değer deney esnasında elde edilen parça sayısına bölünerek numunelerin ortalama ağırlıkları bulunur.

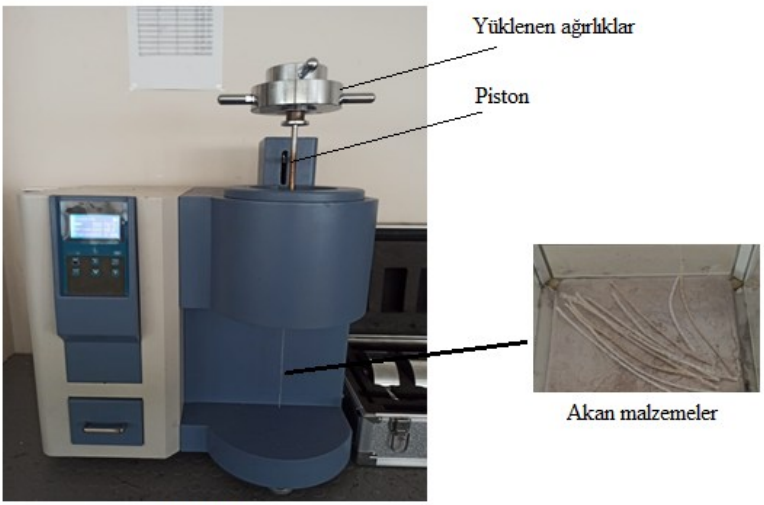
Tablo 1. Termoplastikler için MFI deneyi parametreleri

	AYPE	YYPE	PP	POM	PMMA	PS	ABS
Sıcaklık (°C)	190	190	230	190	230	200	220
Ağırlık (kg)	5	5	5	5	5	5	5
Kesme süresi(s)	20	20	20	20	20	20	20

Tablo 1'de de belirtildiği gibi bütün karışımlar için uygulanan ağırlık 5 kg olarak belirlenmiştir. Normalde 2.16kg'lık ağırlık etkisi altında da bazı termoplastiklerin eriyik akış analizleri

gerçekleştirilmesine rağmen burada kullanılan boraksın akışkanlığa olan olumsuz etkisini daha net görebilmek ve sonuç alabilmek için 5 kg tercih edilerek analizler yapılmıştır. Şekil 1'de gösterilen "JPT EQUIPMANT" marka "XRL-400A" model cihaza kullanılarak tespit edildi (Knappe, vd., 2001; Kısmet, 2012).

Şekil 1: (MFI) eriyik akış indeksi cihazı ve numune örnekleri

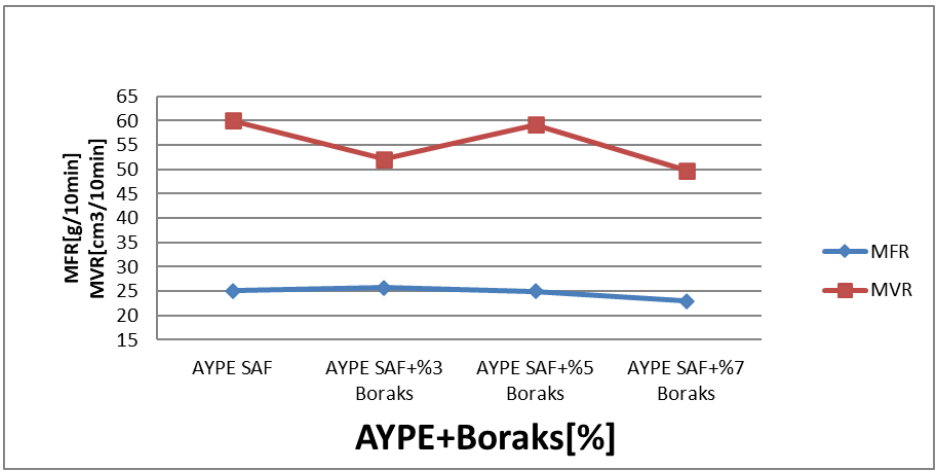


MFI cihazı

Bulgular ve Tartışmalar

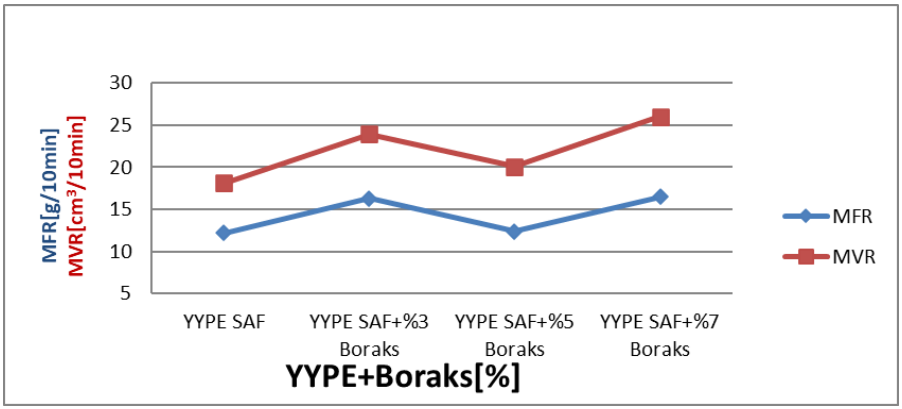
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar grafiklerde verilerek tartışılmıştır.

Şekil 2: Boraks takviyesi ile AYPE'nin kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) akışkanlıklarındaki değişimler.



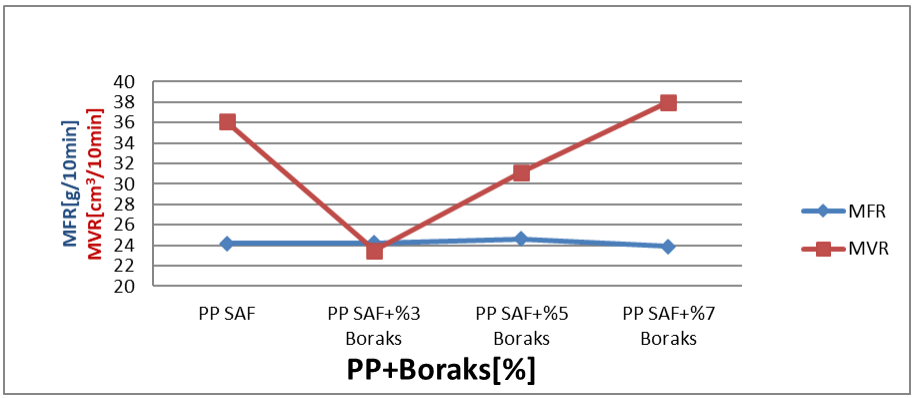
Şekil polietilen (AYPE) saf halde 25.08 g/10dak. kütlesel eriyik akış hızı (MFR) değerine sahipken, karışımdaki boraks dekahidrat %3 olduğunda MFR değeri bir miktar artarak 25,68 g/10dk. değerine yükselmiş, fakat dolgu maddesi oranı %5 ve %7 olduğunda bir miktar azalarak sırasıyla 24,96 g/10dk. ve 23,01 g/10dk. değerlerine düşmüştür. Hacimsel eriyik akış değeri (MVR) ise saf halde 59,99 cm^3/10dk değerini gösterirken sırasıyla %3 boraks dekahidrat takviyeli karışımda azalarak 52,09 cm3/10dak olmuş, %5 takviyeli karışımda bir miktar artarak 59,13 cm^3/10dk olmuş ve %7 dolgu maddeli karışımda da yeniden bir miktar azalarak 49,74 cm3/10dk. değerine düşmüştür. 5'de alçak yoğunluklu polietilen ve boraks dekahidrat ile oluşturulan karışımların kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) eriyik akış hızlarındaki değişiklikler verilmiştir.

Şekil 3: Boraks takviyesi ile YYPE'nin kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) akışkanlıklarındaki değişimler.

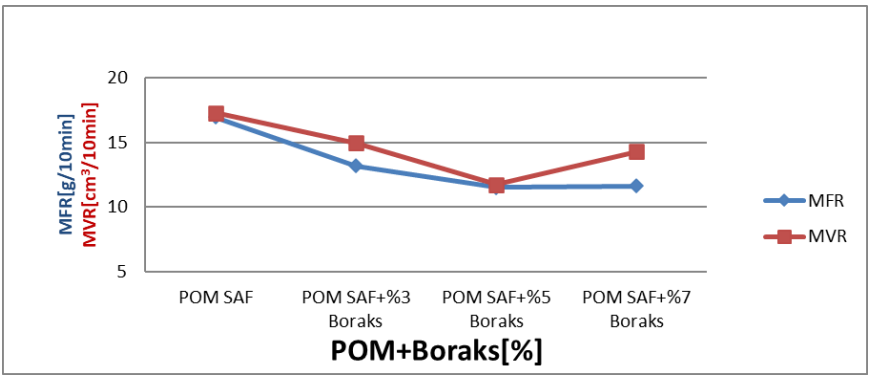


Şekil 3'de yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve boraks dekahidrat karışımlarının kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) eriyik akış hızlarındaki değişimler verilmiştir. YYPE'nin saf halde kütlesel eriyik akış hızı (MFR) 12,18 g/10dk. iken, ağırlıkça %3 oranında boraks dekahidrat eklendiğinde MFR değeri 16,32 g/10dk. değerine çıkmış, boraks katkısı ağırlıkça %5 olunca kütlesel akış 12,36 g/10dk. değerine düşerek azalmış ve ağırlıkça %7 katkılı karışımlarda ise tekrar artış göstererek 16,50 g/10dk. değerine ulaşmıştır. Saf haldeki hacimsel eriyik akış hızı (MVR) ise 18,14 cm^3/10dk. iken bu değer sırasıyla 23,91 cm^3/10dk. 20,06 cm^3/10dk. ve 26,04 cm^3/10dk. olarak ölçülmüştür. Hem kütlesel hem de hacimsel olarak grafikler benzer davranış göstermiş, %3 ve %7 dolgu maddeleri eklenmesi MFR ve MVR değerlerini bir miktar yükseltirken %5 dolgu ilavesi bu değerlerin azalmasına sebep olmuştur.

Şekil 4: Boraks takviyesi ile PP'nin kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) akışkanlıklarındaki değişimler.



Şekil 4'de polipropilen (PP) ile boraks dekahidrat karışımlarına ait kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) eriyik akış hızları grafiği verilmiştir. PP saf haldeyken kütlesel olarak eriyik akış hızının (MFR) 24,18 g/10dk. olduğu görülürken, %3 ve %5 oranlarında dolgu maddesi ilavesiyle MFR değerlerinde artış gözlemlenmiş ve sırayla 24,21 g/10dk. ve 24,63 g/10dk. değeriyle birbirine yakın seyretmiştir. %7 katkı maddesi katıldığında ise bir miktar azalarak 23,91 g/10dk. değerine gerilemiştir. Artış ve azalış miktarları çok küçük değerlerde olup belirtilen oranlardaki katkı maddesi ilavesinin kütlesel eriyik akış hızı üzerinde bariz bir etki meydana getirmediği anlaşılmaktadır. Hacimsel olarak incelendiğinde ise saf haldeki polipropilenin MVR değeri 36,08 cm^3/10dk. iken boraks katkılı karışımların MVR değerleri ise sırasıyla 23,48 cm^3/10dk. 31,17 cm^3/10dk. ve 38,00 cm3/10dk. olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5: POM'nin boraks katkısı ile kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) akışkanlıklarındaki değişimler.

Şekil 5'de polioksimetilen (POM) ve boraks dekahidrat karışımının kütlesel (MFR) ve hacimsel (MVR) eriyik akış analizleri verilmiştir. Saf haldeki POM'un kütlesel olarak eriyik akış hızı (MFR) 37,02 g/10dk. değerine sahipken, ağırlıkça %3 oranında dolgu katkısı ile azaltarak 25,38 g/10dk. değerine gerilemiştir. Ağırlıkça boraks dekahidrat katkısı %5 olduğunda ise 37,80 g/10dk. değerine ulaşarak saf haldeki MFR değerine yakın bir değere gelmiştir. Dolgu oranı ağırlıkça %7 olduğunda da çok küçük bir artış ile 38,22 g/10dk. olarak ölçülmüştür. POM'un hacimsel eriyik akış değerleri incelendiğinde ise saf 55,08 cm^3/10dk. iken dolgu takviyesiyle sırasıyla 18,57 cm3/10dk. , 30,10 cm^3/10dk. , 27,32 cm^3/10dk. olarak tespit edilmiştir. Görüleceği üzere %3 oranında boraks dekahidrat katkısı MFR ve MVR değerlerine olumsuz etki ederek akışkanlığı düşürmüş, bu azalış özellikle MVR değerinde ciddi oranda göz önüne çıkmıştır. %5 ve %7 oranındaki dolgu ilavelerinin ise akışkanlık değerlerine katkısı olumlu yönde olmuştur.

Sonuçlar

Bu çalışmada piyasada önemli kullanım alanlarına sahip olan ticari ve mühendislik termoplastiklerinden alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), polipropilen (PP), polioksimetilen (POM) matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan bu termoplastiklerin boraks takviyesi ile kütlesek ve hacimsel akışkanlıklarında ki değişimler incelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre kristal/yarı kristal yapıdaki AYPE, YYPE, PP'nin akışkanlıkları artan boraks miktarı ile genelde bir miktar artmış ya da yatay seyretmiştir. Her ne kadar AYPE, PP numunelerinde ağırlıkça %3 boraks katkısı ile hacimsel akışkanlık değerleri radikal bir azalma göstersede artan dolgu miktarı ile akışkanlıklar tekrar iyileşmiştir. Bir diğer yarı kristal POM da ise hacimsel akışkanlık değeri PP de olduğu gibi önce radikal bir şekilde azalmış fakat daha sonra bir miktar artmıştır. Bu radikal değişimlerin nedeni düşük dolgu oranlarında karışımların yeterince homojen olmamasından kaynaklanmaktadır. İnorganik takviye elemanları genellikle termoplastiklerin akışkanlıklarını olumsuz etki ederken burada özellikle poliolefinler grubunun üyesi olan AYPE, YYPE ve PP'nin akışkanlıklarına boraks nispeten olumlu etki etmiştir. Bu termoplastikler ile boraks takviyeli kompozitler geliştirilecek olduğunda özellikle ekstrüzyon ve plastik enejeksiyon üretim teknikleri ile üretimin daha kolay ve parça kalitesinin iyi olabileceği söylenilebilir.

Kaynaklar

Akkurt, S., 1991. “Plastik malzeme bilgisi”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 7-55, 75-89, 91-112

Akyüz Ö. F. , 1999, “Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş”, PAGEV Yayınları, İstanbul, (41-55, 59-89, 102-106)

Hsissou, R., 2021. Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. Composite structures, 262, 113640.

Çetinel, H. (2000). Polietilen ve polipropilenin mekanik özelliklerinin incelemesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2(3), 79-87.

Gächter, R ., Müller, H., 1987. ‘’Plastics Additives’’, 2nd Edition, Hanser Publishers,Munich.

Singh Y, Singh J, Sharma S, Lam DT, Nguyen DN. (2020), Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports- good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties. J Mater Res Technol 9:15593–15603.

James, E. M., 2007. Physical properties of polymers Hand book, Springer, Newyork, 1096s

Kaya, F., 2005. Plastikler ve katkı maddeleri. Birsen yayınevi, İstanbul, 103s

Kısmet Y., 2016, Hidrolize edilmiş elektrostatik toz boya atık miktarına bağlı olarak poliamid 6 (PA6) ve polioksimetilenin (POM) eriyik akış indeksleri ve yoğunluklarındaki değişimlerin incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 22(4), 241-245, 2016 2s.

Guerreiro SD, João IM, (2012), Real LP Evaluation of the influence of testing parameters onthe melt flow index of thermoplastics. Polym Test 31:1026 1030.,

Kısmet, Y., Wagner, M.H., 2019, Mechanical, thermal, and morphological properties of powder coating waste reinforced acetal copolymer, Polymer Testing, 82, 106332.

Marşoğlu, M., 1986. Plastik Malzemeler, Arpaz Matbaacılık,İstanbul.

Mazumdar, S.K., 2001. Composites Manufacturing, Materials, Product and Process Engineering, Crc Press.

Peacock, A. J., 2000. Handbook of polyethylene: structures, properties, andapplications. Scrivener publishing, New York, 1333s.

Yılmaz, O. (2007). Polimer malzemelerin ekstrüzyonunun deneysel ve sayısal olarak incelenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Ravve, A., 2012. Principles of Polymer Chemistry, third ed., Springer, New York.

Savaşçı, Ö. T., Uyanık, N., Akovalı, G., 1998. Plastikler ve Plastik Teknolojisi. Çantay Kitabevi, İstanbul, 1-25: 199-203s.

Shenoy, A. V., Saini, R. D., 1996. Thermoplastic melt rheology and processing, Marcel Dekker Inc., New York, 475s.

BÖLÜM XVI

Askeri Araçlarda Tırmanma, İniş ve Devrilme Test Performanslarının Değerlendirilmesi

Yunus AYAZSEVEN[1]

1. Giriş

Askeri operasyonlarda, arazi koşulları büyük bir stratejik öneme sahiptir. Özellikle dağlık ve engebeli arazilerde askeri araçların tırmanma ve iniş becerileri, operasyonların başarısı için kritik bir rol oynamaktadır (Ahmet Faruk & Neslihan, 2023). Zorlu arazi koşullarında fiziksel performans, askerlerin operasyonel etkinliğini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, tırmanma ve iniş gibi faaliyetlerdeki performansın bilimsel olarak incelenmesi, askeri araçların hazırlık süreçlerini optimize etmek için önemli bilgiler sağlayabilir.

Tasarım Kalite Uzmanı, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., Mersin/TÜRKİYE, yunus.ayazseven@koluman.com, ORCID ID: 0009-0009-1908-3989[1]

Arazi koşullarındaki değişkenlik, özellikle eğim açıları, tırmanma ve iniş tekniklerini ve fiziksel güç gereksinimlerini önemli ölçüde etkileyebilir (Murat, İrfan, & Rasim 2020). Askeri alanda kullanılan çeşitli testler, eğim açılarındaki değişikliklerin performansa etkisini anlamak için değerli verilere yol açabilir. Bu çalışmada, yüzde 30 ve yüzde 60 eğimlerde tırmanma ve iniş performansları incelenmiş ve yan eğimdeki performans değerlendirilmiştir.

Eğim konusunda kısaca yüzde eğimin derece olarak hesaplanması ve farklı eğim ölçülerinin derece karşılığını örnekleyerek askeri araçların tırmanacağı eğimin zorluğunu daha iyi anlayabiliriz. Eğim, genellikle yüzde (%) olarak ifade edilir ve bir hattın yataya göre ne kadar dik olduğunu gösterir. Yüzdelik eğim, dikey mesafenin yatay mesafeye oranının yüzde olarak ifade edilmesidir. Bu yüzde eğim derecelere dönüştürülebilir.

Bir yüzdelik eğimi dereceye dönüştürmek için aşağıdaki formül kullanılır:

Arctan (tan−1^{-1}−1) ters tanjant fonksiyonudur ve genellikle hesap makinelerinde veya programlama dillerinde bulunur.

1. **%10 eğim:**

$$\text{Eğim (derece)} = \arctan\left(\frac{10}{100}\right) = \arctan(0.1) \approx 5.71^\circ$$

2. **%50 eğim:**

$$\text{Eğim (derece)} = \arctan\left(\frac{50}{100}\right) = \arctan(0.5) \approx 26.57^\circ$$

Tablo 1: Eğim yüzdeleri ve karşılık gelen derece değerleri

Eğim (%)	Eğim (Derece)
%10	5.71°
%20	11.31°
%30	16.70°
%40	21.80°
%50	26.57°
%60	30.96°

Kaynak: https://trigonometri.hesabet.com/tanjant-hesaplama

2 Araştırma Yöntemi

Araştırma, askeri araçlara yönelik beş ana testten oluşmuştur:

- **%60 Dik Eğim Tırmanma Testi**: Bu test, askeri araçların yüzde 60 eğimli bir yokuşu tırmanma yeteneklerini ölçmeyi amaçlamaktadır.
- **%60 Dik Eğim İniş Testi**: Bu test, yüksek dik eğimlerde iniş performansını ölçer. İnişin güvenliği ve hız gibi faktörler değerlendirilmiştir.
- **%30 Dik Eğim Tırmanma Testi**: Orta seviye eğimde yapılan bu test, daha az zorluk seviyesi sunarak araçların performansını test eder.
- **%30 Dik Eğim İniş Testi**: Yüksek ve orta seviyedeki eğim farklarının iniş performansına etkisi burada ölçülmüştür.

- **%30 yan Eğim Testi**: Yüksek seviyedeki yan eğim açısının performansına etkisi burada ölçülmüştür.

2.1. Araç Testi ve Güvenlik Önlemleri: Hazırlık Süreci ve Gereksinimler

Askeri ve endüstriyel testlerde araçların güvenli ve verimli bir şekilde performans sergileyebilmesi için çeşitli hazırlık adımları büyük önem taşır. Araçların çeşitli testlere tabi tutulmadan önce belirli teknik kontrollerden geçmesi, güvenlik risklerinin azaltılması ve testlerin doğru sonuçlar vermesi için gereklidir (Fuat, 2024). Bu bağlamda aşağıda belirtilen kontrollerin yapılması, testlerin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir:

2.1.1. Zemin Durumu:

Araçların testleri sırasında lastiklerin yola sağlam tutunabilmesi için zeminin kuru ve düzgün olması gerekmektedir. Sıkı bir yol tutuşu, test sonuçlarının güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda araç ve ekipman güvenliği açısından riskleri minimize eder. Özellikle yüksek eğimli arazilerde, zemin koşullarının uygunluğu, testin başarılı olabilmesi için zorunludur.

2.1.2. Lastik Durumu ve Basınç Kontrolü:

Lastiklerin yeni olması ve uygun lastik basınçlarının kontrol edilmesi önemlidir. Aşağı ya da aşırı şişirilmiş lastikler, aracın yol tutuşunu ve genel performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, test öncesinde lastiklerin durumu ve hava basıncı mutlaka kontrol edilmelidir.

2.1.3. Bijon Tork Kontrolleri:

Lastiklerin güvenli bir şekilde sabitlenmiş olması için bijon tork kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Tork boyası işareti, bijonların doğru torkta sıkıldığını gösteren önemli bir işaret olup, test sırasında herhangi bir gevşeme olmasını engeller. Bu kontrol, aracın güvenliğini artırırken, sürüş esnasında oluşabilecek mekanik hataları da önler.

2.1.4. Kablo Soketlerinin Durumu:

Araçta herhangi bir boşta kablo soketi varsa, bu durumun uygun bir şekilde sızdırmazlık sağlanarak düzenlenmesi gerekmektedir. Boşta kalan veya düzgün bağlanmayan kablolar, araç içinde kısa devreye yol açabilir ve güvenlik riski oluşturabilir.

2.1.5. Ekipman ve Malzeme Kontrolleri:

Araçta üzerinde boşta veya sabitlenmemiş ekipman malzeme bulunmamalıdır. Testler sırasında araç içinde herhangi bir malzemenin gevşemesi, hem araç güvenliğini hem de test sonuçlarını tehlikeye atabilir. Bu nedenle, tüm ekipmanlar test öncesi sabitlenmeli ve güvenli bir şekilde yerleştirilmelidir.

2.1.6. Arıza Kontrolü:

Araçta testlerin gerçekleşmesine engel olabilecek ya da testleri riske atabilecek bir arıza bulunmamalıdır. Motor, şanzıman, frenler, direksiyon sistemi gibi kritik bileşenlerin düzgün çalıştığı ve arızaların olmadığı kontrol edilmelidir. Bu tür arızalar, test sırasında ciddi güvenlik sorunlarına yol açabilir.

2.1.7. Yük Sabitleme Kontrolleri:

Araç üzerindeki yüklerin düzgün bir şekilde sabitlendiğinden emin olunmalıdır. Örneğin, sapanlar, takozlar ve benzeri araç sabitleme ekipmanları yerinde olmalıdır. Yüklerin düzgün sabitlenmemesi, aracın test sırasında dengesiz hareket etmesine ve beklenmedik kazalara neden olabilir.

2.1.8. Motor Yağı ve Soğutma Suyu Kontrolü:

Araçtaki motor yağı ve soğutma suyunun yeterli seviyede olup olmadığı kontrol edilmelidir. Eksik olan yağ ve sıvılar, motorun verimsiz çalışmasına veya aşırı ısınmasına neden olabilir. Bu tür eksiklikler tespit edilirse, gerekli seviyelere tamamlanmalıdır.

2.1.9. Yolcu Güvenlik Önlemleri:

Araçta bulunan tüm yolcuların güvenlik önlemleri, özellikle emniyet kemerleri ve diğer güvenlik ekipmanlarının tam ve doğru şekilde kullanıldığından emin olunmalıdır. Test sırasında yolcuların güvenliği, testin sonuçları kadar önemlidir. Güvenlik önlemleri alınmadan hiçbir test yapılmamalıdır.

2.2. Araç Ağırlığı Kontrolü:

Araç son ağırlığı, kantar ile tartılarak belirlenmelidir. Bu, aracın test koşullarında taşıyabileceği yükü doğru bir şekilde belirlemek için gereklidir. Ağırlık değişimleri, aracın performansını ve dengeyi etkileyebilir, bu nedenle ağırlık ölçümü önemlidir.

2.2.1.Ağırlık Merkezi ve Eğim Testleri

Ağırlık merkezi, bir aracın denge, stabilite ve hareket kabiliyeti üzerinde kritik bir rol oynar, özellikle eğim testleri gibi

zorlu arazi koşullarında. Yüzde 30 ve yüzde 60 dik eğim ya da yan eğim testlerinde ağırlık merkezinin konumu, aracın performansını ve güvenliğini doğrudan etkiler (Boccolini, Brazit, Bonfanti, & Albarti, 2013).

2.2.2. Ağırlık Merkezinin Tanımı ve Önemi

Ağırlık merkezi, bir cismin kütlesinin dengede olduğu noktadır. Araçlarda bu nokta, kütlenin geometrik dağılımına bağlı olarak değişir ve aracın dengesini etkiler. Yüksek eğimli arazilerde:

- **Denge:**

Ağırlık merkezi aracın denge yeteneğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Ağırlık merkezi ne kadar düşük ve aracın tabanına yakın olursa, aracın devrilme riski o kadar azalır. Yüksek eğimli testlerde, ağırlık merkezi üstteyse, araç yan yatabilir veya arkaya devrilebilir (J. Bernard, Shannan, & M. Vanderploeg, 1989).

- **Tırmanma Performansı:**

Dik eğimlerde, ağırlık merkezi arkaya kayarsa, aracın ön tekerlekleri yerden kesilebilir ve bu da çekiş kaybına neden olur. Aksine, ağırlık merkezi önde yer alırsa, aracın arka tekerlekleri kayabilir veya tutunma sağlayamaz.

- **Yan Eğim Performansı:**

Yan eğim testlerinde ağırlık merkezi, aracın yanal denge kabiliyeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Ağırlık merkezi aracın merkez hattından dışarı kayarsa, yan devrilme riski artar.

2.2.4. Ağırlık Merkezinin Eğime Etkisi

2.2.4.1. Dik Eğim (Tırmanış ve İniş):

Dik eğim tırmanışında ağırlık merkezi arkaya doğru kayarsa, aracın tırmanışı sırasında arka tekerleklere daha fazla ağırlık biner. Bu durum, aks kilidi gibi sistemlerin önemini artırır çünkü güç dağılımı dengelenmezse çekiş kaybı yaşanabilir.

Dik eğim inişinde ise ağırlık merkezinin önde olması, fren sistemi üzerinde daha fazla yük oluşturabilir ve araç kayma riski ile karşı karşıya kalabilir.

2.2.4.2. Yan Eğim:

Yan eğimlerde, ağırlık merkezinin aracın eğim tarafına yakın olması, devrilme riskini artırır. Bu nedenle, ağırlık merkezi yatay eksen üzerinde mümkün olduğunca ortalanmalıdır.

2.2.5. Ağırlık Merkezini Kontrol Altında Tutmak İçin Çözümler

2.2.5.1 Düşük Ağırlık Merkezi Tasarımı:

Araç tasarımında ağırlık merkezi mümkün olduğunca aşağıda olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Motor, batarya gibi ağır bileşenler aracın alt kısmında yer almalıdır (Gillespie, & Thomas D., 1992).

2.2.5.2. Yük Sabitleme:

Araç üzerindeki yükler düzgün ve dengeli bir şekilde yerleştirilmeli, ağırlık merkezini yukarı ya da yan tarafa kaydıracak şekilde birikmemelidir. Sabitlenmemiş yükler, özellikle dik veya

yan eğimlerde aracın dengesini bozabilir (Leon S., & The Expert Witness Scam, 2000).

2.2.5.3. Dinamik Kontrol Sistemleri:

Modern araçlarda kullanılan eğim algılayıcılar ve stabilite kontrol sistemleri, ağırlık merkezinin pozisyonuna bağlı olarak çekiş ve frenleme performansını optimize edebilir.

2.2.5.4. Araç Kullanım Teknikleri:

Dik eğimlerde, aracın yük dağılımını eşit tutmak için hız ve frenleme kontrollü yapılmalıdır.

Yan eğimlerde, ani manevralardan kaçınılmalı ve aracın ağırlık merkezi eğime karşı dengede tutulmalıdır.

2.3. Aks Kilidi ve Dik Eğim Performansı

Araçların yüksek eğimli arazilerde, özellikle yüzde 60 gibi dik eğimlerde, tırmanma performansını artırmak için aks kilidi (differential lock) sisteminin kullanılması büyük önem taşır. Aks kilidi, tüm tekerleklere gücü eşit olarak dağıtmayı sağlayan bir mekanizmadır ve zorlu arazi koşullarında tırmanış sırasında çekiş kaybını önlemede kritik bir rol oynar.

2.3.1. Aks Kilidi Nedir ve Nasıl Çalışır?

Standart bir diferansiyel, tekerleklerin farklı hızlarda dönmesini sağlayarak virajlarda aracın manevra kabiliyetini artırır. Ancak bu sistem, zorlu arazi koşullarında bir tekerleğin çekişini kaybetmesi durumunda gücün bu tekerleğe yönlendirilmesine neden olabilir. Böyle bir durumda, araç ilerlemekte zorlanır.

Aks kilidi ise diferansiyeli kilitleyerek tüm tekerleklerin eşit hızda dönmesini sağlar. Bu mekanizma, özellikle eğimli veya kaygan yüzeylerde, aracın her bir tekerleğinin zemine yeterli çekiş gücü uygulamasını mümkün kılar. Bu sayede, yüzde 60 gibi dik bir eğimde aracın tırmanış sırasında gücünü kaybetmeden ilerlemesi sağlanır.

2.3.2.Aks Kilidinin Kullanımı

2.3.2.1. Aktivasyon Süreci:

Aks kilidi genellikle sürücünün manuel olarak aktive ettiği bir sistemdir. Düğme, kol veya elektronik bir kontrol aracılığıyla devreye alınabilir. Bazı modern araçlarda, aks kilidi zorlu arazi koşulları algılandığında otomatik olarak devreye girer.

2.3.2.2. Eğimli Arazilerde Kullanım:

Yüzde 60 eğim gibi dik yokuşlarda, aks kilidi devreye alındığında tekerlekler eşit hızda döner ve zemindeki kayganlık ya da gevşeklik nedeniyle bir tekerleğin patinaj yapması önlenir. Bu, aracın dengeli ve kontrollü bir şekilde tırmanmasını sağlar. Aşağıda bulunan Fotoğraf 1'de aks kilidi sistemi yer almaktadır.

Fotoğraf 1: Elektronik Diferansiyel Kilidi

Kaynak: https://blog.toyota.com.tr/elektronik-diferansiyel-kilidi

2.3.2.3. Kaygan Zeminlerde Performans:

Dik eğimlerde zemin genellikle toprak, çamur veya gevşek taşlardan oluşabilir. Aks kilidi, bu tür kaygan zeminlerde çekişin maksimum seviyeye çıkmasına yardımcı olarak aracın tırmanış sırasında durmasını ya da kaymasını önler.

2.3.2.4. Avantajları

- Tırmanma Performansını Artırır: Aks kilidi, yüksek eğimlerde çekiş kaybını en aza indirerek tırmanış performansını optimize eder.
- Denge ve Stabilite Sağlar: Eğimli arazilerde, tekerleklere eşit güç dağıtımı aracın stabilitesini artırır.
- Zorlu Arazi Şartlarında Çekiş Kaybını Önler: Çamur, kar veya gevşek taş gibi yüzeylerde daha iyi yol tutuşu sağlar.

2.3.2.5. Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

- Sadece Gerekli Durumlarda Kullanılmalı: Aks kilidi, aracın manevra kabiliyetini sınırlayabileceği için sadece dik eğim veya kaygan zemin gibi zorlu koşullarda devreye alınmalıdır.
- Lastik Durumu ve Basıncı: Aks kilidinin etkili çalışması için lastiklerin durumu ve basıncı uygun olmalıdır.
- Sistem Bakımı: Aks kilidinin uzun ömürlü ve verimli çalışması için düzenli bakım yapılmalı ve sistem yağlanmalıdır.

Yüzde 60 gibi dik eğimlerde aracın performansını artırmak için aks kilidi, vazgeçilmez bir donanımdır. Bu mekanizma, tüm tekerleklere eşit güç dağıtarak çekişi artırır, aracın stabilitesini korur ve zorlu arazilerde tırmanışın güvenli bir şekilde tamamlanmasını sağlar. Askeri operasyonlar gibi kritik durumlarda, aks kilidi hem aracın hem de ekipman güvenliğini sağlayarak operasyonel başarıya katkıda bulunur.

2.4. Bulgular

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen testler sonucunda aşağıdaki önemli bulgular elde edilmiştir:

2.4.1. Dik Eğim Tırmanma Performansı (%60 ve %30 Eğimler):

- Yüzde 60 eğimli arazide araçların tırmanma performansı, tüm tekerleklere eşit güç dağıtımını sağlayan aks kilidi sisteminin aktif kullanımıyla optimize edilmiştir.

- Aks kilidinin aktif olduğu durumlarda tekerleklerin patinaj yapma oranı önemli ölçüde azalmış ve araçlar stabil bir şekilde tırmanış gerçekleştirmiştir.
- Yüzde 30 eğimli orta seviye arazilerde ise aks kilidinin kullanımı daha az kritik bir rol oynamış, standart diferansiyel sistemiyle bile yeterli tırmanış performansı sağlanmıştır.

2.4.2. Dik Eğim İniş Performansı:

- İnişlerde fren sistemlerinin güvenliği önemli bir faktör olarak öne çıkmıştır. Araçların yüzde 60 eğim iniş testinde güvenli duruş sağlayabilmesi için fren sistemleri etkili bir şekilde çalışmıştır.
- Araçların iniş sırasında çekiş kontrol sistemleri ve fren kullanımına bağlı olarak denge kayıplarını minimize ettiği gözlemlenmiştir.

2.4.3. Yan Eğim Hareket Kabiliyeti (%30 Eğim):

- Yüzde 30 yan eğimli arazilerde araçların denge ve stabilitesi, aks kilidinin aktif olduğu durumlarda artış göstermiştir.
- Yan eğim koşullarında zemin tutuşu ve lastiklerin uygun basıncı kritik faktörler arasında yer almıştır.

2.4.4. Yakıt Verimliliği:

- Dik eğimlerde araçların yakıt tüketiminin belirgin şekilde arttığı, özellikle yüzde 60 eğim parkurunda yakıt verimliliğinin yüzde 20 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Yan eğim parkurlarında ise yakıt tüketimi, dik eğim parkurlarına kıyasla daha az etkilenmiştir.

2.4.5. Yakıt Sızıntısı ve Güvenlik:

- Dik ve yan eğim koşullarında, yakıt deposu ve menhol kapaklarından sızıntı gözlemlenmemiştir. Bu durum, araçların tasarımında kullanılan sızdırmazlık sistemlerinin yeterliliğini göstermektedir.

2.4.6. Araç Yükü ve Performans İlişkisi:

Araçların taşıdığı yük miktarının artması, hem dik eğim tırmanışında hem de iniş performansında belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Özellikle yüzde 60 eğimde ağır yüklü araçların tırmanış süresi yüzde 25 oranında uzamıştır.

2.4.7. Yöntem

Araştırma, askeri operasyonlarda kullanılan araçların zorlu arazi koşullarındaki performansını değerlendirmek için sistematik bir yöntem izleyerek gerçekleştirilmiştir. Test prosedürü şu şekilde tasarlanmıştır:

2.4.8. Test Alanı ve Şartları:

- Testler, yüzde 60 dik eğim, yüzde 30 dik eğim ve yüzde 30 yan eğim olmak üzere üç farklı eğimli parkurda gerçekleştirilmiştir.

2.4.9. Araçlar ve Ekipman:

- Testler için aks kilidi (differential lock) sistemine sahip, arazi koşullarına uygun askeri araçlar kullanılmıştır.
- Araçların teknik kontrolleri, lastik durumu, yük sabitlemesi ve motor performans testi önceden yapılmıştır.

2.4.10. Test Adımları:

- Dik Eğim Tırmanış Testi: Araçlar, yüzde 60 ve yüzde 30 eğimli parkurlarda tırmanış testine tabi tutulmuş, tekerleklerin çekiş performansı ve stabilitesi gözlemlenmiştir.
- Dik Eğim İniş Testi: Araçların iniş sırasındaki denge, frenleme mesafesi ve güvenliği değerlendirilmiştir.
- Yan Eğim Testi: Yüzde 30 yan eğimde araçların denge, stabilite ve hareket kabiliyeti ölçülmüştür.

2.5. Sonuç

Bu araştırma, askeri operasyonlarda karşılaşılan eğimli arazilerde araç performansının değerlendirilmesine yönelik önemli bulgular sunmuştur. Arazi koşullarındaki farklı eğim açıları, hem fiziksel hem de teknik performans üzerinde çeşitli etkiler yaratmıştır. Araştırmanın bulguları şu sonuçları içermektedir:

2.5.1. Yüksek Eğimli Arazilerde Tırmanma ve İniş:

Yüzde 60 eğim gibi dik arazilerde, araçların tırmanma performansında belirgin bir zorluk yaşadığı, bu durumun artan güç tüketimi gözlemlenmiştir. İniş sırasında ise fren sistemi üzerinde artan yüklenme ve stabilite sorunları, sürücünün güvenli hareket etmesini güçleştirmiştir. Yüksek eğimlerde araçların da frenleme ve stabilizasyon mekanizmalarının büyük önem taşıdığı, bu koşullarda teknik eksikliklerin araç performansını ve güvenliğini olumsuz etkileyebileceği görülmüştür.

2.5.2. Orta Dereceli Eğimlerde Performans:

Yüzde 30 eğim gibi daha orta seviyeli eğimlerde, araçların tırmanma ve iniş performansı daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Güç tüketimi ve zorlanma, yüzde 60 eğime kıyasla daha düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu bulgu, orta dereceli eğimlerin, araçların operasyonel yeterlilikleri açısından daha az riskli olduğunu ortaya koymaktadır.

2.5.3. Yan Eğim Koşulları:

Yan eğimlerde yapılan testler, araçların denge ve stabilite kabiliyetlerinde önemli zorluklar yaşadığını göstermiştir. Özellikle zeminin kaygan olması ve eğimin dengesiz hareketlere yol açması, performansı olumsuz etkilemiştir. Araçlar açısından ise yan eğimde güvenli hareket kabiliyeti, teknik yeterliliklerin doğrulanması için kritik bir değerlendirme noktası olmuştur. Yakıt kaçağı, frenleme ve denge sistemleri gibi unsurlar bu koşullarda titizlikle test edilmiştir.

2.5.3. Araç Testleri ve Kabul Kriterleri:

Araç testleri, zorlu arazi koşullarında güvenli operasyonlar için belirli kabul kriterlerinin önemini vurgulamıştır. Yüzde 60 ve yüzde 30 eğimlerde tırmanma ve inişin sorunsuz gerçekleştirilmesi, fren sistemlerinin araçları sabitleme kapasitesi ve yakıt kaçağı olmaması gibi kriterler, araçların operasyonel uygunluğunun sağlanmasında kritik unsurlar olarak öne çıkmıştır.

2.5.4. Eğitim ve Hazırlık Süreçlerinin Önemi:

Çalışmanın sonuçları, askeri araçların eğimli arazilerdeki performansını artırmak için sürücüye doğru eğitim süreçlerinin ve simülasyonların iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Özellikle yüksek eğimlerdeki zorlukların azaltılması ve yan eğimlerde denge kabiliyetlerinin geliştirilmesi için özel eğitim programları tasarlanmalıdır. Araçlar için ise zorlu arazi koşullarına uygun ekipman geliştirilmesi ve bakım süreçlerinin önceliklendirilmesi gerekmektedir.

2.5.5. Gelecekteki Araştırmalar için Öneriler

Bu çalışma, eğimli arazilerde araç performansına dair temel bilgiler sunsa da, daha geniş ölçekli araştırmalar yapılması gerekmektedir. Farklı arazi türleri, hava koşulları ve ekipmanların performansa etkisi gibi unsurların incelenmesi, daha kapsamlı sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır. Ayrıca, bu tür çalışmaların sonuçlarının, askeri operasyonel stratejilere ve teknolojik yeniliklere doğrudan entegre edilmesi, saha koşullarındaki başarıyı artırabilir (Güzide, & İbrahim, 2022).

Sonuç olarak, bu çalışma, zorlu arazi koşullarında hem personel hem de araçların performansını optimize etmek için bilimsel bir temel sunmuş ve askeri operasyonların verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. (1. Baumann, J., Torkzadeh, DD., Ramstein, A., Kiencke, U., & Schlegl, T., 2006)

Kaynaklar

https://trigonometri.hesabet.com/tanjant-hesaplama

Boccolini G, Brazit A, Bonfanti L, Albarti G. Using balance training to improve the performance of youth basketball players. Sport Sci Health. 2013;9(2):37-42. doi:10.1007/s11332-013-0143-z

Murat, İrfan, & Rasim 2020 Eğimli ve Kurak Koşullarda Bir Arazi Toplulaştırma Sahasının Çölleşme Potansiyelinin Fraktal Analizle Araştırılması

Leon S. Robertson, The Expert Witness Scam, 2000. View this at

ÇETİNKAYA, A. Faruk ve DEMİREL, Neslihan (2023). " Askeri Operasyonlarda Zırhlı Araçların Seçimi: Karar Verme Sürecinde Kullanılabilecek Analitik Yaklaşımlar", Uluslararası Türk Dünyası Araştırmaları Dergisi, (6/3), 35-72. DOI: 10.59182/tudad.1290824 White, M., & Hall, T. (2018). Biomechanics of descending slopes during military training: A review. Journal of Biomechanics, 61(2), 192-198.

J. Bernard, J. Shannan, M. Vanderploeg, 1989 "Vehicle Rollover on Smooth Surfaces," SAE Paper No. 891991

Fuat Özçakmak, Askeri Taktik Ağlarda Derin Makine Öğreniminin Etkisi

Gillespie,Thomas D., 1992 "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers,USA,

Güzide, & İbrahim, 2022 Askeri Alanda Endüstri 4.0 Uygulamaları Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı 43, S. 104-109, Kasım 2022

1. Baumann, J., Torkzadeh, DD., Ramstein, A., Kiencke, U., Schlegl, T., Model-based predictive anti-jerk control, Control Engineering Practice (Control Eng. Pract.), 14 (3), 259-266, 2006.

SAE International - Mobility Engineering Resources https://www.sae.org/

https://blog.toyota.com.tr/elektronik-diferansiyel-kilidi

BÖLÜM XVII

Semi-Treyler Araçlarında Sürücü Konforu İçin Su Tankı Tasarımı ve Ergonomi Doğrulama Süreçleri

Mehmet VURGUN[1]

Giriş

Semi-treyler araçlarında sürücü konforu, uzun yolculuklar ve operasyonel verimlilik için kritik bir unsurdur. Bu araçlar, uzun mesafeli taşımacılıkta sürücüler için hem bir çalışma hem de yaşam alanı sunar. Bu makale, semi-treyler araçlarında sürücü konforunun artırılması amacıyla bir su tankının entegre edilmesi projesini incelemektedir. Bu kapsamda, uygun yer belirlenmesi, su tankı tasarımı, malzeme seçimi, üretim metodu ve montaj aparatı tasarımı gibi aşamalar gerçekleştirilmiştir.

[1] RD Team Leader, Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş., RD Center, Mersin/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4685-9588, mehmet.vurgun@gmail.com

1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi

1.1. Kullanıcı Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Sürücülerle yapılan anketler ve görüşmeler sonucunda, su erişimi ile ilgili temel sorunlar ve beklentiler tespit edilmiştir:

- Temiz suya kolay erişim ve hijyen.
- Ergonomik konumlandırma.
- Gıda depolama alanına yakınlık.
- Kolay doldurulabilirlik ve musluk ile su boşaltma olanağı.
- Sıvı sabuna kolay erişim.
- Yıkama faaliyetleri için yeterli alan.

1.2. Ergonomik Tasarım Kriterleri

Ergonomi, insan faktörlerine dayalı tasarım prensiplerini esas alır. Tasarım kriterleri şunları kapsamıştır:

- **Erişilebilirlik**: Sürücünün su tankına rahatça ulaşabilmesi için yol kenarına kolay erişim sağlayan sağ tarafta yemek dolabına yakın bir konum.
- **Kullanım Kolaylığı**: Musluk ile pratik su kullanımı ve doldurma ağzı.
- **Aksesuar Seçimi**: Sıvı sabun haznesi yakın konumda.

1.3. Malzeme Seçimi

Su tankının malzemesi; hijyen, dayanıklılık ve ağırlık faktörleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir:

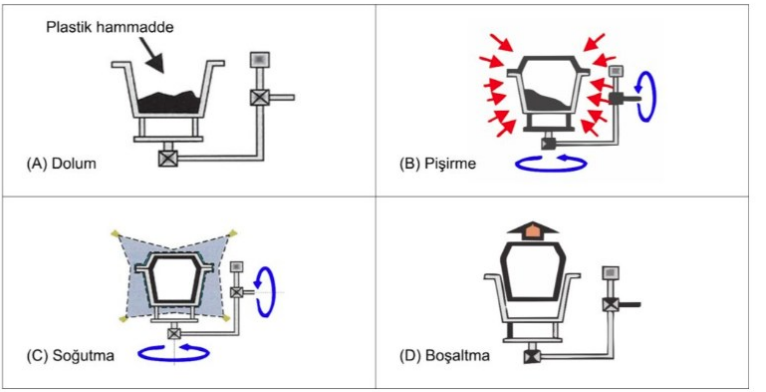
- **Paslanmaz çelik**: Hijyenik, dayanıklı ancak daha ağır.

- **Polietilen (PE)**: Hafif ve maliyet etkin.

Malzeme seçimi sırasında ağırlık/kapasite dengesi ve üretim maliyetleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlam da paslanmaz çelik olması durumunda daha basit geometride bir tasarım yapılabilecektir. Üretim metodunda kullanılması zaruri olan kaynak ve yüksek işçilik toplam maliyetleri yükseltecektir. Bu sebepler ile düşük işçilik ihtiyacı gerektiren PE malzeme seçilmiştir. PE malzeme üretim metodlarında en yaygın ve düşük maliyetli üretim olan rotasyon kalıplama modeli tercih edilmiştir.

Tablo 1 : Hammadde fiyatları

Malzeme	Birim Fiyat	Toplam Ağırlık	Toplam Fiyat
2 mm AISI 304	3 $ / kg	6 kg	24 $
3 mm PE	1,7 $ / kg	8 kg	13,6 $



Şekil 1: Rotasyon üretim basamakları
Kaynak: ankararotasyon

2. Tasarım Süreci

2.1. 3D Modelleme (Su Tankı)

Tasarım süreci, ürünün ihtiyaçlarını ve özelliklerini belirlemekle başlar. Su tankları için bu ihtiyaçlar, kapasite, malzeme, kullanım şekli ve bağlantı elemanları gibi unsurları içerir. Örneğin, bu modelde olduğu gibi bir tankın gövdesi sağlam ve dayanıklı bir yapıya sahip olmalı, aynı zamanda üretim kolaylığı sunmalıdır.

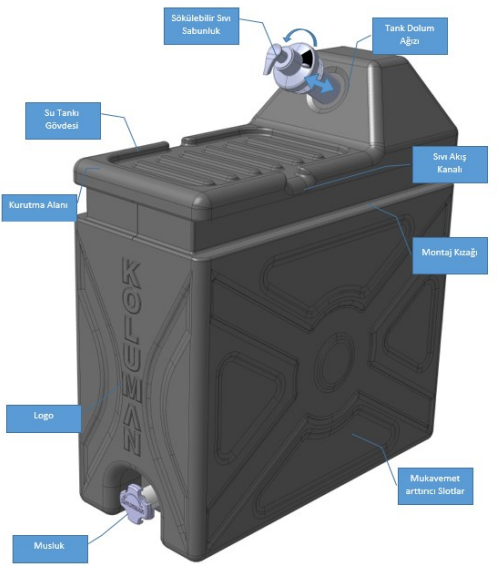
CATIA gibi parametrik modelleme araçları, ürünün geometrik detaylarının kusursuz bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Su tankı tasarımı sürecinde kullanılan temel adımlar şunlardır:

- **Geometrinin Tanımlanması:** İlk aşamada tankın temel geometrisi oluşturulur. Dikdörtgen prizma ya da silindirik bir yapı tercih edilebilir. Bu, tasarımın temelini oluşturur.Sonrasında gövdeye destek için güçlendirici

slotlar, araç üzerine montaj yapılabilmesi ve kolay demontaj için kanallar eklenmiştir.

- **Hacim ve Boşaltma İşlemleri:** Gövdenin iç hacmi, ağırlık ve malzeme tasarrufu için boşaltılarak belirlenir. Bu işlem genellikle "Shell" gibi komutlarla gerçekleştirilir. Malzeme kalınlığı 3 mm olarak belirlenerek nihai tasarıma ulaşılmıştır.
- **Bağlantı Noktaları:** Su tanklarının temel işlevlerinden biri sıvı transferidir. Bu nedenle musluk ve dolum bağlantı noktaları eklenir. Model üzerinde bu bölgeler, "Hole" komutları ile detaylandırılmıştır.
- **Ergonomik Eklentiler :** Kullanıcının sıvı sabuna erişimi için üst bölümüne çift kullanım amacı için sıvı sabunluk ve bu sabunluğun sökülmesi ile tankın doldurulmasını sağlayacak nokta oluşturulmuştur.

Şekil 2: Su Tankı Catia 3D modeli



Şekil 3: Su Tankı Üzerindeki Detaylar

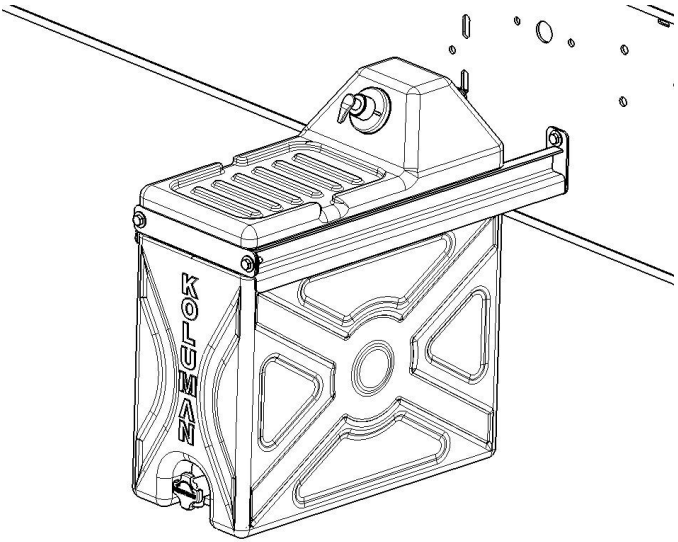
2.2. 3D Modelleme (Montaj Ekipmanları)

Su tankının tasraımları sırasında ürünün araç üzerine montajının yapılabilmesi için montaj braketlerinin tasarımları da eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

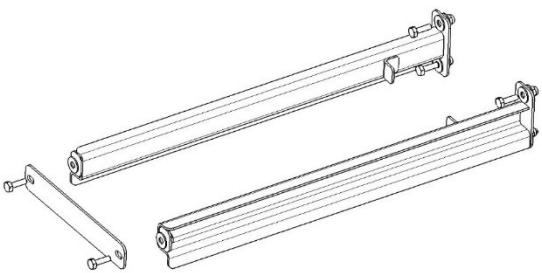
Montaj ekipmanlarının tasarımında,

- Su tankının maximum kapasite kullanımı sırasında gerekli mukavemeti sağlaması.
- Araç şasisine minimum değişiklik gereksinimi.
- Montaj faaliyeleri için özel ekipman kullanımını minimize edilmesi.
- İstenilen durumda kolayca demonte edilerek modüler kullanım sağlanabilmesi.

Kriterleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4: Su Tankı Şasi Üzerine Montaj Modeli

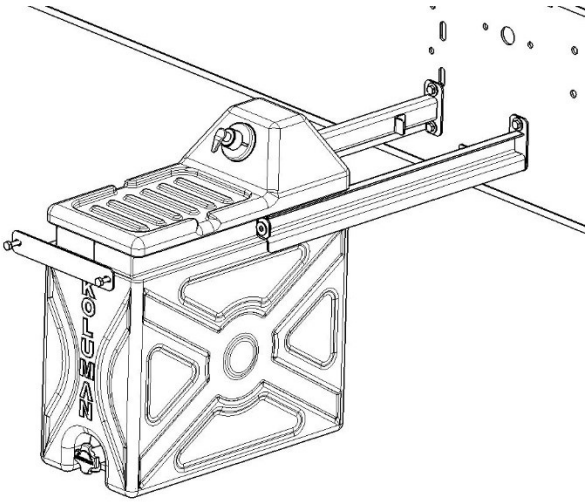


Şekil 5: Kolay montaj sağlayan kızaklama braketleri

Gerekli tasarım kriterlerine istinaden araç üzerine 4 adet delik delinerek entegre edilebilir ekipman tasarımı belirlenmiştir.

Yapılan su tankının üzerine ekstra metal insörtlerin eklenme gereksinimini ortadan kaldırmak için kızaklı bir montaj modeli geliştirilmiştir. Bu model de su tankı üzerinde oluşturulan kızaklama boşluklarından geçmeli bir yapı ile montajı sağlanmıştır(Şekil 6).

Üretim montajı tarafından özel ekipman gereksinimi de ortadan kaldırılarak standart M12 bağlantı ekipmanları ile montaj faaliyetleri planlanmıştır.



Şekil 6: Montaj Model Gösterimi

2.3. Ergonomik Kontroller

Araç üzerinde bulunan ve sürücü/kullanıcının yolculuk sırasında dinlenme molalarında kullanımı için aracın sağ tarafında gıda/yemek dolabı bulunmaktadır.

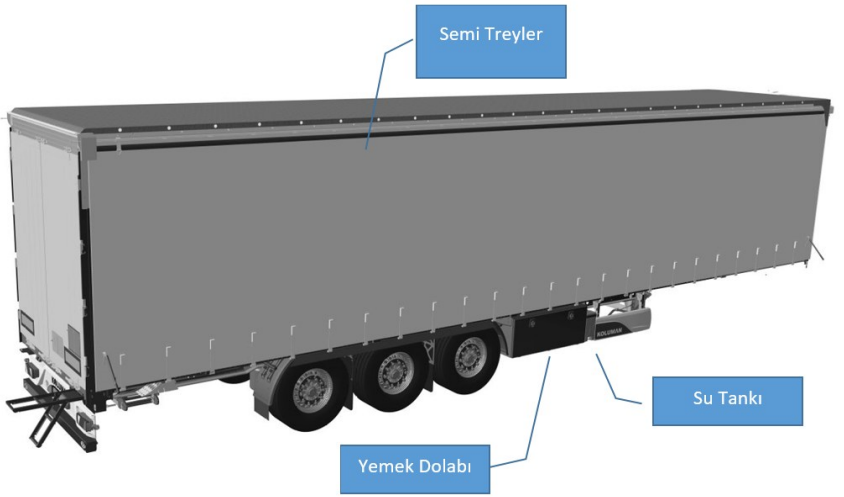
Su tankının konumlandırılması sırasında:

- Araç gidiş yönüne göre yanaşma bölgesi olan sağ tarafta olması
- Sürücünün yemek dolabı kullanım alanına yakın lokasyonda olması,

- Dolap içerisinde kullandığı bardak, tabak gibi malzemeleri kullanım sonrası yıkamasını sağlayacak şekil ve gereksinimleri sağlaması.
- Yıkanan malzemeleri bekletebileceği alana sahip olması
- En az 2 kere dinlenme sırasındaki ihtiyaçlarını karşılayacak hacimde olması.
- Yemek dolabı kullanımı sırasında kullanılan oturma modeline uygun pozisyonda bulunması.
- Herhangi bir elektrik tesisatına yakın olmaması.
- Sökülmek istendiğinde basit ekipmanlar ile sökülerek modüler olarak taşınabilmesi

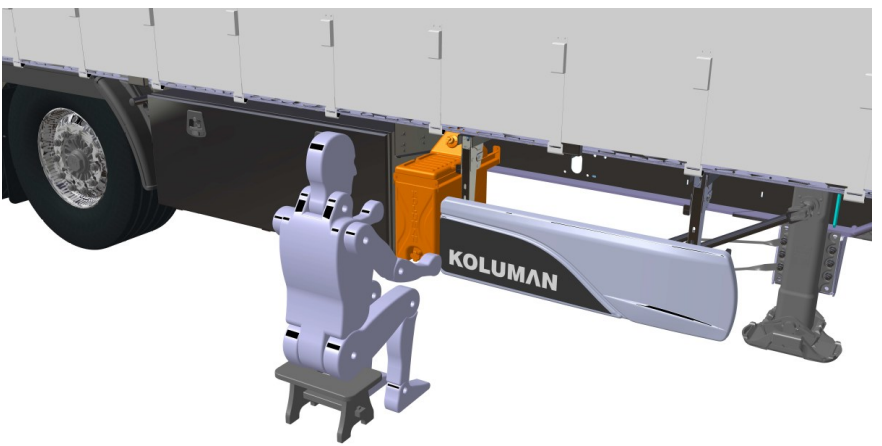
Kriterleri dikkate alınmıştır.

Bu kriterlere istinaden, araç gidiş istikametine göre aracın sağ tarafında yer alacak şekilde konumlandırılmıştır(Şekil 7). Aracın yine sağ tarafında bulunan yemek dolabına en yakın lokasyon olacak şekilde yemek dolabının sağ tarafına konumlandırılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7: Araç ve ekipman lokasyonları

Yemek dolabının sağında bulunan su tankı kullanıcının yemek dolabını kullanımı sırasında bulunduğu yükseklik ve pozisyonlara uygun şekilde montajlanmıştır(Şekil 8)



Şekil 8: Araç üzerinde konum ve kullanım

3. Prototipleme

3.1. Prototip Üretimi

Belirlenen 3D model, malzeme ve üretim metodu sonrası tedarikçi araçtırmasına gidilerek, rotasyon kalıplama metodu ile polietilen tank üreticileri araştırılmıştır. Bulunan tedarikçiye 3D modeller iletilerek üretime hazır hale getirilecek şekilde nihai tasarım sonuçlandırılmıştır.

- **Kalıp Hazırlığı :** Su tankı tasarımına uygun olarak metal bir kalıp hazırlanır. Kalıp genellikle alüminyum veya çelikten üretilir ve tankın iç ve dış yüzey özelliklerini belirler. Ürünümüzde 6 parçadan montajlı Aluminyum gövdeli kalıp üretimi yapılmıştır(Şekil 9/1).
- **Malzeme Yükleme :** Polietilen toz veya granül formda kalıba yüklenir. Malzeme miktarı, ürünün duvar kalınlığını ve kapasitesini belirler(Şekil 9/2).
- **Isıtma ve Döndürme :** Kalıp, fırına yerleştirilerek kontrollü bir şekilde ısıtılır. Bu sırada kalıp, iki eksende (yatay ve dikey) döndürülür. Isı etkisiyle polietilen eriyerek kalıbın iç yüzeyine eşit bir şekilde yayılır (Şekil 9/3).
- **Soğutma :** Kalıp, döndürme işlemi devam ederken soğutma aşamasına alınır. Soğutma genellikle hava ve su püskürtme ile gerçekleştirilir. Malzeme katılaştığında tank şekillenir ve kalıptan çıkarılır(Şekil 9/4) (Şekil 9/5).

Şekil 9: Üretim Adımları

Kalıptan çıkarılan tankın yüzeyinde gerekli kontroller yapılır. Tankın bağlantı noktaları ve musluk gibi aksesuarları monte edilir. Ürün, sızdırmazlık ve dayanıklılık testlerinden geçirilir.

Polietilen malzeme kullanılarak rotasyon kalıplama yöntemiyle üretilen su tankları, ekonomik, dayanıklı ve fonksiyonel ürünlerdir. Bu yöntem, özellikle büyük ve karmaşık ürünlerin düşük maliyetle üretilmesi gereken durumlarda öne çıkmaktadır.

Günümüzde bu tür tanklar, su depolama ihtiyacının olduğu birçok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3.2. Araç Üstü Uygulama Kontrolleri

3D modeller ile araç datalarında kontrolleri sağlanan ürün, prototip üretimi sonrası araç üzerine montajlanarak kontrolleri sağlanmıştır.

- Tankın taşıma sırasındaki hareketli yüklere dayanıklılığı.
- Sızıntı ve yapısal bozulma risklerinin gözlemlenmesi.
- UV dayanımı.
- Musluk kullanımı sonrası deformasyonlar

Gözlemlenmek üzere 180 gün süresi ile müşteriye teslim edilerek kontroller sağlanarak geribildirimler toplanmıştır.

Şekil 9: Nihai üretim ve araç üstü montaj

4. Sonuçlar

Yapılan tasarım ve ergonomik doğrulama süreçleri sonucunda, semi-treyler araçları için optimize edilmiş bir su tankı modeli geliştirilmiştir. Öne çıkan iyileştirme alanları şu şekildedir:

- **Ergonomi ve Konfor** : Tankın yerleşimi ve ergonomik tasarımı, sürücünün fiziksel yükünü azaltmış ve kullanım kolaylığı sağlamıştır.
- **Hijyen ve Dayanıklılık**: Polietilen malzeme kullanılarak hijyen standartlarına uygun, dayanıklı ve uzun ömürlü bir çözüm sunulmuştur.
- **Maliyet ve Verimlilik** : Uygun malzeme ve üretim metodları sayesinde ekonomik bir çözüm elde edilmiştir.

- **Pratiklik**: Kolay montaj ve sökülebilir tasarım sayesinde bakım ve kullanım esnasında esneklik sağlanmıştır.
- **Uzun Vadeli Performans** : 180 gün süreyle araç üzerindeki gözlemler, sızıntı ve yapısal deformasyon gibi risklerin minimize edildiğini göstermiştir. UV dayanıklılığı ve genel tasarım ömrü, kullanıcı memnuniyetini artırmıştır.

Bu çalışma, gelecekte benzer projelerde uygulanabilecek bir model sunarak sektör için değerli bir kaynak oluşturmuştur.

Kaynaklar

R.J. Crawford, Rotational Molding of Plastics, Wiley, New York (1992).

Tüfekçioğlu Erkan, Akif Yamalı, Erden Markoviç, Haluk Koltuksuz, Sabri Özerdoğan, Polietilen Ve Plastiklerin İşleme Teknolojileri El Kitabı Aliağa Petrokimya Sanayi Ve Tic. A.Ş.

Ankara Rotasyon. Rotasyon Plastik Üretimi Nedir ? (15.12.2024 tarihinde https://www.ankararotasyon.com/rotasyon-plastik/ adresinden ulaşılmıştır).

Doruk Plastik. Rotasyon Üretim Aşamaları (10.12.2024 tarihinde https://dorukplastik.com/rotasyon-uretim-asamalari/ adresinden ulaşılmıştır).

Teşekkür

Bildirinin yazımına değerli görüşleri ile katkı sunan iş arkadaşım Hakan Görgün yöneticilerimiz Tuğba Gedik ve Erhan Biçer'e teşekkürlerimi sunarım. Tüm araştırma/geliştirme süreçlerini destekleyen Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş. ne teşekkürlerimi sunarım.

BÖLÜM XVIII

Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçların CO_2 Salınımı Açısından İncelenmesi

Mustafa ÇAVLI[1]
Eylem YILMAZ ULU[2]

Giriş

Ulaşım ve lojistik sektörü günümüzde CO_2 salınımlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu yüzden sürdürülebilirlik açısından en hızlı çözüme ulaştırılması gereken alanlardan biridir.

Yakıt Türlerine Göre Motorlu Araçlar

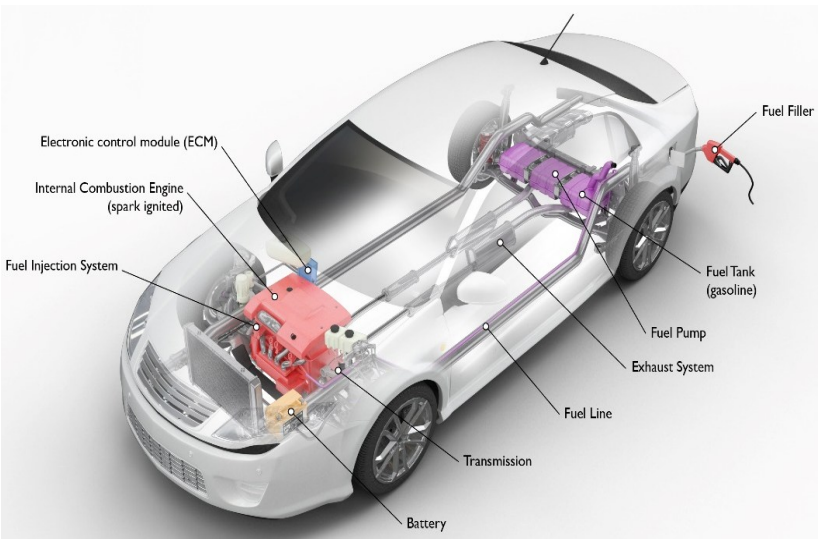
Taşıtlarda birçok farklı yakıt türü bulunmaktadır. Sürdürülebilirlik ve karbon salınımı yakıt türlerini karşılaştırmada dikkate alınması gereken konulardır. Bu konular göz önünde bulundurulduğunda yakıt türlerini temel olarak içten

[1] Mustafa ÇAVLI, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,Otomotiv Müh. Böl., Denizli/TÜRKİYE, Orcid: 0009-0006-8356-8575, mcavli22@posta.pau.edu.tr
[2] **Eylem YILMAZ ULU**, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,Otomotiv Müh. Böl., Denizli/TÜRKİYE, Orcid: 0000-0001-6257-9845, eyilmaz@pau.edu.tr

yanmalı motorlar, hibrit araçlar, elektrikli araçlar ve hidrojen yakıt pilli elektrikli araçlar olmak üzere 4 alt başlığa ayırabiliriz.

1. İçten Yanmalı Motorlu Araçlar

İçten yanmalı motorlar otomobillerin icadından günümüze kadar yaygın bir şekilde kullanılmıştır ancak içten yanmalı motorların termal verimleri %25 ile %30 arasında değişmektedir bu değer elektrikli araçların verimlerine nazaran düşük bir değerdir. Bunun haricinde günümüzde CO_2 salınımları göz önünde bulundurulduğunda, kara taşıtları arasında CO_2 salınımı en yüksek yakıt türüdür bu yüzden içten yanmalı motora sahip araçların günümüzde sürdürülebilirlik açısından bir geleceği olması söz konusu değildir [1, 30].



Şekil 25 İçten Yanmalı Motora Sahip Bir Araç [3]

İçten yanmalı motorlar yakıt olarak benzin, dizel, doğalgaz ve biyolojik yakıtlar gibi birçok yakıt kullanmaktadır. Ancak bizim inceleyeceğimiz yakıt türleri benzin ve dizeldir.

1.1 Benzinli Araçlar

Benzinli araçlar geçmişten günümüze kadar otomobillerde en çok kullanılan motor türüdür ancak son zamanlarda CO_2 salınımını düşürmek için, elektrikli ve hibrit araçların popülerleşmesiyle satış rakamları artarken benzinli araçların üretim sayısı neredeyse yarı yarıya düşmüştür [1, 2].

1.2 Dizel Araçlar

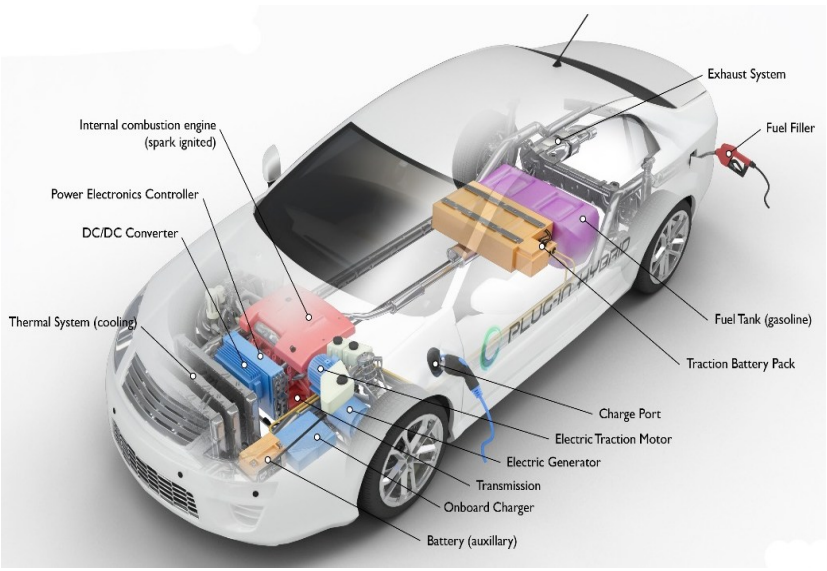
Dizel araçlar otomotiv sektöründe büyük rol sahibidir. Bunun sebebi dizel araçların benzinli araçlara göre daha verimli olmasıdır. Dizel araçlar bu avantajı sayesinde iş makinelerinde, ağır vasıta araçlarda ve bunlar gibi ağır yüke maruz bırakılan birçok alanda kullanılmaktadır. Dizel araçlar en çok CO_2 salınımı yapan araç türüdür. Bundan dolayı birçok Avrupa Birliği ülkesi ve otomotiv üreticisi önümüzdeki 20 yıl içerisinde dizel araç üretimini sonlandıracağını açıklamıştır [1, 4, 5].

2. Hibrit Araçlar

Hibrit araçlar içten yanmalı motordan elde edilen gücün haricinde araçtaki ikincil bir güç kaynağı olarak elektrik motoruna ve elektrik motorunu besleyecek bataryaya sahip araçlardır. Hibrit araçlar otomotiv sektöründe daha öncesinde spor otomobillere güç desteği için kullanılmasına rağmen 21. Yüzyıl itibariyle daha verimli ve CO_2 salınımı daha düşük araçlar için kullanılması yaygınlaşmıştır. Bu alanda otomotiv üreticileri uzun yıllardır çalışmalar yürütmektedir. Hibrit Araçları genel olarak plug-in hibrit ve hafif hibrit olmak üzere sınıflandırılabilir [2, 6].

2.1 Plug-in Hibrit Araçlar

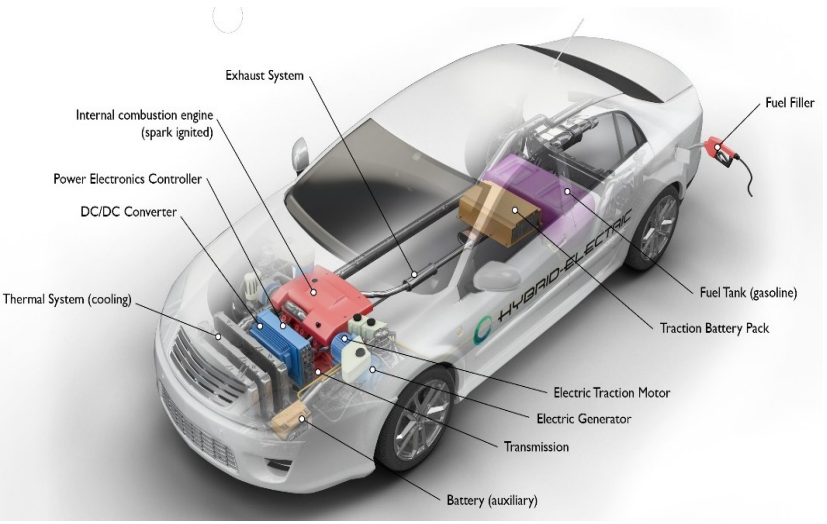
Plug-in hibrit araçlar içten yanmalı motorun dışında bataryası şarj edilen ve düşük hızlardaki hareketi elektrik motoruyla sağlayan bir sisteme sahiptir. Dışardan şarj edilmesinin haricinde çoğu plug-in hibrit araçta rejeneratif frenleme sistemiyle enerji kazanımı vardır. Bu sistem aracın verimliliğine etki etmektedir. Plug-in hibrit araçlar içten yanmalı motora sahip olmasına rağmen düşük hızlarda elektrikli araç deneyimi sunmaktadır ancak en büyük sorunu bataryasının gücü bittiğinde yakıt tüketiminin ve CO_2 salınımının artmasıdır, bunun sebebi elektrik motorunun ve bataryanın ekstra ağırlığıdır. Bu yüzden çoğu kullanıcının birincil tercihi değildir [8].



Şekil 2 Plug-in Hibrit Bir Araç [7]

2.2 Hafif Hibrit Araçlar

Hafif hibrit araçlar içten yanmalı motorun dışında bataryaya sahip araçlardır. Plug-in hibrit araçlardan farkı bataryalarının daha küçük olması ve dışardan bir şarj işleminin gerçekleşmemesidir. Hafif hibrit araçlar bataryalarını rejeneratif frenleme sistemini kullanarak elde ettiği elektrik enerjisiyle doldurur. Bu sayede araç ilk kalkışta ve düşük hızlardayken elektrik motorunu kullanılır. Hafif hibrit araçlar kullanıcı kolaylığı ve yakıt tüketimi açısından ön plana çıkmaktadır [9].

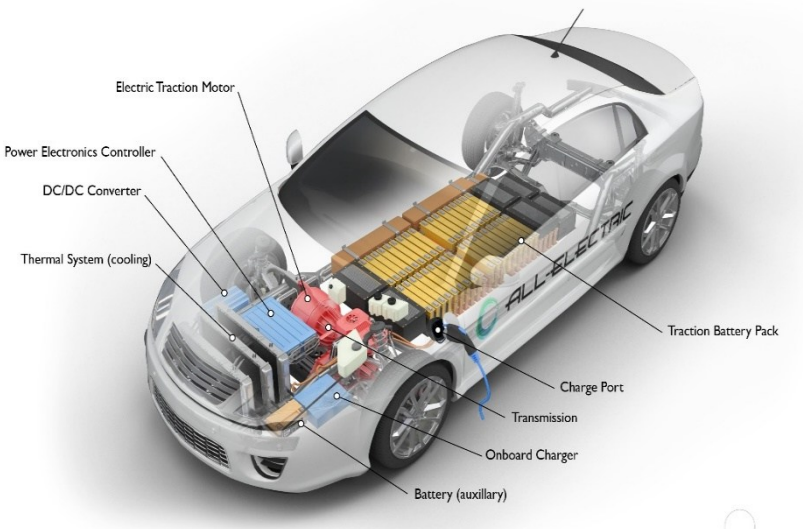


Şekil 3 Hafif Hibrit Bir Araç [29]

3. Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçların güç kaynağı sadece bataryadır, bunun haricinde çoğu elektrikli araç rejeneratif frenleme sistemiyle enerji kazanımı sağlamaktadır. Elektrikli araçlar son yıllarda oldukça popülerleşmiş ve her geçen gün dünyanın dört bir yanında satış rakamları artmaktadır. Elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre ivmelenmesinin daha iyi olması,

bataryanın aracın tasarımındaki konumu sayesinde ağırlık merkezini aşağıya çekmesinden dolayı daha iyi bir yol tutuşu sağlamaktadır. Günümüzde kullanıcıların araçlarında istedikleri teknolojik özellikler araç satışlarında etkili olmaktadır, çoğu elektrikli araç içten yanmalı bir araca göre kullanıcıya daha fazla teknolojik deneyim sunmaktadır. Elektrikli araçların en büyük dezavantajları uzun şarj süreleri ve her hava koşulunda verimli olarak çalışmamasıdır. Ancak çevreci olarak lanse edilen elektrikli araçların ekosisteme içten yanmalı araçlardan daha fazla zarar verdiği göz ardı edilemez bir gerçektir bunun birçok farklı sebebi bulunmaktadır [10].



Şekil 4 Elektrikli Araç [11]

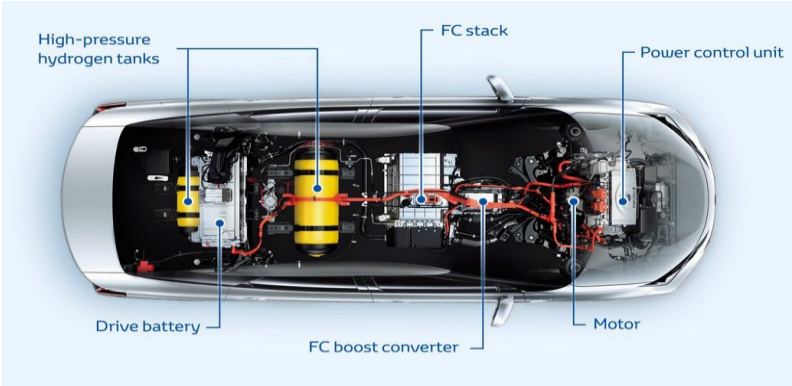
Günümüzde çoğu elektrikli aracın bataryası lityum temellidir. Lityum temelli bataryalar çevreci olarak bilinmekte fakat arka

planda doğaya çok büyük zararlar vermektedir. 2021 yılında 540 bin metrik ton lityum üretilmiştir ve 2030 yılına kadar tahmini olarak 3 milyon metrik ton lityum üretileceği öngörülmektedir. Lityumun ana üretici ülkeleri Şili, Arjantin, Çin ve Avusturalya'dır. Lityum geniş bir coğrafyada üretildiği ve dünyanın dört bir yanına taşındığı için lojistiği sırasında çevreye büyük zararlar vermektedir. Lityum üretiminde yüksek miktarda su kullanılmaktadır ve çevreye zehirli atıklar salmaktadır. Bu yüzden lityum madenleri, yakınında bulunan yaşam alanlarına büyük zarar vermektedir [12].

Elektrikli araçların bir diğer problemi lityum temelli bataryaların geri dönüşümünün sağlanamamasıdır. 2030 yılına kadar elektrikli araç satışının 30 milyonu geçeceği öngörülmektedir. Bu durumda kullanım ömrü bitmiş bataryalar için birbirinden kötü iki senaryo bulunmaktadır. Bunlardan biri ömrü bitmiş bataryaların toprağa gömülmesi bir diğeri ise bataryaların uzay çöpçülüğü ile atılmasıdır. Ortalama 15 ila 20 yıllık ömrü olan elektrikli araç bataryalarının çok yakın gelecekte büyük bir çevresel felakete sebep olacağı beklenmektedir [13].

4. Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçlar

Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçlar prensip olarak hibrit bir araçtır. Yakıt pilleri, yakıt tankındaki hidrojeni kullanarak elektrik enerjisi üretir ve bu enerjiyi elektrik motoruna iletir. Bu aşamada bir egzoz emisyonu oluşmaz ve egzozdan sadece su atılır. Araçta hibrit araçlarda bulunduğu üzere bir batarya bulunur fakat bu batarya elektrikli araçların bataryasına göre daha küçüktür [14].

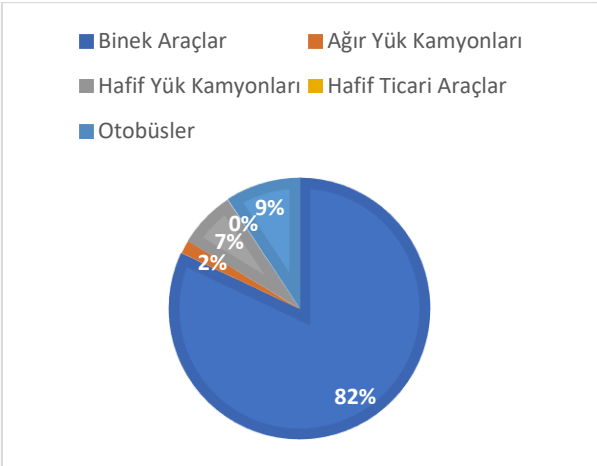


Şekil 5 Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araç [15]

Hidrojen yakıt pilleri ilk olarak NASA tarafından uzay araçlarında güç kaynağı olarak kullanılmıştır. İlk hidrojen yakıt pilli elektrikli araç tasarımı 1966 yılında GM tarafından yapılmıştır. Ancak seri üretim ilk hidrojen yakıt pilli elektrikli araç 2008 yılında Honda tarafından üretilmiştir. Aynı yıllarda birçok farklı otomotiv üreticisi bu alan üzerine konsept tasarımlar yapmıştır ancak günümüze kadar seri üretim halinde gelen model sayısı sınırlıdır. Bunun en büyük sebeplerinden biri yetersiz altyapı, çoğu otomotiv markasının elektrikli ve hibrit araçlara yatırım yapmasının yanı sıra hidrojen ve yakıt pillerinin üretimindeki maliyetlerdir [16, 17, 18].

Binek otomobillerin yanı sıra hidrojen yakıt pilleri otobüslerde, kamyonlarda, ağır vasıta araçlarda ve iş makineleri gibi çeşitli taşıtlarda kullanımına uygundur. Bunun sebebi

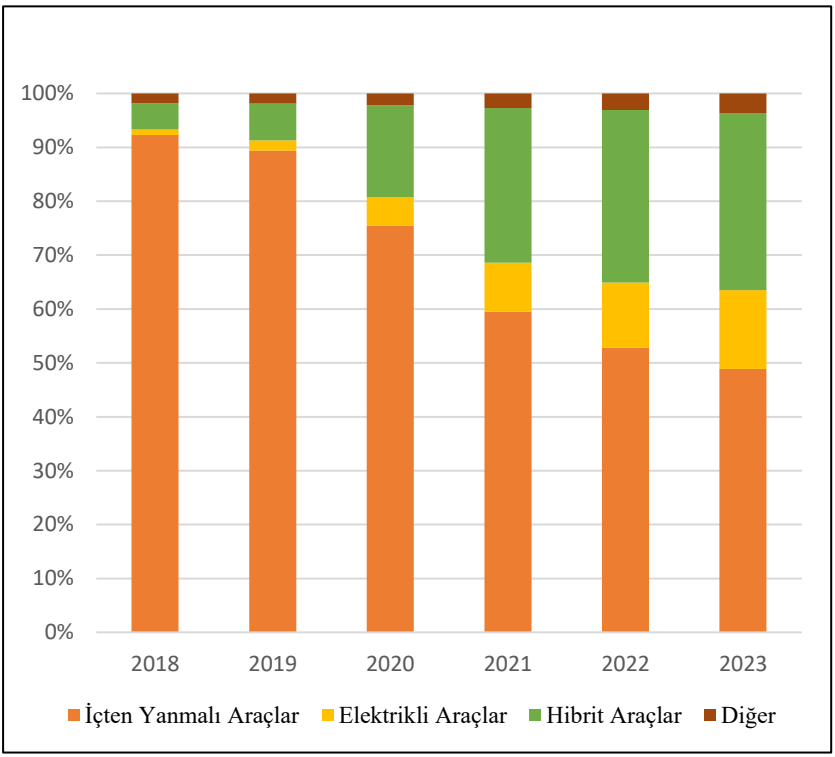
elektrik motorunun yüksek tork değerine sahip olmasıdır. Elektrikli araçların bu alanda kullanıma uygun olmamasının sebebi uzun şarj süreleridir. Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçlarda ise bu sorun hızlı yakıt ikmali sayesinde ortadan kalkmaktadır [19].



Grafik 1 - Türlerine Göre Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araç Satış Grafiği [20]

Grafik 1 incelendiğinde binek araçların, Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araç pazarında büyük pay sahibi olduğu görülmektedir. Ancak günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte hidrojen yakıt pilli elektrikli araçların, otobüs ve kamyon gibi ağır vasıtalarda da ivme kazandığı görülmektedir [20].

Yakıt türlerinin karşılaştırması birçok farklı kriteri göz önünde bulundurarak yapılması gerekmektedir. Bunlardan en önemlisi çağımızın en büyük problemlerinden biri olan çevre kirliliğidir.



Grafik 2 - 2018-2023 Yılları Arasında Avrupa Birliğindeki Otomobil Satışlarının Yakıt Türlerine Göre Dağılımı [2]

Grafik 2 incelendiğinde benzinli ve dizel araçların satışında büyük bir düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi içten yanmalı motorlara sahip araçların emisyon değerlerinin yüksek olmasının yanı sıra hükümet teşvikleridir. Benzinli ve dizel araçların aksine hibrit ve elektrikli araç satışının arttığı gözlenmektedir. Bu artış, gelişen batarya teknolojileriyle maliyetlerin düşmesi ve elektrikli araç altyapısının gelişmesiyle ilişkilendirilmektedir [2].

CO_2 salınımının yaklaşık %25 i ulaşım sektöründen kaynaklanmakta ve bunun büyük bir kısmını fosil yakıtlar

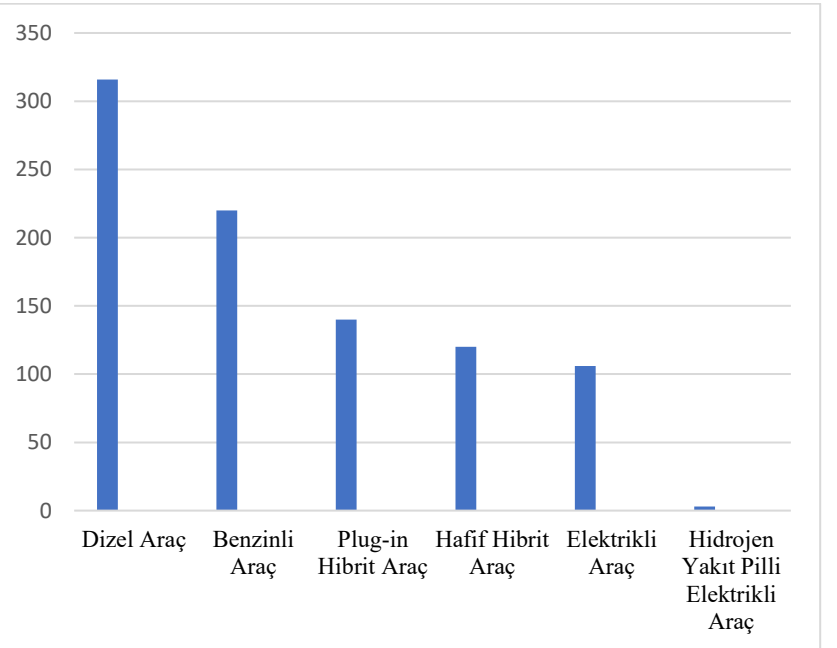
oluşturmaktadır. Bu veri, yakıt türlerinin sebep olduğu CO_2 salınımının önemini vurgulamaktadır. Kyoto Protokolü ile tüm dünya ortak bir şekilde çevre sorunlarını çözüme kavuşturmak istemektedir [21, 22].

Günümüzde en çok karbon salınımını içten yanmalı motorlara sahip araçlar yapmaktadır. En yüksek salınım kilometre başına yaklaşık 316,28 gram CO_2 salınımla dizel araçlara aittir. Benzinli araçlar ise kilometre başına yaklaşık 220,89 gram CO_2 salınımı yapmaktadır. Benzinli araçlar dizel araçlara göre daha düşük bir karbon salınım değerine sahip olmalarına rağmen diğer yakıt türleriyle kıyaslandığında bu değerler yüksek kalmaktadır [1].

Hibrit araçlar, içten yanmalı bir motora sahip olmalarına rağmen düşük bir CO_2 salınımı değerine sahiptir. Plug-in hibrit bir araç şarj edildiği taktirde km başına ortalama 100 gram CO_2 salınımı yapmaktadır. Fakat dışardan bir şarj olmadığı sürece km başına ortalama 185 gram CO_2 salınımı yapmaktadır. Bunun en büyük sebebi aracın elektrik motoruna güç sağlayan bataryanın şarjı bittiğinde araca, bataryanın ve elektrik motorunun ekstra ağırlık katmasıdır. Hafif hibrit bir araç km başına ortalama 120 gram CO_2 salınımı yapmaktadır. Bu değer dışardan herhangi bir şarj işlemi olmadan hem yakıt tüketiminin düşürüldüğünü hem de CO_2 salınımının azaltıldığını göstermektedir. Bu veriler doğrultusunda hibrit araçların yakıt tüketimi ve CO_2 salınımı açısından avantajlı olduğu görülmektedir [23, 24].

Elektrikli araçlar prensip olarak sıfır CO_2 salınımıyla çalışmaktadır. Ancak günümüzde elektrik ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan elde edildiği için pratikte bu değeri yakalamak imkansızdır. Avrupa'da bir elektrikli araç kilometre başına ortalama 106 gram CO_2 salınımı yapmaktadır buda içten yanmalı ve hibrit araçlara göre düşük bir değerdir [25].

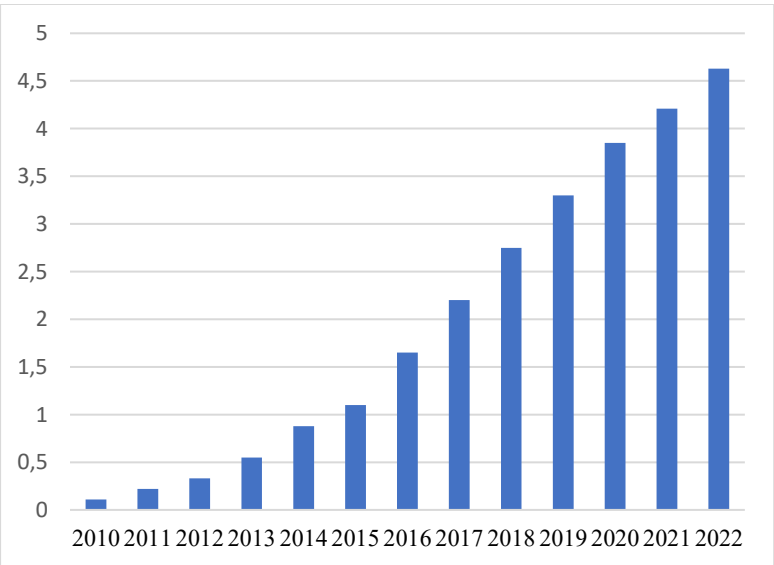
Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçların CO_2 salınımı, üretilen hidrojenin üretim türüne göre değişiklik göstermektedir. Fakat tamamen yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojeni yakıt olarak kullanan bir aracın CO_2 salınımı sıfırdır. Bu da Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçları sürdürülebilirlik için en uygun çözüm olarak ön plana çıkarmaktadır. Günümüzde çoğu enerji firması yeşil hidrojen üretimi konusunda yatırımlar yapmaktadır [26].



Graik 3 - Yakıt Türlerine Göre Araçların Ortalama CO_2 Salınımı [1, 23, 24, 25, 26]

Grafik 3 incelendiğinde Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçlar ve elektrikli araçların daha az CO_2 salınımına sahip olduğu görülmektedir. Aralarındaki en büyük faktör bataryadır. Elektrikli araçlarda bulunan büyük bataryalar bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Bunun sebebi lityum temelli bataryaların geri

dönüştürülememesidir. Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçların böyle bir sorunu yoktur, bunun yanı sıra elektrikli araçların bir diğer problemi şarj süresidir. Binek otomobillerde bu sorun göz ardı edilse bile otobüs, kamyon gibi ticari araçlarda bu sorun göz ardı edilemez ama Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçlarda bu sorun ortadan kalkmıştır. Sebebi; içten yanmalı motorlu bir araca nasıl yakıt ikmali yapılıyorsa Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli araçlara da aynı şekilde hidrojen ikmali yapılabilmesidir. Bu çözüm elektrikli aracın şarj süre sorununu ve içten yanmalı motora sahip bir aracın CO_2 salınımı sorununu ortadan kaldırarak olabildiğince çevreci bir çözüm sunmaktadır.



Grafik 4 - Dünya Genelinde Satılan Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçların Oranı [27]

Graik 4 incelendiğinde Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araç satışlarının arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi gelişen yakıt

pili teknolojileri, hükümet destekleri ve otomotiv üreticilerinin hidrojen yakıtlı araç satışlarındaki büyük kampanyalarıdır. Ayrıca Uluslararası Enerji Ajansı 2050 yılına kadar Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araç satışlarının pazarda yaklaşık %17'lik bir paya sahip olacağını öngörmektedir [27, 28].

Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, bir yakıtın kimyasal enerjisini, genellikle oksijen olmak üzere oksitleyici bir madde ile kimyasal bir reaksiyon yoluyla doğrudan elektriğe dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Mekanik güç üretmek için yakıt kullanan geleneksel içten yanmalı motorların aksine, yakıt hücreleri temiz, verimli ve sessiz bir şekilde elektrik üretir. Yakıt hücrelerinin temel faydaları arasında yüksek verimlilik, düşük çevresel etki ve hidrojen, metan ve metanol gibi farklı yakıtların kullanımında esneklik bulunmaktadır. Bu cihazlar, taşınabilir elektronik cihazlardan sabit güç üretimi ve ulaşım sistemlerine kadar değişen uygulamalarla sürdürülebilir enerji sistemleri için giderek önem kazanmaktadır.

Yakıt pilleri, kullandıkları elektrolit türüne göre Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMFC'ler), Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC'ler) ve Alkali Yakıt Hücreleri (AFC'ler) gibi kategorilere ayrılır. Bunlar arasında PEMFC'ler, hızlı başlatma süreleri, kompakt tasarımları ve nispeten düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleri nedeniyle ulaşımda en yaygın kullanılanlardır [31].

Hidrojen Yakıt Pillerinin Çalışma Prensibi

Hidrojen yakıt hücreleri, özellikle de PEMFC'ler, elektrik, su ve ısı üretmek için hidrojen ve oksijen arasında kimyasal bir reaksiyonu gerçekleştirerek çalışır. Temel prensip, elektron ve

protonların hidrojen moleküllerinden ayrılmasını içerir. Bu süreç üç ana bileşen aracılığıyla gerçekleşir: anot, katot ve elektrolit membran.

Anot; Yakıt pilinde anota hidrojen gazı (H_2) girişi sağlanır. Genellikle platin olan bir katalizör, hidrojen moleküllerini protonlara (H^+) ve elektronlara (e-) ayırır. Protonlar elektrolit membrandan geçerken, elektronlar harici bir devre üzerinden geçerek bir elektrik akımı oluşturur.

Elektrolit Membran; Bu katman sadece protonların katoda geçmesine izin vererek elektronların elektrik üretmek için harici olarak geçişini sağlar. Elektrolit membran tipik olarak iyonları iletirken gazlara karşı geçirimsiz olan bir polimer malzemedir.

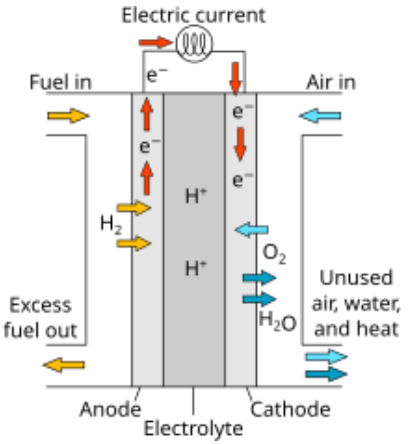
Katot; Yakıt pilinde katoda oksijen gazı (O_2) girişi sağlanır ve burada membrandan gelen protonlar ve dış devreden gelen elektronlarla reaksiyona girerek çıkış ürünü olarak su (H_2O) oluşturur.

Bir hidrojen yakıt pilindeki reaksiyonlar şu şekildedir:

Anot reaksiyonu $\Rightarrow H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katot Reaksiyonu $\Rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Genel Reaksiyon $\Rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{Elektrik} + \text{Isı}$



Şekil 6 Proton Değişim Membranın Çalışma Prensibi [36]

Şekil 6'da çalışma prensibi görülen reaksiyon ekzotermiktir ve üretilen elektrik cihazlara veya araçlara güç sağlamak için kullanılırken, ısı da yardımcı amaçlar için kullanılabilmektedir [32, 33].

Yakıt Pillerinin Otomobillere Entegrasyonu

Tipik bir Yakıt Pilli Elektrikli Araç (FCEV) bir hidrojen depolama tankı, bir yakıt hücresi yığını ve bir elektrik motorundan oluşur. Yakıt hücresi yığını motora güç sağlayan elektriği üretirken, fazla elektrik yardımcı güç ihtiyaçları için bir bataryada depolanır.

Hidrojen Yakıt Pilli Bir Araçtaki Temel Bileşenler

Hidrojen Yakıt Tankı: Sıkıştırılmış hidrojen, güvenlik ve verimlilik için tasarlanmış yüksek basınçlı tanklarda genellikle 700 bar'da depolanır.

Yakıt Pili Yığını; Aracın merkezinde yer alan yığın, hidrojeni elektriğe dönüştürür.

Batarya ve Güç Elektroniği; Bu bileşenler enerji akışını yöneterek hızlanma sırasında elektrik motorunun yeterli gücü almasını ve yavaşlama sırasında fazla enerjinin depolanmasını sağlar.

Termal Yönetim; Verimli çalışmayı sağlamak için yakıt hücresi yığınının ve diğer bileşenlerin sıcaklığını düzenleyen sistemler uygulanmaktadır.

FCEV'ler, bataryalı elektrikli araçlara (BEV'ler) kıyasla uzun sürüş menzilleri ve hızlı yakıt ikmali süreleri sunarak onları özellikle ağır hizmet ve uzun mesafe uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Ancak hidrojen altyapısının geliştirilmesi, üretim maliyetleri ve hidrojen üretiminin çevresel etkileri açısından zorluklar devam etmektedir [34, 35].

Sonuç

Hidrojen yakıt pilleri, içten yanmalı motorlara ve diğer yakıt türlerine sürdürülebilir bir alternatif olarak araçlarda giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bataryalı elektrikli araçlardan üstün tarafları ise sürüş menzillerinin daha uzun olması ve yakıt ikmali için daha kısa süreye ihtiyaç duyulmasıdır. Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında Hidrojen Yakıt Pilli Elektrikli Araçların CO_2 salınımı açısından çevreci, uzun menzil sürüş imkanı sunması açısından tercih edilebilir araçlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

U.S. Environmental Protection Agency. (t.y.). **Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle**. https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle

European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). (t.y.). **New EU car sales by power source**. ACEA. https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/

U.S. Department of Energy. (n.d.). How do gasoline cars work? Alternative Fuels Data Center. Retrieved December 25, 2024, from https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-gasoline-cars-work

Ricochet Fuel. (n.d.). Diesel vs. Gasoline: Which Engine Type is Best for Your Needs? https://www.ricochetfuel.com/blog/diesel-vs-gasoline-which-engine-types-is-best-for-your-needs/

European Parliament. (2022, October 20). EU ban on sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained

Chauhan, R., & Patel, P. (2022). Carbon emission reductions in hybrid cars. International Journal of Research Publication and Reviews, 4(11), 1234–1240

U.S. Department of Energy. (n.d.). How do plug-in hybrid electric cars work? Alternative Fuels Data Center. Retrieved December 25, 2024, from https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work

Mock, P., & Tietge, U. (2020). Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO_2 emissions. International Council on Clean Transportation.

Posada, F., Bandivadekar, A., & Yang, Z. (2022). Real-world emissions of mild hybrid vehicles in Europe. The International Council on Clean Transportation.

McKinsey & Company. (2022). The race to decarbonize electric-vehicle batteries. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-race-to-decarbonize-electric-vehicle-batteries

U.S. Department of Energy. (n.d.). How do all-electric cars work? Alternative Fuels Data Center. Retrieved December 25, 2024, from https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work

OBN. (t.y.). **Lityum ve doğa**. Başlangıç Noktası. https://baslangicnoktasi.org/lityum-ve-doga/

Ekonomist. (t.y.). Dünyada bir süre sonra lityum sıkıntısı olabilir mi? **Ekonomist**. https://tls.tc/g2R5i

De Wolf, D., & Smeers, Y. (2023). Comparison of battery electric vehicles and fuel cell vehicles. World Electric Vehicle Journal, 14(9), 262.

Boron Extrication. (2015, October 21). Toyota Mirai fuel cell vehicle. Boron Extrication. Retrieved from https://www.boronextrication.com/2015/10/21/toyota-mirai-fuel-cell-vehicle/

Qasem, N. A. A. (2024). A recent comprehensive review of fuel cells: History, types, and applications. International Journal of Energy Research, 48(1), 123-145. doi:10.1155/2024/7271748

Hydrogen Cars Now. (n.d.). 1966 GM Electrovan - First hydrogen fuel cell vehicle. https://www.hydrogencarsnow.com

Mac's Motor City Garage. (2018, December 27). Inside the 1966 GM Electrovan, fuel cell pioneer. https://www.macsmotorcitygarage.com/video-inside-the-1966-gm-electrovan-fuel-cell-pioneer

Oak Ridge National Laboratory. (2023). Heavy-duty vehicles an ideal entry into hydrogen fuel cell use. https://www.ornl.gov

Soleimani, A., Hosseini Dolatabadi, S. H., Heidari, M., Pinnarelli, A., Mehdizadeh Khorrami, B., Luo, Y., Vizza, P., & Brusco, G. (2024). Progress in hydrogen fuel cell vehicles and up-and-coming technologies for eco-friendly transportation: An international assessment. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 7, 3153–3172. https://doi.org/10.1007/s41939-024-00482-8

Our World in Data. (t.y.). **Cars, planes, trains: Where do CO_2 emissions from transport come from?** https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport

Xu, Y., Geelen, D., & Zhao, Y. (2018). Transport and distribution of auxin at the plasma membrane and through the cytoplasm. Unpublished manuscript.

International Council on Clean Transportation. (2022). **Real-world plug-in hybrid electric vehicle use and emissions**. https://theicct.or/pu/rea-world-phev-use-jun22/

Le Monde. (2024, 15 Ekim). Les petites voitures hybrides: Un succès inattendu. **Le Monde**. https://www.lem.f/e/article/2024/10/15/les-petites-vo-hybrides-un-succes-in.html

European Environment Agency. (2023, 27 Ekim). **New data: CO_2 emissions of new cars and vans**. European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/new-data-co2-emissions-of-new-cars-and-vans

Wang, M., Elgowainy, A., Han, J., & Lee, D. (2021). Comparative analysis on carbon footprint of hydrogen fuel cell and battery electric vehicles based on the GREET model. IEEE Xplore.

Zhang, Y., et al. (2023). **Hydrogen fuel cell vehicles: Opportunities and challenges**. Sustainability, 15(15), Article 11501.

Yang, T., Qiu, X., & Jiang, Y. (2019). Research on the performance of cooling modules for supercomputer servers. Applied Sciences, 9(11), 2296.

U.S. Department of Energy. (n.d.). How do plug-in hybrid electric cars work? Alternative Fuels Data Center. Retrieved December 25, 2024, from https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work

Dergipark. (n.d.). Egzoz emisyonlarının çevresel etkileri.

Barbir, F. (2013). PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Academic Press.

O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). Fuel Cell Fundamentals. Wiley.

Larminie, J., & Dicks, A. (2003). Fuel Cell Systems Explained. Wiley.

Eberle, U., Felderhoff, M., & Schüth, F. (2009). Chemical and physical solutions for hydrogen storage. Angewandte Chemie International Edition, 48(36), 6608-6630.

Andò, E., et al. (2020). Advances in hydrogen production, storage, and utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 130, 109933.

Wikipedia contributors. (n.d.). Proton exchange fuel cell diagram [SVG illustration]. In Wikipedia. Retrieved December 25, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/File:Proton_Exchange_Fuel_Cell_Diagram.svg

BIDGE