

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

TASARIM, ANALİZ VE AKILLI SİSTEMLER



Editör: **HASAN KÖTEN**



BİDGE Yayınları

**Makine Mühendisliğinde Güncel Yaklaşımlar: Tasarım, Analiz
ve Akıllı Sistemler**

Editör: HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-8995-51-0

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-03-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Makine Mühendisliğinde Güncel Yaklaşımlar: Tasarım, Analiz ve Akıllı Sistemler

Önsöz

Makine mühendisliği, teknolojik gelişmelerin hız kazandığı günümüzde sürekli olarak dönüşen ve genişleyen bir disiplin haline gelmiştir. Artan endüstriyel ihtiyaçlar, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve dijitalleşme gibi kavramlar, mühendislik uygulamalarında daha yenilikçi, akıllı ve entegre çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, klasik mühendislik yaklaşımlarının modern analiz yöntemleri, sayısal modelleme teknikleri ve veri odaklı sistemlerle birleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kitap, makine mühendisliğinin farklı alt alanlarında yürütülen güncel çalışmaları bir araya getirerek, hem teorik hem de uygulamaya yönelik kapsamlı bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Kitapta yer alan bölümler; yapısal analiz, akışkanlar mekaniği, turbomakinalar, kestirimci bakım sistemleri, sürdürülebilir motor teknolojileri ve tersine mühendislik gibi farklı konuları kapsamaktadır. Bu çeşitlilik, makine mühendisliğinin multidisipliner yapısını ortaya koymakta ve farklı uzmanlık alanlarının bir arada değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Kitapta, kanat yapısal elemanlarında boşaltma geometrilerinin mekanik davranışa etkisi gibi ileri düzey yapısal analiz çalışmaları yer almakta; bunun yanı sıra santrifüj kompresör tasarımı ve CFD tabanlı performans değerlendirmeleri ile akışkanlar mekaniği alanındaki güncel yaklaşımlar ele alınmaktadır. Ayrıca, IoT tabanlı kestirimci bakım sistemleri kapsamında rulman arızalarının titreşim analizi ile belirlenmesi gibi endüstriyel uygulamalar, mühendislikte dijital dönüşümün önemini vurgulamaktadır. Sürdürülebilir motor teknolojileri kapsamında yağ ve yakıt katkılarının performans üzerindeki etkileri incelenirken, tersine mühendislik süreçlerinde kullanılan yazılım entegrasyonları ve sapma analizleri de detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Bu kitap, lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar ve mühendislik uygulamalarıyla ilgilenen profesyoneller için hem bir başvuru kaynağı hem de güncel gelişmeleri takip edebilecekleri bir rehber niteliği taşımaktadır. Sunulan çalışmalar, teorik bilgi ile pratik uygulamalar arasında bir köprü kurarak, mühendislik problemlerine yenilikçi çözümler geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Sonuç olarak, bu eser makine mühendisliğinin güncel yönelimlerini, teknolojik dönüşümünü ve disiplinler arası etkileşimini yansıtan bir çalışma olarak hazırlanmıştır. Kitabın, alandaki araştırmacılara ve uygulayıcılara ilham vermesi ve yeni çalışmalara zemin hazırlaması en büyük temennimizdir..

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

İÇİNDEKİLER

TEK KADEMELİ SANTRİFÜJ KOMPRESÖRÜN TASARIMI VE CFD TABANLI PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ: KANAT SAYISININ ETKİSİ	1
---	---

BEYZA ARSLAN

IOT TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM SİSTEMLERİNDE RULMAN ALT BİLEŞEN ARIZA SEVİYELERİNİN TİTREŞİM ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ	40
---	----

EMİN ÖZTÜRK, AZİZ KUBİLAY OVACIKLI

TERSİNE MÜHENDİSLİK SÜREÇLERİNDE GEOMAGIC FOR SOLIDWORKS ENTEGRASYONU TASARIM ÖZELLİKLERİ VE SAPMA ANALİZİNİN İNCELENMESİ ..	56
--	----

RECEP KARA, İLYAS KARTAL

KANAT YAPISAL ELEMANLARINDA BOŞALTMA GEOMETRİLERİNİN MEKANİK DAVRANIŞ ANALİZİ	82
--	----

OĞUZHAN ERTAŞ, FIRAT KAFKAS

EULER-BERNOULLİ KİRİŞİNİN TİTREŞİM KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK VE PINN TABANLI YÖNTEMLERLE ANALİZİ	104
---	-----

*BURAK EMRE YAPANMIŞ, EMRAH KUZU, SÜLEYMAN MURAT
BAĞDATLI*

YATAY VE DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE YAPISAL ANALİZ VE VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRMASI	141
--	-----

ABDULLAH AVCU, AHMET SAMANCI

ELECTROMAGNETICALLY ACTUATED MULTI-FUNCTIONAL MECHANICAL TESTING PLATFORM: A NEXT-GENERATION APPROACH	162
---	-----

HAKKI ÖZER

PHYSICS-BASED SIMULATION AND DATA-DRIVEN	
--	--

İÇİNDEKİLER

MODELING: AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR ENGINEERING SYSTEMS	177
<i>HİKMET İMAMOĞLU, SÜLEYMAN MURAT BAĞDATLI</i>	
SÜRDÜRÜLEBİLİR MOTOR TEKNOLOJİLERİNDE YAĞ VE YAKIT KATKILARI	197
<i>MEHMET SİNAN</i>	
MICROSTRUCTURAL ENGINEERING OF AL-FE ALLOYS IN ADDITIVE MANUFACTURING: FROM SUSTAINABLE RECYCLING TO HIGH-TEMPERATURE APPLICATIONS	208
<i>AHMED ALSAKKAF, RAHMİ ÜNAL, İRFAN ÜNAL</i>	
OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM: EMİSYON REGÜLASYONLARI VE SU BUHARI ENJEKSİYONU	262
<i>MEHMET SİNAN</i>	

BÖLÜM 1

TEK KADEMELİ SANTRİFÜJ KOMPRESÖRÜN TASARIMI ve CFD TABANLI PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ: KANAT SAYISININ ETKİSİ

BEYZA ARSLAN¹

Giriş

Bir hava aracını havada hareket ettirebilmek için bir itme kuvveti oluşturan itki sistemine ihtiyaç vardır. En yaygın olarak kullanılan itki sistemleri modern çağ araçları için gaz türbinleridir. Gaz türbinli motor teknolojilerinin gelişim süreci, yüksek verimlilik ve güç-ağırlık oranı arayışıyla şekillenmiştir. Bu sistemlerin kalbinde yer alan en kritik bileşenlerden biri şüphesiz kompresör grubudur.

Gaz Türbinlerinde Kompresörün Rolü

Bir gaz türbininin çevrim verimliliği, büyük ölçüde yanma odasına giren havanın ne kadar efektif sıkıştırıldığına bağlıdır. Kompresörün temel görevi, atmosferden aldığı havayı yüksek basınç ve uygun sıcaklık değerlerine ulaştırarak Brayton çevriminin

¹ Müh., İstanbul Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay, Orcid: 0009-0007-9281-6478

başlangıcını oluşturmaktır. Sıkıştırma oranındaki (r_p) artış, termodinamik verimliliğin doğrudan iyileşmesini sağlar:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

Bu nedenle, kompresör sadece bir "hava pompalama" ünitesi değil, motorun genel performansını, yakıt tüketimini ve itki kapasitesini belirleyen stratejik bir bileşendir.

Neden Santrifüj Kompresör?

Eksenel (axial) kompresörler devasa hava debilerini işleme kapasitesine sahip olsalar da, santrifüj kompresörler belirli operasyonel sınırlarda benzersiz avantajlar sunar. Santrifüj kompresörlerin tercih edilme nedenleri şu başlıklar altında toplanabilir:

- **Yüksek Basınç Oranı:** Tek bir kademede elde edilen basınç artışı, eksenel kompresörlerin çok sayıda kademeye ulaştığı değerlere eşdeğerdir.
- **Dayanıklılık ve Kompaktlık:** Radyal yapı, mekanik olarak daha sağlamdır ve yabancı cisim hasarına (FOD) karşı daha dirençlidir.
- **Geniş Çalışma Aralığı:** Değişken devirlerde ve debi koşullarında (surge ve stall limitleri dahilinde) daha esnek bir operasyonel harita sunarlar.

Küçük ve Orta Ölçekli Turbojetlerde Tercih Edilme Sebebi

Özellikle İHA (İnsansız Hava Aracı), seyir füzeleri ve yardımcı güç üniteleri (APU) gibi küçük ve orta ölçekli sistemlerde santrifüj kompresörler rakipsizdir. Bunun temel sebebi "ölçeklendirme" (scaling) sorunudur.

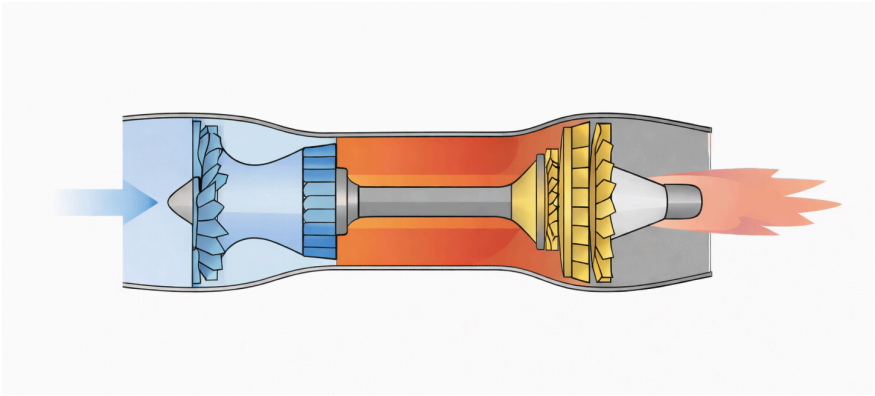
Küçük ölçeklerde aksenal kanatçıkların üretimi hem maliyetli hem de aerodinamik olarak verimsiz hale gelir (sınır tabaka etkileri ve kanat ucu kaçakları nedeniyle). Santrifüj kompresörler ise;

- Düşük kütleli debilerde dahi yüksek verimlilik sunar.
- Motorun toplam uzunluğunu ciddi oranda kısaltarak hafiflik sağlar.
- İmalat kolaylığı sayesinde düşük maliyetli seri üretime uygundur.

Gaz Türbini Sistemleri ve Brayton Döngüsü

Santrifüj kompresörün performans karakteristiklerini tam olarak anlayabilmek için öncelikle içinde bulunduğu sistemin termodinamik çalışma prensiplerini incelemek gerekir.

Basit Bir Turbojet Motorunun Şematik Gösterimi.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Temel Gaz Türbini Konfigürasyonu

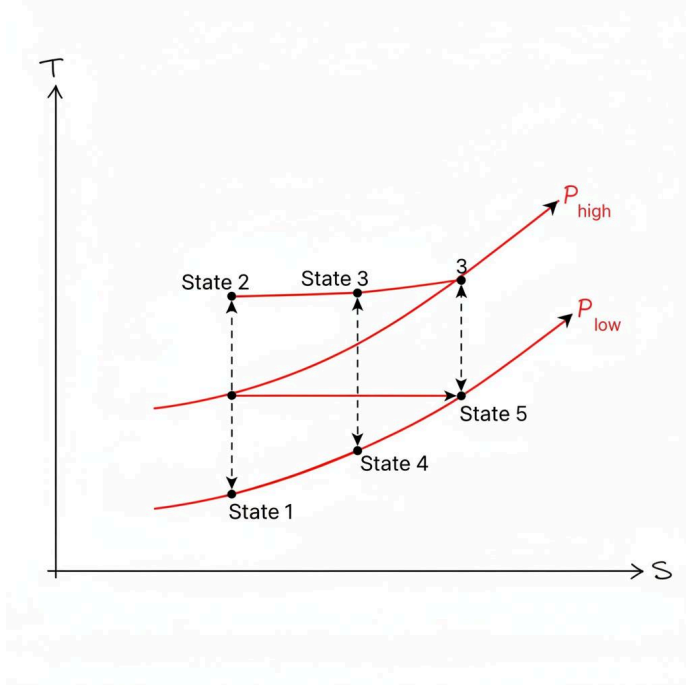
Tipik bir gaz türbini sistemi; enerjinin akışkana aktarıldığı, ısının eklendiği ve işin geri alındığı bir döngüden oluşur. Temel konfigürasyon üç ana bileşen etrafında şekillenir:

- **Kompresör** : Atmosferik havayı yüksek basınçlara çıkararak sistemin potansiyel enerjisini artırır.
- **Yanma Odası** : Basınçlı hava ile yakıtın sabit basınçta birleştiği ve kimyasal enerjinin ısı enerjisine dönüştüğü bölümdür.
- **Türbin** : Yüksek enerjili gazların genişleyerek mekanik iş (mil gücü) ürettiği kısımdır. Üretilen işin bir kısmı kompresörü sürmek için kullanılır.

İdeal Brayton Döngüsü

Gaz türbinlerinin teorik çalışma prensibi **Brayton Çevrimi** (veya Joule Çevrimi) ile açıklanır. İdeal bir senaryoda bu döngü dört ana aşamadan oluşur:

Brayton Çevrim Grafiği



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

- **1-2 İzentropik Sıkıştırma (Kompresör):** Dışarıdan iş girişi (W_c) ile havanın basıncı artırılır, entropi sabit kabul edilir.
- **2-3 Sabit Basıncıta Isı Girişi (Yanma Odası):** Yakıt yakılarak sıcaklık (T_{max}) noktasına ulaştırılır.
- **3-5 İzentropik Genleşme (Türbin):** Gaz genişleyerek dışarıya iş (W_t) verir.
- **5-1 Sabit Basıncıta Isı Atımı:** Egzoz gazlarının atmosfere salınımı ile çevrim tamamlanır.

Brayton (veya Joule) döngü için akış enerji denklemi (*Gas Turbine Theory*, 2001),

$$Q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + W$$

şeklindeir. **Q** ısı transferini, **W** ise işin birim kütle başına akışıdır. Her bir bileşenin girişi ve çıkışı arasındaki çalışma akışkanın kinetik enerji değişimi ihmal edilebilir düzeydedir.

$$W_{12} = - (h_2 - h_1) = - C_p (T_2 - T_1)$$

$$Q_{23} = (h_3 - h_2) = C_p (T_3 - T_2)$$

$$W_{34} = (h_3 - h_4) = C_p (T_3 - T_4)$$

Döngü verimliliği ise:

$$\eta = \frac{\text{net iş } \cancel{çıkış}}{\text{uygulanan } s} = \frac{C_p(T_3 - T_2) - C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)}$$

şeklindeir. Brayton döngüde ideal durumda olduğundan dolayı,

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{(\gamma-1)/\gamma} = \frac{T_3}{T_4}$$

basınç ve sıcaklık arasındaki ilişki şeklindedir ve r basınç oranlarını temsil etmektedir.

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Verim (formülden de anlaşılacağı üzere) sadece basınç oranına ve gaza bağlı olduğu görülmektedir.

Kompresörlerin Temelleri

Kompresörler, düşük basınçtaki bir akışkanın (gaz veya buhar) basıncını artırmak amacıyla dışarıdan mekanik iş alan makinelerdir. Bir gaz türbininde kompresör, sadece basıncı arttırmakla kalmaz, aynı zamanda akışkanın yoğunluğunu ve sıcaklığını da yükseltir.

Enerji Aktarımı ve Euler Turbomakina Denklemleri

Kompresörlerde enerji aktarımı, dönen bir çark (impeller/rotor) vasıtasıyla akışkana açısal momentum kazandırılması ilkesine dayanır. Bu süreçte mekanik iş, akışkanın kinetik ve potansiyel enerjisine dönüştürülür.

Enerji aktarımını tanımlayan en temel matematiksel ifade **Euler Turbomakina Denklemi**dir. Birim kütle başına düşen iş (w_c), giriş ve çıkıştaki hız vektörlerine bağlıdır (Dixon & Hall, 2013):

$$w_c = U_2 V_{\theta 2} - U_1 V_{\theta 1}$$

Burada,

- U : Kanat çevresel hızı (Blade speed)
- U_θ : Akışkanın teğetsel hız bileşeni (Tangential velocity)

temsil etmektedir. Santrifüj kompresörlerde, akışın merkezden dışa doğru (radyal) yönlendirilmesi sayesinde $U_2 \gg U_1$ olur. Bu geometrik özellik, tek bir kademede çok yüksek enerji aktarımı yapılabilmesinin temel sebebidir

Kompresörlerde Sınıflandırma

Kompresörler, basınç artışı sağlama yöntemlerine göre iki ana kategoriye ayrılır. Bu ayrım, mühendislik tasarımında hangi tipin seçileceğini belirleyen en temel kriterdir.

A. Pozitif Yer Değiştirmeli (Statik) Kompresörler:

Bu tip kompresörlerde basınç artışı, belirli bir hacme hapsedilen gazın hacminin mekanik olarak daraltılması ile sağlanır. Bu kompresörlerde çalışma prensibi, sabit bir gaz kütesinin silindir veya hazne içerisine alınması, piston, vida ya da palet mekanizmasıyla hacminin küçültülerek basıncının artırılması ve basınç istenen seviyeye ulaştığında akışkanın dışarı atılması esasına dayanır. Bu sistemler düşük debide çalışmayla birlikte çok yüksek basınç oranlarına ulaşabilmeleri ile öne çıkar ve çalışma karakterleri gereği kesikli (pulsating) bir akış oluştururlar.

- a. **Loblu Döner Kompresör:** Üfleyici pompalar, vakum pompaları ve hidrolik pompalar gibi döner loblu pompalar, endüstride yaygın olarak kullanılan sıvı çıkarma aparatlarıdır. Bir tür pozitif deplasmanlı pompa olan bu pompalar, özel olarak şekillendirilmiş bir silindir içinde, zamanlama dişlileri kullanarak sıvıyı bir taraftan çekip diğer tarafa iletmek için birbirine geçen iki veya daha fazla döner lob kullanır. Bu iki rotor sabit bir dişli oranıyla zıt yönlerde döner ve çalışma sırasında yalnızca küçük açıklıkları korur.

- b. **Döner Vidalı Kompresör:** Döner ekip kompresör birbirine geçen bir erkek ve bir dişi rotorun bulunduğu ikiz döner vidalı tasarımıdır. Bu kompresörler, büyük hacimlerde yüksek basınçlı havaya ihtiyaç duyulan ticari ve endüstriyel uygulamalarda pistonlu kompresörlerin yerini almak için yaygın olarak kullanılır. Döner Vidalı hava ucu sürekli bir süpürme hareketiyle sıkıştırma üretilir. Havayı sıkıştırmak için iç içe geçmiş rotorlar son derece dar toleranslarla hassas bir şekilde işlenir, böylece rotorlardaki kanatlar neredeyse birbirine temas eder ve tipik olarak aralarında bir inçin sadece birkaç binde biri kadar mesafe bulunur.
- c. **Sıvı-Halkalı Kompresör:** Sıvı halkalı pompalar tipik olarak vakum pompası olarak kullanılır ancak gaz kompresörü olarak da kullanılabilir. Bir sıvı halkalı pompanın işlevi döner kanatlı pompaya benzer; aradaki fark, kanatların rotorun sert bir parçası olması ve sıkıştırma odası contasını oluşturmak için dönen bir sıvı halkasını çalkalamasıdır. Doğası gereği düşük sürtünmeli bir tasarıma sahiptirler ve rotor tek hareketli parçadır.
- d. **Scroll Kompresör:** Scroll vakum pompası olarak da bilinen bir scroll kompresör, sıvılar ve gazlar gibi akışkanları pompalamak veya sıkıştırmak için iç içe geçmiş iki spiral benzeri kanat kullanır. Kanat geometrisi involüt, arşimet spiral veya hibrit eğriler olabilir. Düşük hacim aralığında diğer kompresör türlerine göre daha sorunsuz, sessiz ve güvenilir bir şekilde çalışırlar.
- e. **Döner Kanatlı Kompresör:** Döner kanatlı kompresörler silindirik bir gövde, biri emme diğeri

tahliye olmak üzere iki açıklık ve gövdeye göre eksantrik olarak konumlandırılmış bir rotordan oluşur. Sıkıştırma, eksantrik dönüş nedeniyle istenen hacimde bir azalmanın olduğu odaya akan soğutucu akışkan ile gerçekleşir.

- f. **Diyaframlı Kompresör:** Diyaframlı kompresörler, üç adet esnek diyaframlı membran seti kullanarak gazı hareket ettirir ve sıkıştırır. Gaz, kompresörün proses kafasına harici bir tanktan veya prosesten aşağı strokta girer. Yukarı strokta, diyaframlar esneyerek haznenin içindeki alanı azaltır ve gazı kompresörün dışına iter.
- g. **Tek Etkili Pistonlu Kompresör:** Bir giriş valfi ve bir tahliye valfi bulunan tek yönlü yay yüklü valfler, hava giriş ve çıkışını kontrol eder. Piston aşağı hareket ettiğinde hava giriş valfinden emilir, yukarı hareket ettiğinde ise giriş valfi kapanır ve tahliye valfi belirli bir kuvvet uygulanana kadar açılmaz. Bu süreç, havanın sıkışmasına ve artan basınçla yol açar; basınç tahliye valfini açacak seviyeye ulaştığında hava dışarı çıkar. Tek etkili recip kompresörlerde valfler yalnızca silindirin üstündedir, bu nedenle her krank mili dönüşünde bir sıkıştırma döngüsü gerçekleşir.
- h. **Çift Etkili Pistonlu Kompresör:** Çift etkili pistonlu kompresör tek etkiliye benzer, ancak silindirin her iki tarafında giriş ve tahliye valfleri vardır. Bu, krank milinin her dönüşü için iki sıkıştırma döngüsü sağlar.

B. Dinamik (Turbo) Kompresörler:

Gaz türbinlerinde esas olarak dinamik kompresörler kullanılır; bu sistemlerde basınç artışı, akışkana yüksek hız kazandırılması ve ardından bu kinetik enerjinin difüzörlerde statik basınca dönüştürülmesi prensibiyle elde edilir. Santrifüj (radyal) kompresörlerde akış eksenel yönde giriş yapar ve radyal yönde çıkış gerçekleştirir; bu yapı yüksek basınç artışı ve mekanik dayanıklılık sağlar. Eksenel (axial) kompresörlerde ise akış mil eksenine paralel ilerler ve özellikle çok yüksek kütsel debi gerektiren uygulamalar için idealdir.

- a. **Eksenel Kompresör:** Eksenel akışlı kompresörler çok yüksek hızlı, büyük hacimsel akış oranlı makinelerdir. Bu tip kompresörler gazı giriş portlarına akıtır ve bir dizi radyal düzenlenmiş döner rotor kanatları ve sabit stator (veya difüzör) kanatları aracılığıyla gazı sıkıştırma alanı boyunca eksenel olarak iter.
- b. **Santrifüj Kompresör:** Santrifüj kompresör, esasında havaya yüksek hız kazandırmaya çalışan döner bir pervanedir ancak bu hızı kazandırma süresinde hava pervane gözüne emilir (muhafaza edilir) ve disk üzerindeki kanatlar tarafından yüksek hızda döndürölür. Hava akışından merkezci bir ivme basıncı yüksekliğı elde edilir ve böylece impeller da gözden (eye) uca (tip) statik basıncı artar. Statik basıncın geri kalan artışı ise difüzörde elde edilir çünkü çark ucundan çıkan yüksek hızdaki hava difüzöre taşınır.

Neden Bu Çalışmada Santrifüj Kompresör Seçildi ?

Bu çalışmada santrifüj kompresörün odak noktası olarak seçilmesi, bu makinelerin özellikle küçük ve orta ölçekli turbojet sistemlerinde sunduğı yapısal ve aerodinamik avantajlardan

kaynaklanmaktadır. Eksenel kompresörler devasa kütleli debileri işleme kapasitesine sahip olsalar da, motor boyutları küçüldükçe "ölçeklendirme" (scaling) sorunuyla karşı karşıya kalırlar. Küçük ölçeklerde eksenel kanatçıkların üretimi sadece maliyetli olmakla kalmaz, aynı zamanda kanat ucu kaçakları (tip clearance) ve düşük Reynolds sayılarından kaynaklanan sınır tabaka ayrılmaları nedeniyle verimlilik ani bir şekilde düşer. Buna karşın santrifüj kompresörler, radyal akış karakteristikleri sayesinde düşük debilerde bile yüksek verimliliği koruyabilmektedir.

Ayrıca, operasyonel dayanıklılık ve üretim ekonomisi de bu seçimi destekleyen unsurlar arasındadır. Santrifüj impeller'ın yekpare (monoblok) yapısı, küçük ölçekli sistemlerin sıklıkla maruz kaldığı yabancı cisim hasarına (FOD) karşı eksenel kanatçıklara kıyasla çok daha dirençlidir. Üretim açısından bakıldığında ise, yüzlerce hassas eksenel kanadın tek tek üretilip montajlanması yerine, tek bir çarkın 5 eksenli CNC tezgahlarında işlenebilmesi, seri üretim maliyetlerini düşürerek projeyi ekonomik olarak daha sürdürülebilir kılmaktadır. Tüm bu teknik ve lojistik gerekçeler, santrifüj kompresörü modern küçük ölçekli turbojet tasarımlarının vazgeçilmez bir bileşeni haline getirmektedir.

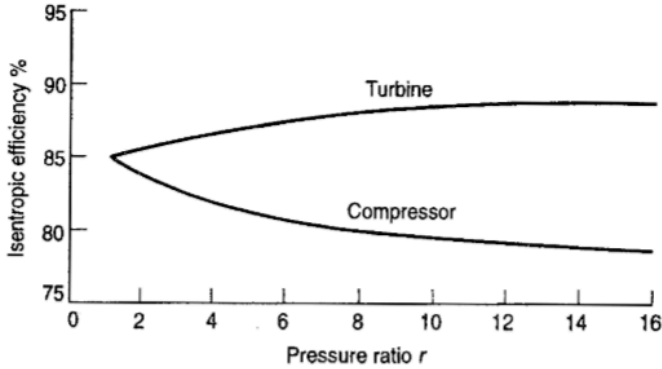
Termodinamik Parametrelerin Hesaplanması

Termodinamik tasarım hesaplamaları, tek kademeli santrifüj kompresör konfigürasyonuna karşılık gelen bir dizi önceden tanımlanmış çalışma varsayımına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Birincil tasarım parametresi olarak 4'lük bir kompresör basınç oranı benimsenmiştir. Bu değer, pratik tek kademeli santrifüj kompresör uygulamalarıyla tutarlı orta düzeyde bir basınç oranını temsil etmekte olup, mevcut çalışma için hedef çalışma koşulu olarak seçilmiştir.

Kompresörün izentropik verimliliği keyfi olarak varsayılmamış, bunun yerine basınç oranı ile verimlilik arasındaki

ilişkiyi gösteren yerleşik performans eğilimlerinden tahmin edilmiştir. Seçilen 4 basınç oranına göre, karşılık gelen izentropik verimlilik, verimlilik-basınç oranı karakteristik eğrisinden 0,82 olarak tahmin edilmiştir.



Kaynak: Gas Turbine Theory, Fifth Edition.

Ayrıca, benzer basınç oranlarında çalışan santrifüj kompresörler için yaygın olarak bildirilen aerodinamik ve mekanik kısıtlamalara uygun olarak, pervane uç hızı 460 m/s ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlama, aşırı Mach sayılarının ve yapısal gerilmelerin önlenmesini sağlar.

Son olarak, tasarım kütle akış hızı, sistemin amaçlanan sabit çalışma koşulunu temsil eden 1,4886 kg/s olarak alınmıştır. Bu varsayımlar, sıcaklık artışı, özgül iş girişi ve sonraki performans parametrelerini belirlemek için kullanılan termodinamik çerçeveyi tanımlar.

Toplam Basınç

Kompresör tasarım sürecinin ilk adımı, hedeflenen çevrim verimliliğine ulaşmak için gerekli olan çıkış basıncının tanımlanmasıdır. Bu çalışmada, standart analizlerde yaygın bir referans noktası olması sebebiyle giriş koşulları deniz seviyesi (International Standard Atmosphere - ISA) şartlarında ele

alınmıştır. Bu bağlamda, giriş toplam basıncı (P_{t1}) 101.325 Pa olarak kabul edilmiştir.

Küçük ölçekli turbojet motorları için optimize edilen kompresör basınç oranı (CPR), çevrimin termodinamik dengesi gözetilerek 4 olarak belirlenmiştir. Kompresör çıkışındaki toplam basınç (P_{t2}), giriş basıncı ile hedeflenen basınç oranının çarpımı olarak aşağıdaki basit fakat temel ilişki ile hesaplanır:

$$P_{t2} = (CPR) \times P_{t1}$$

Bu hesaplama, sistemin "idealleştirilmiş" çıkış kapasitesini temsil eder.

Statik Basınç

Normal ileri hızlarda emme, havanın C_a 'dan C_1 'e yavaşlaması ve statik basıncın P_a 'dan P_1 'e yükselmesiyle bir difüzör görevi görür. Çevrim hesaplamaları için gerekli olan kompresör girişindeki durgunluk basıncı olduğundan, ilgilenilen ve ram basıncı artışı olarak adlandırılan basınç artışıdır ($P_{01} - P_a$). Süpersonik hızlarda bu, girişteki şok dalgaları sistemi boyunca basınç artışını ve ardından kanalın geri kalanında ses altı difüzyondan kaynaklanan basınç artışını içerecektir.

Emme verimliliği çeşitli şekillerde ifade edilebilir, ancak en yaygın olarak kullanılan iki tanesi izentropik verimlilik η_i ; (sıcaklık artışları cinsinden tanımlanır) ve ram verimliliği η_r (basınç artışları cinsinden tanımlanır).

$$T_{01} = T_{0a} = T_a + \frac{C_a^2}{2C_p}$$

ve

$$\frac{P_{01}}{P_a} = \left(\frac{T_{01}'}{T_a} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Burada T_{01}' , P_{01} 'e izentropik bir ram sıkıştırması sonrasında ulaşılacak olan sıcaklıktır.

Toplam Sıcaklık

Analizlerde kullanılan hava, standart atmosfer koşullarına uygun olarak deniz seviyesinde $T_{t1} = 288.15K$ K giriş sıcaklığında kabul edilmiştir.

İdeal bir sıkıştırma sürecinde basınç ve sıcaklık arasındaki ilişki, termodinamiğin izentropik değişim yasalarıyla tanımlanır. Tasarımda kullanılan havanın özgül ısı oranı (γ) 1.4 olarak sabit alındığında, CPR = 4 olan bir sistem için çıkıştaki teorik toplam sıcaklık (T_{t2}) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\frac{P_{t2}}{P_{t1}} = \left(\frac{T_{t2}}{T_{t1}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Statik Sıcaklık

Kararlı akış enerji denklemindeki kinetik enerji terimleri, durgunluk (veya toplam) entalpi kavramından yararlanılarak dolaylı olarak açıklanabilir. Fiziksel olarak, durgunluk entalpisi h_0 , entalpisi h ve hızı C olan bir gaz akışının adyabatik olarak ve iş transferi olmaksızın durgun hale getirildiğinde sahip olacağı entalpidir. Enerji denklemi daha sonra aşağıdaki bağıntıya indirgenir:

$$(h_0 - h) + \frac{1}{2} (0 - C^2) = 0$$

Böylece durgunluk entalpisi (h_0) tanımlanabilir.

$$h_0 = h + \frac{c^2}{2}$$

Çalışma akışkanı olan havanın "mükemmel gaz" (ideal gas) kabulüne uygun davrandığı durumlarda, entalpi değişimi doğrudan sıcaklık değişimiyle ilişkilendirilebilir. Bu kabul, karmaşık enerji denklemlerinin sıcaklık parametresi üzerinden basitleştirilmesine olanak tanır. Akışkanın hem statik sıcaklığını hem de kinetik enerjisinin adyabatik olarak durdurulmasıyla elde edilecek olan termal potansiyelini birleştiren **durgunluk (veya toplam) sıcaklığı** (T_0), özgül ısı kapasitesi (C_p) kullanılarak şu şekilde tanımlanır:

$$T_0 = T + \frac{c^2}{2 C_p}$$

Yoğunluk

Her iki nokta için de (giriş ve çıkış) aşağıdaki formül ile o noktadaki yoğunluk hesaplanır:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

Çarkın Toplam Çapı

Santrifüj kompresör tasarımında, çarkın dış çapı (d) ve dönme hızı (N), hedeflenen basınç oranına ulaşmak için gerekli olan kinetik enerjiyi belirleyen temel parametrelerdir. Çark kanat ucu hızı (U), hem akışkanın kazanacağı momentumu hem de merkezkaç kuvvetleri nedeniyle malzeme üzerinde oluşacak mekanik gerilmeleri doğrudan sınırlar. Modern küçük ölçekli turbojet uygulamaları ve malzeme limitleri göz önüne alınarak, bu çalışmada pervane uç hızı $U = 460$ m/s olarak kabul edilmiştir.

Belirlenen bu hız değeri ile çarkın fiziksel boyutu ve operasyonel devir sayısı arasındaki ilişki, aşağıdaki temel kinematik bağıntı ile tanımlanır:

$$U = (\pi) (d) (N)$$

Bu denklem, tasarımcının motorun toplam çapı ile mil hızı arasında bir optimizasyon yapmasına olanak tanır. Yüksek uç hızları, daha küçük çaplı çarklarla yüksek basınç oranlarına çıkılmasını sağlasa da, bu durumun beraberinde getireceği şok dalgaları ve yapısal yükler tasarımın sınırlarını belirleyen temel unsurlar olarak dikkate alınmalıdır.

Mach Sayısı

Mach sayısının hesaplanması için, o noktadaki, toplam basınç ve statik basınç değeri yeterli olacaktır.

$$\frac{P_0}{P_s} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Eksenel Hız

Kompresörün giriş ve çıkış istasyonlarındaki eksenel hız bileşenlerinin belirlenmesi, akışın kanatçıklar arasındaki yönelimini ve enerji transfer kapasitesini anlamak için kritik bir adımdır. Gaz türbinlerindeki yüksek hızlarda hava, sıkıştırılabilir bir akışkan olarak davranır; bu nedenle hız hesaplamalarında yerel ses hızı (a) temel referans noktası olarak alınmalıdır. İdeal gaz kabulleri altında, belirli bir istasyondaki yerel ses hızı, o noktadaki statik sıcaklığın (T_s) bir fonksiyonu olarak şu şekilde hesaplanır:

$$a = \sqrt{\gamma R T_s}$$

Burada (γ) ısı sığaları oranını, R ise havaya özgü gaz sabitini temsil eder. Ses hızının belirlenmesinin ardından, akışın karakteristiğini ve aerodinamik kayıpları tanımlayan boyutsuz Mach sayısı (M) kullanılarak gerçek akış hızlarına (V) geçiş yapılır. Giriş ve çıkış kesitlerindeki eksenel hız bileşenleri, hedeflenen Mach sayıları uyarınca aşağıdaki bağıntı ile türetilir:

$$M = \frac{V}{a}$$

Tasarım aşamasında Mach sayısının kontrol altında tutulması, özellikle çark girişinde oluşabilecek şok dalgalarının ve buna bağlı verim kayıplarının önlenmesi açısından hayati önem taşır. Bu hız verileri, ilerleyen bölümlerde çarkın giriş geometrisini ve kanat açılarının belirlenmesini sağlayan hız üçgenlerinin (velocity triangles) temel girdilerini oluşturacaktır.

Çark Gözünün Anülüs Alanı

Kompresör tasarımında, belirlenen kütleli debinin ($\dot{m}$) çark girişine sorunsuz bir şekilde yönlendirilmesi için gerekli olan anülüs alanının (A) hesaplanması, geometrik tasarımın ilk somut adımını oluşturur. Süreklilik denklemi (continuity equation) kullanılarak, giriş istasyonundaki statik yoğunluk (ρ) ve eksenel hız ($V_{eksenel}$) değerleri yardımıyla gerekli akış alanı şu şekilde belirlenir:

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho_s V_{eksenel}}$$

Hesaplanan bu alan, çark girişindeki merkez (hub) yarıçapı (r_h) ile uç (tip) yarıçapı (r_t) arasındaki geometrik ilişkiyi tanımlar. Ancak bu radyal boyutların belirlenmesinde sadece alan gereksinimi değil, aynı zamanda aerodinamik ve yapısal kısıtlamalar da dikkate alınmalıdır. Literatürde ve endüstriyel uygulamalarda, akışın kanat köklerindeki tıkanma etkilerini minimize etmek ve kanat ucu hızlarını kontrol altında tutmak adına merkez/uç yarıçap oranının (r_h/r_t) belirli sınırlar dahilinde tutulması bir standarttır:

$$0.3 \leq \frac{r_h}{r_t} \leq 0.7$$

Belirlenen bu oran dahilinde uç ve merkez yarıçapları hesaplanarak, çarkın "eye" (göz) olarak adlandırılan giriş kısmının

nihai boyutları elde edilir. Bu boyutlar, motorun toplam alın alanını belirleyen ve hava alığı (intake) tasarımıyla doğrudan etkileşim halinde olan kritik verilerdir.

Tasarım Parametrelerinin Özeti

Yukarıda detaylandıran termodinamik ve geometrik analizler sonucunda, küçük ölçekli turbojet motoru için optimize edilen santrifüj kompresörün temel tasarım parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Santrifüj Kompresör için Nihai Tasarım Parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Kompresör Basınç Oranı	CPR	4.0	-
Giriş Toplam Basıncı	P_1	101325	Pa
Giriş Toplam Sıcaklığı	T_1	288.15	K
Giriş Statik Basıncı	P_{s1}	83086	Pa
Giriş Statik Sıcaklığı	T_{s1}	271.353	K
Giriş Yoğunluğu	ρ	1.0665	kg/m^3
Giriş Mach Sayısı	M_1	0.540	-
Giriş Eksenel Hızı	$V_{eksenel,1}$	193.74	m/s
Çıkış Toplam Basıncı	P_2	405300	Pa
Çıkış Toplam Sıcaklığı	T_2	402.982	K
Giriş Statik Basıncı	P_{s2}	327757.0935	Pa
Çıkış Statik Sıcaklığı	T_{s2}	402.982	K
Çıkış Yoğunluğu	ρ	2.834	kg/m^3
Çıkış Mach Sayısı	M_2	0.559	-
Çıkış Eksenel Hızı	$V_{eksenel,2}$	224.936	m/s

Hız Üçgenleri

Santrifüj kompresör, esas olarak havaya yüksek hız kazandıran döner bir pervane (impeller) içeren sabit bir gövdeden oluşur ve daha sonraki süreci difüzyon sürecidir, bu nedenle kompresörün ıraksak geçitleri içeren kısmı difüzör (diffuser) olarak bilinir.

Hava, pervane gözüne emilir ve pervane diski üzerindeki kanatlar tarafından yüksek hızda döndürülür. Çarktan geçen hava akışının herhangi bir noktasında, merkezci ivme bir basınç yüksekliği ile elde edilir, böylece havanın statik basıncı göz çarkın (impeller eye) ucuna doğru artar. Statik basınç artışının geri kalanı, çark ucundan çıkan havanın çok yüksek hızının, havanın çark gözüne girdiği hız bölgesinde bir yere düşürüldüğü difüzörde elde edilir; difüzördeki sürtünmenin durgunluk basıncında bir miktar kayba neden olacağı beklenmektedir. Normal uygulama, kompresörü basınç artışının yaklaşık yarısı pervanede ve yarısı difüzörde gerçekleşecek şekilde tasarlamaktır.

Kanatçıkların havayı pervane ile birlikte taşıma etkisi nedeniyle, bir kanatçığın ön yüzünde arka yüzüne göre biraz daha yüksek bir statik basınç olacağı değerlendirilecektir. Bu nedenle hava, pervane ile gövde arasındaki boşlukta kanatların kenarları etrafında akma eğiliminde olacaktır. Bu doğal olarak verim kaybına neden olur ve boşluk mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Kanatlara takılan bir örtü bu kaybı ortadan kaldıracaktır, ancak imalat zorlukları büyük ölçüde artar ve örtü ile ilişkili bir disk sürtünmesi veya 'windage' kaybı olacaktır. Örtüler süper şarjörlerde ve proses kompresörlerinde kullanılmasına rağmen, gaz türbinleri için pervanelerde kullanılmamaktadır.

Difüzördeki hava üzerinde herhangi bir iş yapılmadığından, kompresör tarafından emilen enerji, pervanenin giriş ve çıkışındaki

havanın koşullarına göre belirlenecektir ve havanın ilk açıl momentumu sıfır olur.

Hub ve Tip Yarıçapları

Hesaplanan anülüs alanı kullanılarak çark girişinin fiziksel boyutlarına geçilirken, merkez (hub) ve uç (tip) yarıçapları arasındaki oran, tasarımın hem aerodinamik kapasitesini hem de mekanik bütünlüğünü belirleyen temel bir kısıttır. Literatürde bu oran (r_h/r_t) genellikle 0.3 ile 0.7 arasında değişen değerlerle tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, küçük ölçekli motorlarda mil bağlantısının ve yapısal kararlılığın artırılması amacıyla söz konusu tasarım aralığının üst sınırı olan **0.7** değeri referans alınmıştır.

Seçilen bu oran ($r_h/r_t = 0.7$), daha önce türetilen anülüs alanı ($A = \pi(r_t^2 - r_h^2)$) denklemiyle birleştirilerek, çark gözü (eye) için gerekli olan nihai yarıçap değerlerine ulaşılmasını sağlar:

$$r_t = \sqrt{\frac{A}{\pi(1-0.7^2)}}$$

Bu yüksek oranlı seçim, giriş kesitinde daha dar bir akış kanalı oluştururken, çarkın merkez kısmında daha sağlam bir yapısal temel sunmaktadır. Elde edilen r_t ve r_h değerleri, kompresörün toplam dış çapı ile uyumlu olacak şekilde giriş hunisi (intake) ve pervane geometrisinin temelini oluşturur.

Giriş Hızları ve Açıları

Çark girişinde (eye), akışın kanatçıklara giriş açısı yarıçap boyunca önemli ölçüde değişim gösterir. Bu değişim, merkezden (hub) uç (tip) kısmına doğru gidildikçe artan teğetsel hız bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, giriş geometrisini ve kanat açılarını doğru tanımlayabilmek için merkez, orta (mean) ve uç yarıçaplardaki yerel kanat hızlarının (U) hesaplanması

elzemdir. Pervane girişindeki bu hız değerleri, daha önce belirlenen dönme hızı (N) ve ilgili radyal konumlar (r) kullanılarak şu şekilde türetilir:

$$U_{hub} = (\pi)(r_h)(N)$$

$$U_{mean} = (\pi)(r_m)(N)$$

$$U_{tip} = (\pi)(r_t)(N)$$

Burada r metre (m) cinsinden ilgili radyal konumu, N ise saniyedeki devir sayısını (rev/s) temsil etmektedir. Bu hız bileşenleri, giriş eksenel hızı (V_{ax1}) ile birleştirildiğinde, akışın kanatçıklara çarpma açısını (incidence angle) belirleyen hız üçgenlerini oluşturur.

Orta (mean) hızın yarıçapı ise,

$$r_m = \frac{r_h + r_t}{2}$$

Tasarım sürecinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla yapılan el hesaplamaları, endüstri standardı olan **GasTurb** yazılımından elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Analitik yaklaşımla elde edilen sonuçlar ile yazılım çıktıları arasındaki yüksek uyum, tasarım parametrelerinin güvenilirliğini kanıtlamaktadır. Elde edilen nihai değerler Tablo 2'de toplu olarak sunulmuştur.

Tablo 2: Giriş Hızları ve Yarıçapları

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Merkez (hub) Hızı	U_{hub}	160.67	m/s
Merkez (hub) Yarıçapı	r_{hub}	0.0964	m
Orta Hız	U_{mean}	195.084	m/s
Orta Yarıçapı	r_{mean}	0.11705	m

Uç (tip) Hızı	U_{tip}	229.5	m/s
Uç (tip) Yarıçapı	r_{tip}	0.1377	m

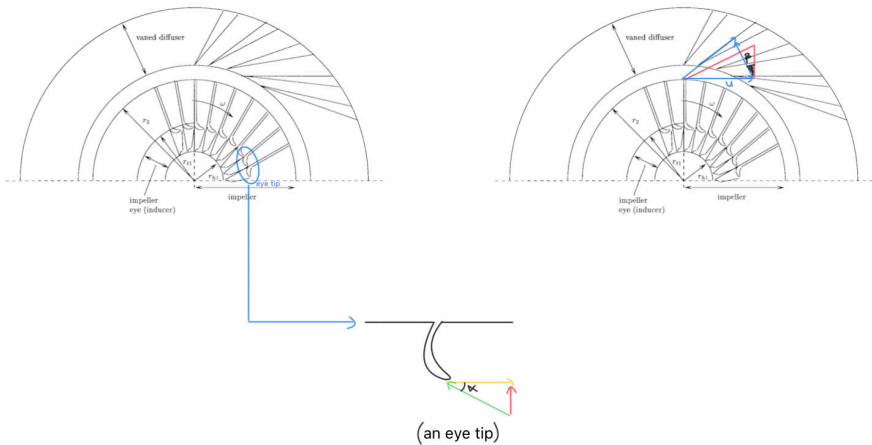
r_m yarıçap değerleri üzerinden türetilen yerel kanat hızları (U), akışın mutlak hızı (V) ile birleşerek bağıl hızı (W) ve giriş açılarını oluşturur. Kanat tasarımında, akışın kanatçıklara göre "gördüğü" hız olan bağıl hız (W), aerodinamik kayıpların ve giriş şoklarının minimize edilmesi açısından en kritik parametredir. İdeal bir giriş senaryosunda (zero swirl), bu bileşenler arasındaki trigonometrik ilişkiler şu şekilde formüle edilmiştir:

$$W = \sqrt{U^2 + V^2}$$

Akışın kanat yapısına göre yönelimini belirleyen bağıl giriş açısı (β) ve mutlak akış açısı (α), hız vektörlerinin birbirine oranı üzerinden tanımlanır:

$$\beta = \arctan\left(\frac{-U}{V}\right)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V}{U}\right)$$



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Elde edilen nihai değerler Tablo 3'de toplu olarak sunulmuştur.

Tablo 3: Giriş Hızları ve Yarıçapları

Radyal Konum	Bağıl (Relative) Hız	Bağıl (Relative) Açı	Mutlak (Absolute) Hız
Merkez (hub)	224.08 m/s	48.83°	-41.168°
Orta (mean)	267.989 m/s	43.28°	-46.72°
Uç (tip)	293.99 m/s	38.68°	-51.319°

Göz ve uç arasındaki pervane kanalının şekli büyük ölçüde deneme yanılma meselesidir. Amaç, kanatçığın arka yüzünde akış ayrılmasına yol açabilecek yerel yavaşlamalardan kaçınarak, kanal boyunca mümkün olduğunca düzgün bir akış hızı değişikliği elde etmektir. Bunun başariılıp başariılmadığını sadece yapılan testler/analizlerden anlaşılabılır. Çevredeki pervane kanalının gerekli derinliğini hesaplamak için, hem uçtaki hızın radyal bileşeni hem de yoğunluğun değerlendirilebilmesi için pervane ve difüzör arasındaki kayıpların bölünmesi ile ilgili bazı varsayımlar yapmalıyız. Hızın radyal bileşeni nispeten küçük olacaktır ve tasarımcı tarafından seçilebilir; çark ucundaki yoğunluğu tahmin etmek için, statik basınç ve sıcaklık, bu noktadaki mutlak hız hesaplanarak ve bu noktaya kadar olan varsayılan kayıptan hesaplanan durgunluk basıncı ile birlikte kullanılarak bulunur.

Normal şartlar altında $V_1 = C_{r2}$ kabulü yapılarak eksenel çıkış değeri bulunabilir ancak kompresör veriminin değeri elimizde mevcut olduğ u için aşığıdaki formülden yararlanarak statik çıkış hesaplanır.

$$\eta = \frac{T'_{02} - T'_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

Burada eksenel çıkış hızı şu şekilde hesaplanır:

$$T_{02} = T_{s2} + \frac{V_2^2}{2C_p}$$

Çark çıkışındaki mutlak hız (V_2), akışın hem radyal yöndeki ötelenmesini hem de çarkın dönme hareketiyle kazandığı teğetsel ivmelenmeyi temsil eden iki dik bileşenin vektörel toplamıdır (Aungier, 2000). Bu bileşenler; akışın kütsel debisiyle doğrudan ilişkili olan radyal hız (C_{r2}) ve enerji aktarımının birincil göstergesi olan teğetsel hız ($C_{\omega 2}$) bileşenleridir. Akışkanlar mekaniğinin temel vektör analizi uyarınca, mutlak hızın büyüklüğü aşağıdaki dik üçgen bağıntısı ile tanımlanmaktadır:

$$V_2 = \sqrt{C_{r2}^2 + C_{\omega 2}^2}$$

Bu bağıntı, çarktan ayrılan akışın toplam kinetik enerji potansiyelini simgeler.

$$C_{\omega 2} = \sigma U$$

Bu noktada, tasarımın en başında kabul edilen ve çarkın hız limitlerini belirleyen **kanat uç hızı** (U), hesaplamaların temel referans parametresidir. Akışın çark ucunda radyal yönde ilerleyebilmesi için gerekli olan efektif kesit alanını ve bu alana bağlı olarak çark çıkış genişliğini (derinliğini) belirlemek amacıyla aşağıda sunulan sistematik hesaplama adımları takip edilmektedir.

$$\frac{P_2(toplam)}{P_{02}(statik)} = \left(\frac{T_{02}}{T'_{02}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\rho_2 = \frac{P_{02}}{RT'_{02}}$$

$$A_2 = \frac{\dot{m}}{(\rho_2)(C_{r2})}$$

Son olarak derinlik hesaplanır.

$$h = \frac{A}{(\pi)(d)}$$

Termodinamik analizler ve hız üçgenlerinden elde edilen veriler ışığında, kompresör çarkının çıkış karakteristiğini tam olarak tanımlayabilmek için sistematik bir hesaplama prosedürü takip edilmektedir. Bu süreç, akışkanın çarkı terk ettiği andaki termodinamik durumunu belirlemekle başlar ve bu verilerin kütle korunumu yasasıyla birleştirilmesiyle nihai geometrik boyutlara ulaşılmasını sağlar.

$$r_2 = \frac{A_2}{2\pi r_2}$$

$$\Delta H = C_p(T_2 - T_1)$$

Kompresör çarkının akışkan üzerinde gerçekleştirdiği mekanik iş, entalpi artışı (ΔH) cinsinden ifade edilir ve türbomakine teorisinin temelini oluşturan **Euler Denklemine** dayanır. Sistemin enerji transfer kapasitesini belirleyen bu bağıntı, giriş ve çıkış istasyonlarındaki momentum değişimini aynı zamanda şu şekilde de tanımlar:

$$\Delta H = U_2 V_{\theta 2} - U_1 V_{\theta 1}$$

Bu çalışmada tasarlanan santrifüj kompresörde, akışın çark gözüne (eye) herhangi bir ön döndürme (pre-swirl) olmaksızın, tamamen aksel yönde girdiği kabul edilmiştir. Aerodinamik açıdan bu durum, giriş teğetsel hız bileşeninin ($V_{\theta 1}$) sıfıra eşit olduğu anlamına gelir. Bu kritik basitleştirme sonucunda denklem, aktarılan toplam enerjinin tamamen çark çıkışındaki teğetsel ivmelenmeye bağlı olduğunu gösteren aşağıdaki forma indirgenir:

$$\Delta H = U_2 V_{\theta 2}$$

Bu sonuç, tasarımcıya çark çıkışındaki kanat hızı (U_2) ve mutlak hızın teğetsel bileşeni ($V_{\theta 2}$) üzerinden, hedeflenen basınç oranına ulaşmak için gereken net işi doğrudan kontrol etme imkanı tanır. Girişteki momentum kaybının minimize edilmesiyle elde edilen bu teorik iş artışı, kompresörün toplam termodinamik verimliliğinin hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmaktadır.

$$U_2 = (rpm) \left(\frac{2\pi}{60} \right) r_2$$

$$W_{\theta 2} = V_{\theta 2} - U_2$$

Çark çıkışındaki kanat hızı (U_2) ile mutlak hızın teğetsel bileşeni ($V_{\theta 2}$) arasındaki oran, kompresörün sadece iş kapasitesini değil, aynı zamanda akışın aerodinamik kararlılığını da belirler. Tasarım kontrol aşamasında bu iki büyüklük arasındaki ilişki şu iki kritik kısıt çerçevesinde değerlendirilmelidir:

- **Aşırı İş Yüğü Riski :** Teorik olarak $V_{\theta 2}$ değerinin U_2 değerinden büyük olması, birim kütle başına aktarılan işin ($\omega = U_2 V_{\theta 2}$) çok yüksek seviyelere çıkacağı anlamına gelir. Ancak bu durum, kanat üzerindeki aerodinamik yüklemenin aşırı artmasına, dolayısıyla erken akış ayrılmalarına ve dramatik verim kayıplarına yol açtığı için tasarımda arzulanan bir senaryo değildir.
- **Akış Açısı ve Ters Akış Fenomeni :** Diğer yandan, U_2 değerinin $V_{\theta 2}$ değerinden belirgin şekilde büyük olması durumunda, bağıl hız vektörü (W_2) ve buna bağlı olan bağıl çıkış açısı (β_2), kanat geometrisi ile uyumsuz bir karakter sergiler. Bu senaryoda akış, kanat profilinin doğal yönelimine "ters yönde" hareket ediyormuş gibi bir vektörel

yönelim kazanır. Bu durum, kompresörün stabil çalışma aralığını daraltarak pompalama (surge) veya tıkanma (choke) gibi istenmeyen operasyonel sınırlara yaklaşmasına neden olur.

$$W_2 = \sqrt{(W_{\theta 2})^2 + (V_2)^2}$$

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{w_{\theta 2}}{V_2}\right)$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{V_{\theta 2}}{V_2}\right)$$

Tablo 4: Elde Edilen Değerler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Çıkış Alanı	A_2	2.3352×10^{-3}	m
Genişlik	h	8.46×10^{-3}	m
Yarıçap	r_2	0.0439	m
Pervane Çıkış Ucu Hızı	U_2	459.487	m/s
Teğetsel Çıkış Hızı	$V_{\theta 2}$	308.552	m/s
Teğetsel Bağlı Hızı	$\omega_{\theta 2}$	-150.925	m/s
Bağlı Hız	W_2	270.883	m/s
□ Açısı	-	-33.862	°
α Açısı	-	53.91	°

Kanat Sayısının Belirlenmesi

Santrifüj kompresör tasarımında kanat sayısı (Z), akışın yönlendirilmesi ile sürtünme kayıpları arasındaki hassas dengenin kurulduğu noktadır. Bu çalışmada kanat sayısının 6, 7 ve 8 olarak varyasyonlandırılmasının temel teknik gerekçeleri aşağıda sunulmuştur:

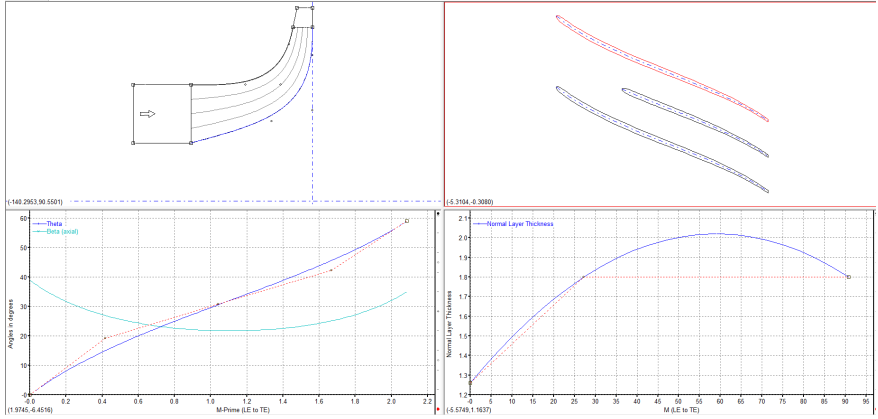
- **Tıkanma (Choke) ve Boğaz Alanı Kısıtı :** Küçük ölçekli kompresörlerde, çark giriş çapı (eye diameter) oldukça küçüktür. Kanat sayısının artırılması, giriş kesitindeki metal hacmini artırarak akışın geçeceği "boğaz alanını" daraltır. Bu durum, düşük kütleli debilerde bile akışın ses hızına ulaşarak "choke" olmasına (tıkanmasına) neden olur. 6-8 arası kanat sayısı, yeterli akış alanı sağlamak için idealdir.
- **Islak Yüzey Alanı ve Sürtünme Kayıpları :** Kanat sayısı arttıkça, akışkanın temas ettiği toplam yüzey alanı ("wetted area") artar. Küçük kanallarda sınır tabaka gelişimi çok hızlı olduğundan, fazla kanat kullanımı viskoz sürtünme kayıplarını (skin friction) artırarak verimi düşürür.
- **Splitter Blade (Ara Kanat) Kullanımı :** Literatürde genellikle az sayıda ana kanat (6-8 adet) tercih edilir ve akışın çıkışa doğru kontrolden çıkmasını önlemek için aralara "splitter" adı verilen kısa kanatçıklar eklenir. Bu sayede hem giriş alanı geniş tutulur hem de çıkışta akışın kanatları takip etmesi sağlanır.
- **İmalat Kolaylığı ve Yapısal Kararlılık :** Küçük boyutlu çarkların 5-eksenli CNC veya döküm yöntemleriyle üretilmesinde, kanat aralıklarının takım girebilecek kadar geniş olması gerekir. 6-8 kanatlı tasarımlar, yapısal dayanım ve imalat toleransları açısından optimum bölgededir.

Kompresör Tasarımının Üç Boyutlu Modellemesi ve Sayısal Analiz Hazırlığı

Analitik hesaplamalar ve GasTurb yazılımı ile doğrulanan termodinamik parametreler, kompresörün üç boyutlu geometrisini oluşturmak üzere **ANSYS BladeGen** modülüne aktarılmıştır. Bu aşama, teorik hız üçgenlerinden elde edilen verilerin, gerçek akış karakteristiğini yansıtacak fiziksel bir kanat profiline dönüştürülmesini sağlar.

Geometrik Tanımlama ve BladeGen Modelleme Süreci

Kompresör kanat yapısı tanımlanırken, aerodinamik performans ile yapısal bütünlük arasındaki denge gözetilmiştir. Tasarımda başlangıç aşamasında literatürle uyumlu olarak 6, 7 ve 8 kanatlı konfigürasyonlar üzerinde durulmuştur ve kanat sayısındaki bu değişimin toplam basınç oranı ve verimlilik üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

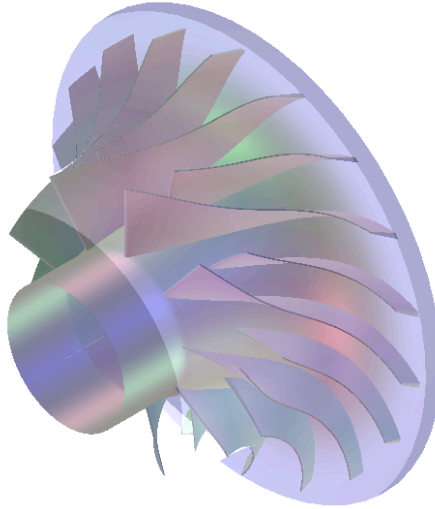
Şekilde görülen BladeGen arayüzü tasarımın dört temel perspektifini sunmaktadır:

- **Meridyonel Görünüm (Sol Üst) :** Kanadın eksenel-radyal düzlemdeki kesitini tanımlar. Bu görünüm, akışın girişten (inlet) çıkışa (outlet) kadar izlediği yolun geometrik sınırlarını ve CFD analizleri için gerekli olan uzantı bölgelerini (domain extensions) içermektedir.
- **Kanat Profili ve Yerleşim (Sağ Üst) :** Kanatların iki boyutlu düzlemdeki profil yapısını ve birbirlerine göre konumlanmalarını gösterir.
- **Açısal Dağılım Grafiği (Sol Alt) :** Kanadın ön kenarından (leading edge) arka kenarına (trailing edge) kadar olan

bükülme karakteristiğini temsil eden $\square$ (bağıl akış açısı) ve θ (meridyonel açı) değerlerinin boyutsuz M' parametresine göre değişimini sunar. Burada M' , $\int_0^s (dm/R) ds$ integrali ile tanımlanan ve akış yolu boyunca yarıçap değişimini normalize eden bir değerdir.

- **Kalınlık Dağılım Grafiği (Sağ Alt) :** Kanadın aerodinamik verimliliğini ve yapısal mukavemetini belirleyen "Normal Layer Thickness" (normal katman kalınlığı) dağılımını gösterir.

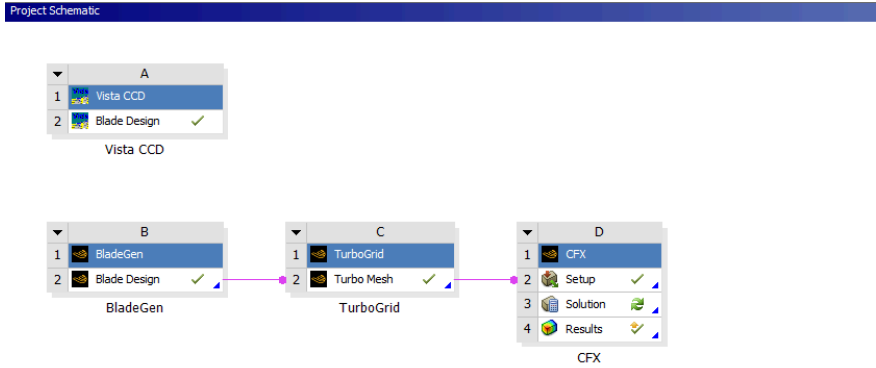
Bu görünümünden elde edilen veriler, farklı akış çizgileri (streamlines) boyunca birleştirilerek üç boyutlu kanat yüzeyini oluşturmaktadır. Bu entegre yaklaşım, kanadın her katmanda (hub, mean, tip) akış dinamiklerine tam uyum sağlamasına olanak tanır ve bir sonraki aşama olan mesh üretimi (sayısal ağ yapısı) için gerekli olan yüksek çözünürlüklü geometriyi sağlar.



Sayısal Ağ Yapısı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Kurulumu

Kompresör geometrisinin BladeGen üzerinde tamamlanmasının ardından, akış alanının fiziksel denklemlerle çözülebilmesi için yüksek kaliteli bir sayısal ağ (mesh) yapısı oluşturulmuştur. Bu süreçte, türbomakinelere özgü otomatikleştirilmiş ağ üretim yetenekleri nedeniyle **ANSYS TurboGrid** modülü tercih edilmiştir.

Ağ Stratejisi ve Model Entegrasyonu



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Şekil'de görülen ANSYS Workbench iş akışı şeması, tasarımın dijital prototipleme sürecini özetlemektedir. BladeGen'den aktarılan geometri verileri, TurboGrid içerisinde "Fine" (Hassas) çözünürlük seviyesinde mesh edilmiştir. Sınır tabaka (boundary layer) gelişimini doğru yakalayabilmek adına duvar yakınlardaki ağ yoğunluğu artırılmış ve türbülans modellerinin gerektirdiği y^+ değerleri göz önünde

bulundurulmuştur. Üretilen kaliteli ağ yapısı, akış analizinin gerçekleştirileceği ANSYS CFX modülünün "Setup" (Kurulum) birimine doğrudan entegre edilmiştir.

Sayısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

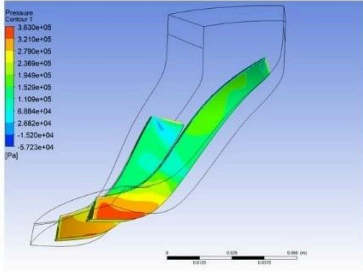
Tasarlanan mikrotürbin kompresörünün performansı; basınç dağılımı, sıcaklık artışı ve hız vektörleri üzerinden global ölçekte analiz edilmiştir.

Aerodinamik Performansın İncelenmesi

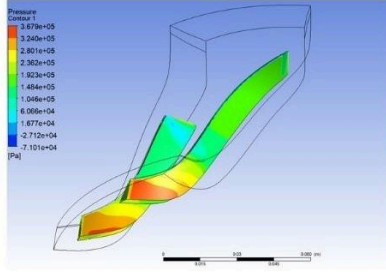
CFX çözücüsünden elde edilen veriler ışığında şu genel değerlendirmeler yapılabilir:

- **Basınç Dağılımı** : Çark girişinden çıkışına doğru gözlemlenen basınç artışı, beklenen basınç oranı (PR) hedefleriyle uyumludur. Akış pasajı boyunca basınç gradyanlarının sürekliliği, kanat profillerinin akış ayrılmasına (separation) yol açmadan verimli bir sıkıştırma yaptığını kanıtlamaktadır.
- **Termal Karakteristik** : Sıkıştırma işlemi sonucunda oluşan sıcaklık artışı, termodinamik çevrim hesaplamalarında öngörülen limitler dahilindedir. Kompresör içindeki maksimum sıcaklık değerleri, kullanılan malzeme limitlerini zorlamamakta ve termal bir risk teşkil etmemektedir.
- **Hız Alanı** : Hız analizleri, akışın kanat uçlarında (tip) ve difüzör girişinde hedeflenen Mach sayılarında seyrettiğini göstermektedir. Global hız dağılımında gözlemlenen ekstrem değerlerin, tasarımın genel stabilitesini bozmadığı ve beklenen aerodinamik fenomenlerle (şok dalgaları veya sınır tabaka etkileşimleri) açıklanabildiği saptanmıştır.

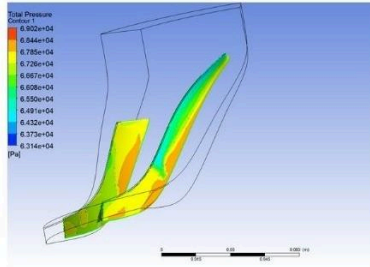
Kanat Sayısının Basınç Dağılımı Üzerindeki Etkisi



(a) Blade Sayısı 9



(b) Blade Sayısı 7



(c) Blade Sayısı 6

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

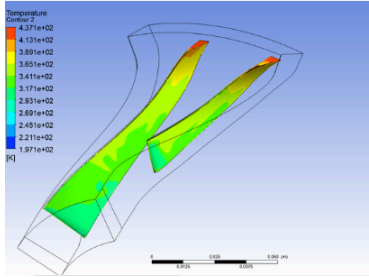
Tasarım sürecinin bir parçası olarak gerçekleştirilen parametrik analizlerde, kanat sayısının (Z) aerodinamik performans üzerindeki etkileri şekilde sunulan basınç konturları üzerinden incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları, kanat sayısı değişiminin akış pasajı içerisindeki basınç gradyanları üzerindeki etkisini şu şekilde ortaya koymaktadır:

- **9 Kanatlı Konfigürasyon (a) :** Akış pasajının daha dar olması nedeniyle basınç artışının daha homojen dağıldığı ve kanat yüzeyleri üzerindeki yüklemenin (blade loading) dengeli olduğu gözlemlenmiştir.
- **7 ve 6 Kanatlı Konfigürasyonlar (b ve c) :** Kanat sayısı azaldıkça akış pasajı genişlemekte, bu durum belirli bölgelerde basınç artış hızını değiştirirse de toplam basınç

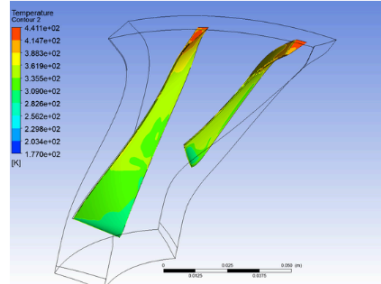
oranı hedefleriyle uyumlu sonuçlar vermektedir. Özellikle 6 kanatlı yapıda, pasaj genişliği nedeniyle akışın kanatları takip etme karakteristiğinde (slip factor etkisi) değişimler gözlenmiş ancak bu durumun makro ölçekte tasarım limitlerini aşmadığı teyit edilmiştir.

Global değerler üzerinden yapılan değerlendirmede, yüksek basınç noktalarının kanat uçlarında yoğunlaştığı ve bu bölgelerin yapısal dayanım açısından sorun teşkil etmediği belirlenmiştir. Elde edilen bu görsel veriler, analitik olarak hesaplanan değerlerin ANSYS CFX ortamında yüksek doğrulukla doğrulandığını simgelemektedir.

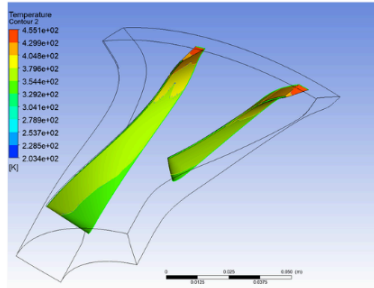
Kanat Sayısının Sıcaklık Dağılımı Üzerindeki Termodinamik Etkisi



(a) Blade Sayısı 9



(b) Blade Sayısı 7



(c) Blade Sayısı 6

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

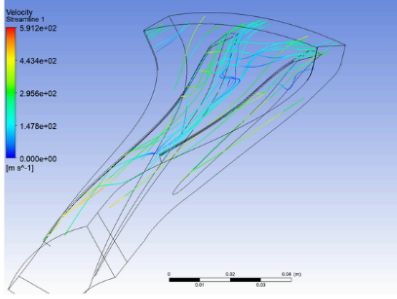
Sıkıştırma işlemi sonucunda akışkanın iç enerjisinde meydana gelen artış, şekilde sunulan sıcaklık konturları üzerinden incelenmiştir. Pervane (impeller) pasajı boyunca girişten çıkışa doğru gözlemlenen sıcaklık gradyanları, kanat sayısı varyasyonlarına bağlı olarak şu karakteristik özellikleri sergilemektedir:

- **Sıcaklık Artış Karakteristiği :** Her üç konfigürasyonda da ($Z=9, 7, 6$), mekanik işin akışkana aktarılmasıyla birlikte sıcaklığın radyal yönde arttığı ve maksimum değerlerin kanat firar kenarlarında (trailing edge) yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.
- **Kanat Sayısı ve Termal Yükleme :** Kanatçık sayısı azaldıkça ($Z=6$ durumunda), kanat yüzeylerindeki yerel sıcaklık değerlerinin diğer iki duruma oranla daha yüksek seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, kanat pasajı genişledikçe akış içerisindeki sirkülasyon bölgelerinin artmasından ve akışkanın kanat yüzeyi ile olan etkileşim süresinin uzamasından kaynaklanan aerodinamik ısınma etkisidir.
- **Global Termal Kararlılık :** Şekil (a)'daki 9 kanatlı yapı, sıcaklık dağılımının kanat boyunca daha homojen yayılmasını sağlayarak termal gerilmeleri minimize etmektedir. 6 kanatlı yapıda (c) ise sıcaklık seviyesi daha yüksek olmasına rağmen, ulaşılan maksimum değerlerin malzeme yapısal sınırları içerisinde kaldığı ve kompresörün operasyonel güvenliğini tehdit etmediği saptanmıştır.

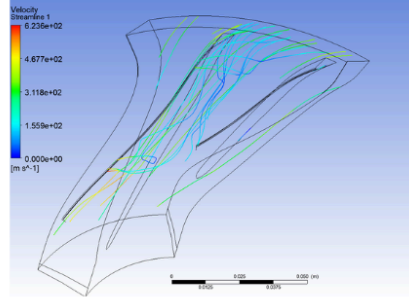
Sayısal analizden elde edilen bu termal veriler, başlangıçta yapılan analitik termodinamik hesaplamaları doğrular niteliktedir. Sıcaklık artışının kontrol edilebilir sınırlar içinde kalması, tasarlanan kanat geometrisinin yüksek devirlerde dahi soğutma

veya malzeme dayanımı açısından sürdürülebilir bir performans sergileyebileceğini kanıtlamaktadır.

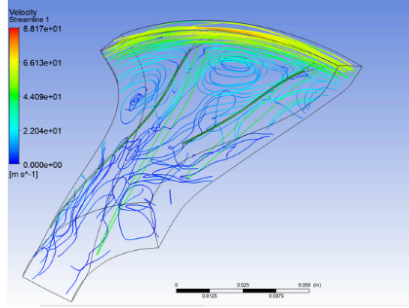
Kanat Sayısının Akış Hız Alanı ve Akış Çizgileri Üzerindeki Etkisi



(a) Blade Sayısı 9



(b) Blade Sayısı 7



(c) Blade Sayısı 6

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Kompresör performansının nihai belirleyicisi olan hız dağılımı ve akış çizgisi (streamline) karakteristiği, şekilde farklı kanat konfigürasyonları için sunulmuştur. Akışkanın çark içerisindeki ivmelenme süreci ve oluşan hız gradyanları üzerine yapılan incelemeler şu temel sonuçları ortaya koymaktadır:

- **Maksimum Hız ve Kinetik Enerji :** Analiz sonuçlarına göre, en yüksek hız değerlerine 6 kanatlı ($Z=6$) tasarımda

ulaşılmıştır. Akış pasajının genişlemesi, akışkanın üzerindeki geometrik kısıtlamaları azaltarak daha yüksek bir ivmelenme potansiyeli sunmaktadır. Bu durum, kinetik enerji kazanımı açısından olumlu bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

- **Akış Kararlılığı ve Girdap Oluşumu :** Akış çizgileri (streamlines) incelendiğinde, kanat sayısı azaldıkça ($Z=6$ durumunda) pasaj içerisinde yerel sirkülasyon bölgelerinin ve ikincil akışların (secondary flows) daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. 9 kanatlı yapıda ($Z=9$) ise akışın kanat formunu daha sadık bir şekilde takip ettiği ve akış ayrılmalarının (flow separation) minimum düzeyde kaldığı saptanmıştır.
- **Hız Vektörlerinin Radyal Dağılımı :** Tüm modellerde hızın girişten çıkışa doğru kademeli olarak arttığı ve maksimum hız vektörlerinin çark çıkış çapında (tip bölgesi) yoğunlaştığı görülmektedir. Bu dağılım, analitik hız üçgenleri hesaplamalarında öngörülen radyal hız artışı ile tam uyum içerisinde dir.

Sayısal Analiz Sonuçlarının Genel Özeti

Gerçekleştirilen karşılaştırmalı CFD analizleri; basınç, sıcaklık ve hız parametrelerinin kanat sayısı ile olan dinamik ilişkisini doğrulamıştır. 6 kanatlı tasarım hız performansı açısından avantaj sunarken, 9 kanatlı tasarımın daha homojen basınç dağılımı ve kararlı akış çizgileri sunduğu belirlenmiştir.

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, küçük ölçekli bir gaz türbinli motor için yüksek verimliliğe sahip bir santrifüj kompresörün aerodinamik ve geometrik tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Analitik hesaplamalarla başlayan süreç, ileri seviye sayısal analiz

teknikleriyle (CFD) doğrulanarak tasarımın operasyonel başarısı kanıtlanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- **Boyutlandırma ve Geometri :** Hub-to-tip yarıçap oranının 0.7 olarak belirlenmesi, mikrotürbin ölçeğinde gerekli olan yapısal bütünlüğü ve mil bağlantı kararlılığını sağlamıştır. BladeGen üzerinde oluşturulan üç boyutlu modeller, teorik hız üçgenlerinden gelen verilerle tam uyum sergilemiş ve akışın çark içerisinde kayıpsız yönlendirilmesine olanak tanımıştır.
- **Kanat Sayısı Analizi :** Gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda kanat sayısının (Z); basınç gradyanları, yerel sıcaklık artışları ve akış hızları üzerinde belirleyici bir role sahip olduğu saptanmıştır. 9 kanatlı yapının homojen bir basınç dağılımı ve kararlı akış çizgileri sunduğu, buna karşın 6 kanatlı yapının daha yüksek hız potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu bölüm kapsamında geliştirilen metodoloji; teorik denklemlerden başlayıp yüksek çözünürlüklü sayısal doğrulamaya kadar uzanan bütünsel bir tasarım disiplini sunmaktadır. Elde edilen veriler, tasarlanan mikrotürbin motorunun diğer bileşenleriyle (yanma odası ve türbin) entegre edilerek yüksek performanslı bir itki sisteminin oluşturulmasına temel teşkil etmektedir.

References

- ANSYS. (2025). *Ansys TurboGrid User's Guide*.
https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/pdf/Ansys_TurboGrid_Users_Guide.pdf
- Aungier, R. H. (2000). *Centrifugal Compressors: A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis*. ASME Press.
- Dixon, S. L. (2005). *Fluid mechanics, thermodynamics of turbomachinery*. Elsevier Science.
- Epstein, A., Senturia, S., Al-Midani, O., Ayon, A., Breuer, K., Chen, K., Ehrich, F., Esteve, E., Fréchette, L., Gauba, G., Ghodssi, R., & Groshenry, C. (1997). *Micro-heat engines, gas turbines, and rocket engines* [The MIT microengine project]. 10.2514/6.1997-1773
- Gas Turbine Theory*. (2001). Pearson Education.
- Mattingly, J. D. (2006). *Elements of propulsion : gas turbines and rockets*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

BÖLÜM 2

IOT TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM SİSTEMLERİNDE RULMAN ALT BİLEŞEN ARIZA SEVİYELERİNİN TİTREŞİM ANALİZİ İLE BELİRLENMESİ

EMİN ÖZTÜRK¹
AZİZ KUBİLAY OVACIKLI²

Giriş

Endüstriyel üretim süreçlerinde makine sağlığı, plansız duruşların önüne geçebilmek, üretim verimliliğini korumak ve talep edilen üretimi kesintisiz bir şekilde karşılayabilmek için kritik bir öneme sahiptir. Makine sağlığını korumak ve bakım maliyetlerini düşürmek için zaman içerisinde pek çok bakım yöntemi ortaya çıkmıştır. Geleneksel bakım yöntemlerinden olan arızı ve periyodik bakım yöntemleri karmaşık hale gelen modern makinelerde oluşabilecek arızaları erken aşamada tespit etme konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu durum, işletmeleri daha güvenilir ve veri odaklı olan farklı bakım yöntemleri arayışına yönlendirmiştir (Romanssini & ark., 2023:1797; Chu & ark., 2024:1).

¹ Bilgisayar Mühendisi, Environics Uygulamalı Bilimler A.Ş., Namık Kemal Üniversitesi Teknopark, Orcid: 0009-0008-6107-5993

² Dr., İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6687-7794

Endüstri 4.0 çağında yaşanan teknolojik gelişmeler ile birlikte işletmeler dijitalleşmeye başlamıştır. Yaşanan dönüşüm üretim süreçlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini mümkün hale getirmiştir (Gürsoy & ark., 2019:56). Bu süreçte ortaya çıkan kestirimci bakım uygulamaları, özellikle makine alt bileşenlerinde yer alan döner elemanlarda oluşabilecek arızaları erken aşamalarda tespit ederek makine sağlığının korunmasında önemli bir görev üstlenmiştir (Arora & ark., 2024:375; Pinheiro, Brandao & Costa, 2019:12).

Makinelerde aşırı yüklenme, yetersiz yağlama ve hatalı hizalama gibi farklı nedenlere bağlı olarak sıklıkla arızaya neden olan rulmanlar, makine sağlığını ve performansını olumsuz olarak etkilemektedir. Rulman sağlığının sürekli olarak izlenmesi, üretim duruşlarının önlenmesine ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinden yararlanan endüstriyel sensörlerin gelişimiyle birlikte, makinelerden toplanan titreşim verilerinin analizi yoluyla rulmanlardaki arızalar otomatik olarak tespit edilmektedir. Rulman arızası tespitinde kullanılan rulman arıza seviyesi ölçeklendirmesi (Bearing Fault Indication-BFI) skoru, oluşan sorunun hangi rulman alt bileşeninden kaynaklandığını belirleyerek bakım personelleri için karar destek sistemi görevi görmektedir. Alt bileşenlerden herhangi birinde tespit edilen arızanın zaman içindeki gelişimi ve rulmanın diğer bileşenlerine sirayet edip etmediği, yağlama periyodunun arttırılarak rulman ömrünün ne kadar uzatılabileceği gibi kritik çıkarımlar yapabilmek için erken aşamada ön bilgi sağlamaktadır.

Literatür Taraması ve Geçmiş Çalışmalar

Rulmanlarda çatlaklar (cracks), yüzey çukurları (pits/spalls), yüzey pürüzlülüğü (surface roughness), ve aşınma (wear) en sık karşılaşılan sorunlardır. Bu arızalar, yorulma, yetersiz

veya fazla yağlama, kirlenme ve aşırı veya açılmal yük gibi nedenlerle oluşur. Rulman yüzeyinde meydana gelen bu hasarlar, karakteristik frekanslarda titreşim genliğinin artmasına yol açarak titreşim analizi yöntemiyle erken aşamada tespit edilebilmektedir (Tandon & Choudhury, 1999:469).

Makine sağlığını korumak ve rulman arızalarını tespit edebilmek için günümüze kadar pek çok araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar olası arızaları erken aşamalarda tespit ederek işletmelerde bakım maliyetlerinin düşürülmesini sağlamıştır (Yuan & ark., 2021:345).

Demir ve Müştak (2021) yaptıkları çalışmada Hilbert yöntemi kullanarak rulman arızası tespiti için zarflama analizi yapan bir sistem geliştirmişlerdir. Arıza tespitinde başarılı olan sistem içerisine ses analizi de ekleyerek arızalı rulmanların oluşturdukları ses seviyelerini tespit etmişlerdir.

Doğan ve Gözüoğlu (2020) yaptıkları çalışmada rulman arıza tespiti için SCADA tabanlı bir durum izleme uygulaması geliştirmişlerdir. Yaptıkları uygulama ile sağlıklı çalışan rulmanlardan veri toplayarak normal çalışma limitleri belirlenmiş ve limit aşımı gerçekleştiğinde arıza tespiti yapılmıştır.

Akkurt ve Arabacı (2019) yaptıkları çalışmada akım işaret analizi ve yapay sinir ağları kullanarak rulman arıza tespiti yapmayı hedeflemişlerdir. Arızalı rulman verileriyle eğittikleri sistemde %95 oranında bir sınıflandırma başarıları elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, makine sağlığını korumak ve rulmanlardaki bileşen bazlı arızaları erken aşamada tespit edebilmek amacıyla bir kestirimci bakım sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, titreşim analizi yöntemleri ile güçlendirilmiş ve literatürdeki çalışmalarda yer almayan denetimsiz öğrenme ile BFI skor hesaplayarak arızanın hangi rulman bileşeninde olduğunu da belirlemektedir. Trakya bölgesinde faaliyet gösteren beyaz kağıt üreticisinin vakum

fanlarına uygulanan yöntem oluşan rulman arızalarını erken aşamalarda başarıyla tespit etmiştir.

Materyal ve Metot

Bu bölümde geliştirilen kestirimci bakım sistemi ele alınacaktır. Makinelardan veri toplama aşamasından başlayarak bulut ortamında yapılan analizlere kadar geçen süreç açıklanacaktır.

Veri toplama

Makinelerden gerçek zamanlı veri toplamak için şekil 1’de yer alan Ascribo marka 3-eksenli titreşim sensörü olan Able Sens kullanılmıştır. Yüksek doğrulukta veri elde edilebilmesi için sensör yerleşimi ve veri toplama parametrelerinin optimizasyonu kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda sensör, sinyal kaybını minimize etmek amacıyla arıza tespiti yapılacak bileşene mümkün olan en yakın noktaya konumlandırılmalıdır. Ayrıca, örnekleme sayısı ve ölçüm süresi makinenin çalışma devri ile rulman karakteristikleri dikkate alınarak belirlenmekte ve veri toplama işlemi öncesinde sensöre tanımlanmaktadır (Öztürk & Ovacıklı, 2025a:448).

şekil 1 Able Sens 3-eksenli ivme sensörü



Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

Veri iletim sürecinde, sensörlerden gelen titreşim verileri öncelikle Ascribo marka endüstriyel ağ geçidinde toplanmaktadır. Ağ geçidi üzerinde çalışan bir ara yazılım katmanı, bu verilerin bulut tabanlı sunucuya güvenli ve kesintisiz bir şekilde gönderimini sağlamaktadır.

Veri analizi

Sunucuya ulaşan veriler Python programlama dili ile geliştirilen kestirimci bakım uygulaması tarafından analiz edilmektedir. Analiz işleminde ilk adım olarak fiziksel makinenin dijital ortamda bir kopyası oluşturulur. Makineye ait çalışma devri, rulman ve dişli bilgisi, fan kanat sayısı gibi makineyi tanımlamaya yarayan bilgiler kullanılarak dijital bir ikizi oluşturulur (Aydın & Akın, 2021:167). Bu yaklaşım sayesinde yapılan analizin makineye özgü olması sağlanır.

Çalışan her makine, içerisinde yer alan döner elemanlar nedeniyle titreşim yaratmaktadır. Titreşim analizi, verideki ani veya periyodik genlik değişimlerini tespit ederek sorunun kaynağı hakkında bilgi sağlayan bir kestirimci bakım yöntemidir.

Titreşim analizi için kullanılan pek çok istatistiksel yöntem mevcuttur. Çalışma kapsamında en çok kullanılan yöntemler ele alınmıştır (Öztürk & Ovacıklı, 2025b:67).

- **Skewness:** Verinin olasılık dağılımının simetrik bir yapıda olup olmadığını belirtir. Sağlıklı makinelerde bu değer 0'a yakındır. Değerin sıfırdan pozitif veya negatif yönde uzaklaşması verinin dengesiz bir yapıda olduğunu göstermektedir.
- **Kurtosis:** Ani darbelere bağlı olarak oluşan uç değerlerin görülme sıklığını ifade eder. Sağlıklı makinelerde bu değer 3 civarındadır. Makinelerde oluşabilecek rulman ve dişli arızalarının erken aşamalarda tespit edilmesi için önemli bir analizdir.

- **RMS Hız (mm/s):** Titreşim sinyali içerisindeki orta frekanslı bileşenlerin enerjisini belirtir. Yüksek enerji seviyesi makinede hizasızlık ve dengesizlik gibi sorunların olabileceğini göstermektedir.
- **RMS İvme (g):** Titreşim sinyali içerisindeki yüksek frekanslı bileşenlerin enerjisini belirtir. Değerin yüksek olması rulman veya dişliye bağlı olarak bir arıza başlangıcı olduğuna işaret eder.
- **Pk-Pk İvme (g):** Sinyaldeki en üst ve en düşük genlik değerleri arasındaki farkı ifade eder. Değerin yüksek olması makinenin şiddetli şekilde titreşim hareketi yaptığını ve gevşeklik olabileceğini göstermektedir.
- **Crest Factor:** Veri içerisindeki kısa süreli ve yüksek genlikli değerlerin tespiti için kullanılır. Sağlıklı makinelerde bu değer 1,4 ile 5 arasındadır. Yüksek değerler rulman arızası veya çatlaklara bağlı olarak oluşan sorunların olabileceğini göstermektedir.

İstatistiksel analiz yöntemleri karmaşık olan ham veriyi anlaşılır hale getirmek için kullanılmaktadır. Makine sağlığı hakkında yorum yapabilmek için elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirilmelidir.

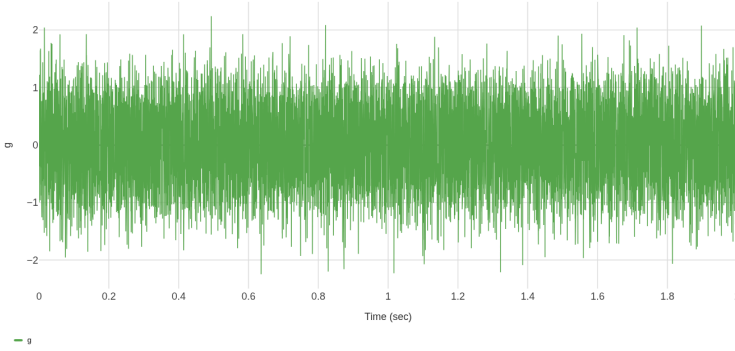
Rulman analizi

Rulmanlar hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi en aza indirerek yük iletimini sağlayan mekanik bileşenlerdir (Şimşiri & Ergenç, 2023:1). Endüstriyel makinelerde sıklıkla kullanılan rulmanlar iç bilezik, dış bilezik, kafes ve bilya olmak üzere dört bileşenden oluşur (Karaçay & Aktürk, 2009:191). İç bilezik, mil üzerinde yer aldığı için yüksek hızda dönerken, dış bilezik, gövdeye sabitlenerek yataklama görevi gördüğü için dönme hareketi yapmayan rulman bileşenidir. Bilyalar iki yüzey arasındaki sürtünmeyi (yağ filmi ile birlikte) azaltarak dönme hareketini

aktarıırken, kafes bilyaları eşit mesafede tutarak birbirleri ile temas etmelerini önlemektedir.

Rulmanlarda titreşim analizi, yanlış hizalama, aşırı yükleme, açılmal/noktasal yük, hatalı yağlama gibi nedenlerle (Şekercioğlu, 2020:198) meydana gelen arızaları erken aşamalarda tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Analiz işlemi için kullanılacak ham veri Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2 Eksenel eksende toplanan ham titreşim verisi



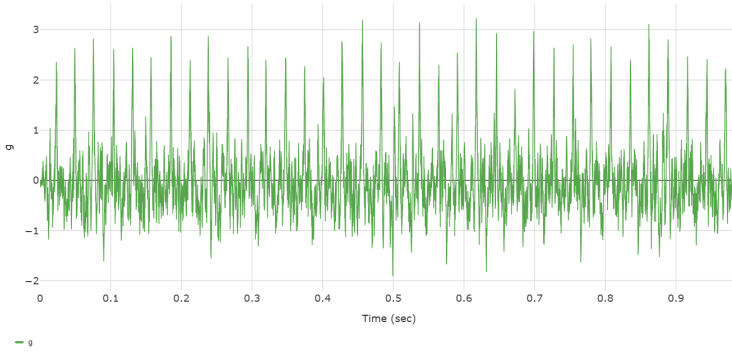
Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

Toplanan ham titreşim verisi içerisinde yer alan rulman arıza bileşenleri, çevresel gürültülerin neden olduğu karmaşıklık sonucunda baskılanmaktadır. Bu nedenle, ham veri üzerinde doğrudan rulman arıza tespiti yapmak mümkün değildir. Gürültüleri temizlemek ve veriyi daha anlaşılır hale getirmek için çalışma kapsamında adaptif filtreleme yöntemi kullanılmıştır (Ovacıklı ve ark., 2016:1586).

Kullanılan yöntemde sinyal adaptif FIR filtresinden geçirilmiş ve filtre katsayıları, filtre çıkışının çarpıklığını (skewness) maksimize edecek şekilde güncellenmiştir. Skewness, sıfır ortalamalı bir sinyal için üçüncü mertebeden istatistiksel bir ölçüttür. Kullanılan ölçüt sayesinde arıza sinyal bileşenleri ön plana çıkarken, gürültü kaynaklı frekanslar bastırılmıştır.

Adaptif filtreleme yöntemi herhangi bir referans sinyale ihtiyaç duymadan çalışarak (denetimsiz öğrenme), rulman arızalarına bağlı oluşan arıza frekanslarını güçlendirerek ön plana çıkarmaktadır. Filtreleme sonucunda elde edilen işlenmiş veri şekil 3'te yer almaktadır.

Şekil 3 Filtreleme sonrasında elde edilen işlenmiş veri



Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

İşlenmiş veri içerisindeki baskın titreşim bileşenlerini belirleyebilmek için güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) hesaplanmıştır. PSD, işlenmiş veride arıza frekanslarını ve katlarını (harmoniklerini) gösterdiğinden döner ekipmanlarda sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yapılan analizde doğrudan uygulanabilirliği nedeniyle periodogram temelli spektral tahmin yöntemi kullanılmıştır.

İşlenmiş veri, spektral kaçağı azaltmak için pencere fonksiyonu ile çarpılır. Pencereleme yöntemi, periyodik olmayan sinyallerde frekans bileşenlerinin daha net ayrılmasını sağlar. Pencerelemiş sinyal Denklem 1'de yer alan formül ile hesaplanmaktadır.

$$x_w[n] = x[n] * w[n] \quad (1)$$

- N=Verinin uzunluğu
- $x[n]$ =İşlenmiş veri ($n=0,1,..., N-1$)

- $w[n]$ =Pencere fonksiyon
- $x_w[n]$ =Pencerelenmiş sinyal

FFT değeri, pedigram hesabında kullanılmaktadır. Değeri sinyal uzunluğundan küçük en büyük 2'nin kuvveti olarak belirlenir. Denklem 2'de yer alan formül ile frekans çözünürlüğü korunarak hızlı bir hesaplama yapılmaktadır.

$$N_{FFT} = 2^{\lceil \log_2(N) \rceil} \quad (2)$$

Ayrık Fourier dönüşümü kullanılarak pencerelenmiş sinyal zaman düzleminde frekans düzlemine aktarılmaktadır. Böylece her bir frekans bileşeninin büyüklüğü ve enerjisi ortaya çıkar. Denklem 3'de yer alan formül ile hesaplanır.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} x_w[n] e^{\frac{-j2\pi kn}{N_{FFT}}} \quad (3)$$

Pencereleme nedeniyle oluşan genlik değişimlerini dengeleyerek doğru güç seviyelerinin elde edilmesini ile çift taraflı PSD değeri Denklem 4'te yer alan formül ile hesaplanır (Kay & Marple, 1981:1380).

$$\hat{S}_{xx}(f_k) = \frac{1}{N_{FFT} * U} |X[k]|^2 \quad (4)$$

- $\hat{S}_{xx}(f_k)$ =Çift taraflı PSD
- U =Pencere fonksiyonunun enerji normalizasyon katsayısı

Normalizasyon katsayısı Denklem 5'te yer alan formül ile hesaplanmaktadır.

$$U = \frac{1}{N_{FFT}} * \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} w[n]^2 \quad (5)$$

Titreşim sinyalleri simetrik spektrum ürettiğinden, yalnızca pozitif frekanslar değerlendirilir ve enerji korunumu için simetrik bileşenler ikiyle çarpılır. Bu adım, PSD'nin fiziksel olarak

yorumlanabilir hâle gelmesi için gereklidir. Denklem 6’da yer alan formül ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} \hat{S}_{xx}^{(1)}(f_k) &= \hat{S}_{xx}(f_0), & k &= 0 \\ \hat{S}_{xx}^{(1)}(f_k) &= 2\hat{S}_{xx}(f_k), & 1 \leq k \leq \frac{N_{FFT}}{2} - 1 \\ \hat{S}_{xx}^{(1)}(f_k) &= \hat{S}_{xx}(f_{\frac{N_{FFT}}{2}}), & k &= \frac{N_{FFT}}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

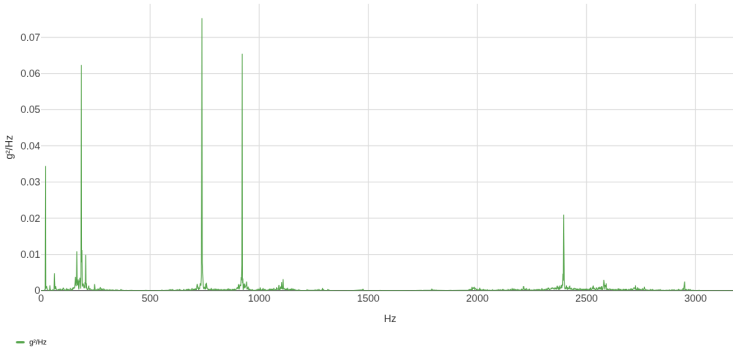
Hesaplanan her bir PSD değerin hangi frekans değerine karşılık geldiği Denklem 7’de yer alan formül ile hesaplanmaktadır.

$$f_k = \frac{k}{N_{FFT}} * f_s \quad (7)$$

- f_s = Sinyalin örnekleme frekansı

Gerekli hesaplamaların yapılmasından sonra elde edilen spektrum Şekil 4’te yer almaktadır.

Şekil 4 İşlenmiş veriden elde edilen spektrum grafiği



Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

Spektrum içerisinde aranacak olan arıza frekansları makinede kullanılan rulmana özgü olarak (ve en sık arıza tespit edilen) iç bilezik arıza frekansı (BPFI), dış bilezik arıza frekansı (BPFO) ve bilya arıza frekansı (BPFR) belirlenmelidir. Çalışmada analiz edilen makine SKF marka 1311 ETN9 model rulman kullanmaktadır.

- d = Bilya çapı (mm)
- D = Bilyaların merkezden geçtiği dairenin çapı (mm)
- Z = Bilya sayısı
- α = Temas açısı (derece)
- n = Milin dönüş hızı (devir sayısı)

Rulman bileşenlerine ait arıza frekansları denklem 8, 9 ve 10'da yer alan formüller ile hesaplanmaktadır.

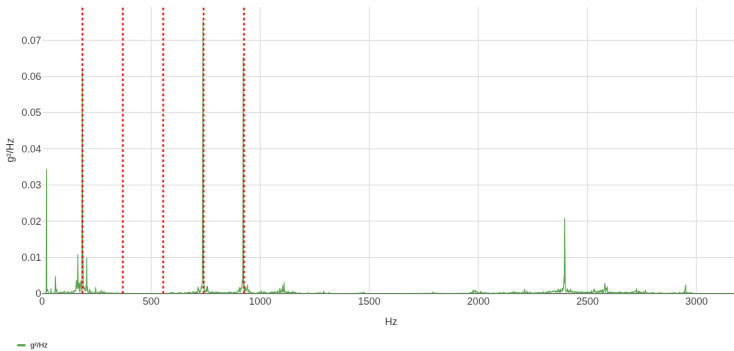
$$BPFI = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right) \quad (8)$$

$$BPFO = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right) \quad (9)$$

$$BPFR = \frac{D \cdot n}{d \cdot 60} \cdot \left(1 - \left[\frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right]^2 \right) \quad (10)$$

Hesaplanan arıza frekanslarına ait 10 harmonik değeri spektrum üzerinde kontrol edilir. Harmoniklerdeki frekans genlikleri incelenerek rulman bileşenlerine ait arıza değerleri hesaplanır. Bu işlem tüm rulman bileşenleri için ayrı ayrı yapılır. Şekil 5'te BPFO için arıza frekanslarının spektrum üzerindeki gösterimi yer almaktadır.

Şekil 5 1311 ETN9 rulmanına ait dış bilezik arıza frekansları



Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

Yapılan rulman analizi sonucunda BPFI %0.26, BPFO %20.03 ve BPFR %0.53 olarak tespit edilmiştir. Rulman arıza

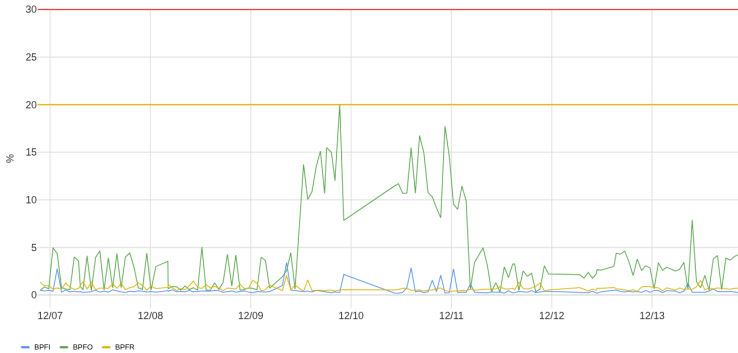
değerlendirmesinde, en yüksek değere sahip frekans bileşeni BFI skor olarak kabul edilmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Makinelardan toplanan titreşim verileri istatistiksel analiz yöntemleri ve rulman analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Özellikle skewness ve kurtosis gibi istatistiksel değerlerin zaman içerisinde arttığı gözlemlenmiştir. Değerlerlerdeki yükseliş, sinyalde ani darbe bileşenlerinin arttığını ve rulman üzerinde mikroskobik hasarların oluştuğunu göstermektedir.

Ham titreşim verisi üzerinde yapılan analizlerden sonra adaptif filtreleme yöntemi ile veri içerisindeki gürültüler baskılandığı ve arıza bileşenlerinin belirgin hale geldiği görülmüştür. Adaptif filtrelemenin referans sinyale ihtiyaç duymadan çalışması önemli bir avantaj sağlamaktadır. Rulmana özgü hesaplanan BPFI, BPFO ve BPFR arıza frekans ve harmonik değerleri, filtrelenmiş veri kullanılarak elde edilen spektrumda net bir şekilde tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerin zamana göre değişimi Şekil 6'da yer almaktadır.

Şekil 6 Rulman arıza değerlerinin zamana göre değişim grafiği

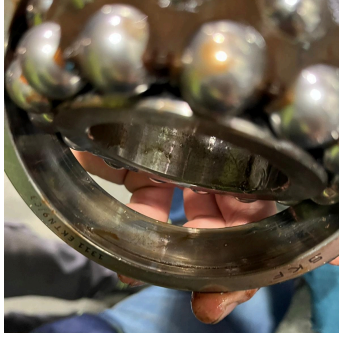


Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

BFI skor, rulmana özgü arıza frekansları ve bunların harmonik genliklerinin birlikte değerlendirilmesiyle, arızanın hangi rulman alt bileşeninde yoğunlaştığını sayısal olarak ifade eden bir

gösterge'dir. Analiz sonucunda sistemde dış bilezik kaynaklı bir arıza tespit edilmiştir. Arıza tespit edilen rulman Şekil 7'de yer almaktadır.

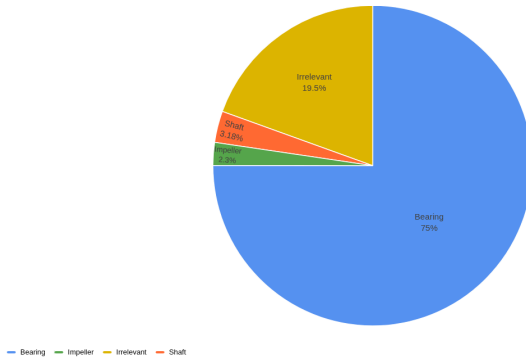
Şekil 7 Dış bilezik arızası tespit edilen rulman



Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

Yapılan enerji kaynağı analiz, titreşim verisi içerisindeki sinyallerin hangi makine alt bileşeninden kaynaklandığını ortaya çıkarmaktadır. Şekil 8'de titreşim verisi içerisindeki enerji dağılımı yer almaktadır.

Şekil 8 Enerji kaynağı analizi grafiği



Kaynak: Yazar tarafından üretildi.

Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, rulman arızalarının erken aşamalarda tespit edildiği görülmüştür. Bu durum plansız duruşları önleyerek sistemlerinin bakım maliyetlerini azaltma ve ekipman ömrünü uzatma potansiyelini doğrulamaktadır.

Sonuç

Çalışmada, endüstriyel döner ekipmanlardaki rulman arızalarını tespit edebilmek için IoT ve bulut bilişim tabanlı bir kestirimci bakım sistemi geliştirilmiştir. Makinelerden toplanan titreşim verileri adaptif filtreleme ve istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiş ve rulman arızaları frekans dönüşümü kullanılarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sistemin çevresel gürültüler olmasına rağmen rulman arızalarının başarılı bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir.

İstatistiksel analiz yöntemleri, makine sağlığı hakkında genel bir değerlendirme imkanı sağlamaktadır. BFI skor, denetimsiz öğrenme yaklaşımı ile sorunun hangi rulman bileşeninden kaynaklandığını ortaya çıkarmakta ve arızanın gelişim hızı ile ilgili net bir skor trendi oluşturmaktadır. Bu özelliği sayesinde geliştirilen sistem, literatürde yer alan diğer kestirimci bakım uygulamalarından ayrılmaktadır.

Geliştirilen sistem, rulmanlardaki mekanik arızaları erken aşamalarda tespit ederek plansız duruşların önüne geçilmesine ve böylece bakım maliyetlerinin düşürülmesine olanak tanımıştır. Endüstriyel bir işletmedeki vakum fanları üzerinde kullanılan sistem, elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde güvenilir ve sürdürülebilir bir çalışma sergilediğini kanıtlamıştır.

Kaynakça

Akkurt, İ. & Arabacı, H. (2019). Sürücüden beslenen asenkron motorlarda rulman arızalarının stator akımı kullanılarak tespiti. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 2(1),122-134.

Arora, J.K. & Rajagopalan, S. & Singh, J. & Purohit, A. (2024). Low-frequency adaptation-deep neural network-based domain adaptation approach for shaft imbalance fault diagnosis. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1(12), 375-394. Doi: 10.1007/s42417-022-00848-7.

Aydın, Ö. & Akın, E. (2021). Endüstri 4.0 tabanlı üretim sistemleri ve kestirimci bakım yaklaşımlarında digital ikiz uygulamalarının incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(33), 167-178.

Chu, T. & Nguyen, T. & Yoo, H. & Wang, J. (2024). A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, 2(10), 1-13. Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26282.

Demir, H.G. & Müştak, O. (2021). Rulman hasarlarının titreşim ve gürültü analizi ile tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25(1), 571-581. Doi: doi.org/10.31590/ejosat.869285.

Doğan, Z. & Gözüoğlu, S.G. (2020). Durum izleme ve istatistiksel süreç kontrolü kullanarak şebeke kalkışlı daimi mıknatıslı senkron motorda rulman arızası tespiti. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(7), 781-794.

Gürsoy, M.Ü. & Çolak, U.C. & Gökçe, M.H. & Akkulak, C. & Ötleş, S. (2019). Endüstri için kestirimci bakım. *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry*, 1(3), 56-66.

Karaçay, T. & Aktürk N. (2009). Bilyalı rulman yerel kusurlarının neden olduğu titreşimlerin modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2(24), 191-197.

Kay, S.M. & Marple, S.L. (1981). Spectrum analysis-A modern perspective. *IEEE*, 11(69), 1380-1419.

Ovacıklı, A.K. & Pääjärvi, P. & LeBlanc, J.P. & Carlson, J.E. (2016). Recovering periodic impulsive signals through skewness maximization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 6(64), 1586-1596. Doi: 10.1109/TSP.2015.2502549.

Öztürk, E. & Ovacıklı, A.K. (2025a). Endüstride bulut bilişim tabanlı kestirimci bakım ve denetimsiz titreşim analizi

uygulaması. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(9), 448-461. Doi: 10.46519/ij3dptdi.1731806.

Öztürk, E. & Ovacıklı, A.K. (2025b). IoT ve bulut bilişim tabanlı kestirimci bakım. Eyyüp Gülbandır (Ed.), *Yapay Zekâ Tabanlı Sistemler: Teori, Uygulama ve Gelecek Perspektifleri-1* içinde (s. 67-76). Ankara: Bidge Yayınları.

Pinheiro, A.A. & Brandao, I.M. & Da Costa, C. (2019). Vibration analysis in turbomachines using machine learning techniques. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2(4), 12-16. Doi: 10.24018/ejeng.2019.4.2.1128.

Romanssini, M. & de Aguirre, P.C. & Compassi-Severo, L. & Girardi, A.G. (2023). A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng*, 3(4), 1797-1917. Doi: 10.3390/eng4030102.

Şekercioğlu, T. (2020). Rulman ömürlerinde güvenilirlik ve etkileyen faktörlerin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 700(61), 198-207. Doi: 10.46399/muhendismakina.749835.

Şimşiri, O. & Ergenç, A.F. (2023). Sıkı geçme operasyonu için ANFIS ve yapay sinir ağları modellemesinin matematiksel model ile karşılaştırılması. *İstanbul Teknik Üniversitesi*, 1-7.

Tandon, N. & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 8(32), 469-480. Doi: 10.1016/S0301-679X(99)00077-8.

Yuan, X. & He, Y. & Wan, S. & Qiu, M. & Jiang, H. (2021). Remote vibration monitoring and fault diagnosis system of synchronous motor based on internet of things technology. *JMobile Information Systems*, 1(2021), 345-624.

BÖLÜM 3

TERSİNE MÜHENDİSLİK SÜREÇLERİNDE GEOMAGIC for SOLIDWORKS ENTEGRASYONU TASARIM ÖZELLİKLERİ ve SAPMA ANALİZİNİN İNCELENMESİ

Recep KARA¹
İlyas KARTAL

Giriş

Günümüz üretim teknolojilerinde, fiziksel nesnelerin dijital ortama hassas bir şekilde aktarılmasını sağlayan tersine mühendislik süreçleri giderek önem kazanmaktadır. Ürün geliştirme, kalite kontrol ve hasarlı parçaların yeniden üretimi gibi alanlarda kritik bir rol oynayan bu süreç, fiziksel formun dijital ikize dönüştürülmesini hedefler. Ancak, optik tarama sistemlerinden elde edilen nokta

¹Doktora Öğrencisi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Orcid:0000-0001-9596-7692

Doçent Doktor, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid:0000-0001-9677-477X

bulutu (point cloud) ve ağ (mesh) verilerinin, düzenlenebilir parametrik CAD modellerine dönüştürülmesi süreci, geleneksel yöntemlerle zaman alıcı ve hataya açık olabilmektedir.

Tersine mühendislik uygulamalarında veri toplama yöntemi, elde edilen sonucun doğruluğunu ve kullanılabilirliğini doğrudan etkiler. Geleneksel ölçüm aletleri (kumpas, mikrometre vb.) prizmatik parçaların temel boyutlarını belirlemede yeterli olsa da, endüstrinin gerektirdiği karmaşık ve serbest formlu yüzeylerin analizinde yetersiz kalmaktadır. Geleneksel yöntemler ile modern 3D tarama teknolojileri arasındaki temel farklar Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1 Geleneksel Ölçüm Yöntemleri ile 3D Tarama Tabanlı Tersine Mühendislik Sürecinin Karşılaştırılması

Karşılaştırma Kriteri	Geleneksel Yöntemler (Kumpas, Mikrometre, CMM)	3D Tarama ve Geomagic for SOLIDWORKS Entegrasyonu
Veri Yoğunluğu	Sınırlı sayıda, tekil ölçüm noktaları.	Saniyede milyonlarca nokta (Nokta Bulutu) ile tüm yüzey verisi.
Geometrik Yetenek	Prizmatik/düzgün şekiller için uygundur. Organik yüzeylerde yetersizdir.	Serbest formlu (Freeform), amorf ve karmaşık yüzeyleri eksiksiz tanımlar.
Doğrulama	Sadece temas edilen noktaların doğruluğu bilinir.	Tüm yüzeyin CAD model ile kıyaslandığı "Sapma Analizi" mümkündür.
Modelleme Süreci	Manuel ölçüm ve sıfırdan çizim gerektirir.	Tarama verisi referans alınarak doğrudan üzerinde modellenir.
Hata Riski	Yüksektir (Kullanıcı ve okuma hataları).	Düşüktür (Fiziksel form dijital ikize dönüştürülür).

Karşılaştırma Kriteri	Geleneksel Yöntemler (Kumpas, Mikrometre, CMM)	3D Tarama ve Geomagic for SOLIDWORKS Entegrasyonu
Zaman Maliyeti	Karmaşık parçalarda günler sürebilir.	Veri toplama dakikalar, modelleme saatler mertebesinde.

Tablo 1’de görüldüğü üzere, optik tarama teknolojileri "bütünsel" (volumetrik) bir veri seti sunarak manuel veri girişi riskini ortadan kaldırmaktadır. Bu çalışmada ele alınan yöntem; fiziksel parçanın taranması, nokta bulutunun işlenmesi, parametrik CAD modelinin oluşturulması ve son olarak sapma analizi ile doğrulanmasını içeren bütünlük bir süreci kapsamaktadır (Şekil 1).

Şekil 1 Tersine Mühendislik Süreci



Literatür incelendiğinde, tersine mühendislik süreçlerinin matematiksel temellerinden endüstriyel uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Ma ve Kruth (1998), tersine mühendislik sürecinde NURBS eğri ve yüzey uydurma yöntemlerini ele almış, serbest biçimli parçalardan CAD modeli oluşturmak için iki aşamalı doğrusal bir yaklaşım önermişlerdir. Bu temel çalışma, kontrol noktalarının optimizasyonu ile fiziksel modellerden dijital yüzeylerin oluşturulabileceğini göstermiştir.

Uygulama alanlarına bakıldığında, Ayyıldız (2009) hasarlı makine elemanlarının (dişli çarklar, şaftlar vb.) tersine mühendislik

ile yeniden tasarımı üzerine çalışmış ve bu yöntemin yedek parça eksikliğini gidermede etkili olduğunu vurgulamıştır. Benzer şekilde Demir (2018), CAD datası bulunmayan parçaların (özellikle medikal implantlar ve endüstriyel parçalar) optik tarama ve CMM yöntemleriyle sayısallaştırılarak katı modellere dönüştürülmesini incelemiş, sürecin model bütünlüğünü sağladığını belirtmiştir. Daha güncel çalışmalarda ise yazılım entegrasyonları ön plana çıkmaktadır. İnce (2023), STL formatındaki verilerin MATLAB ve SolidWorks API entegrasyonu ile parametrik modellere dönüştürülmesi üzerine çalışarak, STL verilerinin düzenlenebilir formatlara evrilmesi için pratik çözümler sunmuştur.

Mevcut literatürdeki çalışmalar genellikle veri toplama veya modelleme aşamalarına odaklanırken, bu çalışma 3D tarama verilerinin doğrudan SOLIDWORKS ortamında işlenmesine olanak tanıyan Geomagic for SOLIDWORKS eklentisinin entegrasyon yeteneklerine ve doğrulama metodolojilerine odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında, tarama verisinin referanslanması ve otomatik yüzey örme gibi tasarım özelliklerinin yanı sıra; oluşturulan modelin orijinal veriye sadakati "Sapma Analizi" (Deviation Analysis) aracı kullanılarak nicel olarak irdelenmiştir. Bu yaklaşım, tasarım sürecini hızlandırmakla kalmayıp, model doğruluğunu anlık renk haritaları ve tolerans kontrolleri ile güvence altına almayı hedeflemektedir.

Geomagic for SOLIDWORKS Arayüzünde Mesh Hazırlığı ve Optimizasyon Süreçleri

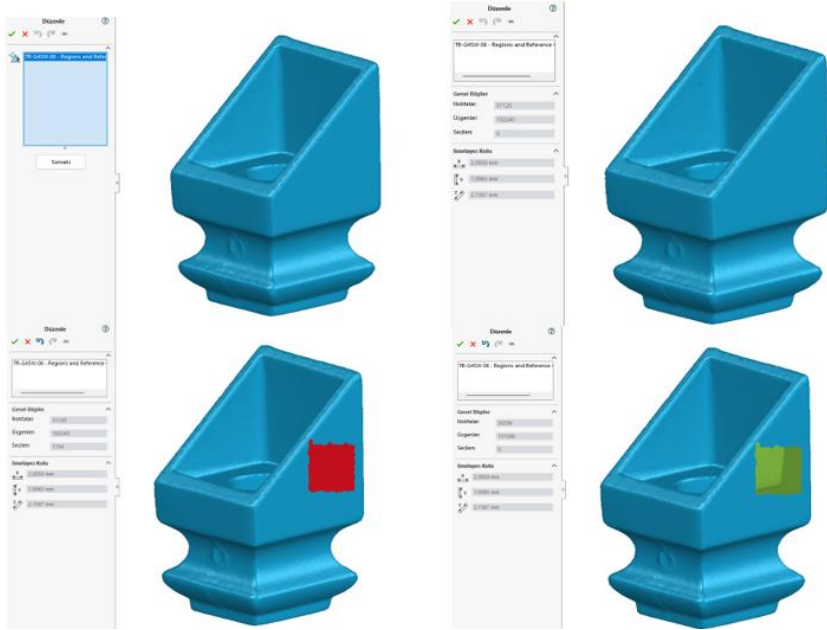
Tarama modellerinin SOLIDWORKS içerisine dahil edilerek tasarıma uygun bir referans haline getirilmesi sürecinde, aşağıda açıklanan yöntemler üzerinden çalışma yürütülmelidir.

Düzenle Komutu

Mesh model üzerinde yer alan gereksiz detayların, gürültülerin veya fikstür gibi istenmeyen geometrik unsurların modelden uzaklaştırılması için 'Sil' (Delete) ve düzenleme komutları

kullanılmaktadır. Ayrıca, bu arayüz üzerinden modelin üçgen ve nokta sayısı anlık olarak izlenebilmektedir. Elde edilen bu veriler ışığında, modelin hesaplama yükünü azaltmak ve çalışma performansını artırmak amacıyla 'Basitleştirme' komutunun uygulanıp uygulanmayacağına karar verebilmektedir.

Şekil 2 Düzenle Komutu



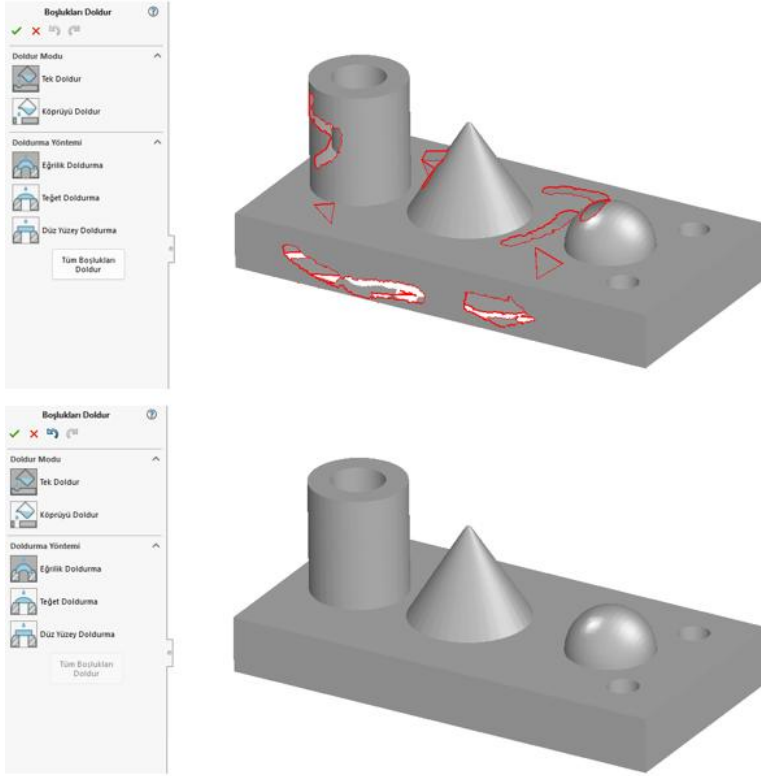
Boşlukları Doldur Komutu

Tarama sürecinde model üzerinden oluşan boşlukları ve modelin kapalı bir hacim (watertight) haline getirilmesi amacıyla 'Delik Doldurma' (Fill Holes) komutu kullanılmaktadır.

Bu işlemde, eksik bölgeler tasarımcı tarafından tekil olarak seçilebileceği gibi, yazılım tarafından otomatik algılanarak toplu halde de kapatılabilmektedir. Deliği çevreleyen yüzeyin geometrik karakteristiği analiz edilerek; kapatılacak bölgenin düz (flat), teğet (tangent) veya eğrilik (curvature) sürekliliğini koruyacak en uygun doldurma algoritması tercih edilmektedir.

STL model üzerindeki tüm açıklıklar toplu doldurma fonksiyonu ile tek seferde kapatılarak 'su sızdırmaz' (watertight) bir kapalı hacim formuna getirilmiştir.

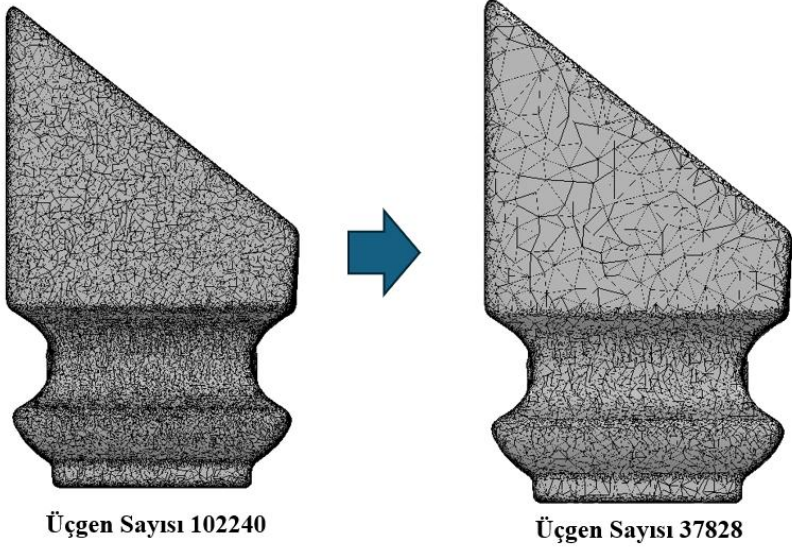
Şekil 3 Boşlukları Doldur Komutu



Basitleştir Komutu

Bu komutun temel amacı, taranmış modelin geometrik formunu ve boyutsal doğruluğunu muhafaza ederek toplam üçgen (poligon) sayısını minimize etmektir. Yüksek poligon yoğunluğuna sahip STL modeller, CAD ortamında hesaplama yükünü artırarak performans kayıplarına neden olabilmektedir. Bu komut sayesinde veri seti optimize edilmekte ve tasarım süreçlerinde önemli bir hız kazanılmaktadır.

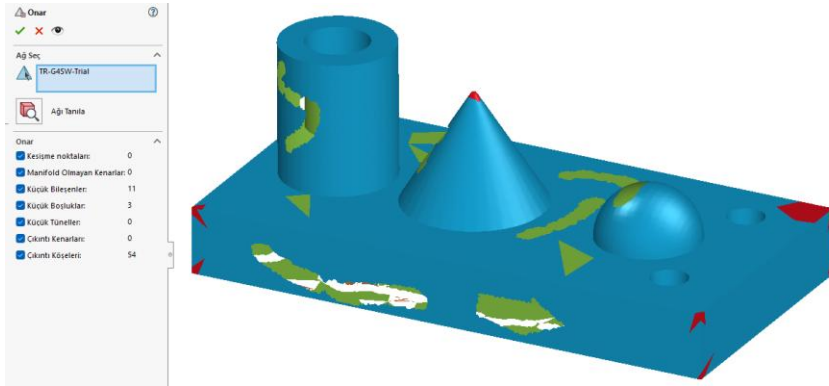
Şekil 4 Basitleştir Komutu



Onar Komutu

Tarama sürecinde oluşan kendiyle kesişen yüzeylerin ve modelden bağımsız küçük gürültü parçacıklarının tespit edilerek düzeltilmesini kapsamaktadır. Modelin geometrik olarak hatasız olarak elde edilmesine sağlamaktadır.

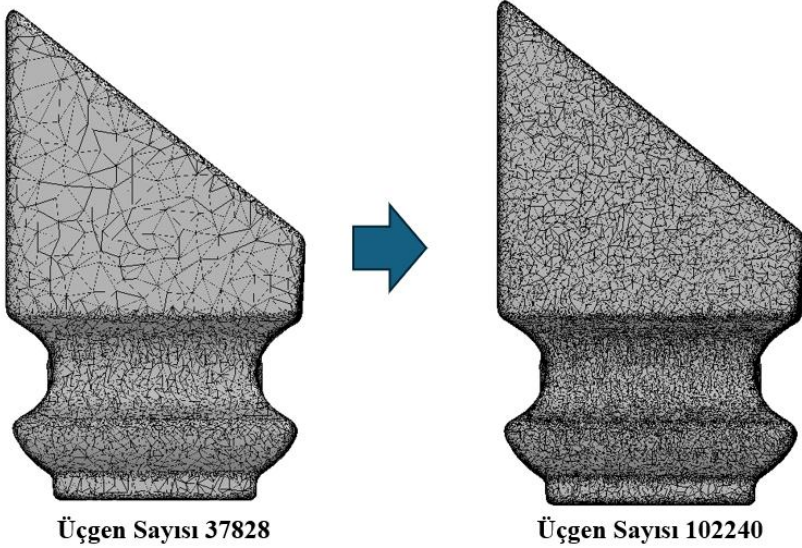
Şekil 5 Onar Komutu



Yeniden Ağ Oluştur Komutu

Üçgen dağılımındaki düzensizlikleri gidermek için yeniden ağ oluşturma (remeshing) işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu adım, modelin geometrik formunu korurken yüzeydeki üçgen yoğunluğunu standardize etmektedir.

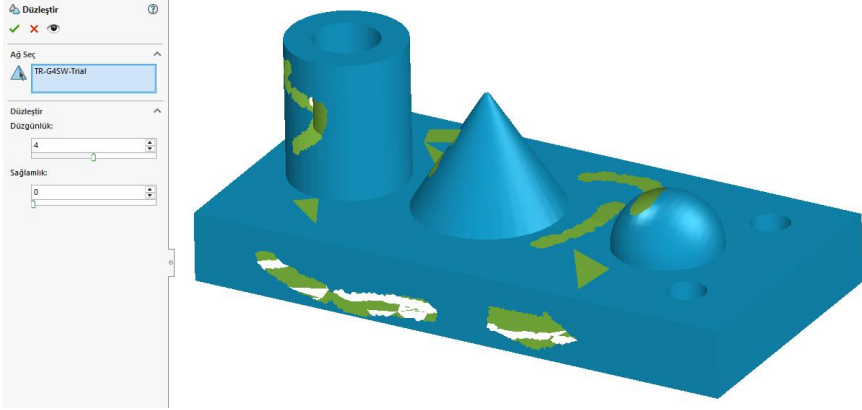
Şekil 6 Yeniden Ağ Oluştur Komutu



Düzleştir Komutu

Taranmış nokta bulutu verisinden elde edilen mesh yüzey pürüzlerini gidermek için kullanılmaktadır. Bu işlem, modelin geometrik formunu değiştirmeden, lokal yüzey dalgalanmalarını düzelterek sonraki CAD modelleme aşaması için daha temiz bir referans yüzey oluşturulmasını sağlamaktadır.

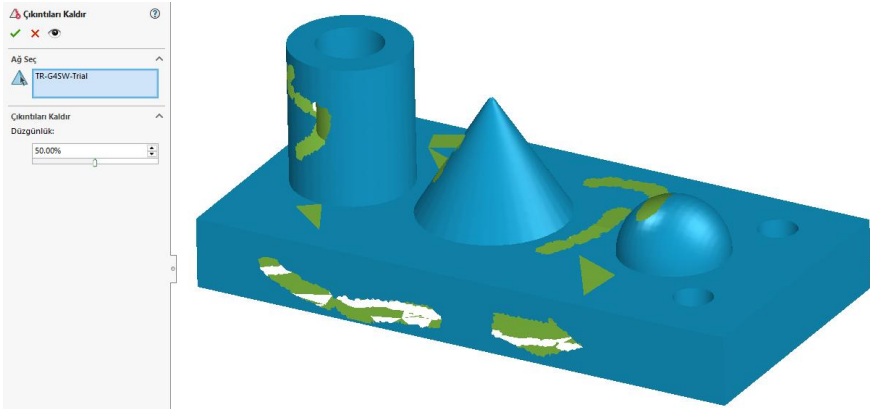
Şekil 7 Düzleştir Komutu



Çıkıntıları Kaldır Komutu

Tarama verisinin poligon modele dönüştürülmesi sonrasında, yüzey üzerinde oluşan ve 'spike' (diken) olarak adlandırılan aykırı geometrik çıkıntıların kaldırılmasını sağlamaktadır.

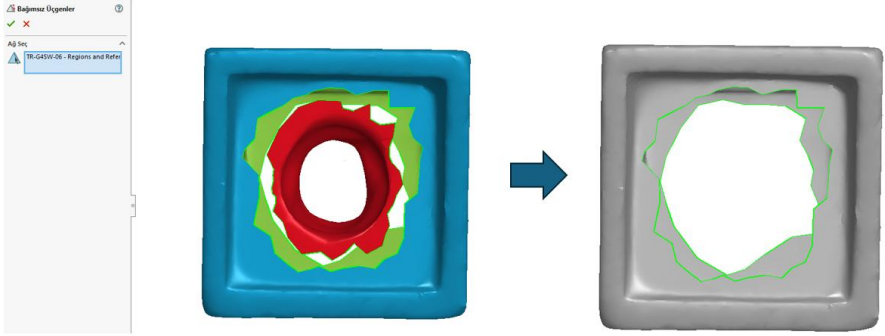
Şekil 8 Çıkıntıları Kaldır Komutu



Bağımsız Üçgenler Komutu

Taranmış model üzerinde STL modelden bağımsız geometrilerin kaldırılarak modelin temizlenmesini sağlamaktadır.

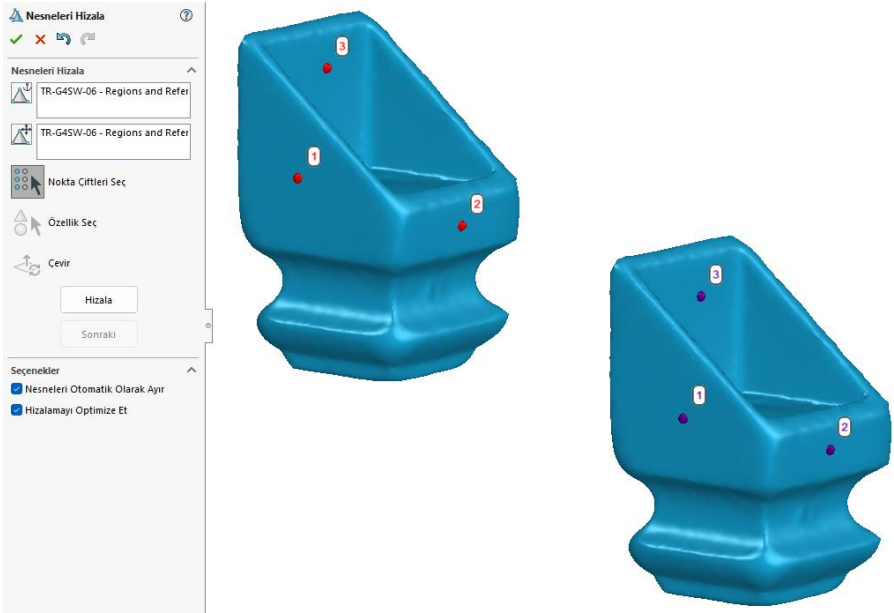
Şekil 9 Bağımsız Üçgenler Komutu



Nesneleri Hizalama Komutu

İki farklı STL modelin birbirine benzeyen bölgelerini seçim yaparak üst üste gelmesini sağlamaktadır.

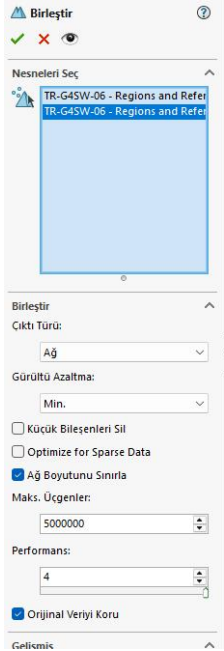
Şekil 10 Nesneleri Hizalama Komutu



Birleştir Komutu

İki veya daha fazla STL modeli seçerek tek bir STL model oluşturmayı sağlamaktadır.

şekil 11 Birleştir Komutu



GEOMAGIC for SOLIDWORKS Tasarım Özellikleri ve CAD Modelleme Yaklaşımı

Referans Geometrisi Komutu

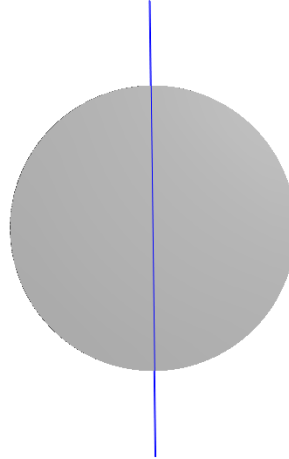
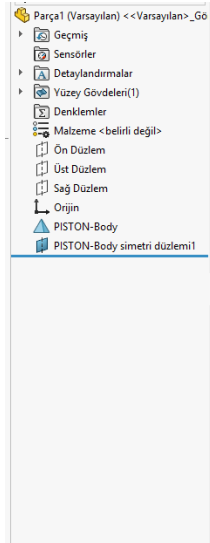
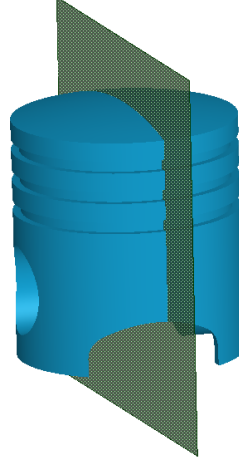
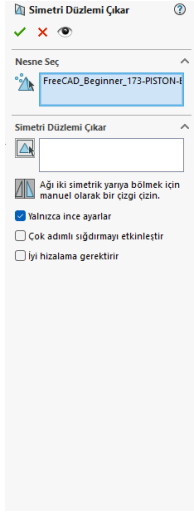
STL model üzerinden simetri düzlemi, düzlem, referans eksenini ve referans noktası çıkarmaya kolaylık sağlamaktadır.

Simetri Düzlemi Çıkar

Bu komut, taranmış ağ (mesh) verisini analiz eder ve parçayı iki eş parçaya bölen en uygun matematiksel düzlemi otomatik olarak oluşturur. Gerçek hayatta hiçbir üretilmiş parça %100 simetrik değildir (üretim hataları ve deformasyonlar nedeniyle). Bu komut,

parçanın sağ ve sol tarafındaki tüm noktaların ortalamasını alarak teorik simetri merkezini bulur.

Şekil 12 Simetri Düzlemi Çıkarma



STL formatındaki tarama verisinin SOLIDWORKS ortamına import edilmesiyle birlikte, modelin tasarım uzayındaki konumu ile varsayılan koordinat sistemi arasında bir uyumsuzluk meydana

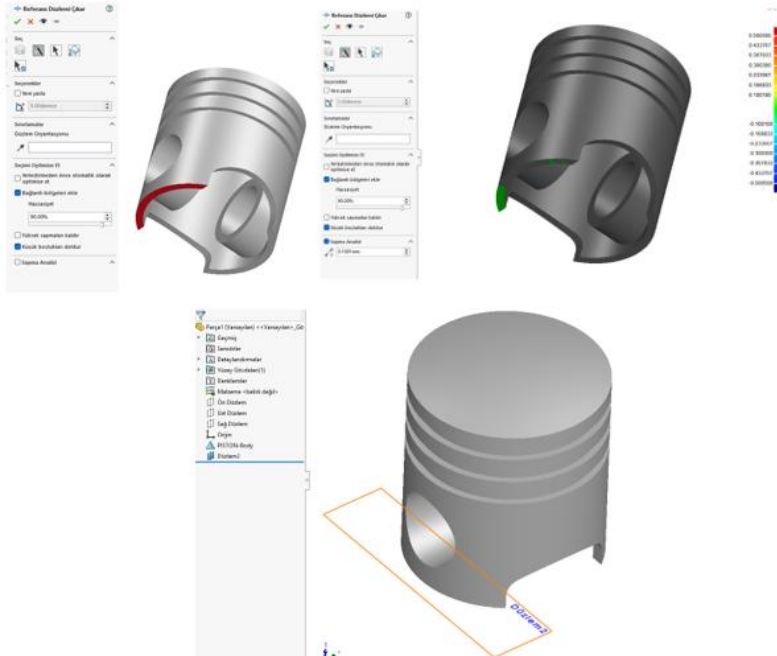
gelmektedir. Bu durum, model üzerinden tanımlanan yardımcı referans düzlemler vasıtasıyla gerçekleştirilen 'Mesh Hizalama' (Orient Mesh) işlemi ile giderilmelidir. Bu aşamada, modelin geometrik merkezini referans alan simetri düzleminin kullanımı, parçanın ana eksenlere (X, Y, Z) doğru ve hızlı bir şekilde oturtulmasında önemli bir kolaylık sağlamaktadır.

Referans Düzlem Çıkar

Mesh ağı üzerinden herhangi bir yer seçim sağlanarak düzlem oluşturma işlemi sağlamaktadır. Komut içerisinde yer alan sapma analizi ile model ile oluşturulan düzlemin doğruluğunu kontrol etme imkânı tanımaktadır.

Taban bölgesinden seçim yapılan kırmızı alana göre düzlem oluşturma işlemi yapılmıştır. Seçenekler içerisinde sapma analizi aktif hale getirilip düzlemin doğruluğu kontrol edilebilmektedir.

Şekil 13 Referans Düzlem Çıkarma

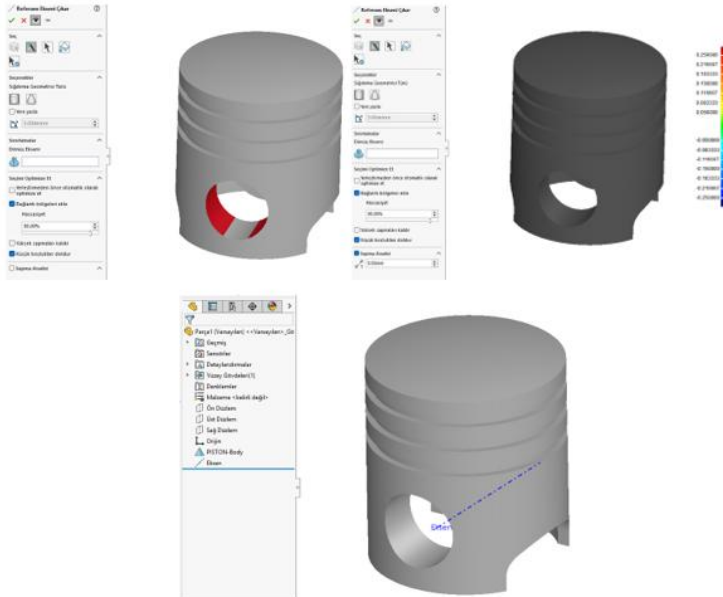


Referans Eksenı Çıkar

Tersine mühendislik süreçlerinde, silindirik, konik veya dönel (rotasyonel) geometriye sahip parçaların merkez hatlarının hassas bir şekilde tanımlanabilmesi için "Referans Eksenı Çıkar" komutu kullanılmaktadır. Elde edilen bu referans eksen, özellikle döndürerek katı oluşturma operasyonlarında profilin dönme merkezi olarak temel işlevi görürken, aynı zamanda parçanın uzaydaki konumunun belirlendiği hizalama (alignment) aşamasında da delik merkezlerinin koordinat eksenleri ile karşılaştırılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Mesh model üzerinden silindirik geometri üzerinden klavyeden sift tuşuna basarak çoklu seçim yapılabilir. Bu sayede oluşan eksenin doğruluğu artırılmış olacaktır. Düzlem komutunda olduğu gibi yine bu komut içerisinde de oluşacak eksenin sapma analizi ile doğruluğunu kontrol etmek mümkündür.

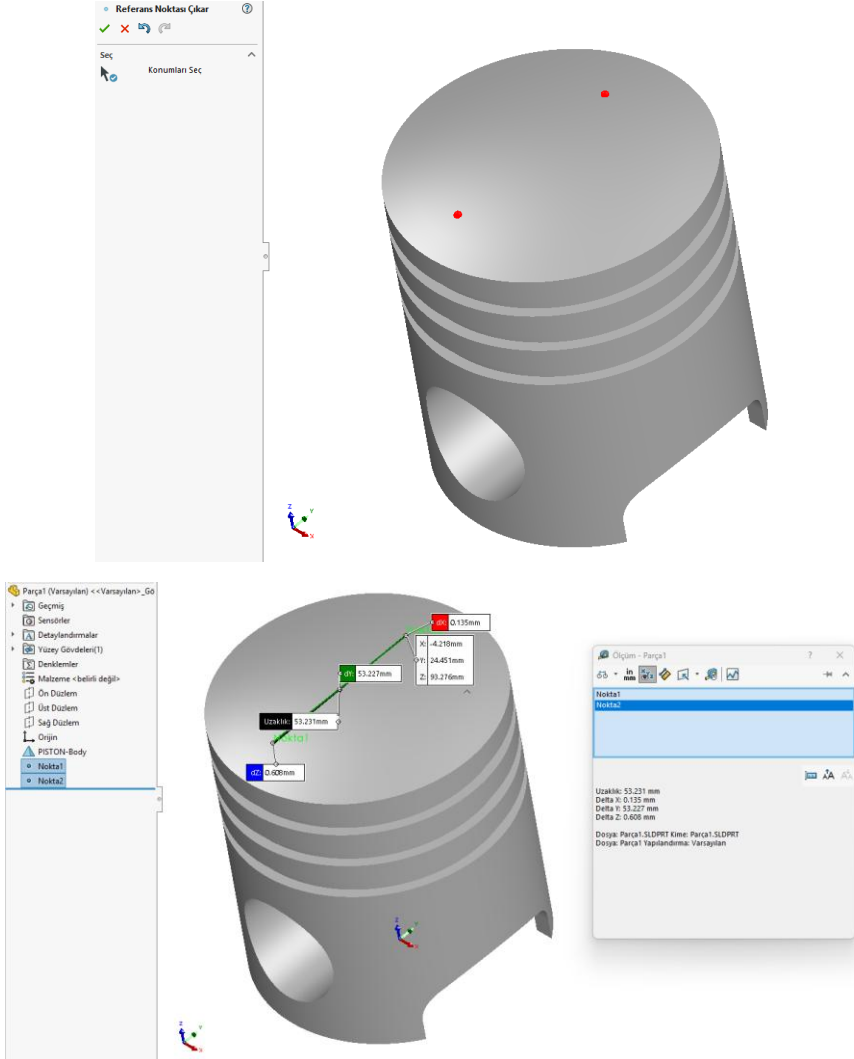
Şekil 14 Referans Eksen Çıkarma



Referans Nokta Çıkar

Bu komut sayesinde mesh model üzerinden herhangi bir bölge seçilerek model üzerinde nokta oluşturmısını sağlamaktadır. Taranan model üzerinde ölçüm gerektiren noktalarda bu komut kullanılarak iki nokta arasındaki mesafe bilgisine ulaşılabilmektedir.

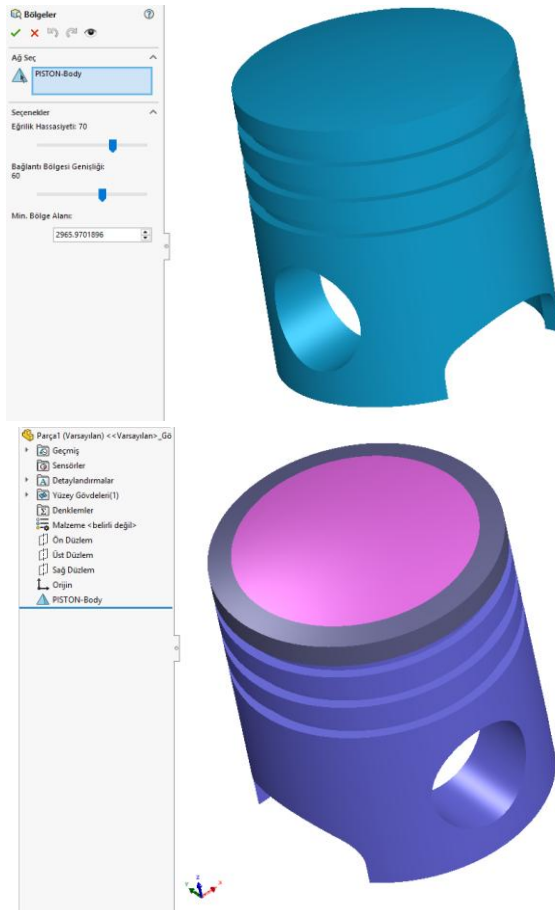
Şekil 15 Referans Nokta Çıkarma ve Mesafe Ölçümü



Bölgeler Komutu

Geomagic for SOLIDWORKS yazılımında yer alan "Bölgeler" komutu, homojen bir yapıya sahip olan nokta bulutu veya ağ (mesh) verisinin, üzerindeki yüzey eğrilikleri ve normal vektörleri analiz edilerek anlamlı geometrik alt segmentlere ayrıştırılmasını sağlar. Elde edilen bu bölgeler, tersine mühendislik sürecinde tek tıklama ile hassas seçim yapılabilmesini sağlayarak, referans geometri oluşturma ve yüzey modelleme aşamalarında ciddi bir hız ve doğruluk avantajı sunmaktadır.

Şekil 16 Mesh Modeli Bölgelerine Göre Ayırma

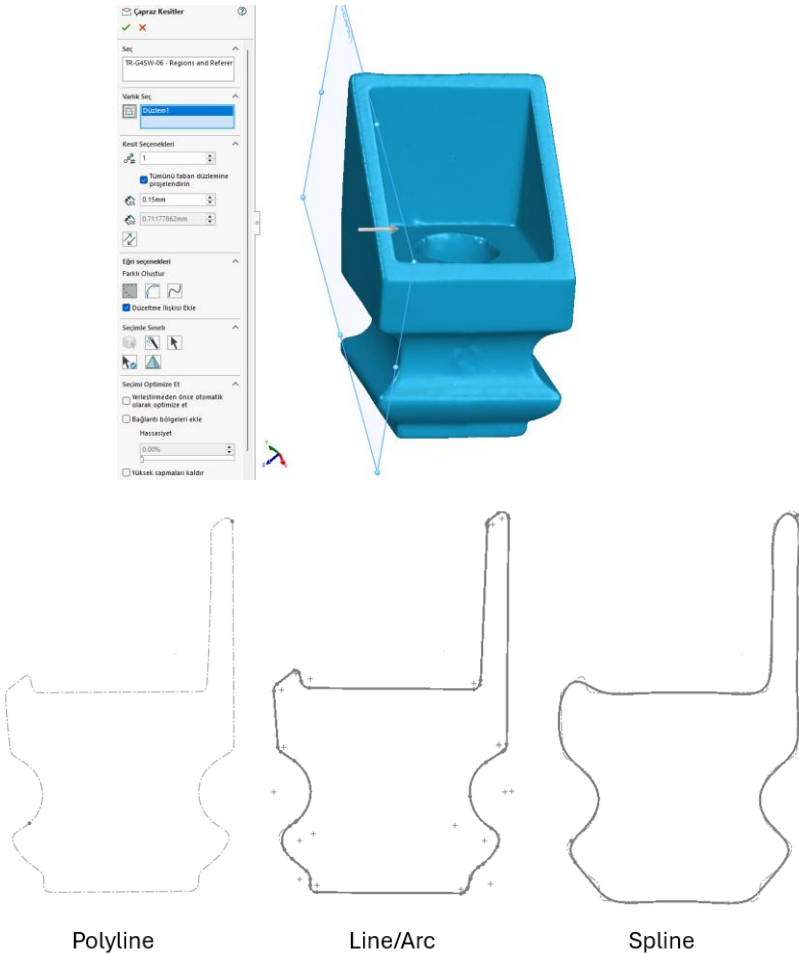


Geomagic for SOLIDWORKS yazılımının en kritik hazırlık aşamalarından biri olan "Yönlendir Komutu", tarama cihazından genellikle rastgele bir uzay koordinatında gelen ağ (mesh) verisinin, SOLIDWORKS'ün global koordinat sistemi ve standart düzlemleri (Ön, Üst, Sağ) ile çakıştırılmasını sağlar. Bu işlemde, daha önceden model üzerinden türetilen referans düzlemler, eksenler veya noktalar kullanılarak parça uzayda döndürülür ve ötelenir. Parçanın serbestlik derecelerinin (DOF) kısıtlanarak doğru çalışma konumuna getirilmesi, parametrik çizimlerin (sketch) standart eksenlerde hatasız oluşturulabilmesi ve teknik resim görünüşlerinin (izometrik, ortogonal) doğru alınabilmesi için önemli bir adımdır.

Çapraz Kesitler Komutu

Bu komut sayesinde mesh model üzerinden alınan düzlem ile modelin kesiştiği alanların çizimleri elde edilebilmektedir. Çizim oluştururken polyline,line/arc ve spline olarak farklı türde çizgi oluşturmaya imkan tanımaktadır. Tarama kalitesi göz önüne alınarak devamlı çizgi (polyline) olarak oluşturulması ve bu çizimi referans alınarak tekrar çizim araçlarını kullanarak tasarım yapılması önerilmektedir.

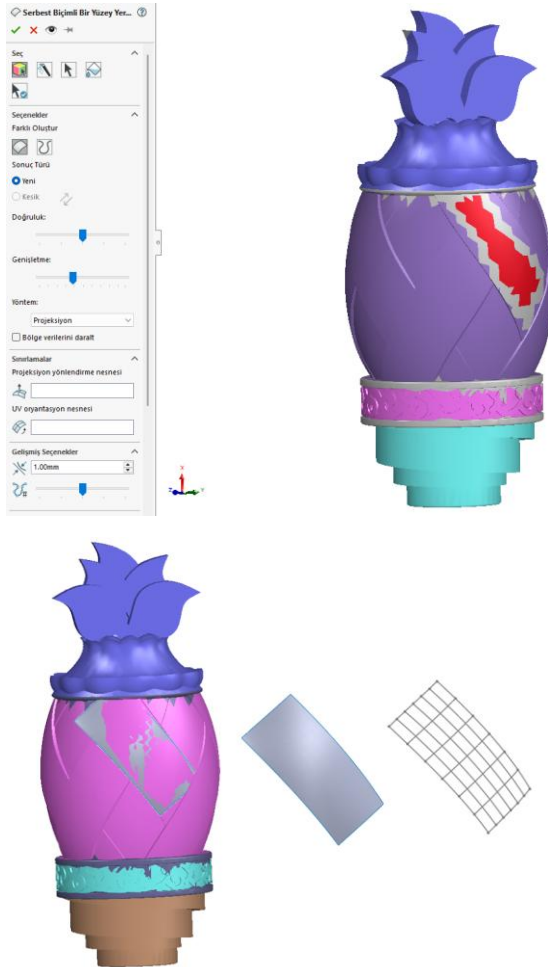
Şekil 18 Çapraz Kesit Oluşturma ve Elde Edilen Çizgi Türleri



Serbest Biçimli Bir Yüzey Yerleştir Komutu

Bu komut, modelin tamamını otomatik ören "Otomatik Yüzey" işleminden farklı olarak, sadece hedeflenen lokal, amorf veya karmaşık eğrilikli alanların (örneğin bir araba çamurluğu veya ergonomik bir tutamak yüzeyi) hassas bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Tasarımcı seçmiş olduğu bölgenin yüzeyini doğrudan oluşturabildiği gibi eğrilerini de elde edebilmektedir.

Şekil 19 Serbest Biçimli Bir Yüzey Yerleştir Yöntemi



Otomatik Yüzey Komutu

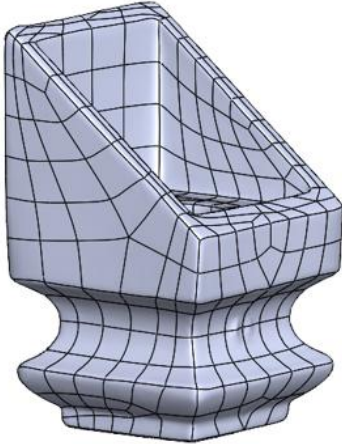
Geomagic for SOLIDWORKS içerisindeki "Otomatik Yüzey Oluştur" komutu, elle çizilmesi çok zor veya imkânsız olan karmaşık, eğrisel ve organik şekilleri (örneğin bir heykel, anatomik bir yapı veya döküm bir parça) tek bir tuşla katı modele çevirmeye yarayan son derece pratik bir araçtır.

Geometrik türüne göre Mekanik ve Organik olmak üzere ikiye ayrılır;

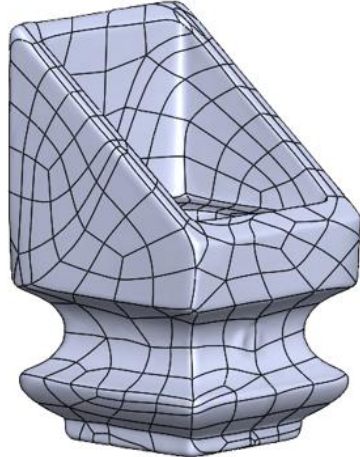
Mekanik: Yazılım model üzerindeki keskin köşeleri, kenarları ve düzlemsel geçişleri dikkate alarak bunları korumaya çalışmaktadır. Prizmatik mühendislik parçalarında tercih edilmektedir.

Organik: Model üzerinde yer alan keskin köşeleri algılamaz ve köşeleri yumuşatarak örmektedir. Daha çok amorf veya heykel gibi modellerde tercih edilmektedir.

Şekil 20 Otomatik Yüzey Komutu ve Geometri Türleri



Mekanik

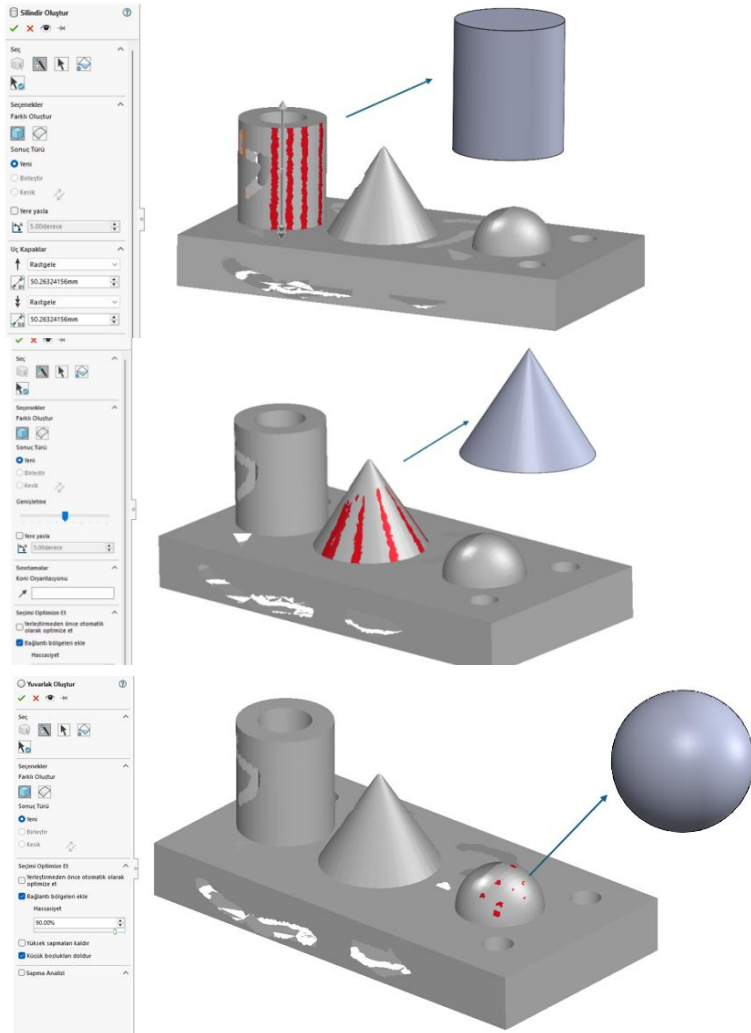


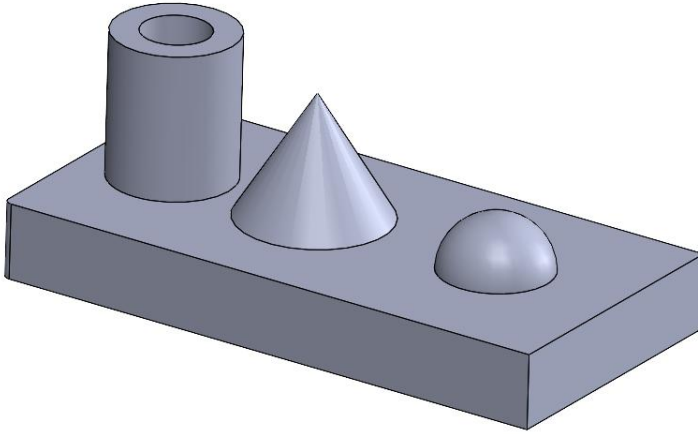
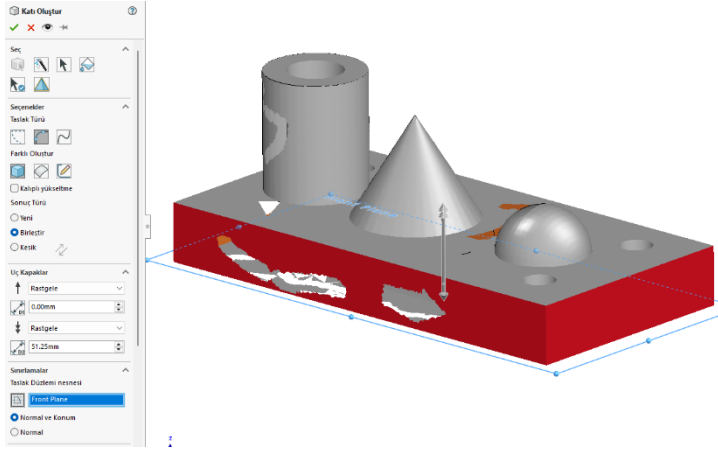
Organik

Geometrik Türe Göre Modelleme

Geomagic for SOLIDWORKS programında mesh modelleme üzerinden seçim yaparak geometrik modellemelerin oluşturulmasına imkan tanıyan komutlar yer almaktadır. Oluşan bu geometrik modellerin SOLIDWORKS unsur ağacından çizimlerini düzenleme yaparak daha doğru tasarımlar oluşmasını sağlamaktadır.

Şekil 21 Geometrik Türe Göre Modelleme





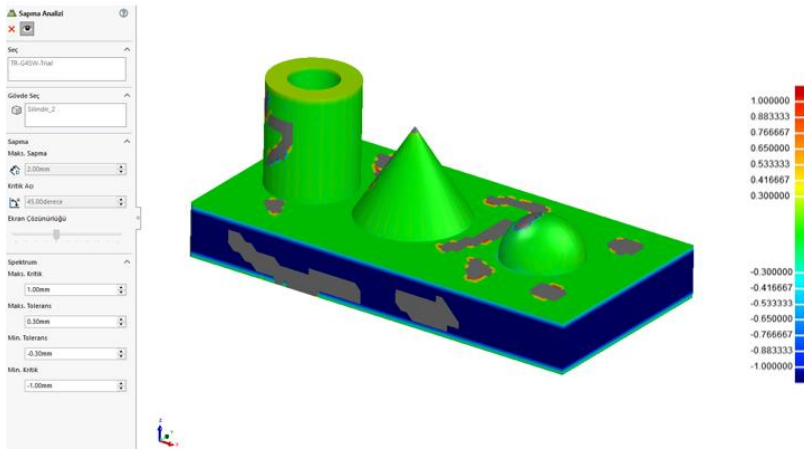
GEOMAGIC for SOLIDWORKS Tasarım Doğrulama Sapma Analizi

Tersine mühendislik uygulamalarında, elde edilen parametrik CAD modelinin referans nokta bulutu (mesh) verisine olan topolojik sadakatinin ve boyutsal doğruluğunun saptanması amacıyla Sapma Analizi (Deviation Analysis) yöntemi kullanılmaktadır (Raja & Fernandes, 2008). Bu analitik süreç, matematiksel olarak CAD yüzey normalleri ile tarama verisi arasındaki en kısa mesafenin (Öklid mesafesi / Euclidean Distance)

hesaplanması prensibine dayanır (Varady vd., 1997). Analiz çıktıları, belirlenen tolerans bandı (nominal değerler) içerisindeki bölgelerin yeşil, pozitif sapmaların (malzeme fazlalığı) sıcak renk spektrumuyla, negatif sapmaların (dalma) ise soğuk renk spektrumuyla ifade edildiği renk haritaları (color maps) üzerinden görselleştirilmektedir (3D Systems, 2024).

Modelin genel kalite indeksi, sadece bölgesel renk dağılımlarıyla değil, tüm yüzey üzerindeki hataların karesel ortalamasının karekökünü ifade eden RMS (Root Mean Square) değeri ve sapmaların tutarlılığını gösteren Standart Sapma gibi istatistiksel metriklerle kantitatif olarak değerlendirilmektedir (Bagci, 2009). Bu değerlendirme sürecinde, parçanın zıt eksenlerinde gözlemlenen simetrik hata dağılımları olası hizalama (alignment) kusurlarını işaret ederken; lokal form bozuklukları, fiziksel parçadaki üretim kaynaklı deformasyonların veya geometrik idealleştirme farklarının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Raja & Fernandes, 2008). Başarılı bir tersine mühendislik süreci, toplam yüzey alanının istatistiksel olarak anlamlı bir yüzdesinin hedeflenen tolerans aralığı içerisinde kalması ile valide edilmektedir.

Şekil 22 Sapma Analizi Değerlendirme

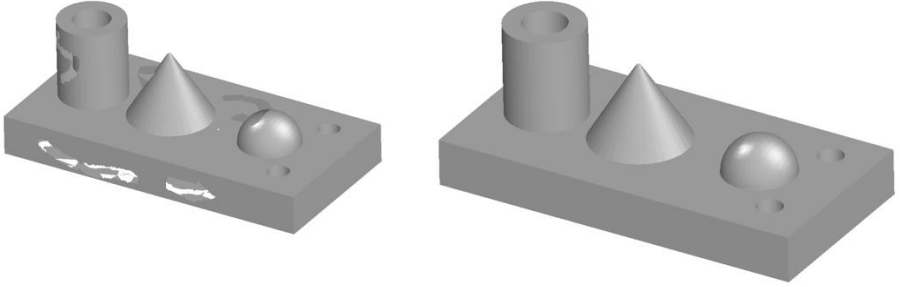


Model üzerinde gerçekleştirilen Sapma Analizi (Deviation Analysis) sonuçları incelendiğinde; modelin üst yüzey geometrilerinin ve Z eksen konumlandırmasının $\pm 0.30\text{mm}$ tolerans bandı (Yeşil bölge) içerisinde kalarak yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir. Silindirik ve konik formların yüzey normallerinde herhangi bir sapma tespit edilmemiştir.

Ancak, taban plakasının yanıl yüzeylerinde gözlemlenen negatif sapmalar (Mavi bölgeler), modelin ilgili kesitindeki dış kontur ölçülerinin (En/Boy) referans tarama verisine kıyasla daha dar tanımlandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, taban profili eskiz ölçülerinin revize edilerek genişletilmesi gerektiğini işaret eden boyutsal bir bulgudur.

Tarama datası üzerinde yer alan boşluklar doldurularak tekrar model tasarımı üzerinde revize işlemi yapılmıştır.

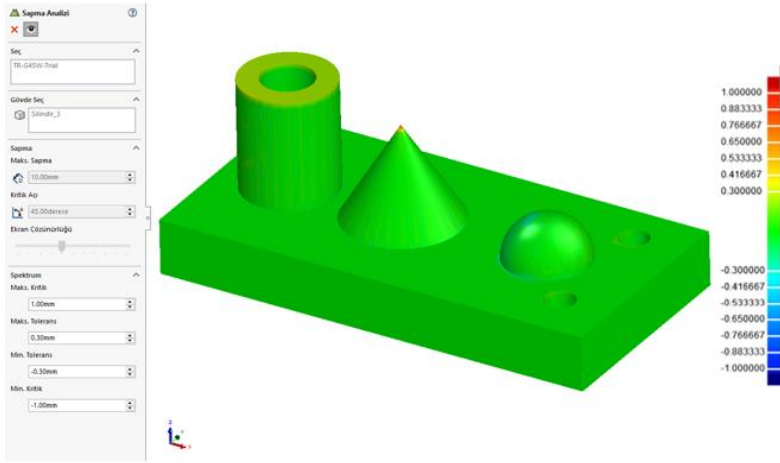
Şekil 23 Açık Olan Tarama Datasının Boşluklarının Kapatılması



Revize edilen model üzerinde tekrar sapma analizi çalıştırılmıştır. Elde edilen parametrik CAD modeli üzerinde gerçekleştirilen nihai doğrulama analizinde (Şekil 23), taban profil ölçülerinde yapılan boyutsal revizyonların etkisi net bir şekilde görülmektedir. Önceki iterasyonlarda yanıl yüzeylerde tespit edilen negatif sapmalar giderilmiş ve model yüzey alanının %98'inden fazlası, hedeflenen $\pm 0.30\text{ mm}$ tolerans bandı (Yeşil Bölge) içerisine taşınmıştır.

Renk haritasındaki homojen yeşil dağılım; modelin sadece formsal (silindirik/küresel) olarak değil, aynı zamanda boyutsal (en/boy/yükseklik) olarak da referans tarama verisiyle tam bir örtüşme sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar ışığında, tersine mühendislik süreciyle oluşturulan dijital ikizin (digital twin), geometrik doğruluğu ve üretim toleransları açısından kabul edilebilir (validated) olduğu doğrulanmıştır.

Şekil 23 Revizyon Sonrası Nihai Sapma Analizi Sonuçları



Gelecekte tersine mühendislik teknolojileri, sadece mevcut bir parçayı kopyalamanın ötesine geçerek yapay zekâ destekli sistemlerle çok daha hızlı ve hatasız hale gelecektir. Günümüzdeki dijital dönüşüm trendleri, tarama verilerinin doğrudan üretim bantlarına aktarıldığı ve dijital ikiz uygulamalarının standartlaştığı bir süreci işaret etmektedir. Bu bağlamda, Geomagic for SOLIDWORKS gibi yazılım entegrasyonları, tasarımcıların sadece fiziksel formu dijital ortama aktarmasını değil, aynı zamanda bu modelleri ileri mühendislik analizleriyle optimize etmesini de kolaylaştıracaktır. Sonuç olarak, bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla ürün geliştirme süreleri kısalacak ve imalat sektöründe yüksek hassasiyetli, yenilikçi çözümler çok daha erişilebilir olacaktır.

Kaynakça/References

3D Systems. (2024). Geomagic for SOLIDWORKS: User guide [Geomagic for SOLIDWORKS: Kullanıcı kılavuzu]. 3D Systems, Inc.

Ayyıldız, M. (2009). Hasarlı makine elemanlarının tersine mühendislik ile tasarım ve imalat için yenilenmesi [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Bagci, E. (2009). Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies [Kırık veya aşınmış parçaların kurtarılması ve yeniden imalatı için tersine mühendislik uygulamaları: Üç vaka çalışması]. *Advances in Engineering Software*, 40(6), 407–418.

Demir, H. (2018). CAD datası olmayan parçaların tersine mühendislik metodu ile CAD dataalarının oluşturulması [Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

İnce, M. (2023). STL formatlı CAD bilgilerinden nesne oluşturmak [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Ma, W. ve Kruth, J.-P. (1998). NURBS curve and surface fitting for reverse engineering [Tersine mühendislik için NURBS eğri ve yüzey uydurma]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(12), 918–927. <https://doi.org/10.1007/BF01179082>

Raja, V. ve Fernandes, K. J. (Ed.). (2008). Reverse engineering: An industrial perspective [Tersine mühendislik: Endüstriyel bir bakış açısı]. Springer Science & Business Media.

Varady, T., Martin, R. R. ve Cox, J. (1997). Reverse engineering of geometric models—an introduction [Geometrik modellerin tersine mühendisliği: Bir giriş]. *Computer-Aided Design*, 29(4), 255–268.

BÖLÜM 4

Kanat Yapısal Elemanlarında Boşaltma Geometrilerinin Mekanik Davranış Analizi¹

Oğuzhan ERTAŞ²
Fırat KAFKAS³

Giriş

Hava aracı yapısal sistemlerinin fonksiyonları iki ana ekseninde değerlendirilebilir. Birincil olarak uçağın aerodinamik geometrisinin bütünlüğünün korunmasıdır. Bu durum görev performansının devamlılığı, taşıma kuvvetinin üretimi ve akış özelliklerinin korunması açısından hayati bir gerekliliktir. İkinci temel işlev ise operasyonel süreçte ve uçuş manevraları esnasında yapıya etki eden yüklerin güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasıdır. Bu bağlamda, yapısal bileşenlerin yük aktarım mekanizmaları, mukavemet sınırları ve rijitlik kriterleri gözetilerek uçak tasarım süreçlerinin yürütülmesi, hava aracının yapısal kararlılığının ve

¹ Bu kitap bölümü, “Uçak Yapısal Elemanlarında Boşaltma Geometrilerinin Sonlu Elemanlar Analizi İle Karşılaştırılması ve Optimizasyonu” isimli yüksek lisans tez çalışmasından uyarlanmıştır.

² Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
ORCID: 0009-0007-4662-3157

³ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği
ORCID: 0000-0003-3257-7413

görev güvenliliğinin oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır (Sadraey, 2020).

Güncel havacılık ürünlerinde kompozitlerin tercih edilmesi, kütle optimizasyonu, mukavemet-ağırlık oranının geliştirilmesi ve yapısal stabilitenin maksimize edilmesi noktalarında kritik katkılar sunmaktadır. Geleneksel alüminyum materyaller ile mukayese edildiğinde, Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP) çok daha ileri seviyede özgül rijitlik ve dayanım karakteristikleri sunmaktadır. Bu üstün mekanik özellikler, yapısal ağırlığı minimize ederken dayanıklılığı artıran yeni nesil gövde ve kanat tasarımlarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Kumar at al., 2021).

Hava araçlarında taşıma kuvvetinin ana kaynağı olan kanat yapıları, fonksiyonel birer aerodinamik yüzey olmanın ötesinde çok yönlü birer muhafaza alanı olarak da görev yapar. Kanat yapısının iç geometrisi, yakıt sistemlerinin depolanması, ana iniş takımlarının katlanma sonrası yerleşimi ve yardımcı alt sistemlerin yapıya dahil edilmesi gibi operasyonel gereksinimlere yanıt verecek şekilde optimize edilir. Dolayısıyla bu iç hacim, aerodinamik performans ile yapısal entegrasyonun bir arada yürütüldüğü stratejik bir alan niteliğindedir (Anderson, 2016).

Bu bağlamda, yapısal kütleyle optimize etmek ve operasyonel verimliliği artırmak amacıyla kanat ribleri üzerinde yaygın olarak boşaltma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu geometrik değişiklikler yalnızca ağırlık tasarrufu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda dahili kablaj yollarının oluşturulması, kanat içi gerekli hacmin oluşturulması gibi ihtiyaçlara da olanak tanımaktadır (Sedaghati & Elsayed, 2006).

Kanat ribleri üzerinde yapılan boşaltma işlemleri, kütsel hafifleme sağlamanın yanı sıra imalat süreçlerinde ve maliyet kalemlerinde avantajlar yaratmaktadır. Öte yandan, bu geometrik müdahaleler yapının mukavemet limitlerini ve iç gerilme rejimini

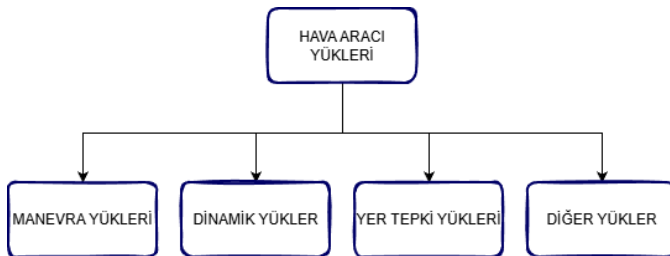
değiştirdiği için, tasarımı belirlı mühendislik standartları çerçevesinde hassasiyetle yönetilmesi gerekmektedir (Haile & Rao, 2024).

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, kanat riblerinde yer alan boşaltma geometrilerinin yapının mukavemet sınırları, gerilme yığılmaları, malzeme hasar değerleri ve deformasyon karakteristikleri üzerinde etkileri olduğunu göstermektedir. Bu araştırmalarda genellikle kanat profili geometrisinin offsetlenmiş hali, dörtgensel, dairesel ve üçgensel formlardaki boşaltma geometrilerinin mekanik tepkileri, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir.

Schrenk Yaklaşımı ile Kanat Yüklerinin Hesaplanması

Hava aracına etki eden dış yükler genel olarak uçağın tamamının dayanım seviyesini belirlemek amacıyla, uçak yapısal bileşenlerine uygulanan kuvvet ve yükler olarak tanımlanır. Dayanım seviyesi ve yapısal kriterler, uçağın icra etmesi gereken manevralar, yk faktörleri ve uçak hızı ile belirlenmektedir. şekil 1’de gösterildiği gibi yapısal bileşen yüklemeleri, hava basıncı, atalet kuvvetleri, iniş ve taksi esnasındaki yer tepki kuvvetlerinden kaynaklanabilir. Diğer yükler olarak tanımlanan bazı bileşenler ise hava aracının yerde maruz kaldığı havaya kaldırma, nakliye gibi yer hizmetleri sırasında maruz kaldığı yüklerdir (Niu, 2011).

şekil 1 Uçak Dış Yükleri



Kaynak: (Niu, 2011)

Kanat üzerindeki aerodinamik yük dağılımı, taşıma, sürüklenme ve moment bileşenlerinden oluşur. Yapısal tasarım açısından bakıldığında, taşıma kuvvetinin temel etkisi kanat profili üzerinde yukarı yönlü bir eğilme momenti oluşturmaktadır. Buna karşın sürüklenme kuvveti, kanadın akış yönünde arkaya doğru zorlanmasına neden olan bir yükleme karakteristiği sergiler (Megson, 2007).

Kanat, temel bir mühendislik yaklaşımıyla, üzerine etki eden tüm aerodinamik yükleri toplayarak gövde ile birleştiği merkezi bağlantı noktalarına ileten bir giriş yapısı olarak değerlendirilebilir. Yapısal ön boyutlandırma ve yük analizleri aşamasında toplam kanat yükü, hava aracının ağırlığı ile limit yük faktörünün çarpımına ek olarak “1.5” değerindeki emniyet katsayısının çarpımı ile hesaplanmaktadır (Niu, 2002).

Hava aracının yapısal tasarımında esas alınan limit yük faktörü değerleri, uçağın operasyonel kabiliyetlerini ve hız limitlerini bir arada sunan V-n diyagramı üzerinden tayin edilmektedir (Sökmen, 2006).

Maksimum kalkış ağırlığı 150 kg eşliğini aşan hava araçlarının operasyonel gereksinimleri, sivil havacılık sertifikasyonlarını (CS-23) temel alan STANAG 4671 yönergeleri çerçevesinde düzenlenmektedir. Bahse konu standart uyarınca, standart bir hava aracının uçuş zarfı limit yük faktörü, oluşturulan V-n diagramı ile pozitif yönde +3,8g negatif yönde ise -1,5g aralığında tanımlanan yük katsayıları ile sınırlandırılmaktadır (NATO, 2007).

Kanat üzerindeki aerodinamik yük dağılımının kestirimi için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlardan biri hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleridir. Bir diğeri de karmaşık hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerine ihtiyaç duymaksızın kullanılabilen Schrenk Metodudur. Kanat açıklığı boyunca kaldırma kuvveti dağılımını makul bir doğrulukla tahmin edebilmesi, bu yöntemin mühendislik

çalışmalarında yaygın kullanılmasına olanak tanımaktadır (Soemaryanto & Rosid, 2017).

Bu çalışma kapsamında yükleme değerlerinin hesaplanmasında ve sonlu elemanlar analizi sırasında kullanılan hava aracı ve kanat özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Belirtilen değerlere göre yük hesapları ve analiz çalışmaları yürütülmüştür.

Tablo 1 Hava Aracı Özellikleri

Hava Aracı Ağırlığı	1250 kg
Yarı Kanat Açıklığı (b_s)	5.5 m
Kök Veteri (C_k)	1.2 m
Uç Veteri (C_u)	0.6 m
Sivrilik Değeri (λ)	0.5
Ok Açısı (Λ)	0°
Burulma Açısı (α_t)	0°
Airfoil Serisi	NACA4416

Yapısal analiz aşamasında kanada uygulanacak yükler, hava aracı özelliklerine göre Schrenk Yaklaşımı metodu ile hesaplanmıştır. Bu metodoloji kapsamında analize temel teşkil eden ve hava aracının uçuş zarfı limitleri dahilinde maruz kalabileceği azami yük miktarı, Eşitlik 1 ile sunulan matematiksel formül ile hesaplanmıştır. Elde edilen bu yük verileri, nihai yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi sırasında kanat modeline sınır şartı olarak aktarılmıştır.

$$L_f = W . n . EK \quad (1)$$

$$L_f = (1250 \times 9.81) \times 3.8 \times 1.5$$

$$L_f = 69896.250 \text{ N}$$

(L_f : Final Yük(N), W : Uçak Kalkış Yüğü(N), n :Yük Faktörü, EK : Emniyet Katsayısı)

Analiz sürecinde kullanılan geometrik modelin yarı kanat formunda olması sebebiyle Eşitlik 1 ile elde edilen tümleşik yük verileri, Eşitlik 2’de belirtilen matematiksel dönüşüm uygulanarak yarı kanat yapısına etki edecek yük değerine indirgenmiştir.

$$L = \frac{L_f}{2} \quad (2)$$

$$L = 39948.125 \text{ N}$$

(*L*: Yarı Kanat Yüğü(N))

Kanat yükleme değerleri, Schrenk Yaklaşımı temel alınarak Eşitlik 3, 4 ve 5’te yer alan formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$L_{Schrenk} = \frac{L_e + L_p}{2} \quad (3)$$

(*L_{Schrenk}*: Schrenk Yüğü(N/m), *L_e*: Eliptik Kanat Yük Dağılımı(N/m), *L_p*: Trapez Kanat Yük Dağılımı(N/m))

$$L_e = \frac{4L}{\pi b_s} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b_s}\right)^2} \quad (4)$$

(*y*: Kanat Açıklığı Boyunca Kabul Edilen Mesafe Değerleri(m))

$$L_p = \frac{2L}{(1+\lambda)b_s} \cdot \left[1 + \frac{2y}{b_s} \cdot (\lambda - 1)\right] \quad (5)$$

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda, kanat açıklığı boyunca her 0.1 metrelik aralıklar için Schrenk Yaklaşımı yükleri belirlenmiştir. Bu yükler, Eşitlik 6’da gösterildiği üzere ilgili aralıklardaki veter uzunluklarına bölünerek basınç değerlerine dönüştürülmüştür.

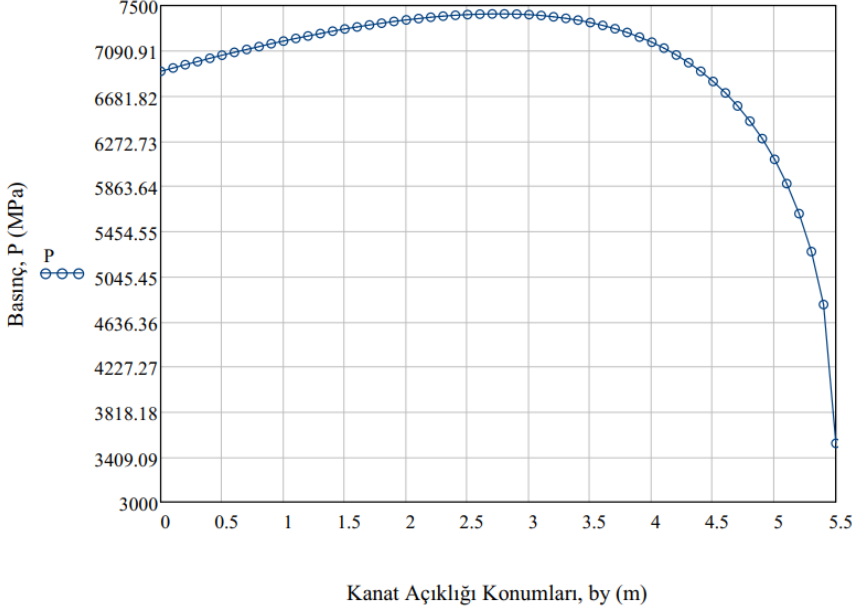
$$P = \frac{L_{schrenk}}{C_y} \quad (6)$$

(*P*: Basınç(N/m²), *C_y*: Veter Uzunlukları(m))

Elde edilen basınç verileri, sonlu elemanlar analizinde değişken yayılı yük olarak tanımlanmış ve sınır şartı şeklinde

analizlere dahil edilmiştir. Elde edilen basınç verileri grafiksel olarak Şekil 2’de gösterilmiştir.

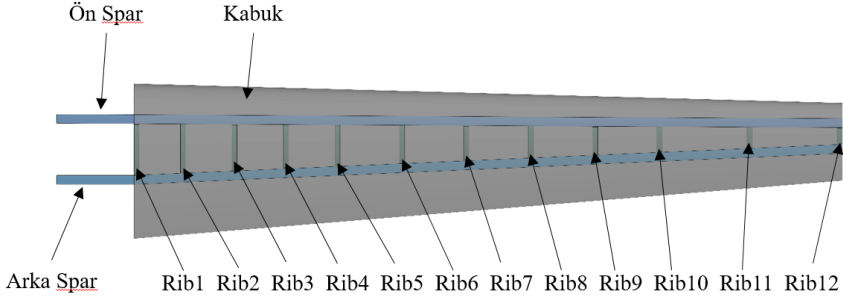
Şekil 2 Schrenk Yüklemesi Basınç Dağılımı



Kanat Tasarımı

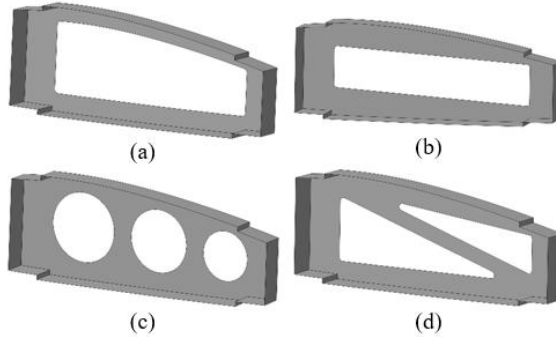
Kanat yapısal tasarımı, daha önceden oluşturulan geometrik parametreler temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında “Wingbox” olarak bilinen yapısal konfigürasyon tercih edilmiştir. Bu yaklaşım doğrultusunda, kanat veterinin %20'lik kısmına ön spar, %65'lik kısmına ise arka spar konumlandırılmış olup her iki elemanda da “C” kesit geometrisi kullanılmıştır. Birbirine bakacak şekilde yerleştirilen bu sparların arasına, kök bölgesinden uca doğru gidildikçe mesafesi artan, yine “C” kesitli 12 adet rib entegre edilmiştir. Bahsedilen tasarımdaki kanat yapısal elemanların kanadın üstten görünüşüyle Şekil 3’de gösterilmiştir.

Şekil 3 Kanat Yapısal Elemanları



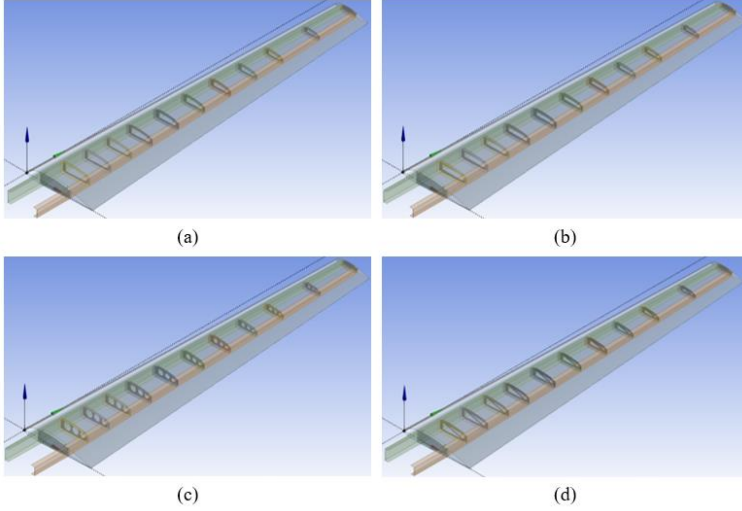
Tasarım aşamasının ardından, kök ve uç kısımlardaki ribler hariç tutularak, diğer riblerin gövde yüzeylerinde ağırlık azaltma amacıyla dört farklı geometride boşaltma işlemi yapılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 4’te detayları sunulan Airfoil Offset, Dörtgensel, Dairesel ve Üçgensel geometrilerden oluşan dört ayrı tasarım varyasyonu oluşturulmuştur.

Şekil 4 Rib Tasarımları((a): Airfoil Offset Boşaltma, (b): Dörtgensel Boşaltma, (c): Dairesel Boşaltma, (d): Üçgensel Boşaltma)



Rib yüzeylerinde gerçekleştirilen boşaltma işlemleri neticesinde elde edilen kanat tasarımları, Şekil 5’de gösterilmiştir.

Şekil 5 Kanat Tasarımları((a): Airfoil Offset Boşaltma, (b): Dörtgensel Boşaltma, (c): Dairesel Boşaltma, (d): Üçgensel Boşaltma)



Kanat yapısını oluşturan alt ve üst kabuklar, sparlar ve riblerin kalınlık değerleri, tasarım kabulleri doğrultusunda saptanmıştır. Bu kapsamda, ön ve arka sparlar için 8 mm, kabuk ve rib bileşenleri için ise 2 mm kalınlık esas alınmıştır. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri, belirlenen bu kalınlık parametreleri temel alınarak yürütülmüştür.

Gerçekleştirilen tasarım sürecinde, 1'i boşaltmasız, 4'ü ise farklı boşaltma geometrilerine sahip toplam 5 ayrı analiz konfigürasyonu oluşturulmuştur. Söz konusu modellere ait eleman bazlı ağırlık karşılaştırmaları, detaylı bir biçimde Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2 Yapısal Eleman Ağırlık Kıyaslamaları

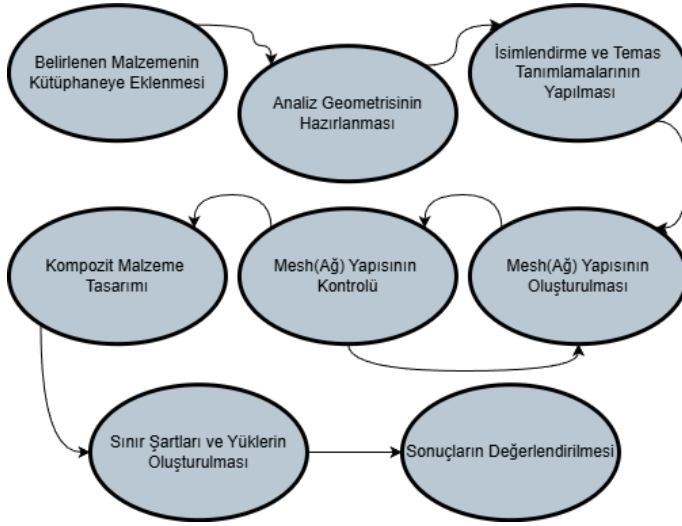
	Boşaltmasız	Airfoil Offset	Dörtgensel	Dairesel	Üçgensel
Eleman	Eleman Ağırlığı (kg)				
Üst Kabuk	14.803	14.803	14.803	14.803	14.803
Alt Kabuk	14.269	14.269	14.269	14.269	14.269
Ön Spar	16.903	16.903	16.903	16.903	16.903
Arka Spar	14.194	14.194	14.194	14.194	14.194
Toplam Rib Ağırlığı	3.166	2.515	2.699	2.763	2.762
Toplam Ağırlık	63.335	62.684	62.868	62.932	62.931

Tablo 2 verileri incelendiğinde; boşaltma işlemi uygulanmayan referans tasarıma kıyasla rib ağırlıklarında önemli kazanımlar elde edildiği görülmüştür. Bu kapsamda, airfoil offset geometrisi ile %20.56, dörtgensel boşaltma ile %14.75, dairesel geometride %12.72 ve üçgensel boşaltma seçeneğinde %12.76 oranında ağırlık tasarrufu gerçekleştirilmiştir.

Yapısal Analiz

Kanat tasarımlarının tamamlanmasının ardından sonlu elemanlar analizi aşamasına geçilmiş ve çalışmalar ANSYS Workbench üzerinde yürütülmüştür. Analiz hazırlıklarından sonuçların elde edilmesine kadar geçen tüm süreç, Şekil 6'da sunulan iş akış şeması ile detaylandırılmıştır.

Şekil 6 Analiz Süreçleri Şeması



Analizlerin ilk aşamasında malzeme tanımlamaları gerçekleştirilmiş ve ANSYS Workbench kütüphanesinde tanımlı olan dokuma yapılı Karbon Epoksi (230 GPa) Pre-preg malzeme tercih edilmiştir.

Malzeme atama işlemlerinin ardından, hazırlanan beş ayrı kanat konfigürasyonu sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla ANSYS Workbench Design Modular ortamına aktarılmıştır. Geometrik modellerin analiz ortamına transfer edilmesiyle, yapısal simülasyonların çözümleme safhası için ihtiyaç duyulan model altyapısı tamamlanmıştır.

Sürecin devamında, analiz sırasında referans alınacak yüzey ve bileşenler için İsimlendirme Tanımlaması (Named Selection) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamanın tamamlanması sonrasında, yapısal elemanlar arasındaki yük aktarımının sağlıklı bir şekilde simüle edilebilmesi için Temas Tanımlaması (Contact Definition) adımına geçilmiştir. Bu kapsamda, analiz çalıştırıldığında parçaların bir bütün olarak hareket etmesini ve

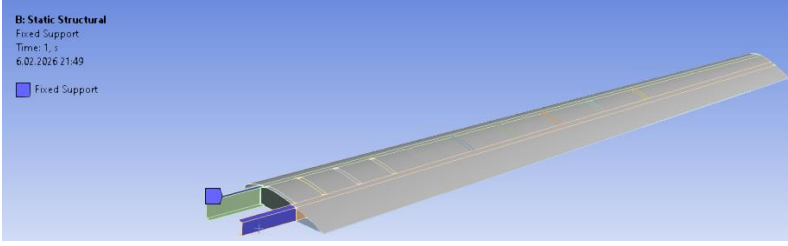
kuvvet iletimini sağlamak amacıyla, birbiriyle etkileşim halindeki tüm yüzeyler arasına uygun temas setleri atanmıştır.

Sürecin bir sonraki basamağında, sayısal çözümlemenin temel taşııı teşkil eden ağ (mesh) yapısının oluşturulmasına geçilmiştir. Bu aşamada, analiz geometrileri daha küçük alt elemanlara indirgenerek matematiksel bir modele dönüştürülmüş ve böylece çözümleyici algoritmanın çalışabileceği bir altyapı oluşturulmuştur. Ağ oluşturma stratejisi kapsamında, yapının bütününe uygulanan genel boyutlandırmaya ilave olarak, riblerdeki kritik detayların ve geometrik süreksizliklerin doğru modellenmesi amacıyla yerel ağ yoğunlaştırma (mesh refinement) ve yerel boyutlandırma işlemleri uygulanmıştır. Son aşamada ise üretilen ağ yapısının kalite metrikleri denetlenmiş, çözüm doğruluğunu artırmak ve ağ kalitesini optimize etmek için belirli bölgelerdeki eleman boyutları revize edilerek ideal ağ yapısına ulaşılmıştır.

Ağ yapısının kurgulanmasının ardından, ANSYS Workbench bünyesindeki ACP-Pre modülü aracılığıyla kanat bileşenlerinin kompozit katman dizilimleri ve modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Daha önce belirlenen yapısal eleman kalınlıkları ile seçilen elyafın birim kalınlık değeri esas alınarak, her bir parça için hedeflenen toplam kalınlığı sağlayacak miktarda katman ataması yapılmıştır. Tercih edilen pre-preg malzemenin dokuma (woven) yapıda olması nedeniyle, elyaf dizilimleri $0^{\circ}/90^{\circ}$ yönelimli açılarla serilerek kompozit yapı oluşturulmuştur.

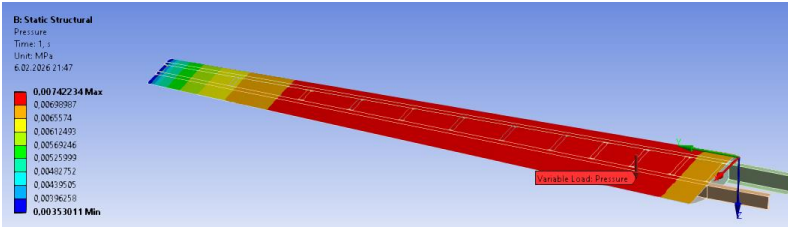
Gerekli tüm ön hazırlıkların tamamlanmasını takiben sınır şartlarının tanımlanmasına geçilmiştir. Şekil 7’de detaylandırıldığı üzere, ön ve arka sparların hava aracı gövdesine girdiği ve yapısal bağlantının kurulduğu yüzeyler üzerinden sabit mesnet (fixed support) ataması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7 Analiz Sabit Mesnet Sınır Şartı



Schrenk Yaklaşımı metodu ile hesaplamaları yapılan ve grafiksel dağılımı Şekil 2’de gösterilen kanat basınç yükü, modelin alt kabuk yüzeyine uygulanmıştır. Kanat açıklığı boyunca belirli aralıklarla elde edilen bu basınç değerleri, ANSYS Workbench ortamına tablo verisi (tabular data) formatında aktarılarak sisteme tanıtılmıştır. Kanat yüzeyine etki eden bu değişken basınç yükleme sinin dağılımı Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8’de gösterim amaçlı kanat yüzeyi ters çevirilerek alt yüzeyi yukarı tarafa getirilmiştir. Analiz sırasında kanat alt yüzeyi aşağı yöne bakmaktadır.

Şekil 8 Kanat Altı Basınç Yük Dağılımı

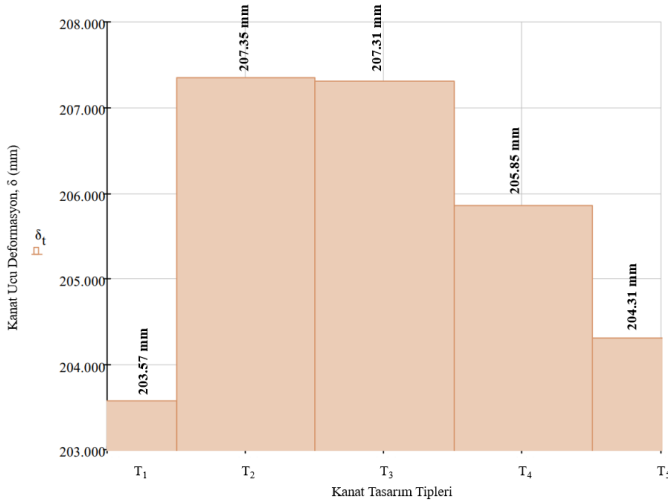


Sınır şartları ve yüklemelerin tanımlanmasının ardından analiz süreci başlatılmıştır. Mekanik davranışların değerlendirilmesi amacıyla kanat ucu toplam deformasyon miktarları, geometri üzerindeki tekillik hatalarına maruz kalmamak için rib boşaltma bölgelerinin 15 mm’lik çevresinde ölçülen Von-Mises gerilme değerlerinin hesaplanması için analizler çalıştırılmıştır.

Analiz Sonuçları

Havacılık yapılarında ağırlık optimizasyonu çalışmaları yürütülürken, yapısal rijitliğin muhafaza edilmesi; hem aerodinamik performansın hem de uçuş kontrol karakteristiklerinin hedeflenen sınırlar içerisinde kalması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, Schrenk basınç dağılımı baz alınarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri neticesinde elde edilen azami kanat ucu deformasyon değerleri, Şekil 9 üzerinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Söz konusu veriler, yapısal davranışın daha net kavranabilmesi amacıyla analiz sonuç görselleriyle desteklenerek detaylandırılmıştır.

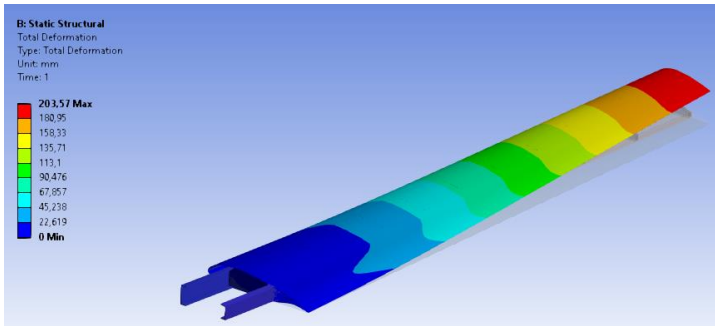
Şekil 9 Kanat Ucu Deformasyon Kıyaslaması



(δ_t : Kanat Ucu Deformasyon(mm), T₁: Boşaltmasız Ribli Kanat, T₂: Airfoil Offset Boşaltmalı Ribli Kanat, T₃: Dörtgensel Boşaltmalı Ribli Kanat, T₄: Dairesel Boşaltmalı Ribli Kanat, T₅: Üçgensel Boşaltmalı Ribli Kanat)

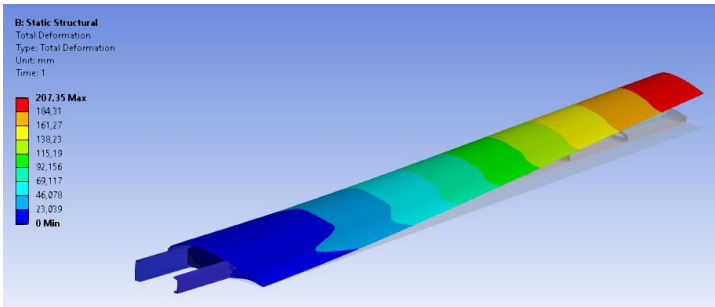
Herhangi bir yapısal modifikasyon içermeyen ve referans model olarak kabul edilen boşaltmasız ribli tasarımda, kanat ucu deformasyon 203.57 mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu veri, boşaltma geometrilerinin sistem rijitliği üzerindeki etkilerini kıyaslamak amacıyla temel referans eşik değeri şeklinde tanımlanmıştır. Elde edilen analiz sonucu Şekil 10’da gösterilmiştir.

Şekil 10 Boşaltmasız Ribli Tasarım Kanat Ucu Deformasyon Analiz Sonucu



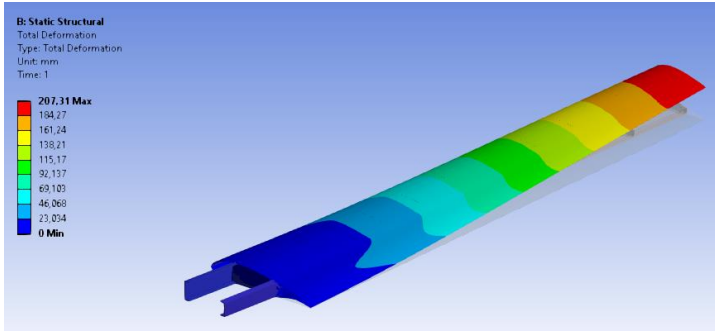
Airfoil Offset boşaltma geometrisine sahip tasarımda, kanat ucu yer değiştirmesi 207.35 mm olarak ölçülmüştür. Baz model ile gerçekleştirilen kıyaslama neticesinde, toplam deformasyon miktarında yaklaşık %1.85 oranında bir artış meydana geldiği saptanmıştır. Elde edilen analiz sonucu Şekil 11’de gösterilmiştir.

Şekil 11 Airfoil Offset Boşaltmalı Ribli Tasarım Kanat Ucu Deformasyon Analiz Sonucu



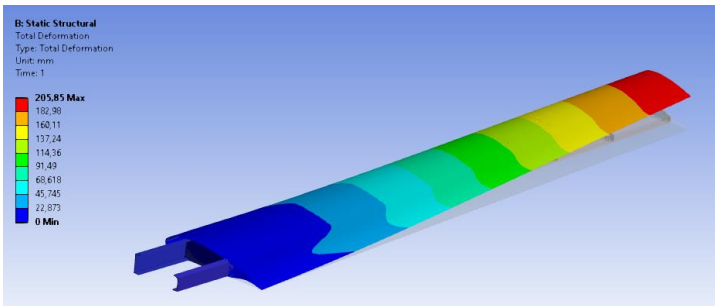
Dörtgensel boşaltma geometrisinin uygulandığı tasarım konfigürasyonunda, azami kanat ucu deformasyon miktarı 207.31 mm olarak ölçülmüştür. Bu değer baz tasarım ile karşılaştırıldığında, toplam deformasyon miktarında yaklaşık %1.83 seviyesinde bir artış meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen analiz sonucu Şekil 12’de gösterilmiştir.

Şekil 12 Dörtgensel Boşaltmalı Ribli Tasarım Kanat Ucu Deformasyon Analiz Sonucu



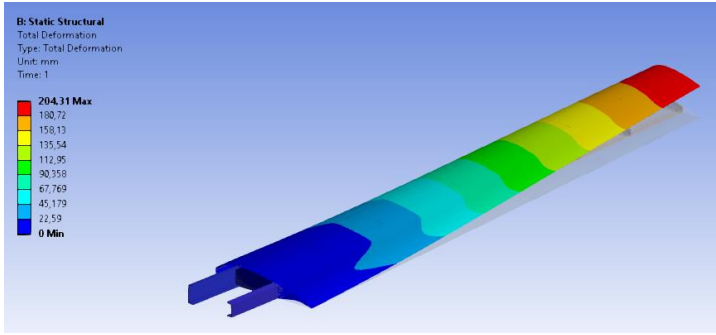
Dairesel boşaltma geometrisinin uygulandığı tasarım konfigürasyonunda kanat ucu deformasyonu 205.85 mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuç, referans modelin deformasyon değerleri ile kıyaslandığında, yapıda yaklaşık %1.1 oranında bir artışın meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen analiz sonucu Şekil 13’de gösterilmiştir.

Şekil 13 Dairesel Boşaltmalı Ribli Tasarım Kanat Ucu Deformasyon Analiz Sonucu



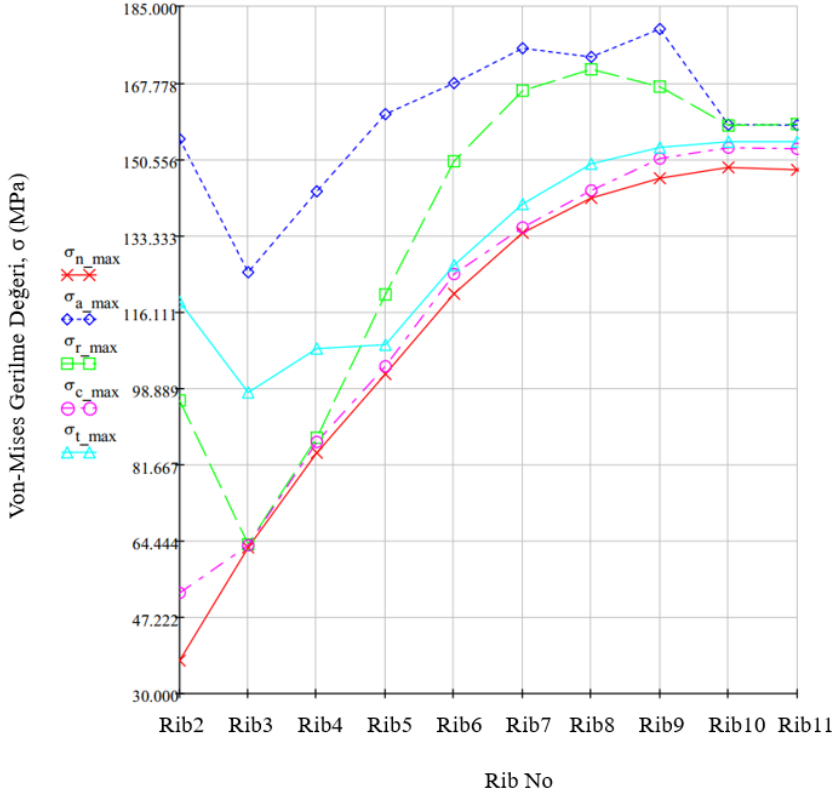
Üçgensel boşaltma geometrisinin uygulandığı tasarım konfigürasyonunda, toplam deformasyon miktarı 204.31 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, referans geometri ile karşılaştırıldığında, toplam deformasyon miktarında yaklaşık %0.36 oranında bir artış meydana geldiği saptanmıştır. Elde edilen analiz sonucu Şekil 14’de gösterilmiştir.

*Şekil 14 Üçgensel Boşaltmalı Ribli Tasarım Kanat Ucu
Deformasyon Analiz Sonucu*



Havacılık yapılarında yapılan tasarımların geometrileri sebebiyle meydana gelen süreksizlikler, yapısal yük akış hatlarının sapmasına ve bu doğrultuda kritik bölgelerde yerel gerilme yığılmalarının oluşmasına sebebiyet vermektedir. Sayısal analiz sonuçlarının numerik tekilliklerden arındırılması ve daha gerçekçi bir sonuç değerlendirmesi yapılabilmesi amacıyla boşaltma geometrilerinin dış sınırlarından itibaren dışarı doğru 15 mm’lik bir hat tanımlanmış ve gerilme değerleri bu dışarıda kalan alanlar içinde değerlendirilmiştir. Schrenk basınç dağılımı altındaki simülasyonlar neticesinde saptanan rib bazlı maksimum Von-Mises gerilme değerleri Şekil 15’de gösterilmiştir.

Şekil 15 Rib Bazlı Tümlşik Von-Mises Gerilme Değerleri



(σ_{n_max} : Boşaltmasız Geometrilili Tasarım Von-Mises Değeri, σ_{a_max} : Airfoil Offset Geometrilili Tasarım Von-Mises Değeri, σ_{r_max} : Dörtgensel Geometrilili Tasarım Von-Mises Değeri, σ_{c_max} : Dairesel Geometrilili Tasarım Von-Mises Değeri, σ_{t_max} : Üçgensel Geometrilili Tasarım Von-Mises Değeri)

Rib-2 ile Rib-11 arasındaki gerilme karakteristikleri tetkik edildiğinde, tüm analiz setlerinin aerodinamik yük dağılımı ile benzerlik içerisinde olduğu saptanmıştır. Kanat köküne yakın konumlanan Rib-2 ve Rib-3 bölgelerinde gerilme değerleri nispeten düşük seviyelerde seyrederken; kanat açıklığı boyunca

ilerlendiğinde, basınç yükündeki artışa ve genişleyen kaburga aralıklarına bağlı olarak tüm geometrilerde gerilme şiddetinin kademeli bir yükseliş sergilediği kaydedilmiştir. Sayısal veriler ışığında; tüm analiz konfigürasyonları için gerilme değerinin, basınç dağılımının tepe noktasına (2800 mm) yakın konumlanan ve yapısal yük transferinin en yoğun gerçekleştiği Rib-9 ile Rib-10 bölgelerinde en yüksek seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir.

Sonuç ve Değerlendirme

Beş farklı konfigürasyon üzerinden elde edilen toplam kanat ucu deformasyon değerleri incelendiğinde, 203.57 mm kanat ucu deformasyona sahip referans model ile en fazla deformasyonun olduğu 207.35 mm kanat ucu deformasyona sahip boşaltma modeli arasındaki farkın %1.85 seviyesinde olduğu görülmektedir. Bu durum, kanat yapısındaki ana rijitliğin sparlar ve kabuklar tarafından karşılandığını, riblerin ise toplam eğilme deformasyonu üzerinde ikincil bir etkiye sahip olduğunu teyit etmektedir. Riblerde gerçekleştirilen geometrik boşaltmalar dahi kanadın toplam sehim karakteristiğinde kayda değer bir değişim yaratmamıştır.

Boşaltma geometrilerinin yapısal gerilmeler üzerindeki etkileri incelendiğinde, Airfoil Offset tasarımı Rib-9 bölgesinde 179.85 MPa ile en yüksek gerilme değerine ulaşırken, en düşük gerilme değerini Rib-3 bölgesinde 125.00 MPa ile sergilemiştir. Dörtgensel boşaltma konfigürasyonunda maksimum gerilme Rib-8 bölgesinde 170.73 MPa olarak ölçülmüş, minimum değer ise Rib-3 bölgesinde 63.65 MPa seviyesinde saptanmıştır. Dairesel boşaltma geometrisi, Rib-10 bölgesinde 153.08 MPa maksimum değerine ulaşmış, kanat köküne yakın Rib-2 bölgesinde ise tüm analiz setleri arasındaki en düşük değer olan 52.70 MPa'yı vermiştir. Son olarak Üçgensel boşaltmalı tasarımda, maksimum gerilme Rib-10 bölgesinde 154.46 MPa seviyesinde gerçekleşirken, minimum gerilme değeri Rib-3 bölgesinde 97.88 MPa olarak ölçülmüştür.

Bu veriler, dairesel ve üçgensel formların gerilmeleri yönetmede, airfoil ve dörtgensel formlara kıyasla yapısal açıdan daha stabil bir performans sunduğunu ortaya koymakla birlikte tüm boşaltma geometrilerinde elde edilen gerilme değerleri kanat malzemesinin dayanım sınırları içerisinde kalarak güvenli bir tasarım sonucuna ulaştırmıştır.

Kaynakça

Anderson J.D.(2016). *“Introduction to Flight”*.(Eighth Edition). USA: MGrav-Hill Education

Haile S.I.,Rao G.B.(2024).“Topology Optimization Method of Aircraft Wing Rib Using ANSYS”.Journal of Engineering Sciences Vol 15 Issues 09.

Kumar S., Narahari H.K., Kumar S.H.G.(2021).“Structural Design and FE Analysis of Fixed Wing for Improved Strength and Weight Characteristics”.Journal of Huazhong Univresity of Science and Technology

Megson T.H.G.(2007).“*Aircraft Structures for Engineering Students*”.(4th Edition). UK: Elsevier.

NATO.(2007).“STANAG 4671 UAV Systems Airworthiness Requirements (USAR) For NATO Military UAV Systems”.(Edition 1).

Niu M.C.Y. (2002).“*Airframe Stuctural Design*”.(2nd Edition).Hongkong:Conmilit Press Ltd.

Niu M.C.Y. (2011).“*Airframe Stress Analysis and Sizing*”.(Third Edition).Hongkong:Conmilit Press Ltd.

Sadraey M.H..(2020).“*Design of Unmanned Aerial Systems*”.USA:John Wiley & Sons Ltd.

Sedaghati R.,Elsayed M.S.A.(2006).“Wing Rib Stress Analysis and Design Optimization”. Multidisciplinary Optimization Standardization Approach for Integration and Configurability MOSAIC Project Task 6 Report 5

Soemaryanto A.R.,Rosid N.H.(2018) “Verification Of Schrenk Method For Wing Loading Analysis Of Small Unmanned Aircraft Using Navier-Stokes Based CFD Simulation”. Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 15 No.2.

Sökmen Ö.(2006).“Structural Optimization of a Composite Wing”.(Master Thesis).Middle East Technical University.Ankara.

BÖLÜM 5

EULER-BERNOULLİ KİRİŞİNİN TİTREŞİM KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK VE PINN TABANLI YÖNTEMLERLE ANALİZİ

BURAK EMRE YAPANMIŞ¹
EMRAH KUZU²
SÜLEYMAN MURAT BAĞDATLI³

Giriş

Kirişler, makine mühendisliği, inşaat mühendisliği ve havacılık uygulamalarında en yaygın kullanılan taşıyıcı elemanlardan biridir. Özellikle mikro ve nano ölçekli sistemlerin gelişmesiyle birlikte, klasik elastisite teorilerinin ötesine geçen modellemelere ihtiyaç duyulmuştur. Ancak makro ölçekteki kirişlerin dinamik davranışı da mühendislik uygulamaları açısından

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-0499-6581

² Öğr. Gör. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilgisayar Programcılığı, Orcid: 0000-0001-9004-2105

³ Prof. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9004-2105

hâlâ büyük önem taşımaktadır. Doğal frekansların doğru bir şekilde belirlenmesi; titreşim kontrolü, rezonansın önlenmesi ve yapısal güvenliğin sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Kirişlerin serbest titreşim analizi genellikle Euler–Bernoulli kiriş teorisine dayanmaktadır. Bu teori, küçük deformasyonlar ve kesit düzlemlerinin düz kaldığı varsayımı altında, birçok mühendislik problemi için yeterli doğruluk sağlamaktadır. Özellikle basit mesnetli ve ankastre–ankastre sınır koşullarına sahip kirişlerin doğal frekansları literatürde analitik olarak elde edilebilmektedir. Ancak daha karmaşık durumlarda analitik çözümler her zaman mümkün olmamaktadır.

Bu tür problemlerde yarı-nümerik yöntemler önemli bir alternatif sunmaktadır. Özellikle Galerkin yöntemi, sonlu farklar yaklaşımı ve seri açılım teknikleri, diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler yüksek doğruluk sağlayabilmekle birlikte, çözüm süreci çoğu zaman problem özelinde türetilmiş matematiksel formülasyonlar gerektirir ve hesaplama maliyeti artabilir.

Son yıllarda ise fizik tabanlı makine öğrenmesi yaklaşımları mühendislik problemlerinde yeni bir paradigma oluşturmuştur. Özellikle Physics-Informed Neural Networks (PINN) yöntemi, diferansiyel denklemleri ve sınır koşullarını doğrudan kayıp fonksiyonu içerisine gömerek çözüm üretmektedir. Bu yaklaşım, klasik veri odaklı yöntemlerden farklı olarak fiziksel yasaları doğrudan öğrenme sürecine dahil etmektedir. PINN yöntemi, karmaşık geometriye, değişken katsayılı diferansiyel denklemlere ve doğrusal olmayan problemlere uygulanabilme esnekliği nedeniyle son yıllarda geniş bir araştırma alanı bulmuştur.

Kirişlerin serbest titreşimleri ve doğal frekans analizleri, klasik elastik teori ve sürekli sistem titreşimi literatüründe uzun bir geçmişe sahiptir. Timoshenko ve Gere’in temel çalışmaları, beam

modellerinin titreşim davranışını kuramlaştırmış ve modal analiz yöntemlerini ilk kez sistematik olarak ortaya koymuştur (Timoshenko & Gere, 1961). Ayrıca, sürekli sistemlerin titreşim çözümleri üzerine Rao gibi araştırmacıların çalışmaları, Euler–Bernoulli kiriş teorisinin uygulanması ve doğal frekansların analitik hesaplanması konusunda kapsamlı bir çerçeve sunmuştur (Rao, 2007). Seri çözüm teknikleri ve değişken kesitli kirişlerin analitik incelenmesi gibi erken dönem çalışmalar, kiriş geometrisi ve sınır koşullarının frekans davranışına etkilerini ortaya koymuştur (Banerjee, 1998; Bokaian, 1990; Khiem & Lien, 2001). Fonksiyonel derecelendirilmiş beam modelleri için klasik teoriler, kirişlerin titreşim karakteristiğini belirlemede temel referans olarak kullanılmaktadır (Reddy, 1998). Günümüzde de kirişlerin doğal frekans davranışı üzerine birçok akademik çalışma yayımlanmıştır. Örneğin, bağlı kiriş sistemlerinin dinamik davranışı analitik ve nümerik yöntemlerle incelenmiş ve doğal frekanslar ile mod şekilleri başarılı şekilde tahmin edilmiştir (Alazmi et al., 2025). Guendouz vd. (Guendouz et al., 2025) tarafından fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış ince duvarlı kirişler için sayısal titreşim analizi yapılmış ve farklı sınır koşullarının doğal frekanslara etkisi araştırılmıştır. Ayrıca fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko kirişlerinin titreşim davranışı üzerine geliştirilen iteratif yöntemler, doğal frekansların belirlenmesinde etkili olmuştur (Kadıoğlu et al., 2025). Vu vd. (2025) çelik kirişlerde hasar tespiti doğal frekans tepkisi üzerinden yapılmış ve deneysel sonuçlar sayısal modellerle karşılaştırılmıştır. Li ve Liu (2025) tarafından fiber takviyeli ankastre kirişlerin dinamik özellikleri teorik ve deneysel yöntemlerle ele alınmıştır. Domagalski (2021) geometrik ve malzeme açısından değişken özelliklere sahip kirişler için doğal frekans spektrumları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Söylemez ve Akgöz (2025) tarafından ankastre kirişlerin doğal frekansları için analitik ve sayısal karşılaştırmalar yapılmış, Bernoulli–Euler teorisi ile elde edilen sonuçların sayısal modellerle uyumu değerlendirilmiştir. Shifrin ve

Lebedev (2024) farklı modelleme teknikleri ile çatlaklı Timoshenko kirişlerinin doğal frekanslarını hesaplamış ve etkilerini analiz etmişlerdir. Gulnaz vd. (2024) Timoshenko, Rayleigh ve Euler–Bernoulli modellerinden yararlanarak elastik temel üzerindeki kirişlerin doğal frekans davranışlarını incelemişlerdir. Li vd. (2024) kayma etkilerini ve doğal frekans davranışlarını Timoshenko teorisi kapsamında sayısal olarak inceleyen çalışma yürütmüşlerdir. Sinha (2023) süreksizlikler ve yay/kütle etkileri içeren Timoshenko kirişlerinin doğal frekanslarını yeni bir yöntemle hesaplamış ve literatürle karşılaştırmıştır. Loya vd. (2022) kırıklı Timoshenko kirişlerinin elastik ortamda doğal frekansları üzerine detaylı analiz yapmıştır. Li vd. (2021) sınır şartları ve çekme yükü etkileri altında Euler–Bernoulli/Timoshenko kiriş modellerinde doğal frekans davranışına odaklanan sayısal ve analitik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Nguyen vd. (2024), öngerilmeli Timoshenko kirişlerin farklı sınır koşulları altındaki serbest titreşim davranışlarını incelemiş ve ön gerilmenin özellikle düşük modlarda doğal frekansları önemli ölçüde artırdığını göstermiştir.

Tüm bu analitik yöntemlerin yanı sıra, son yıllarda Physics-Informed Neural Networks (PINN), kiriş ve yapısal dinamik problemlerini çözmede güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Örneğin, Dan vd., (2025) tarafından bir kablonun serbest titreşim yanıtı gibi klasik beam problemleri PINN çerçevesi kullanılarak başarılı şekilde modellendi ve fizik temelli kısıtlar sayesinde yüksek doğruluk elde edildi. Fallah ve Aghdam (2024), üç boyutlu fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin eğilme ve serbest titreşim analizleri için fizik bilgilendirmeli sinir ağları (PINN) yöntemini kullanarak malzeme dağılımı ve gözenekliliğin doğal frekanslar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kapoor vd. (2023), elastik temeller üzerindeki kirişlerin dinamiğini simüle etmek için nedenselliğe duyarlı fizik bilgilendirmeli sinir ağlarında transfer öğrenmesini kullanarak doğruluk ve genellenebilirliği artırmışlardır.

Hedayatrasa vd. (2025), ince kompozit laminatların titreşim mod şekillerini ve bükülme sertliklerini verimli bir şekilde öğrenmek ve yeniden oluşturmak için Fourier tabanlı spektral k-space fizik bilgilendirmeli sinir ağı (k-PINN) yöntemini geliştirmişlerdir. Das (2023) makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar sayesinde farklı geometri ve sınır koşullarına sahip kirişlerin frekans tahminleri yapmıştır. Zakharov vd. (2025) PINN ile basit mesnetli kirişin eğilme davranışını incelemiş ve fizik temelli veri ile eğitimin doğruluğunu değerlendirmişlerdir. Martinez vd. (2025), demiryolu köprülerinin yapısal analiz ve izlenmesi için fizik bilgilendirmeli sinir ağları (PINN) çalışmalarını sistematik olarak incelemiş ve bu alandaki fırsat ve eksiklikleri ortaya koymuşlardır. Zakharov vd. (2025), tek açıklıklı kirişlerin deplasmanlarını hesaplamak için fizik bilgilendirmeli sinir ağı (PINN) modeli geliştirmiş ve sınırlı ve gürültülü veri koşullarında yüksek doğruluk ve dayanıklılık sağladığını göstermişlerdir. Söyleyici ve Ünver (2025), kirişlerin titreşimlerini ve dinamik parametrelerini belirlemek için Neural Tangent Kernel destekli bir PINN modeli geliştirmişlerdir.

Li vd. (2023), çok temaslı sürtünmeli sistemlerin kesikli dinamiklerini simüle etmek için yeni bir PINN yöntemi geliştirmişlerdir. Baniya ve Maity (2026), yapı mühendisliğinde fizik bilgilendirmeli sinir ağlarının (PINN) teorik çerçevesini, uygulamalarını ve ileri araştırma yönlerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Das vd. (2026), stres kaynaklı nonlokal elastik kirişlerin eigenvalue problemlerini çözmek için fizik bilgilendirmeli sinir ağı (PINN) yaklaşımını geliştirmişlerdir. Yoo vd. (2025), yapı mühendisliğinde eigenvalue problemlerini çözmek için fizik bilgilendirmeli sinir ağı (PINN) tabanlı bir yöntem geliştirmiş ve yöntemlerini vaka çalışmalarıyla doğrulamışlardır. Zhen vd. (2025), hareketli yük altındaki sonsuz Euler–Bernoulli kirişlerin sabit durum dinamik tepkilerini tahmin etmek için transfer öğrenmeli ve yerel PINN tabanlı yeni bir fizik bilgilendirmeli sinir ağı çerçevesi

geliştirmişlerdir. Chen vd. (2024), uzun süreli simülasyonlarda yapısal titreşim problemlerini çözmek için gelişmiş bir zaman adımlamalı fizik bilgilendirmeli sinir ağı (AT-PINN) yaklaşımı geliştirmişlerdir. Azbah ve Musa (2025), derin kırıların yapısal analizini hızlı ve doğru şekilde yapmak için fizik bilgilendirmeli bir konvolüsyonel sinir ağı (PI-CNN) modeli geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, makro ölçekteki homojen bir kırıin serbest titreşim problemi ele alınmıştır. Basit ve ankastre mesnetli sınır koşulları altında doğal frekanslar, yarı-nümerik ve Physics-Informed Neural Networks (PINN) yöntemleri kullanılarak iki farklı yaklaşımla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yöntemlerin doğruluk, yakınsama davranışı ve hesaplama verimliliği açısından performansları değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırma, klasik mühendislik yöntemleri ile yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar arasındaki farkları ortaya koymayı ve PINN yönteminin makro ölçekli titreşim problemlerindeki uygulanabilirliğini göstermeyi amaçlamaktadır. Teorik altyapı sunulmakta, ardından matematiksel model türetilmekte, yarı-nümerik çözüm yöntemi detaylandırılmakta ve son olarak PINN tabanlı çözüm yaklaşımı sistematik olarak açıklanmaktadır. Son bölümde ise elde edilen doğal frekans sonuçları kapsamlı biçimde karşılaştırılmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Bu bölümde, makro ölçekte ele alınan elastik bir kırış sisteminin dinamik davranışı sürekli ortam mekaniği çerçevesinde incelenmiştir. Kırışin hareket denklemleri, varyasyonel prensiplere dayalı olarak İrlandalı matematikçi William Rowan Hamilton tarafından geliştirilen Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Modelleme sürecinde doğrusal kırış teorisi esas alınmış ve sistemin kinetik ile potansiyel enerjileri tanımlanarak hareket denklemleri elde edilmiştir.

Elde edilen doğrusal kısmi diferansiyel denklemler boyutsuzlaştırılmış ve ayrılabilir çözüm yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Böylece analitik çözüm çerçevesinde frekans bağıntıları elde edilmiştir. Sınır şartları uygulandığında elde edilen karakteristik denklem kapalı formda çözilememektedir. Bu nedenle doğal frekans değerleri iteratif kök bulma yöntemleri kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Hareket denkleminin analitik olarak türetilip frekansların sayısal olarak belirlenmesi nedeniyle bu yaklaşım yarı analitik yöntem olarak adlandırılmaktadır. Karakteristik denklemin kökleri, iteratif kök bulma algoritmaları kullanılarak sayısal olarak belirlenmiştir. Böylece analitik türetim sonrası frekans değerleri nümerik çözüm yoluyla elde edilmiştir.

Bununla birlikte, klasik yarı-analitik yaklaşıma alternatif olarak son yıllarda gelişen fizik bilgilendirmeli sinir ağları (Physics-Informed Neural Networks, PINN) yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak Maziar Raissi(2019) ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen bu yaklaşımda, diferansiyel denklem ve sınır koşulları kayıp fonksiyonu içerisine gömülmekte ve çözüm otomatik türev mekanizması kullanılarak elde edilmektedir. PINN yöntemi mesh-free yapıda olup fiziksel yasaları doğrudan öğrenme sürecine dahil etmektedir. Bu çalışmada yarı-analitik ve PINN tabanlı çözümler karşılaştırılarak doğal frekans değerleri, yakınsama davranışı ve hesaplama performansı açısından analiz edilmiştir.

Bu araştırma kapsamında ele alınan problem, eksenel çekme veya basma kuvveti etkisindeki Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayanan lineer elastik bir sistemin serbest titreşim karakteristiklerinin belirlenmesidir. Kirişin dinamik davranışını yöneten dördüncü mertebeden kısmi diferansiyel denklemin çözümünde, sınır şartlarının (ankastre-ankastre) sisteme empoze ettiği kısıtlamalar, sistemin özdeğer spektrumunu doğrudan belirlemektedir. Boyutsuzlaştırılmış formda ifade edilen sistemin doğal frekansı (ω), eğilme rijitliği ile eksenel yükün yarattığı

geometrik sertlik arasındaki etkileşimi yansıtan ve literatürde klasik bir referans olarak kabul edilen şu karakteristik denklemlerle tanımlanmaktadır ((Blevins, 1979; Rao, 2007)):

$$\omega^2 = (kL)^4 + Q(kL)^2 \quad (1)$$

Burada Q , kirişin maruz kaldığı boyutsuz eksenel yük parametresi olup; kL terimi ise, kiriş uçlarındaki dönme ve yer değiştirme kısıtlamalarının sonucu olarak ortaya çıkan transandantal özdeğerleri temsil etmektedir. Bu çalışmada, modelin çoklu mod tahmin kapasitesini değerlendirmek amacıyla ilk beş mod için belirlenmiş karakteristik dalga sayıları ($kL_1=4.7300$, $kL_2=7.8532$, $kL_3=10.9956$, $kL_4=14.1372$, $kL_5=17.2788$) temel alınmış olup, PINN modelinin bu karmaşık spektral ilişkileri veri kullanmaksızın öğrenme kapasitesi test edilmiştir.

Fiziksel Model ve Temel Varsayımlar

Bu çalışmada, uzunluğu L , kesit alanı A , elastisite modülü E ve atalet momenti I olan makro ölçekte homojen ve izotrop bir Euler–Bernoulli kiriş ele alınmıştır. Kiriş modeli, klasik Euler–Bernoulli kiriş teorisine dayandırılmış olup düzlem kesitlerin eğilme sonrasında düzlem kalmaya devam ettiği ve dönmelerin küçük olduğu varsayımı kabul edilmiştir.

Sistem yalnızca enine titreşimler açısından incelenmiş olup boyuna yer değiştirmeler ihmal edilmiştir. Bu nedenle yer değiştirme alanı yalnızca zamana ve eksenel koordinata bağlı enine deplasman fonksiyonu $w(x,t)$ ile tanımlanmıştır. Modelde küçük deplasman ve küçük şekil değiştirme varsayımları kabul edilmiş, böylece geometrik doğrusal davranış esas alınmıştır.

Kirişin lineer elastik malzeme davranışı gösterdiği varsayılmış ve Hooke kanunu geçerli kabul edilmiştir. Kayma deformasyonları ve dönme atalet etkileri ihmal edilerek klasik Euler–Bernoulli yaklaşımı kullanılmıştır.

Hareket Denkleminin Hamilton Prensibi ile Elde Edilmesi

Hareket denklemlerinin elde edilmesi amacıyla varyasyonel prensiplere dayanan Hamilton prensibi uygulanmıştır. Sistemin kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisi arasındaki farkın ve dış kuvvetlerin yaptığı işin belirli bir zaman aralığında alınan integralinin varyasyonunun sıfır olması esasına dayanır. Bu tanım doğrultusunda, sistemin kinetik enerjisi, potansiyel enerjisi ve dış kuvvetlerin yaptığı işe ait varyasyonel ifadeler ayrı ayrı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta T dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \frac{\rho A \partial w}{\partial t} \frac{\partial(\delta w)}{\partial t} dx dt \quad (2)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta U dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \frac{EI(\partial^2 w)}{\partial x^2} \frac{\partial^2(\delta w)}{\partial x^2} dx dt \quad (3)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L q_m(x, t) \delta w dx dt \quad (4)$$

Hamilton prensibi matematiksel olarak

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Hamilton prensibi doğrultusunda sistem için elde edilen varyasyonel ifadeler tek bir integral formunda birleştirildiğinde

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \left(\rho A \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial(\delta w)}{\partial t} - EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2(\delta w)}{\partial x^2} + q_m(x, t) \delta w \right) dx dt = 0 \quad (6)$$

ifadesi elde edilir. Bu aşamada zamana ve uzaya göre kısmi integrasyon işlemleri uygulanır. Zaman sınırlarında $\delta w = 0$ kabul edildiğinden zamana bağlı sınır terimleri ortadan kalkmaktadır.

Benzer şekilde, seçilen sınır şartları (ankastre–ankastre veya basit–basit) uzaysal sınır terimlerini sıfırlamaktadır.

Gerekli kısmi integrasyon işlemlerinin ardından ifade aşağıdaki forma indirgenir:

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^L \left(\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - q_m(x, t) \right) \delta w \, dx \, dt = 0 \quad (7)$$

Burada δw keyfi bir sanal deplasman olduğundan, integrandın sıfır olması gerekmektedir. Böylece Euler–Lagrange denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \eta A Q \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (8)$$

Bu ifade, manyetik alan etkisi altında bulunan Euler–Bernoulli kirişinin doğrusal enine titreşim hareket denklemini temsil etmektedir.

Doğal Frekans Analizi

Bu bölümde elde edilen hareket denkleminin doğal frekans analiz edilmiştir. Öncelikle sistem serbest titreşim koşulu altında incelenmiştir. Manyetik alan etkisi zamandan bağımsız eşdeğer bir dağıtılmış yük olarak modele dahil edildiğinde, sistemin doğrusal hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\rho A w_{tt} + EI w_{xxxx} - \eta A Q w_{xx} = 0 \quad (9)$$

Burada η manyetik alanın kiriş üzerindeki etkisinin katsayısıdır. Q manyetik alandan kaynaklanan kuvvet yoğunluğudur. Bu denklemin parametre sayısını azaltmak ve sistemi daha genel bir formda incelemek amacıyla boyutsuz değişkenler tanımlanmıştır. Uzaysal, zamansal ve deplasmana ait boyutsuz değişkenler aşağıdaki şekilde seçilmiştir: $\bar{w} = \frac{w}{r}$, $\bar{x} = \frac{x}{L}$, $\bar{t} = t \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}$. Burada L kiriş uzunluğunu, r karakteristik deplasman büyüklüğünü ve seçilen

zaman ölçeği ise Euler–Bernoulli kirişinin karakteristik titreşim zamanını temsil etmektedir. Bu dönüşümler ana denkleme yerleştirilip gerekli matematiksel düzenlemeler yapıldığında sistem

$$w_{\bar{t}\bar{t}} + w_{\bar{x}\bar{x}\bar{x}\bar{x}} - \varphi w_{\bar{x}\bar{x}} = 0 \quad (10)$$

şeklinde boyutsuz forma indirgenmiş olur. Burada

$$\varphi = \frac{\eta A Q L^2}{EI} \quad (11)$$

manyetik alanın boyutsuz etkisini temsil eden parametredir. Ayrılabilir çözüm önermesi:

$$w(x, t) = W e^{i(kx - \omega t)} \quad (12)$$

Burada k dalga sayısı, ω açısal frekanstır. Türevleri yerlerine yazıldığında yayılım ilişkisi

$$\omega^2 = k^4 + \phi k^2 \quad (13)$$

şeklinde elde edilir.

PINN Tabanlı Çözüm Yaklaşım

Fiziksel sistemlerin, örneğin akışkanlar dinamiği, ısı transferi veya katı cisim mekaniği gibi davranışı genellikle kısmi diferansiyel denklemler (PDE) ile modellenir. Matematiksel olarak genel bir lineer olmayan diferansiyel denklem şu şekilde ifade edilebilir:

$$ut + N[u; \lambda] = 0, x \in \Omega, t \in [0, T] \quad (13)$$

Burada $u(t, x)$ sistemin çözüm fonksiyonunu, örneğin yer değiştirme veya doğal frekans, $N[u; \lambda]$ fiziksel yasaları temsil eden ve λ parametrelerine bağlı lineer olmayan operatörü, Ω ise problemin uzaysal tanım kümesini ifade etmektedir (Raissi et al., 2019).

Geleneksel veri güdümlü makine öğrenmesi algoritmaları yalnızca girdi ve çıktı arasındaki istatistiksel ilişkiyi öğrenmeye çalışır. Diğer taraftan Fizik Bilgili Sinir Ağları (PINN), sistemin doğasını kontrol edebilen bu diferansiyel denklemleri modelin

eğitim aşamasında bir uygunlaştırma (regularization) kısıtı olarak kullanır. Bunu yapabilmek için fiziksel denklemden yola çıkarak bir kalıntı (rezidü) fonksiyonu olan $f(t, x)$ tanımlanır:

$$f := ut + N[u] = 0 \quad (14)$$

Ağın eğitimi sırasında minimize edilmeye çalışılan toplam kayıp fonksiyonu (L_{tot}), mevcut ölçüm/sınır verilerine ait hata ile fiziksel kuralları sağlamama hatasının toplamından oluşur:

$$L_{tot} = L_u + L_f \quad (15)$$

Denklemdaki L_u , sinir ağının ürettiği tahminler ile ölçülen veya bilinen veriler (z) arasındaki hatayı ifade eder ($L_u = ||u - z||_r$). İkinci terim olan L_f ise ağın fiziksel diferansiyel denklemlere ne kadar uyduğunu ölçen rezidü hatasıdır $L_f = ||f||_r$. Bu yapı sayesinde sinir ağı, yalnızca eğitim verilerine uymakla kalmaz (overfitting riskini düşürür), aynı zamanda verinin bulunmadığı bölgelerde de fiziksel olarak tutarlı ve geçerli çözümler üretmektedir.

PINN yaklaşımı, literatürde temel olarak ileri yönlü (forward) problemler ve ters (inverse) problemler çözümünde başarılı olduğu ispatlanmıştır. İleri yönlü problemlerde ağ, sınır koşulları ve sistem parametreleri bilindiğinde, akışkan hızı, sıcaklık dağılımı veya yapısal deformasyon gibi bilinmeyen durum değişkenlerini ağsız (mesh-free) tahminleme başarısı oldukça yüksektir. Sınırlı, seyrek veya gürültülü sensör verisi bulunan çalışmalarda standart modeller gürültüyü ezberlemeye (overfitting) meyilliyken, PINN fizik kurallarını kullanarak doğru sinyali yakalar. Ters problem çözümlerinde eksik olan malzeme özellikleri veya PDE katsayıları problemin çözümüyle aynı eğitim süreci içerisinde bulunabilir (Haghighat et al., 2021).

Kayıp fonksiyonunda yer alan veri (L_u) ve fizik (L_f) terimlerinin birbiriyle rekabet etmesi, gradyan patolojilerine ve ağın

yerel minimumlara (local optima) akışmasına neden olabilmektedir. Modelin doğruluğu, bireysel kayıp terimlerinin ağırlıklandırılmasına oldukça bağımlıdır ve karmaşık akışlarda bu katsayıların adaptif olarak ayarlanması gerekir. Bunun yanı sıra, standart ağlar çok yüksek frekanslı sinyalleri veya keskin gradyan barındıran problemleri çözmekte yetersiz kalabilmektedir.

Bu sorunu aşmak adına literatürde çeşitli gelişmiş PINN varyasyonları ortaya konmuştur. Uzay ve zaman alanını alt bölgelere ayırarak paralel ağlar çalıştıran XPINN (Extended PINN), karmaşık ve düzensiz geometrilere tekrar eğitim maliyetini ortadan kaldıran PIPN (Physics-informed PointNet) bu iyileştirmelere örnektir(Jagtap et al., 2020). Ayrıca, frekans dağılımlarındaki uzun kuyruk problemini (long-tailed distribution) zmek üzere tasarlanan İki Aşamalı (Two-stage) PINN yaklaşımı, birinci ağın ürettiği kaba çözümü geriye yayılımı (backpropagation) zerek ikinci bir ağa aktarır ve bu sayede çözümün yüksek hassasiyetle genelleştirilmesini sağlamaktadır. Karmaşık kısmi diferansiyel denklemlerin güvenilirlik analizlerinde (reliability analysis) ise yapısal yanıt hesaplamalarından kaçınmak için PINN, Birinci Dereceden Güvenilirlik Metodu (FORM) ile birleştirilerek kara kutu bir vekil model gibi konumlandırılabilir. Son dönemde kesirli difüzyon denklemlerinin çözümünde de Grunwald-Letnikov formülüyle entegre edilen PINN modelleri, değişken katsayılı uzay-zaman problemlerindeki esnekliğini kanıtlamaktadır(Pang et al., 2019; Uçar & Alp, 2025).

Teorik Modelleme ve Yarı-Analitik Yöntem

Kirişin hareket denklemleri, varyasyonel prensiplere dayanan ve sistemin kinetik ile potansiyel enerjilerini esas alan Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Modelleme sürecinde doğrusal kiriş teorisi kullanılmış, elde edilen kısmi diferansiyel denklemler boyutsuzlaştırılarak analitik bir formata getirilmiştir.

Ancak, sınır şartları uygulandığında ortaya çıkan karakteristik denklem kapalı formda çözülemediğinden, doğal frekans değerleri (ω) iteratif kök bulma algoritmalarıyla sayısal olarak hesaplanmıştır. Bu süreç, analitik türetim ile nümerik çözümün birleşimi olduğu için yarı-analitik yöntem olarak tanımlanmaktadır.

Geleneksel yöntemlere alternatif olarak, diferansiyel denklemleri ve fiziksel yasaları doğrudan öğrenme sürecine dahil eden PINN yöntemi uygulanmıştır. PINN, "mesh-free" (ağırsız) bir yapıda çalışarak fiziksel yasaları bir kayıp fonksiyonu (loss function) aracılığıyla sinir ağına dikte eder (Abueidda et al., 2021)

PINN ve Kayıp Fonksiyonu

Bu çalışmanın en özgün yönü, sinir ağının eğitim sürecinde herhangi bir öncül veri setine ihtiyaç duyulmaması, bunun yerine modelin doğrudan diferansiyel denklem kalıntılarını (PDE residuals) minimize etmeye odaklanmasıdır.

Kollokasyon Noktalarının Seçimi: Eğitim, modelin fiziksel alanı kapsamlı bir şekilde tarayabilmesi için $Q \in [0,100]$ ve $n \in [1,5]$ uzayından rastgele örneklenen sentetik noktalar (collocation points) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu strateji, modelin sadece ayrık veri noktalarında değil, tüm sürekli çözüm uzayında geçerli olan fiziksel bir "surrogate" (vekil) model oluşturmaya imkân tanımaktadır.

Fizik Tabanlı Kayıp Fonksiyonu (Physics-Informed Loss Function): Modelin ağırlık (W) ve sapma (b) parametreleri, aşağıdaki fiziksel kalıntı fonksiyonunu minimize edecek şekilde güncellenmiştir:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{phys} = \frac{1}{N_{coll}} \sum_{i=1}^{N_{coll}} (\mathcal{N}_{net}(Q_i, n_i)^2 - [(kL)_i^4 + Q_i(kL)_i^2])^2 \quad (16)$$

Burada $\mathcal{N}_{net}$, ağın tahmini olup, bu kayıp fonksiyonu ağın tahmin ettiği değer ile analitik denklemin sağ tarafı arasındaki farkın karesini (Mean Squared Error) ifade eder.

Kayıp fonksiyonunun minimizasyonu için stokastik gradyan inişi yönteminin geliştirilmiş bir varyasyonu olan Adam optimizasyon algoritması (Kingma & Ba, 2014) kullanılmıştır. Eğitim süreci, 10000 iterasyon boyunca, modelin fiziksel yasayı kabul edilebilir bir tolerans seviyesinde öğrenmesine kadar sürdürülmüştür.

Ağ Mimarisi ve Kod Yapısı

Model, PyTorch kütüphanesi kullanılarak PINN adlı bir class altında yapılandırılmıştır, Ağın katman dizilimi şu şekildedir:

- **Giriş Katmanı:** Normalize edilmiş eksenel yük (Q) ve mod sayısını (n) temsil eden 2 nöron.
- **Gizli Katmanlar:** He biri 64 nörondan oluşan iki adet tam bağlantılı (fully-connected) gizli katman, Aktivasyon fonksiyonu olarak doğrusal olmayan ilişkileri modellemek adına hiperbolik tanjant (Tanh) tercih edilmiştir.
- **Çıkış Katmanı:** Doğal frekansı (ω) temsil eden tek bir nöron,

Kod içerisinde giriş verileri, ağın daha verimli öğrenmesi için normalize edilmiştir:

$$x = \text{torch.cat}([q/100.0, n/5.0], \text{dim} = 1) \# Q (0 - 100) \text{ ve } n (1 - 5) \quad (17)$$

Normalizasyonu ayrıca, fiziksel olarak frekans değerinin negatif olamayacağı gerçeğinden hareketle, ağın çıktısı mutlak değer fonksiyonu ile işlenmiştir (Abueidda et al., 2021; Ghane et al., 2023).

Doğrulama ve Performans Analizi

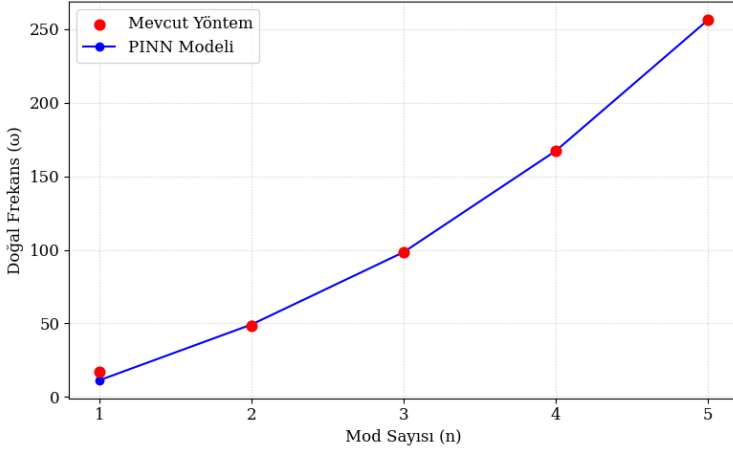
Eğitilen PINN modelinden elde edilen sonuçlar; Mathematica tabanlı yarı-analitik veriler ve analitik mod şekli fonksiyonları ($\sin(n\pi x)$ vb.) ile karşılaştırılmıştır, Karşılaştırmalı analizler sonucunda PINN modelinin; doğal frekans değerlerini, yakınsama davranışını ve mod şekillerini yüksek doğrulukla tahmin edebildiği ve fiziksel yasaları başarıyla öğrendiği grafikler ve tablolar aracılığıyla doğrulanmıştır (Paszke et al., 2019).

Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, eksenel yüke maruz kalan Euler–Bernoulli kirişinin serbest titreşim probleminin yarı-analitik yöntem ve PINN tabanlı yaklaşım ile elde edilen sonuçları, doğal frekans tahmin doğruluğu, mod şekillerinin mekansal temsil yeteneği ve eksenel yük altındaki spektral değişimleri yakalama başarımı açısından karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

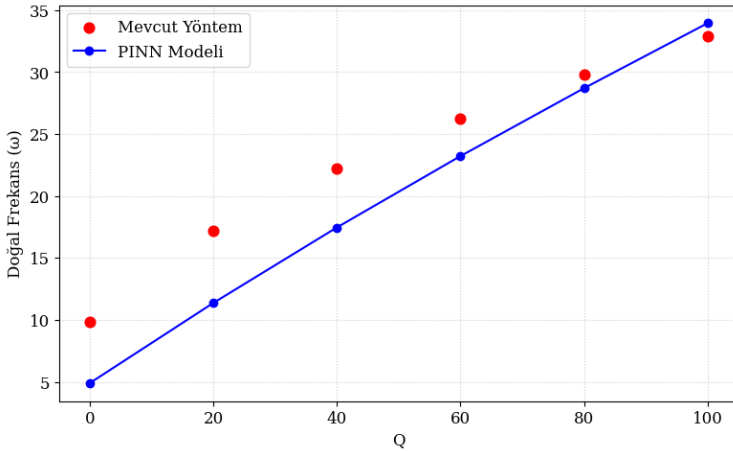
Şekil 1, $Q = 20$ sabit eksenel yükü altında basit mesnetli ve ankastre-ankastre sınır şartları için ilk beş doğal frekansın yarı-analitik yöntem ve PINN ile elde edilen değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermekte; PINN modelinin tüm mod spektrumunu referans verilerle yüksek uyum içinde yeniden üretebildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 1. Farklı sınır şartlarına ait ilk beş doğal frekans değerleri ($Q=20$)

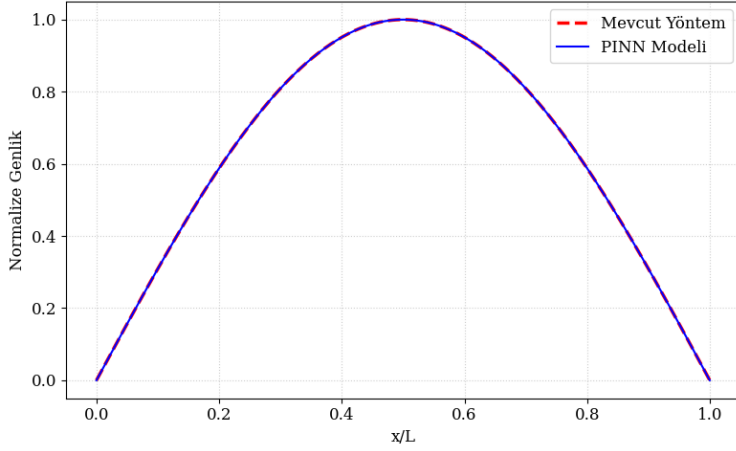


Şekil 2, $Q = 20$ için eksenel yük parametresinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisini sunmakta ve yük arttıkça geometrik sertlik artışı nedeniyle frekansın yükseldiğini, PINN'in bu eğilimi ara değerler dahil başarılı biçimde yakaladığını göstermektedir.

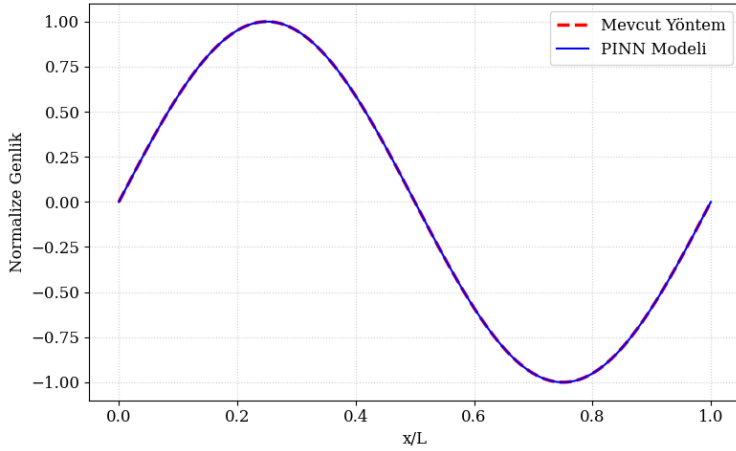
Şekil 2. Farklı manyetik alan durumlarına ait birinci doğal frekans değerleri ($Q=20$)



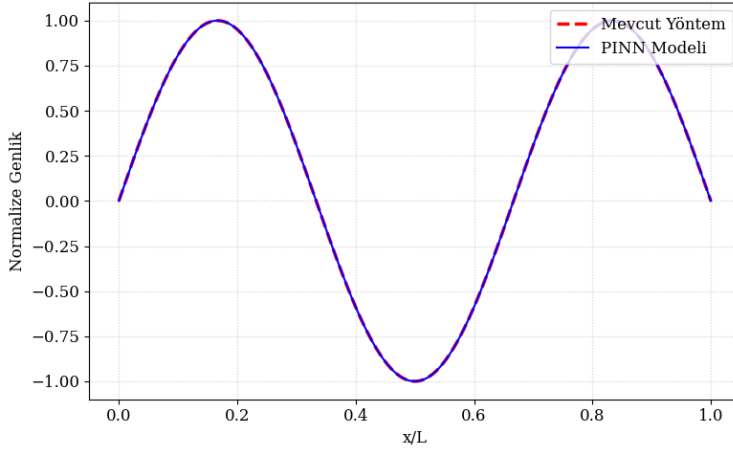
Şekil 3. Basit Basit sınır şartlarına ait kirişin birinci mod şekli karşılaştırması ($Q=50$)



Şekil 4. Basit Basit sınır şartlarına ait kirişin ikinci mod şekli karşılaştırması ($Q=50$)



Şekil 5. Basit Basit sınır şartlarına ait kirişin üçüncü mod şekli karşılaştırması ($Q=50$)



Şekil 3–5, $Q = 50$ için basit mesnetli kirişin birinci, ikinci ve üçüncü mod şekillerini yarı-analitik çözüm ile PINN çıktıları arasında karşılaştırmakta; sinüzoidal mod formlarının, düğüm noktalarının ve genlik değişimlerinin ağ yapısı olmadan (mesh-free) yüksek doğrulukla yeniden üretilebildiğini ortaya koymaktadır

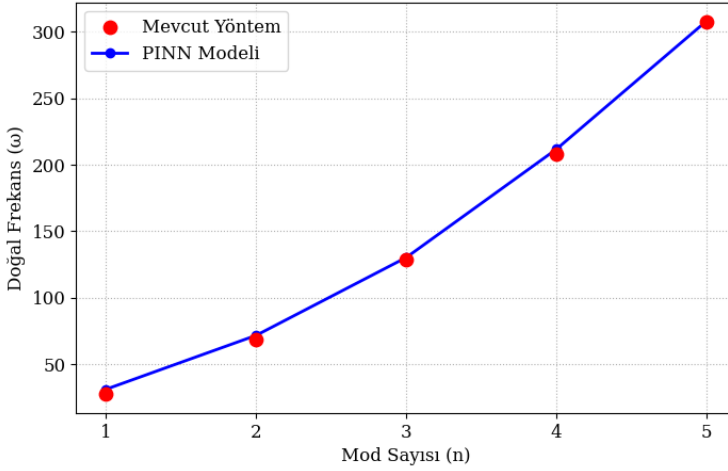
Tablo 1, ankastre–ankastre sınır şartlarına sahip Euler–Bernoulli kirişi için farklı boyutsuz eksenel yük parametreleri (Q) altında elde edilen ilk beş doğal frekansın yarı-analitik yöntemle hesaplanan referans değerleri ile Physics-Informed Neural Network (PINN) modeli tarafından tahmin edilen sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Böylece eksenel çekme/basma yükünün frekans spektrumu üzerindeki etkisi nicel olarak izlenirken, PINN yaklaşımının çoklu modlar için doğal frekansları veri kullanmaksızın ne ölçüde doğru yeniden üretebildiği ve yarı-analitik çözüme yakınsama performansı ayrıntılı biçimde değerlendirilebilmektedir.

Tablo 2, ankastre–ankastre sınır şartlarına sahip Euler–Bernoulli kirişi için farklı eksenel yük değerleri (Q) altında elde edilen ilk beş doğal frekansın yarı-analitik yöntemle hesaplanan sayısal sonuçları ile Physics-Informed Neural Network (PINN) modeli tarafından tahmin edilen değerlerini yan yana göstermektedir. Böylece, eksenel çekme/basma yükünün frekanslar üzerindeki etkisi incelenirken, PINN yaklaşımının çoklu modlar için doğal frekans spektrumunu ne ölçüde doğru ve kararlı biçimde yeniden üretebildiği nicel olarak karşılaştırılmakta; yöntemlerin doğruluk ve hesaplama verimliliği bakımından performans farkları görsel ve sayısal olarak ortaya konulmaktadır.

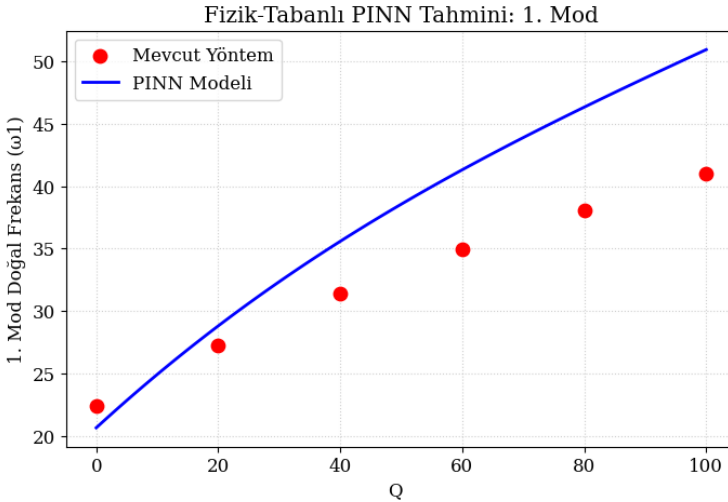
Şekil 6, $Q = 20$ sabit eksenel yükü altında ankastre–ankastre sınır şartına sahip kirişi için ilk beş doğal frekansın yarı-analitik yöntem ve PINN ile elde edilen değerlerini karşılaştırmakta; ankastre durumda da PINN’in mod numarası arttıkça yükselen frekans spektrumunu yüksek uyumla yakalayabildiğini göstermektedir.

Şekil 7, ankastre–ankastre kirişte $Q = 20$ için eksenel yük/manyetik alan parametresinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisini sunmakta; yük arttıkça geometrik sertliğe bağlı frekans artışının PINN tarafından, eğitimde bulunmayan ara değerler de dahil olmak üzere fiziksel olarak tutarlı biçimde yeniden üretildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 6. Ankastre Ankastre Farklı sınır şartlarına ait ilk beş doğal frekans değerleri ($Q=20$)



Şekil 7. Ankastre Ankastre Farklı manyetik alan durumlarına ait birinci doğal frekans değerleri.



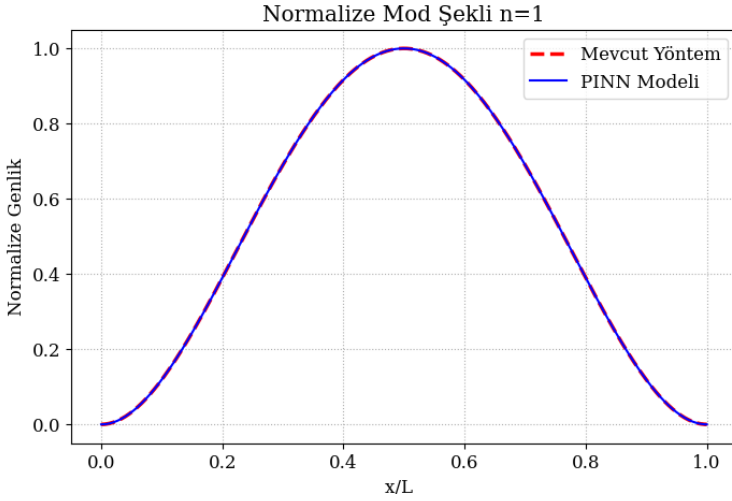
Tablo 1 Basit Basit sınır şartlarına ait kirişin farklı eksenel yük değerleri (Q) için yarı-analitik ve PINN yöntemleriyle elde edilen doğal frekansların (ω) karşılaştırılması

Q Değeri	Mod 1 (Num)	Mod 1 (PINN)	Mod 2 (Num)	Mod 2 (PINN)	Mod 3 (Num)	Mod 3 (PINN)	Mod 4 (Num)	Mod 4 (PINN)	Mod 5 (Num)	Mod 5 (PINN)
Q=0	9.870	8.139	39.478	42.328	88.826	90.614	157.914	158.937	246.740	246.255
Q=20	17.170	14.153	48.457	49.123	98.319	98.294	167.616	167.594	256.545	256.278
Q=40	22.184	19.742	56.015	55.914	106.973	106.225	176.786	176.456	265.989	266.037
Q=60	26.260	24.992	62.668	62.659	114.977	114.256	185.503	185.323	275.109	275.325
Q=80	29.782	29.978	68.679	69.285	122.459	122.202	193.829	193.955	283.936	283.906
Q=100	32.930	34.753	74.205	75.713	129.510	129.882	201.812	202.113	292.497	291.561

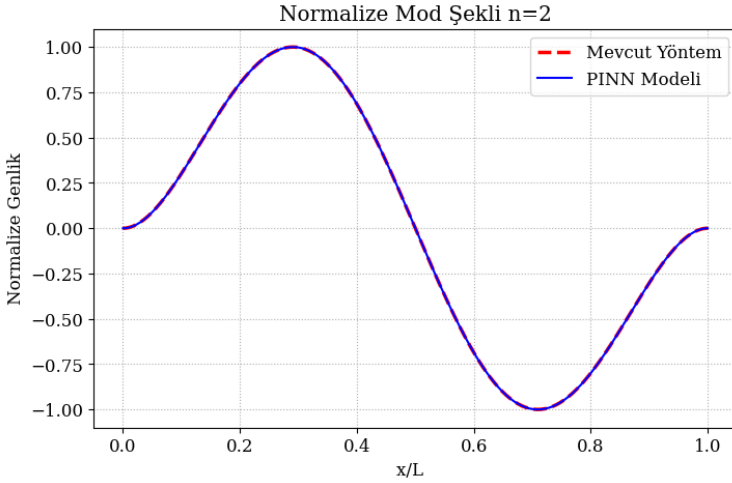
Tablo 2 Ankastre Ankastre sınır şartlarına ait kirişin farklı eksenel yük değerleri (Q) için yarı-analitik ve PINN yöntemleriyle elde edilen doğal frekansların (ω) karşılaştırılması

Q Değeri	Mod 1 (Num)	Mod 1 (PINN)	Mod 2 (Num)	Mod 2 (PINN)	Mod 3 (Num)	Mod 3 (PINN)	Mod 4 (Num)	Mod 4 (PINN)	Mod 5 (Num)	Mod 5 (PINN)
Q=0	22.373	22.949	61.673	62.252	120.903	120.672	199.859	200.578	298.556	298.127
Q=20	27.274	31.135	68.708	71.511	128.818	130.440	208.265	210.385	307.270	308.828
Q=40	31.347	37.802	75.040	79.714	136.259	139.530	216.339	219.690	315.741	318.508
Q=60	34.898	43.363	80.842	87.058	143.300	148.022	224.116	228.701	323.987	327.488
Q=80	38.083	48.217	86.224	93.780	149.998	156.021	231.625	237.503	332.026	335.760
Q=100	40.993	52.679	91.264	100.083	156.395	163.653	238.892	246.094	339.871	343.072

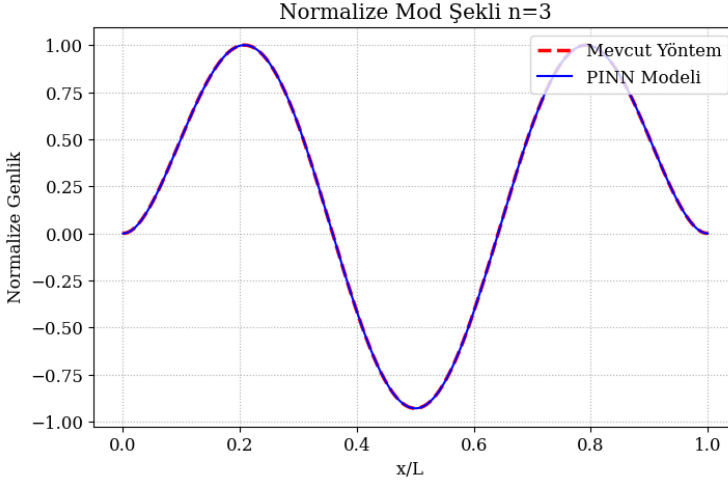
Şekil 8. Ankastre Ankastre sınır şartlarına ait kirişin birinci mod şekli karşılaştırması ($Q=50$)



Şekil 9. Ankastre Ankastre sınır şartlarına ait kirişin ikinci mod şekli karşılaştırması ($Q=50$)



Şekil 10. Ankastre Ankastre sınır şartlarına ait kirişin üçüncü mod şekli karşılaştırması ($Q=50$)



Şekil 8–10, $Q = 50$ için ankastre–ankastre kirişte sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü mod şekillerinin yarı-analitik çözüm ile PINN çıktıları arasındaki karşılaştırmasını vermekte; ankastre uç koşullarının dayattığı transandantal mod formlarının, düğüm konumlarının ve genlik dağılımlarının normalize edilmiş mod şekilleri üzerinden PINN tarafından başarıyla temsil edildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, eksenel yüke maruz kalan Euler-Bernoulli kirişlerinin serbest titreşim davranışını incelemek amacıyla geliştirilen Fizik Bilgili Yapay Sinir Ağı (PINN) modelinden elde edilen bulgular, geleneksel yarı-analitik çözümlerle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar; modelin kestirimsel doğruluğu, mod şekillerini temsil kabiliyeti ve eksenel yük altındaki spektral değişimleri yakalama hassasiyeti üzerinden değerlendirilmiştir.

Doğal Frekans Tahminlerinin Karşılaştırmalı Analizi

Şekil 1 ve Şekil 6’da görüleceği üzere, PINN modeli hem basit mesnetli hem de ankastre-ankastre sınır koşulları için ilk beş doğal frekans değerini (ω_n), referans alınan Mathematica tabanlı yarı-analitik verilerle son derece yüksek bir uyum içerisinde tahmin etmiştir. Sabit bir eksenel yük ($Q = 20$) altında gerçekleştirilen bu analizler, modelin mod numarası (n) arttıkça yükselen frekans değerlerini yakalamadaki doğrusal olmayan hassasiyetini kanıtlamaktadır. Geleneksel yöntemlerde her bir mod için ayrı bir kök bulma algoritmasının çalıştırılması gerekirken, eğitilen PINN modeli tek bir ileri besleme (forward pass) işlemiyle tüm mod spektrumunu eşzamanlı olarak verebilmektedir.

Eksenel yükün (Q) birinci mod doğal frekansı üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 2 ve Şekil7), yük miktarındaki artışın kirişin geometrik sertliğini artırması sonucu frekans değerlerinde meydana gelen yükselme eğilimi model tarafından başarıyla simüle edilmiştir. Özellikle Şekil 7’de ankastre kiriş için sunulan sonuçlar, PINN modelinin fiziksel denklemi (yayılm ilişkisi) bir kısıt olarak kullanması sayesinde, eğitim setinde bulunmayan ara değerlerde dahi fiziksel tutarlılığını koruduğunu göstermektedir.

Mod Şekillerinin Mekansal Doğruluğu

PINN yaklaşımının en belirgin avantajlarından biri, sistemin sadece ayrıık frekans değerlerini değil, aynı zamanda kiriş boyunca meydana gelen yer değiştirme fonksiyonunu (mod şekillerini) sürekli bir uzayda öğrenebilmesidir. Şekil 3-5 ve Şekil 8-10 arasında sunulan normalize edilmiş mod şekilleri, modelin kirişin mekansal harmoniklerini başarılı bir şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır(Lu et al., 2021).

Basit mesnetli kirişler için sinüzoidal karakterdeki mod şekilleri ve ankastre kirişler için daha karmaşık transandantal fonksiyon yapısındaki formlar, PINN tarafından herhangi bir ağ

(mesh) yapısına ihtiyaç duyulmadan öğrenilmiştir. Bu durum, PINN'in "mesh-free" doğasının, özellikle yüksek dereceli modlarda ($n = 2, n = 3$) meydana gelen düğüm noktalarını (nodes) ve genlik değişimlerini yakalamada sonlu elemanlar analizine (FEA) kıyasla hesaplama kolaylığı sağladığını göstermektedir.

Metodolojik Değerlendirme ve Yakınsama Performansı

Eğitim sürecinde kullanılan Adam optimizasyon algoritması ve bağıl hata (*relative loss*) temelli kayıp fonksiyonu, modelin farklı mertebedeki frekanslar ($22 \text{ rad/s'den } 340 \text{ rad/s'ye kadar}$) arasında denge kurmasını sağlamıştır. Geleneksel yapay sinir ağları büyük sayısal değerlere odaklanma eğilimindeyken, bu çalışmada uygulanan fizik temelli normalizasyon stratejisi, düşük frekanslı birinci modun yüksek hassasiyetle yakalanmasında kritik rol oynamıştır. Eğitim sürecinin 4001 *epoch* gibi kısa bir sürede kararlı bir seviyeye ulaşması, önerilen mimarinin hesaplama verimliliğini destekleyen bir diğer bulgudur.

Şekil 2 ve Şekil 7'de sunulan birinci mod doğal frekans değerleri incelendiğinde, PINN modeli ile referans nümerik veriler arasında, yüksek dereceli modlara kıyasla daha belirgin bir sapma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, fizik bilgili sinir ağlarının eğitim sürecindeki "spektral yanlılık" (spectral bias) ve sayısal ölçeklendirme dinamikleri ile açıklanabilmektedir(He et al., 2024).

Sayısal Ölçek Farkı ve Hata Baskınlığı: Eğitim sürecinde kullanılan toplam kayıp fonksiyonu, tüm modların karesel hatalarının ortalamasını (MSE) baz almaktadır. Beşinci modun frekans değerleri ($\omega_5 \approx 340$), birinci modun değerlerinden ($\omega_1 \approx 22$) yaklaşık 15 kat daha büyüktür. Kayıp fonksiyonu hesaplanırken farkların karesi alındığı için, beşinci moddaki küçük bir yüzdesel hata, birinci moddaki aynı yüzdesel hatadan yaklaşık 225 kat (15^2) daha büyük bir kayıp değeri üretmektedir. Bu durum, Adam

optimizasyon algoritmasının toplam kaybı hızla düşürebilmek adına yüksek frekanslı modlardaki hataları gidermeye öncelik vermesine ve düşük frekanslı birinci modu "ihmal etmesine" (loss dominance) neden olmaktadır (Wang et al., 2021).

Gradyan Dengesizliği: Katmanlar arası gradyan akışı sırasında, büyük sayısal değerlere sahip olan yüksek dereceli modların türevleri, ağırlık güncellemelerini domine etmektedir. Birinci modun fiziksel denklemi sağlama çabası, yüksek modların yarattığı devasa gradyan sinyallerinin yanında zayıf kalmakta, bu da ağın düşük frekans bölgesindeki hassasiyetini azaltmaktadır.

Normalizasyon Kısıtları: Her ne kadar giriş verileri normalize edilmiş olsa da çıktı katmanındaki ω değerlerinin geniş bir spektrumu kapsaması (20 ile 340 arası), ağın tüm modlar için eş zamanlı ve eşit hassasiyette bir "haritalama" yapmasını zorlaştırmaktadır.

Bu sapmayı gidermek için literatürde önerilen "Bağıl Kayıp Fonksiyonu" (Relative Loss) veya "Adaptif Ağırlıklandırma" (farklı modların hatalarını farklı katsayılarla çarpma) gibi ileri tekniklerin kullanılması, gelecekteki çalışmalar için bir iyileştirme alanı olarak değerlendirilmektedir. Ancak mevcut haliyle model, sistemin genel trendini ve yüksek modlardaki başarısını kanıtlamış durumdadır (Hedayatrasa et al., 2025; Karniadakis et al., 2021).

Sonuçlar

Bu çalışmada, eksenel yüke maruz kalan Euler–Bernoulli kiriş sisteminin serbest titreşim karakteristikleri, geleneksel yarı-analitik yöntemler ve modern bir derin öğrenme yaklaşımı olan Fizik Bilgilendirmeli Sinir Ağları (PINN) kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, geliştirilen her iki metodolojinin de sistemin doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemede uygun olduğu göstermiştir.

Hamilton prensibi ile türetilen ve iteratif kök bulma algoritmalarıyla desteklenen yarı-analitik yöntemin, karakteristik denklemin kapalı formda çözülemediği durumlarda güvenilir referans veriler ürettiği doğrulanmıştır. Buna paralel olarak PINN modelinin, herhangi bir dışsal veri setine (data-free) ihtiyaç duymadan, sadece fiziksel yasaları (rezidüel kaybı) minimize ederek sistemi başarıyla öğrendiği görülmüştür.

PINN mimarisinde kullanılan Tanh aktivasyon fonksiyonu ve iki katmanlı (64 nöronlu) MLP yapısının, fiziksel diferansiyel kısıtları analitik olarak ağa aktarmada ve uygun bir çözüm uzayı oluşturmada kritik rol oynadığı belirlenmiştir. Modelin 4001 epoch gibi kısa bir sürede, özellikle normalize edilmiş girdi verileriyle kararlı bir yakınsama sergilediği gözlemlenmiştir.

PINN modelinden elde edilen doğal frekans değerlerinin ve mod şekillerinin, Mathematica kıyasla başarılı uyum sergilediği saptanmıştır. Özellikle eksenel yükün (Q) ve mod sayısının (n) değişen değerleri altında modelin genelleme yeteneğinin yüksek olduğu, ara değerleri "mesh-free" bir yapıda yüksek hassasiyetle tahmin edebildiği kanıtlanmıştır.

Fiziksel denklemlerin bir düzenlileştirici (regularizer) olarak kullanıldığı bu yaklaşım, karmaşık yapısal dinamik problemlerinde yüksek hesaplama maliyetli geleneksel yöntemlere (FEA vb.) göre hızlı, esnek ve güvenilir bir alternatif sunmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, düşük frekanslı modlarda (1. mod) gözlemlenen kısmi sapmaların, yüksek frekanslı modların kayıp fonksiyonu üzerindeki sayısal baskınlığından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu durum, PINN modellerinin çok modlu (multi-modal) problemlerde karşılaştığı tipik bir zorluk olup, bağlı hata temelli optimizasyon stratejileriyle geliştirilmeye açıktır.

Bu çalışma PINN yönteminin yapısal mekanik ve titreşim mühendisliği problemlerinde, geleneksel nümerik yöntemlerin

(FEA, Yarı-Analitik) yerini alabilecek veya onları destekleyebilecek güvenilir, hızlı ve fiziksel olarak tutarlı bir araç olduğunu kanıtlamıştır. Gelecek çalışmalarda, bu yaklaşımın değişken kesitli kirişler, doğrusal olmayan (non-linear) sönüm etkileri ve kompozit malzeme yapıları gibi daha karmaşık problemlere genişletilmesi hedeflenmektedir.

Kaynakça

Abueidda, D. W., Lu, Q., & Koric, S. (2021). Meshless physics-informed deep learning method for three-dimensional solid mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 122(23), 7182–7201. <https://doi.org/10.1002/nme.6828>

Alazmi, A., Alshaya, A., & Alhazza, K. (2025). Dynamics and vibrations of mechanically-connected beams system. *Journal of Engineering Research*, 13(4), 3739–3753. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.11.007>

Azbah, A. H., & Musa, I. A. (2025). PI-CNN: A physics-informed machine learning model for the structural analysis of deep beams. *Structures*, 77, 109087. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109087>

Banerjee, J. R. (1998). Free vibration of axially loaded composite Timoshenko beams using the dynamic stiffness matrix method. *Computers & Structures*, 69(2), 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00114-X)

Baniya, S., & Maity, D. (2026). A comprehensive review of theoretical concepts and advancements in physics-informed neural networks with applications in structural engineering. *Artificial Intelligence Review*, 59, 49. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11444-y>

Blevins, R. D. (1979). *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Van Nostrand Reinhold.

Bokaian, A. (1990). Natural frequencies of beams under tensile axial loads. *Journal of Sound and Vibration*, 142(3), 481–498. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(90\)90663-K](https://doi.org/10.1016/0022-460X(90)90663-K)

Chen, Z., Lai, S. K., & Yang, Z. (2024). AT-PINN: Advanced time-marching physics-informed neural network for structural vibration analysis. *Thin-Walled Structures*, 196, 111423. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111423>

Dan, D., Liao, X., Ge, L., & Han, F. (2025). Physics-informed neural networks for solving free vibration response of cables considering bending stiffness. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 13, 587. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-00587-0>

Das, B., Barretta, R., & Čanadija, M. (2026). Physics-informed neural networks for nonlocal beam eigenvalue problems. *Thin-Walled Structures*, 222, 114530. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2026.114530>

Das, O. (2023). Prediction of the natural frequencies of various beams using regression machine learning models. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 41(2), 302–321. <https://doi.org/10.14744/SIGMA.2023.00040>

Domagalski, Ł. (2021). Comparison of the natural vibration frequencies of Timoshenko and Bernoulli periodic beams. *Materials*, 14(24), 7628. <https://doi.org/10.3390/ma14247628>

Fallah, A., & Mohammadi Aghdam, M. (2024). Physics-informed neural network for bending and free vibration analysis of three-dimensional functionally graded porous beam resting on elastic foundation. *Engineering with Computers*, 40, 437–454. <https://doi.org/10.1007/s00366-023-01897-4>

Ghane, S., Mansouri, M., & Alishahi, M. M. (2023). Free and forced vibration analysis of Euler–Bernoulli beams using physics-informed neural networks. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/10775463231189214>

Guendouz, I., Vidal, P., Khebizi, M., & Guenfoud, M. (2025). Advanced numerical free vibration analysis of FG thin-walled I-beams using refined beam models. *Journal of Composites Science*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.3390/jcs9010019>

Haghighat, E., Raissi, M., Moure, A., Gomez, H., & Juanes, R. (2021). A physics-informed deep learning framework for inversion and surrogate modeling in solid mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 379, 113741. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113741>

He, Z., Ni, F., Wang, W., & Zhang, J. (2024). Physics-informed neural networks for frequency response functions of complex beam structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, 111054. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111054>

Hedayatrasa, S., Fink, O., Van Paepegem, W., & Kersemans, M. (2025). k-space physics-informed neural network (k-PINN) for compressed spectral mapping and efficient inversion of vibrations in thin composite laminates. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111920. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111920>

Jagtap, A. D., Kawaguchi, K., & Karniadakis, G. E. (2020). Adaptive activation functions accelerate convergence in deep and physics-informed neural networks. *Journal of Computational Physics*, 404, 109136. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109136>

Kadioğlu, H. G., Yaylı, M. Ö., & Uzun, B. (2025). A new iterative method for free vibration analysis of a FG Timoshenko beam. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(1), 17–43. <https://doi.org/10.24107/ijeas.1625912>

Kanwal, G., Ahmed, N., & Nawaz, R. (2024). A comparative analysis of the vibrational behavior of various beam models with

different foundation designs. *Heliyon*, 10(5), e26491.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26491>

Kapoor, T., Wang, H., Nunez, A., & Dollevoet, R. (2023). Transfer learning for improved generalizability in causal physics-informed neural networks for beam simulations. In *arXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.00578>

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440.
<https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>

Khiem, N., & Lien, T. (2001). A simplified method for natural frequency analysis of a multiple cracked beam. *Journal of Sound and Vibration*, 245(4), 737–751.
<https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3585>

Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *ArXiv Preprint ArXiv:1412.6980*.

Li, G., Wang, G., Ni, J., & Li, L. (2021). The vibration analysis of the elastically restrained functionally graded Timoshenko beam with arbitrary cross sections. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40(4).
<https://doi.org/10.1177/14613484211019648>

Li, H., & Liu, J. (2025). Analysis of the natural characteristics of fiber-reinforced cantilever beams using 8-node solid elements. *Journal of Vibroengineering*, 27(5), 757–770.
<https://doi.org/10.21595/jve.2025.24678>

Li, Y., Ding, J., & Ding, H. (2024). Natural vibration and critical velocity of translating Timoshenko beam with non-homogeneous boundaries. *Applied Mathematics and Mechanics*

(English Edition), 45, 1523–1538. <https://doi.org/10.1007/s10483-024-3148-7>

Li, Z., Bai, J., Ouyang, H., Martelli, S., & Zhao, J. (2023). Physics-informed neural network for friction-involved nonsmooth dynamics problems. In *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.02542>

Loya, J. A., Aranda-Ruiz, J., & Zaera, R. (2022). Natural frequencies of vibration in cracked Timoshenko beams within an elastic medium. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 118, 103257. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103257>

Lu, L., Meng, X., Mao, Z., & Karniadakis, G. E. (2021). DeepXDE: A deep learning library for physics-informed neural networks. *SIAM Review*, 63(1), 208–228. <https://doi.org/10.1137/19M1274067>

Martinez, Y., Rojas, L., Peña, A., Valenzuela, M., & Garcia, J. (2025). Physics-informed neural networks for the structural analysis and monitoring of railway bridges: A systematic review. *Mathematics*, 13, 1571. <https://doi.org/10.3390/math13101571>

Nguyen, N. S., Nguyen, C. X., & Nguyen, H. T. (2024). Free vibration analysis of prestressed Timoshenko beams using the modal analysis method. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(8), 125–141. <https://doi.org/10.12913/22998624/194145>

Pang, G., Lu, L., & Karniadakis, G. E. (2019). fPINNs: Fractional physics-informed neural networks. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 41(4), A2603–A2626. <https://doi.org/10.1137/18M1204014>

Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., & Chintala, S. (2019). PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep

Learning Library. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32, 8024–8035.

Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>

Rao, S. S. (2007). *Vibration of Continuous Systems*. Wiley.

Reddy, J. N. (1998). *Thermomechanical behavior of functionally graded materials*. Washington, DC.

Shifrin, E. I., & Lebedev, I. M. (2024). Natural frequencies of a Timoshenko beam with cracks. *Wave Motion*, 131, 103420. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103420>

Sinha, A. (2023). Free vibration of a Timoshenko beam with arbitrary nonuniformities, discontinuities and constraints. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11, 2099–2108. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00690-x>

Söylemez, A. O., & Akgöz, B. (2025). Free vibration response of cantilever beams by using SOLIDWORKS simulation. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, 17(3), 141–157. <https://doi.org/10.24107/ijeas.1654819>

Söyleyici, C., & Ünver, H. Ö. (2025). A physics-informed deep neural network based beam vibration framework for simulation and parameter identification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 141, 109804. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109804>

Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of Elastic Stability*. McGraw Hill.

Uçar, M. F., & Alp, B. E. (2025). Physics Informed Neural Network Method For the Numerical Solution of Fractional Diffusion Equations. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 18(3), 726–734.

Vu, V. T., Thom, D. V, Khiem, N. T., & Tuan Ta, D. (2025). Damage detection in steel beams using natural frequency analysis and machine learning techniques. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 60(7), 465–480. <https://doi.org/10.1177/03093247251327622>

Wang, S., Sankaran, S., & Perdikaris, P. (2021). On the predictability and multi-fidelity mechanisms of physics-informed neural networks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 374, 113568. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113568>

Yoo, S., Kang, M., & Yoon, H. (2025). A physics-informed neural network approach for solving structural eigenvalue problem. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 26, 2991–3004. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01280-z>

Zakharov, F. N., Jie, Q., & Yi, X. (2025). Physics-informed neural networks for structural mechanics and construction: Modeling the deflection of a single-span beam. *Reinforced Concrete Structures*, 9(1), 35–48. <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2025.1.35-48>

Zhen, B., Xu, C., & Ouyang, L. (2025). Physics-informed neural networks-based wide-range parameter displacement inference for Euler–Bernoulli beams on foundations under a moving load using sparse local measurements. *Applied Sciences*, 15(11), 6213. <https://doi.org/10.3390/app15116213>

BÖLÜM 6

YATAY VE DİKEY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE YAPISAL ANALİZ VE VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRMASI

ABDULLAH AVCU¹
AHMET SAMANCI²

Giriş

Dünya genelinde hızla artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme eğilimleri, küresel enerji talebini sürekli olarak yükseltmektedir (Kanbur, 2014; Aslan, 2023). Günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir kısmının fosil yakıtlarla karşılanması, sera gazı emisyonlarının artmasına, iklim değişikliğine ve çevre kirliliğine yol açarak ekolojik dengeyi tehdit etmektedir (Tuken, 2024; Şükrü Çelenkli, 2025). Fosil kaynakların sınırlı rezervlere sahip olması ve dışa bağımlılığı artırması, ülkeleri sürdürülebilir, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir (Aslan, 2023). Bu bağlamda rüzgâr enerjisi; yüksek potansiyeli, sıfır karbon emisyonu ve düşük işletme maliyetleriyle küresel enerji

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Orcid: 0009-0003-3207-9147

² Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-5412-1575

portföylerinde stratejik bir konuma ulaşmıştır (Büyükzeren vd., 2024). Rüzgâr enerjisi, güneş ışınlarının yeryüzünü farklı oranlarda ısıtması sonucu oluşan basınç farklarından kaynaklanan hava hareketlerinin (kinetik enerjinin) ürünüdür(Keleş Çetin vd., 2019; Keleş vd., 2013). Rüzgâr türbinleri, atmosferdeki bu serbest hava akımlarının sahip olduğu kinetik enerjiyi önce rotor kanatları vasıtasıyla mekanik enerjiye, ardından jeneratör sistemleriyle elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik sistemlerdir (K. Kaya, 2014; Şenol & Musayev, 2017). Modern bir rüzgâr türbini temel olarak temel, kule, nasel (gövde), rotor (kanatlar ve göbek) ve güç iletim sistemlerinden (dişli kutusu, şaft) oluşmaktadır.

Tarihsel süreçte su pompalama ve tahıl öğütme gibi mekanik işler için kullanılan rüzgâr değirmenleri, 20. yüzyıldan itibaren teknolojik gelişmelerle modern elektrik üreten türbinlere evrilmiştir (Kanbur, 2014; Mahmut Can Şenel, 2014). Rüzgâr türbinleri, rotor dönme ekseninin rüzgâr yönüne göre konumuna bağlı olarak temel anlamda Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri (YERT) ve Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT) olarak ikiye ayrılır(Ayar vd., 2023). Rotor ekseninin rüzgâr yönüne paralel olduğu YERT'ler ticari ve büyük ölçekli üretimde baskın hale gelirken, rotor ekseninin yere dik olduğu DERT sistemleri kule gerektirmemesi ve rüzgâr yönünden bağımsız çalışabilmesi gibi özellikleriyle ortaya çıkmıştır (Tanürün, 2023). Rüzgâr türbinlerinden elde edilecek enerjinin en üst düzeye çıkarılması için aerodinamik tasarım ve verimlilik analizleri büyük önem taşımaktadır. Ancak türbin kanatlarının ve diğer mekanik elemanların çalışma sırasında maruz kaldığı aerodinamik yükler, yerçekimi yükleri ve dönme kaynaklı santrifüj yükler (dinamik yükler), yapısal analizlerin de eş zamanlı yapılmasını zorunlu kılmaktadır (K. Kaya, 2014). Güvenli ve verimli bir enerji üretimi için türbinin aerodinamik verimliliği (maksimum güç elde etme potansiyeli) ile yapısal bütünlüğünün (yüklerle, titreşime ve

yorulmaya karşı dayanımı) optimum bir dengede tasarlanması gerekmektedir (Yalçın, 2019).

Rüzgâr enerjisi teknolojisinin tarihsel süreci ve potansiyeli Ackermann & Söder (2000) tarafından kapsamlı bir şekilde incelenerek modern türbinlerin çalışma esasları ortaya konmuştur. Rüzgâr türbinlerinin tasarım parametreleri üzerine yapılan çalışmalarda, Schubel & Crossley (2012) güç üretimi veriminin kanat profili tipine ve aerodinamik yapıya doğrudan bağlı olduğunu belirterek, üç kanatlı modern tasarımların verim, kontrol ve gürültü açısından optimum seviyeyi sunduğunu derlemiştir. Jonkman vd. (2009) ise NREL 5-MW referans türbini için yaptıkları çalışmada optimum uç hız oranının (λ) 7,5 - 8 aralığında olduğunu ve maksimum güç katsayısının (C_p) 0,48 seviyelerinde elde edildiğini rapor ederek endüstri standardı bir referans sunmuşlardır. Xiong vd. (2010), yatay eksenli bir türbin kanadının dönme esnasındaki dinamik yanıtını inceleyerek, yapı üzerindeki aerodinamik, yerçekimi ve santrifüj yüklerin etkilerini matematiksel olarak modellemiştir. Kwon & Kareem, (2013) ise dönen kanatların yerçekimi kuvveti altında yaşadığı yapısal dinamik davranışı ve belirli açısal hızlarda ortaya çıkan dinamik kararsızlığı (rezonans/titreşim) incelemiştir. Lavassas vd. (2003) kule yapısının 20 yıllık ömrü boyunca rüzgâr yükleri altında maruz kaldığı yorulma spektrumunu ve gerilme aralıklarını hasar birikim methodology ile hesaplamıştır. Son yıllarda literatürde kanat aerodinamiğini yenilikçi tasarımlarla iyileştiren çalışmalar dikkat çekmektedir. Maggio vd. (2011), rüzgâr türbini kanatlarında geriye doğru eğim (sweep) uygulamasının yük azaltımındaki faydalarını nümerik olarak ispatlamış ve daha verimli güç çıktıları elde etmiştir. Biyomimetik uygulamalar bağlamında, Tanürün & Acır (2018) kambur balina tüberküllerinden (çıkıntılarında) esinlenerek modifiye ettikleri NACA 0015 kanat profilinin aerodinamik verimini (CL/CD) düz kanada göre %3,81 oranında artırdıklarını

tespit etmişlerdir. Kentsel alanlar ve düşük rüzgâr hızları için DERT (Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri) sistemlerini inceleyen Keleş Çetin vd. (2019) bu türbinlerin rüzgâr yönünden bağımsız olmaları, kule ihtiyacını ortadan kaldırmaları ve düşük bakım masrafları nedeniyle şehir içi entegrasyonda önemli bir potansiyel taşıdığını belirtmiştir. Aynı çalışmada, DERT türlerinin dezavantajlarını aşmak için Savonius ve Darrieus sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin daha yüksek performans sağladığı vurgulanmıştır. DERT rotorlarında aerodinamik zorlukları aşmaya yönelik çalışmalardan birinde Akman (2019), NACA 0012 kanat profilini temel alarak nümerik optimizasyonla türettiği yeni dikey eksenli kanat profilinde performansı %27 oranında iyileştirmiştir. Howell vd. (2010), küçük ölçekli dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin rüzgâr tünelineki davranışlarını CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile destekleyerek sistem analizleri gerçekleştirmiştir. Shoaib vd. (2019) ise H-tipi Darrieus türbinleri için NACA 2424 geometrisi üzerine J-şekilli kanat tasarımları geliştirmiş; bu sayede Darrieus türbinlerinin tipik sorunu olan kendi kendine ilk harekete geçme (self-starting) problemini Savonius özellikleri ile harmanlayarak çözmeyi hedeflemiştir.

Literatürde yer alan rüzgâr türbini tasarımlarına yönelik çalışmalar çoğunlukla yalnızca aerodinamik verimlilik, akış analizleri (CFD) veya bağımsız bileşen dayanımı üzerine odaklanmaktadır. YERT ve DERT sistemlerinin performans karşılaştırmaları çoğunlukla belirli uygulama senaryoları üzerinden yapılmış olup, yapısal parametreler, dinamik yük spektrumu ve enerji verimliliğinin eş zamanlı ve bütüncül olarak ele alındığı karşılaştırmalı araştırmalar sınırlıdır. Bu çalışma, YERT ve DERT sistemlerini hem yapısal davranış dinamikleri hem de verimlilik ekseninde analitik olarak inceleyerek, türbin tasarım süreçleri ve

sistem seçimi aşamaları için akademik bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

Rüzgâr Enerjisinin Teorik Temelleri ve Güç Katsayısı Analizi

Rüzgâr, güneş kaynaklı atmosferik ısınma farklılıkları sonucu oluşan basınç etkisiyle meydana gelen hava hareketidir. Hareket halindeki hava kütlesi kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Burada m hava kütlesini, v ise rüzgâr hızını ifade eder. Hareket halindeki havanın (rüzgârın) bünyesinde barındırdığı güç ise, havanın kütlesi ve hızının karesi ile ilişkili olan kinetik enerjiden kaynaklanır (Şükrü Çelenkli, 2025). Rüzgâr türbinine gelen serbest rüzgârın teorik mekanik gücü (P), havanın yoğunluğu (ρ), kanatların süpürme alanı (A) ve rüzgâr hızının küpü (v^3) ile doğru orantılıdır (Şenol & Musayev, 2017).

$$P_{\text{rüzgar}} = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Bu denklemden de anlaşılacağı üzere, küçük hız değişimlerinin dahi enerji üretiminde büyük farklılıklara yol açtığı sonucuna varılmaktadır.

Fiziksel olarak rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin tamamının türbin tarafından dönüştürülmesi imkansızdır; aksi takdirde rüzgârın hızı türbinin arkasında sıfıra düşer ve hava akışı durur (Omar Abdulkareem Qasim QASIM, 2022; Usta, 2005). Alman fizikçi Albert Betz tarafından formüle edilen ve "Betz Limiti" olarak bilinen teoriye göre, ideal bir rüzgâr türbini havadaki kinetik enerjinin maksimum %59,26'sını ($16/27$) faydalı mekanik

enerjiye çevirebilir (Büyükzeren vd., 2024; Şenol & Musayev, 2017).

$$C_{p,max} = 0.593$$

Güç katsayısı (C_p), rüzgâr türbini rotoru tarafından rüzgârdan çekilerek mekanik enerjiye dönüştürülen gerçek gücün, rüzgârın sahip olduğu teorik maksimum güce oranıdır (Temel &  ıkmiŐ, 2021). Betz sınırına göre teorik maksimum C_p değeri 0,593'tür; ancak sistemdeki aerodinamik kayıplar (uç kayıpları, dairesel dalgalar vb.) ve sürtünme nedeniyle uygulamada iyi tasarlanmış modern bir türbinin güç katsayısı %40 ila %50 (0,45 - 0,55) aralığında kalmaktadır (Şenol & Musayev, 2017; Temel &  ıkmiŐ, 2021).

$$C_p = \frac{P_{türbin}}{0,5\rho Av^3}$$

Uç hız oranı (λ), rotor kanat ucunun teğetsel dönüş hızının, türbine dik olarak gelen serbest rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanır ve türbin verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir (Tuken, 2024). Verilen formülde ω açısal hız, R rotor yarıçapı ve v rüzgâr hızıdır.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

Maksimum C_p değerine ulaşmak, her rüzgâr hızında kanatları spesifik bir λ değerinde (optimum uç hız oranında) d nd r erek gerçekleŐtirilir. Kanat sayısına göre optimum λ deėiŐiklik gösterir; üç kanatlı sistemlerde bu oran genellikle 5-8 arasındayken, çok kanatlı veya sürükleme esaslı sistemlerde 1 gibi düşük değerlerdedir.

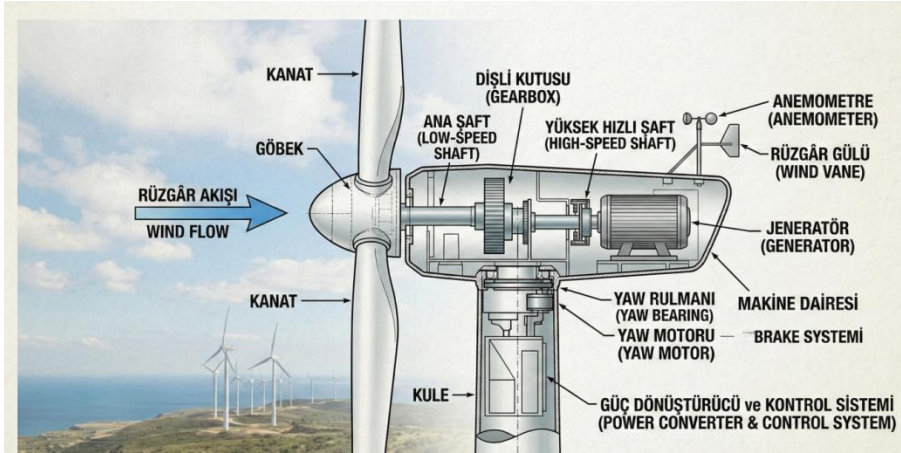
Rüzgâr türbinleri temel olarak aerodinamik kaldırma (lift) veya sürükleme (drag) kuvvetleri prensibi ile çalışır. Kaldırma

kuvveti, özel tasarlanmış kanat profillerinin (airfoil) alt ve üst yüzeyleri arasındaki hız ve basınç farkından doğarak, hareket yönüne dik olarak kanadı yukarı/ileriye doğru çeker. Sürüklenme kuvveti ise doğrudan hava akımının cisme çarpması ile akış yönünde oluşan itme kuvvetidir. Kaldırma kuvvetine dayalı türbinlerin dönüş hızları ve güç katsayıları sürüklenme esaslı olanlardan çok daha yüksektir (K. Kaya, 2014; Ünal vd., 2024).

YERT Sistemlerinin Yapısal Analizi

YERT (Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri), rotor milinin yeryüzüne ve rüzgâr akışına paralel olduğu, jeneratör, dişli kutusu, yüksek/düşük hızlı şaftlar gibi temel bileşenlerin kulenin en üst kısmındaki makine dairesinde (nacelle) yer aldığı sistemlerdir (Ayar vd., 2023). Bu sistemlerin en büyük yapısal handikabı, enerji dönüşümünü gerçekleştiren tüm ağır elektro-mekanik teçhizatın çok yüksek kulelerin tepesinde taşınması zorunluluğudur (M. N. Kaya, 2019).

Şekil 1 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini



YERT rotorları rüzgâr yönüne dik bir süpürme alanı oluşturarak enerjiyi yakalar. Kanatlar, rüzgârın neden olduğu aerodinamik yüklerin (kaldırma/sürüklenme) yanı sıra, kendi devasa kütlelerinden doğan yerçekimi yüklerine ve yüksek devirdeki rotasyondan ötürü şiddetli santrifüj yüklere maruz kalır (K. Kaya, 2014). Rotor çapı büyüdükçe bu yükler katlanarak artar, bu nedenle modern kanatlar cam elyafı veya karbon fiber takviyeli yüksek mukavemetli kompozit malzemelerden üretilmektedir (Tuken, 2024). Büyük rüzgâr hızlarından faydalanmak için YERT kulelerinin oldukça yüksek yapılması gerekmektedir. Kule yapısı, statik ağırlıkların (nacelle, rotor) yanı sıra şiddetli dinamik ve çevresel (rüzgâr dalgalanmaları, deprem, türbülans) yüklere karşı yüksek yorulma dayanımı gerektirir. Sistemin yapısal güvenliği için kule doğal frekansının, türbinin çalışma (1P) veya kanat geçiş (3P) frekansları ile rezonansa girmesini engelleyecek dinamik tasarımlar yapılması şarttır (Kanbur, 2014).

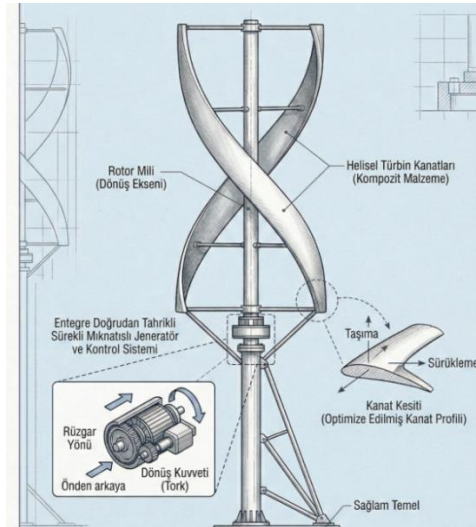
YERT bileşenleri 20-30 yıllık ömürleri boyunca milyonlarca kez tekrarlı stokastik rüzgâr yüklerine maruz kalarak ciddi bir yorulma yük spektrumu yaşarlar. Aerodinamik dalgalanmalar, kanatların her turunda yerçekimi etkisinin yön değiştirmesi ve rüzgâr kesmesi (wind shear) gibi nedenlerle özellikle kanat kök bölgelerinde ve rotor şaftında şiddetli eğilme momentleri ve yapısal yorulma gerçekleşir. Sistemin rüzgârdan en yüksek verimi alabilmesi için YERT'ler aktif mekanizmalara ihtiyaç duyar. Yaw (sapma/yönelme) sistemi, türbin gövdesinin her an rüzgâr doğrultusuna bakmasını sağlarken; Pitch (hatve/kanat açısı) mekanizması rüzgâr hızındaki değişimlere göre kanatların hücum açısını eksen etrafında değiştirerek rüzgârdan elde edilen gücü kontrol eder. Aşırı rüzgâr hızlarında (cut-out) pitch sistemi kanatları rüzgâra paralel hale getirerek (feathering) yapısal hasarı önler ve sistemi korur (Aslan, 2023; M. N. Kaya, 2019; Keleş vd., 2013).

Türbin kanatlarının uzun yapılması süpürme alanını ve verimi (C_p) artırsa da, artan uzunluk kanat ucu sapmalarını (deformasyon) ve kanat kök eğilme momentlerini büyötmektedir. Bu nedenle yüksek aerodinamik performans ile mukavemet sınırları arasında ince bir çizgi bulunur. Modern mühendislikte, optimum malzeme dağılımı (örneğin spar optimizasyonu) yapılarak, kanadın aerodinamik verimden ödün vermeden yapısal dayanımının en üst noktaya çıkarılması hedeflenir.

DERT Sistemlerinin Yapısal Analizi

Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT), rotor milinin zemine dik olarak yerleştirildiği tasarımlardır (Özdemir, 2021). YERT sistemlerinden farklı olarak, ağır bileşenler olan dişli kutusu ve jeneratör zemine ya da yere yakın bir düzleme konumlandırılabilir. Kule tasarım yükünü ve yapısal karmaşıklığı ciddi oranda azaltan bu konfigürasyon, sistemin ağırlık merkezini de aşağı çekerek stabiliteye katkı sağlar (Tanürün, 2023).

Şekil 2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbini



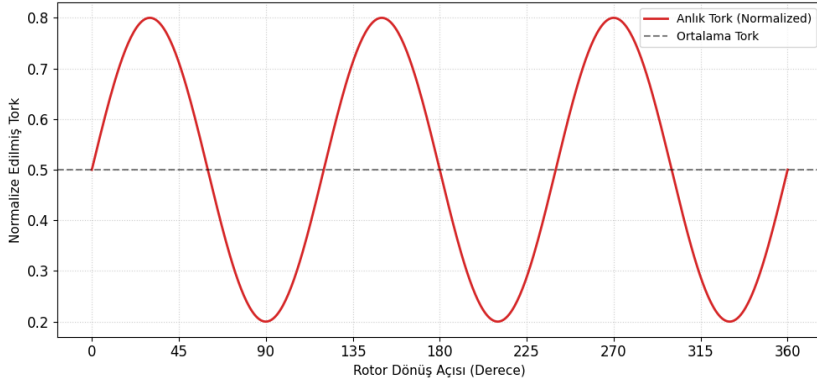
DERT'ler genel olarak Savonius ve Darrieus tipi rotorlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Savonius türbinleri, birbirine göre kaydırılmış yarım silindirlere oluşan, basit, rüzgârın sürüklenme (drag) kuvvetiyle düşük devirlerde çalışan oldukça mukavim yapılardır. Darrieus türbinleri ise havacılık profilli (NACA gibi) ince kanatlara sahip olan, kaldırma (lift) kuvveti ile yüksek devirlerde çalışan (H-Rotor veya eğrisel tip) ve performans potansiyeli daha yüksek sistemlerdir (K. Kaya, 2014; Tanürün, 2023; Ünal vd., 2024).

DERT sistemlerinde, rotor dairesel yörüngesinde 360 derece dönerken rüzgârın kanata geliş açısı (hücum açısı) sürekli olarak değişmektedir. Bu durum dinamik stall fenomenine (tutunma kaybına) yol açabilmekte, kanatlar üzerinde sürekli bir pozitif-negatif kaldırma kuvveti salınımı yaratarak oldukça agresif aerodinamik döngüler (dinamik yükler) oluşturmaktadır.

Değişken aerodinamik yüklere maruz kalan rotor kanatlarının merkeze (mile) ilettiği kuvvetler sarsıntılı ve asimetriktir. Özellikle düz kanatlı H-tipi Darrieus türbinlerinde kanatları merkez mile bağlayan destek (strut) kollarında ciddi bükülme gerilmeleri, yorulma etkileri ve mil üzerinde merkezkaç kuvvetinden kaynaklı şiddetli radyal eğilme momentleri yaşanmaktadır (Tanürün, 2023).

Hücum açısının her turda periyodik olarak değişmesi, DERT'lerin tork karakteristiğinde sarsıntılı dalgalanmalara (torque ripple) neden olur. Şaft üzerinde oluşan bu sürekli vuruntulu tork iletimi, rulman yataklarında, şaft yapısında ve güç iletim sistemlerinde yapısal yorulma (fatigue) ömrünü dramatik bir şekilde kısaltan en önemli sınırlayıcı yapısal problemdir.

*Grafik 1 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini (DERT) Tork Dalgalanması
(Torque Ripple)*



DERT'lerin yapısal avantajları; rüzgâr yönünden bağımsız oldukları için yaw mekanizması gerektirmemeleri, ağır teçhizatın zeminde bulunması, rüzgâr türbülansına daha dayanıklı olmalarıdır. Ancak aerodinamik veriminin düşük olması, merkezkaç kaynaklı dinamik tork dalgalanmaları ve buna bağlı gelişen yorulma problemleri sistemin en temel yapısal sınırlandırmalarıdır.

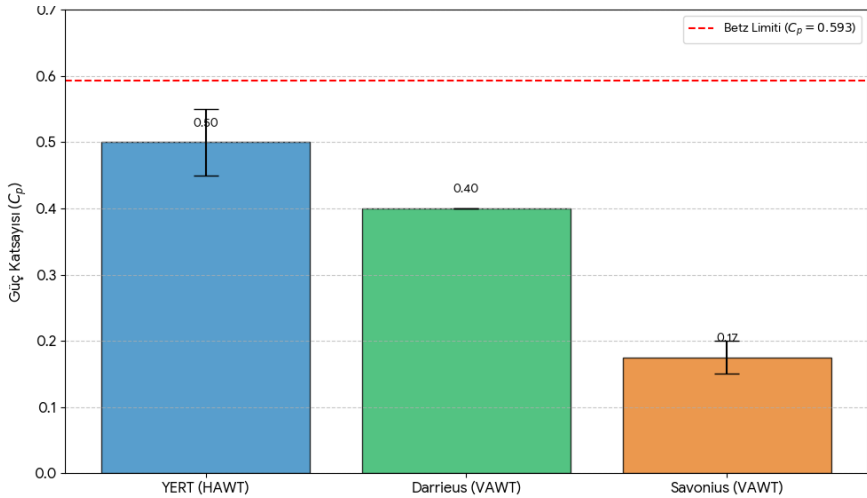
YERT ve DERT Sistemlerinin Verimlilik Temelli Karşılaştırmalı Analizi

YERT sistemleri, tamamıyla optimize edilmiş kaldırma (lift) kuvveti kullanmaları sayesinde enerjiyi çok verimli dönüştürür ve Betz limitine çok yaklaşarak teorik maksimum %45-%55 ($C_p=0,45-0,55$) bandında aerodinamik verimliliğe ulaşırlar. Karşılık olarak, DERT sistemleri (Darrieus $C_p \approx \%40$, Savonius $C_p \approx \%15\text{-}\%20$) aynı rüzgâr şartlarında çok daha düşük verim kapasitesine sahiptir.

Tablo 1 YERT ve DERT Sistemlerinin Teorik Verimlilik Karşılaştırması

Sistem Türü	Çalışma Prensibi (Kuvvet Temelli)	Enerji Dönüşüm Oranı /Verimlilik	Teorik Potansiyel ve Özellikler
YERT	Lift	En Yüksek (Betz Limitine En Yakın)	Potansiyelleri çok yüksektir; en verimli teknoloji olarak kabul edilir.
DERT (Savonius vb. Tipler)	Drag	Düşük (0,15-0,20)	Enerji dönüşüm oranı oldukça sınırlıdır.
DERT (Darrieus Tipi)	Lift	Orta (~0,40)	Savonius'a göre daha yüksek hızlara çıksa da YERT'lerin verimlilik seviyesinin gerisinde kalır.

Grafik 2 Rüzgâr Türbin Tiplerine Göre Maksimum Aerodinamik Verimlilik Karşılaştırması

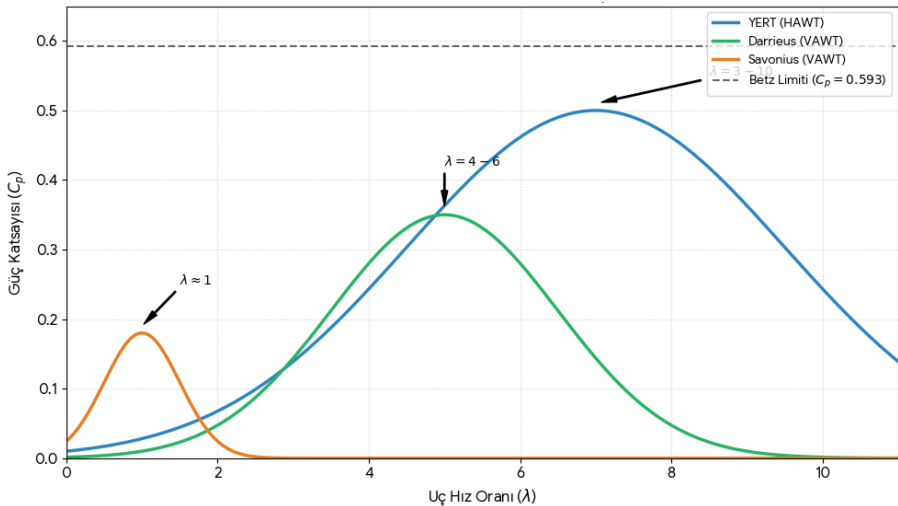


YERT'ler ideal olarak yüksek λ (uç hız oranı) değerlerinde (3-10 arası) rezonans ve yüksek devir rejimiyle en iyi performansı yakalar. DERT sistemlerinden Darrieus tipinde çalışma rejimi nispeten yüksekken ($\lambda = 4-6$), sürüklenme prensibi ile çalışan Savonius türbinlerinde optimum uç hız oranı 1 civarı gibi son derece dar ve düşük bir bandta sıkışmaktadır.

Tablo 2 Uç Hız Oranı

Sistem Türü	Çalışma Prensibi (Kuvvet Temelli)	Optimum Uç Hız Oranı (λ)	Performans Karakteristiği
YERT	Lift	3-10	Yüksek devir rejimi ve rezonans verimliliği
DERT (Darrieus Tipi)	Lift	4-6	Nispeten yüksek çalışma rejimi
DERT (Savonius vb. Tipler)	Drag	~ 1	Son derece dar ve düşük hız bandı

Grafik 3 Uç Hız Oranı-Güç Katsayısı Karşılaştırması



YERT'ler pitch sistemi sayesinde rüzgâr dalgalanmalarına uyum sağlayarak daha stabil, kararlı bir tork karakteristiği ve şebekeye uyumlu düzgün sürekli bir güç profili sunarlar. DERT'lerde ise rotordaki kanatların rüzgâr ile etkileşim açısının devir boyunca değişmesi nedeniyle güç üretim grafiğinde süreklilik eksiktir, tork çıktısında harmonikler ve dalgalanmalar net bir şekilde görülür.

Tablo 3 Yük Karakteristiği

Parametre	YERT	DERT
Kontrol Mekanizması	Aktif Pitch (Kanat Açısı) Sistemi	Sabit veya Pasif Geometri
Tork Karakteristiği	Kararlı ve Stabil	Harmonik İçeren ve Dakdalı
Güç Profili	Sürekli ve Düzgün	Kesikli/Dalgalanma Gösteren
Şebeke Uyum	Yüksek (Uyumlu ve Senkronize)	Düşük (Süreklilik Eksikliği)

Savonius (DERT) gibi sistemlerin en güçlü yanı, düşük devreye girme hızları sayesinde çok düşük rüzgâr rejimlerinde kendi kendilerine ilk harekete (self-starting) kolaylıkla geçebilmeleridir. Ancak YERT sistemleri ve Darrieus (DERT) türbinler aerodinamik özellikleri nedeniyle ilk kalkışta bir başlatma (cut-in) hızına ya da yardımcı bir motora ihtiyaç duyarlar.

Tablo 4 İlk Hareket ve Devreye Girme Karakteristikleri

Sistem Türü	Başlatma Kabiliyeti (Self-Starting)	Devreye Girme Hızı (Cut-in)	Ek Donanım/ Mekanizma İhtiyacı
DERT (Savonius vb. Tipler)	Yüksek	Çok Düşük	İhtiyaç duymaz
DERT (Darrieus Tipi)	Düşük/Yok	Orta-Yüksek	Yardımcı motor veya başlatma sistemi gerekebilir
YERT	Sınırlı	Belirli Bir Eşik	Aerodinamik sınırlama nedeniyle eşik hızı gereklidir

YERT tasarımları, pitch (kanat ayarlama) ve yaw (rüzgâra yönelme) gibi karmaşık mekatronik sistemler barındırır. Bu parçalar yüksek kulenin tepesinde bulunduğundan hem ilk yatırım maliyetleri yüksektir hem de arıza durumunda servis ve bakım faaliyetleri çok maliyetli ve zordur. DERT tasarımlarında yönelme sistemine ihtiyaç olmaması ve zemine yakınlık sebebiyle bakım masrafları ve yapısal operasyon süreci çok daha ekonomiktir.

Tablo 5 Bakım/Maliyet Karşılaştırması

Parametre	YERT	DERT
Kurulum Maliyeti (CAPEX)	Yüksek (Kule/Vinç)	Düşük (Zemin kurulumu)
Bakım Kolaylığı (OPEX)	Zor (Yüksekte çalışma)	Kolay (Yer seviyesi)
Enerji Maliyeti (LCOE)	Düşük (Yüksek Verim)	Yüksek (Düşük Verim)
Lojistik Zorluk	Yüksek (Devasa Kanatlar)	Düşük (Kompakt Yapı)

Uygulama ölçeği bağlamında; rüzgâr santralleri (offshore ve onshore) düzeyinde devasa mega-watt (MW) sınıflarına ölçeklenebilen sistemler yalnızca YERT'lerdir. DERT sistemleri aerodinamik zayıflıkları nedeniyle devasa boyutlara ölçeklenemese de, çatı üstü (rooftop), şehir içi entegrasyonu ve türbülanslı rüzgâr yapısının bulunduğu kentsel mikrosistem uygulamalarında öne çıkarlar.

Tüm bu değişkenler bir arada değerlendirildiğinde; yüksek enerji talebinin istikrarlı rüzgâr bölgelerinden karşılanması için YERT sistemleri aerodinamik, mekanik ve güç kapasitesi açılarından kesin ve rakipsiz üstünlüğe sahiptir. Buna karşın, DERT sistemleri sınırlı alanlarda, türbülanslı düşük rüzgâr profilindeki yerleşim birimlerinde, basitlik ve rüzgâr yönünden bağımsız pratik kullanım sunan fonksiyonel bir alternatif olarak konumlanmaktadır.

Sonuç ve Değerlendirme

Bu makalede rüzgâr türbinlerinde temel sistemleri temsil eden Yatay Eksenli (YERT) ve Dikey Eksenli (DERT) mekanizmaların yapısal karakteristikleri ve aerodinamik verimlilik profilleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Rüzgârdan güç elde etmenin üst limiti olan Betz teorisi (%59,3) temel referans kabul edildiğinde, endüstriyel YERT sistemlerinin aerodinamik kaldırma kuvveti tasarımındaki gelişmişlikleriyle bu kite en fazla yaklaşan verimli teknoloji olduğu görülmektedir. Ancak YERT'lerin yüksek enerji kapasitelerine karşılık; devasa rotor yapıları, aktif kule-gövde kontrol mekanizmaları ve çok ağır bileşenlerinin yüksekte konumlanması nedeniyle karmaşık yapısal hesaplamalar, zorlayıcı yorulma limitleri ve yüksek bakım maliyetleri gerektirdiği tespit edilmiştir.

DERT konfigürasyonları ise, kentsel alan dinamiklerine uygunluğu, rüzgâr yönü ayarlayıcı (yaw) mekanizma gerektirmemesi ve hareketli temel ünitelerinin zemin hizasında konumlandırılması gibi yapısal kolaylıklar sunmaktadır. Tüm bu yapısal basitliğine karşın, DERT'ler asimetrik kuvvet dalgalanmaları nedeniyle mekanik titreşim, yorulma tahribatı ve nihayetinde aerodinamik verimsizlik sorunu ile mücadele etmektedir.

Sonuç olarak; küresel elektrik gücü üretimine yanıt veren megavat ölçeğindeki endüstriyel rüzgâr santrallerinde aerodinamik performans baskınlığı sebebiyle YERT konfigürasyonunun yeri sağlamdır. Öte yandan, rüzgâr enerjisinin desantralize (dağıtık) üretimi bağlamında, sürdürülebilir kent mimarisine entegre, düşük maliyetli ve çok yönlü rüzgâr koşullarına uyum sağlayan DERT teknolojileri mikro ölçekli çözümlerin anahtarını elinde tutmaktadır. Rüzgâr enerjisi yatırımlarında uygulanacak bölgenin morfolojisi, rüzgâr rejimi, üretim amacı ve yatırım maliyeti, hangi türbinin seçileceğini belirleyen esas değerlendirme ölçütleridir.

Kaynakça

- Ackermann, T., & Söder, L. (2000). Wind energy technology and current status: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(4), 315-374. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(00)00004-6)
- Akman, E. (2019). Dikey Eksenli Bir Rüzgar Türbinin Kanat Tasarımının DeneySEL Ve Sayısal İncelenmesi [Master's]. <https://www.proquest.com/docview/2700777654/abstract/D19A13F698E14EC7PQ/1>
- Aslan, Y. (2023). YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENERJİ İHTİYACINI KARŞILAMADAKİ PAYININ ARTIRILMASI KAPSAMINDA TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİNDEN YARARLANMA ANALİZİ.
- Ayar, B., Yalçın, Z. G., & Dağ, M. (2023). Rüzgarı Hasat Etmek: Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Fizibilitesi ve Gelişmeleri Üzerine Bir Araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (49), 43-49. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1261573>
- Büyükeren, R., Kaya, M. N., Bacakoğlu, A. A., Uçar, M., Altıntaş, H. B., Öztürk, A., & Bilici, A. Y. (2024). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kule Yüksekliği ve Türbülans Yoğunluğu Etkisinin İncelenmesi. *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 6(3), 566-582. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.66>
- Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412-422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>

- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., & Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development (NREL/TP-500-38060, 947422; s. NREL/TP-500-38060, 947422). <https://doi.org/10.2172/947422>
- Kanbur, F. A. (2014). 500 Kw Enerji Kapasiteli Bir Rüzgar Türbinin çelik Kule Tasarımı. <http://hdl.handle.net/11527/13908>
- Kaya, K. (2014). Rüzgar Türbin Kanadının Mekanik Tasarım Esasları. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=48XPj7KKQhKUgntkUiKO3AK6V2CRiEVPJBZh3qxfgfAMynLWbjONIfCPCezl3IMO>
- Kaya, M. N. (2019). Eğimli Bir Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Kanadının Aerodinamik Tasarımı ve Optimizasyonu. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=as2oTjW5jfr9IKSvmCdJYjldMYPAUym6NcTUauyezFİLZAI CqYhYdIwkFbYOrxwm>
- Keleş Çetin, S., Genç, M. S., & Daldaban, F. (2019). Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), 539-551. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.643828>
- Keleş, D., Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, İ., Boru, B., & Koç, T. (2013). Bir rüzgar türbini tasarımı ve geliştirilmesi. Sakarya University Journal of Science, 17(2), 207-216. <https://doi.org/10.16984/saufbed.51283>
- Kwon, D. K., & Kareem, A. (2013). Generalized gust-front factor: A computational framework for wind load effects. Engineering Structures, 48, 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.12.024>

- Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Doudoumis, I. N., & Baniotopoulos, C. C. (2003). Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower. *Engineering Structures*, 25(8), 1097-1106. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00059-2)
- Maggio, T., Grasso, F., & Coiro, D. P. (2011). Numerical Study on Performance of Innovative Wind Turbine Blade for Load Reduction.
- Mahmut Can Şenel, E. Ş. (2014). Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Tasarımı ve Denetimi—ProQuest. <https://www.proquest.com/docview/2707559456?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Omar Abdulkareem Qasim QASIM. (2022). Su Pompalama İçin Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tasarımı—ProQuest. <https://www.proquest.com/docview/2802487379?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Özdemir, M. T. (2021). KARABÜK İLİ KIRSAL KESİMLERİ İÇİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİN TASARIMI VE AERODİNAMİK PERFORMANS OPTİMİZASYONU [Karabük Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 5(9), 3425-3449. <https://doi.org/10.3390/en5093425>

- Shoaib, M., Siddiqui, I., Rehman, S., Khan, S., & Alhems, L. M. (2019). Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. *Journal of Cleaner Production*, 216, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.128>
- Şenol, Ü., & Musayev, Z. (2017). Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminin Yapay Sinir Ağları İle Tahmini.
- Şükrü Çelenkli. (2025). TÜRKİYE SAMSUN-VEZİRKÖPRÜ KENTSEL RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Tanürün, H. E. (2023). H-Darrieus Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde J Tipi Kanat Yapısı Uygulamaları. BIDGE YAYINLARI.
- Tanürün, H. E., & Acır, A. (2018). Modifiye Edilmiş NACA-0015 Kanat Yapısında Tüberkül Etkisinin Sayısal Analizi. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.391800>
- Temel, D., & Çikmiş, S. (2021). KONİK HELİSEL SAVONİUS RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI.
- Tuken, A. (2024). YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT PERFORMANSI ÜZERİNE HAVA AKIŞ YARIKLARININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ.
- Usta, M. M. K. (2005). DÜŞÜK MALİYETLİ, KÜÇÜK GÜÇLÜ YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİN TASARIMI.
- Ünal, R., Akçay, M. T., & Özgünel, S. (2024). Rüzgâr Enerjisi Verimliliğinin Artırılması ve Simülasyonunda Etkisinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1), 236-249. <https://doi.org/10.29137/umagd.1345819>

- Xiong, L., Xianmin, Z., Gangqiang, L., Yan, C., & Zhiquan, Y. (2010). Dynamic Response Analysis of the Rotating Blade of Horizontal Axis Wind Turbine. *Wind Engineering*, 34(5), 543-559. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.34.5.543>
- Yalçın, H. A. (2019). YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN GÜRBÜZ TASARIM YÖNTEMİ.

BÖLÜM 7

Electromagnetically Actuated Multi-Functional Mechanical Testing Platform: A Next-Generation Approach

HAKKI ÖZER ¹

**Department of Automotive Engineering, Faculty of
Engineering, Bursa Uludag University, Bursa
16059, Turkey, 0000-0003-0951-8490**

İntroduction

Mechanical testing systems are fundamental tools for understanding the behavior of materials and structural components under real operating conditions. In problems such as crash safety, impact resistance, and energy absorption, it is not sufficient to evaluate material behavior at a single loading rate. As reported in the literature, deformation processes in automotive structures span from quasi-static conditions to strain rates reaching several hundreds of s^{-1} (García-Pérez et al., 2019; Hsiao & Daniel, 1998). This clearly indicates the necessity of obtaining experimental data over a wide range of loading rates.

¹ Associate Professor Hakkı Özer, Department of Automotive Engineering, Faculty of Engineering, Bursa Uludag University, Bursa 16059, Turkey, 0000-0003-0951-8490

Despite this requirement, current testing infrastructures do not directly provide such capability. In practice, different loading regimes are addressed using different devices. Universal testing machines provide reliable results under quasi-static conditions. However, their applicability becomes limited as the loading rate increases. At this stage, servo-hydraulic systems are typically used, while higher loading rates are investigated using drop-weight setups or SHPB systems (Othman et al., 2009; Zou et al., 2024). Although this approach is functional, it introduces an important drawback: the data are not generated within a unified experimental framework.

This is where the main issue emerges. In tests conducted on different devices, boundary conditions cannot be preserved identically. Specimen gripping stiffness varies, alignment differs, and the measurement chain changes. As a result, the measured response does not represent solely the material behavior but rather the combined response of the material and the testing system. Studies on multi-machine testing programs have shown that additional validation procedures are required to ensure comparability between datasets (Xia et al., 2015).

The intermediate strain rate range (approximately $1\text{--}200\text{ s}^{-1}$) is where these challenges become most evident. Although servo-hydraulic systems are theoretically capable of operating within this range, practical limitations arise. As the loading rate increases, the natural frequencies of the system are activated, leading to oscillations in the force signal. This phenomenon, known as “ringing,” becomes particularly pronounced beyond approximately 10 s^{-1} and significantly affects measurement accuracy (Othman et al., 2009). In this context, measurement reliability becomes more critical than load capacity.

At higher strain rates, SHPB systems provide a well-established theoretical framework based on wave propagation principles. These systems are widely used, particularly for brittle and

quasi-brittle materials. However, experimental results are highly sensitive to interface conditions, friction, and specimen geometry (Khosravani & Weinberg, 2018; Zou et al., 2024). In addition, strain is typically obtained indirectly, which introduces an additional layer of uncertainty into the measurement process.

Drop-weight systems, commonly used for impact testing, offer a relatively simple solution. The impact energy can be directly controlled through mass and velocity, which makes them particularly attractive for composite materials. However, measurement quality in these systems is strongly dependent on contact conditions. Even minor misalignment or surface irregularities can influence the results. Furthermore, vibration-induced noise complicates the interpretation of force signals (Murali et al., 2024; Rajput et al., 2018). As a result, significant scatter can be observed between repeated tests.

A common approach to overcome these limitations is to combine different testing systems. Quasi-static tests are performed using UTMs, intermediate rates are addressed using servo-hydraulic systems, and high-rate behavior is evaluated using SHPB or drop-weight setups. While this strategy extends the accessible range of loading conditions, it relies on a key assumption: that all systems measure the same physical response. However, the literature suggests that this assumption is not always valid. Differences in boundary conditions, fixture stiffness, alignment, and measurement techniques require additional validation efforts to ensure consistency (Xia et al., 2015).

Measurement uncertainty represents another critical aspect of this problem. Even for fundamental parameters such as elastic modulus, the choice of measurement technique can influence the results. Differences between extensometer-based measurements, strain gauges, and machine displacement data have been reported (Kostic et al., 2022; Motra et al., 2014). In addition, factors such as

misalignment and system compliance can lead to significant deviations, particularly in sensitive experiments (Sánchez-Ávila et al., 2021; Flauder et al., 2025). These findings highlight that the testing system itself is an integral part of the experimental outcome.

In recent years, electromagnetic actuation systems have attracted increasing attention in this context. Linear motor-based systems, in particular, offer a different approach due to their ability to generate direct motion and provide fast and precise control. Studies have shown that such systems can achieve closed-loop control within milliseconds and reach impact velocities in the order of several meters per second (Šleichrt et al., 2025). They have also demonstrated promising performance in applications requiring high precision in force and displacement control (Peng et al., 2020; Rana, 2011).

However, current applications of these systems are mostly limited to specific testing domains, such as dynamic or vibration testing. The integration of different loading regimes within a single platform, operating under consistent boundary conditions and a unified measurement system, remains largely unexplored. This represents a clear gap in the literature.

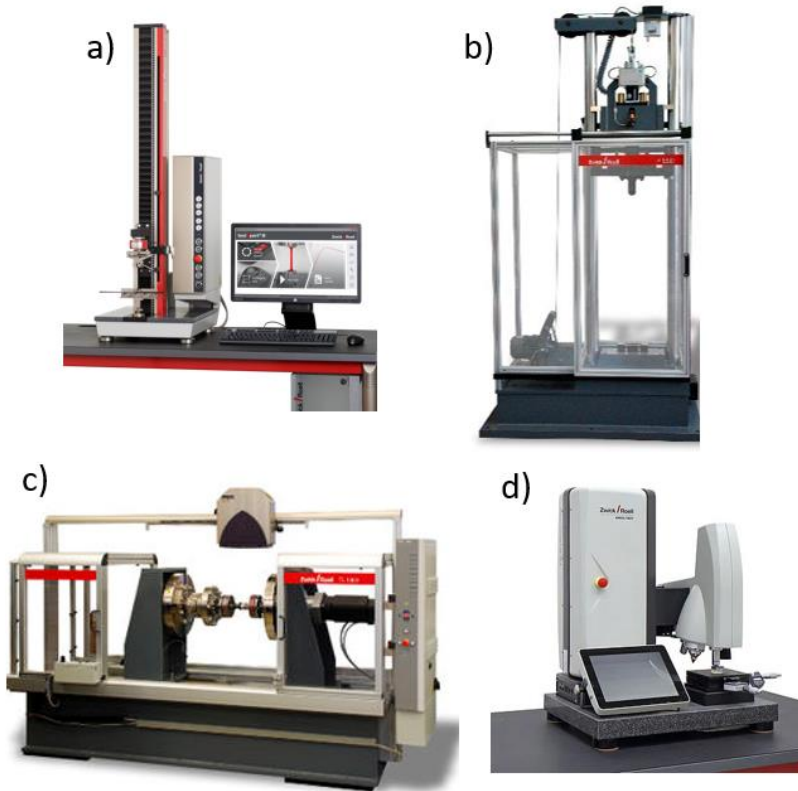
The approach presented in this study directly addresses this gap. The objective is to develop a system capable of performing quasi-static, dynamic, and impact tests within a single platform. The key distinction lies not only in combining different test types, but in ensuring that they are conducted along the same mechanical path and within a unified measurement framework. In this sense, the proposed approach offers an alternative to the conventional multi-device paradigm and introduces a more consistent experimental methodology.

2. Conventional Mechanical Testing Systems and Their Limitations

Mechanical characterization across different loading regimes has traditionally been carried out using separate testing systems. Each system is designed to operate within a specific range of loading conditions, which has led to a fragmented experimental framework. As illustrated in Figure 1, quasi-static tests are typically performed using universal testing machines, while dynamic loading conditions are addressed using servo-hydraulic systems. For impact and high strain-rate scenarios, drop-weight setups and specialized testing devices are commonly employed. In addition, stiffness or hardness measurements are often conducted using dedicated instruments. Although each of these systems provides reliable results within its intended operating range, they are not designed to function as a unified experimental platform.

This separation introduces several practical and methodological challenges. Since each device operates with different boundary conditions, fixture configurations, and measurement systems, the results obtained from different machines are not always directly comparable. Even when testing the same material, variations in alignment, system compliance, and data acquisition methods can influence the measured response (Xia et al., 2015). Another limitation arises from the transition between loading regimes. Intermediate strain rates remain particularly challenging to characterize due to dynamic effects such as inertia and structural vibrations. These effects can distort force measurements and reduce confidence in the obtained data, especially in servo-hydraulic systems where oscillatory behavior has been reported at higher loading rates (Othman et al., 2009).

Figure 1. Representative conventional mechanical testing systems used for different loading regimes: (a) quasi-static universal testing machine (UTM), (b) drop-weight impact testing setup, (c) servo-hydraulic testing system for dynamic loading, and (d) hardness/stiffness measurement device.



<https://www.zwickroell.com/>

At higher strain rates, drop-weight and SHPB systems are commonly used. While drop-weight systems allow direct control of impact energy, their measurements are highly sensitive to contact conditions and system vibrations, which may lead to increased data scatter (Murali et al., 2024; Rajput et al., 2018). SHPB systems, on the other hand, rely on wave propagation theory and are capable of reaching very high strain rates. However, their accuracy depends on

assumptions related to stress uniformity and ideal contact conditions, and strain measurements are often obtained indirectly (Khosravani & Weinberg, 2018; Zou et al., 2024).

Taken together, these observations indicate that the limitations of conventional testing approaches stem not only from individual system constraints, but also from the fragmented nature of the overall testing methodology. The use of multiple independent devices complicates experimental workflows and limits the direct comparability of results across different loading regimes.

3. Unified Electromagnetic Test Platform Concept

The limitations associated with conventional testing approaches have led to increasing interest in unified testing methodologies. Instead of relying on multiple independent systems, a single platform capable of performing different types of mechanical tests offers a more consistent experimental framework.

The conventional approach, shown in Figure 1, clearly demonstrates how different loading regimes are handled by separate devices. In contrast, the concept proposed in this study aims to integrate these capabilities within a single system. The objective is not only to reduce the number of devices required, but also to ensure that all tests are performed under consistent boundary conditions. A key limitation of multi-machine testing programs is the difficulty in ensuring comparability between datasets obtained from different systems. Differences in alignment, fixture stiffness, and measurement techniques can introduce systematic variations, often requiring additional validation procedures (Xia et al., 2015). A unified platform provides a direct way to mitigate these issues.

In this context, the proposed electromagnetic test platform is designed to perform quasi-static, dynamic, and impact tests within a single mechanical structure. By maintaining a common loading axis and measurement chain, the system enables more reliable

comparison of results across different loading regimes. This approach also improves experimental efficiency. Instead of transferring specimens between different devices, multiple test modes can be applied within the same setup. This reduces setup time and minimizes errors associated with reconfiguration.

The comparative framework summarizing conventional systems and the proposed approach is presented in Table 1. The table highlights the differences in operating ranges, measurement consistency, and system integration, providing a clearer perspective on the advantages of a unified testing methodology.

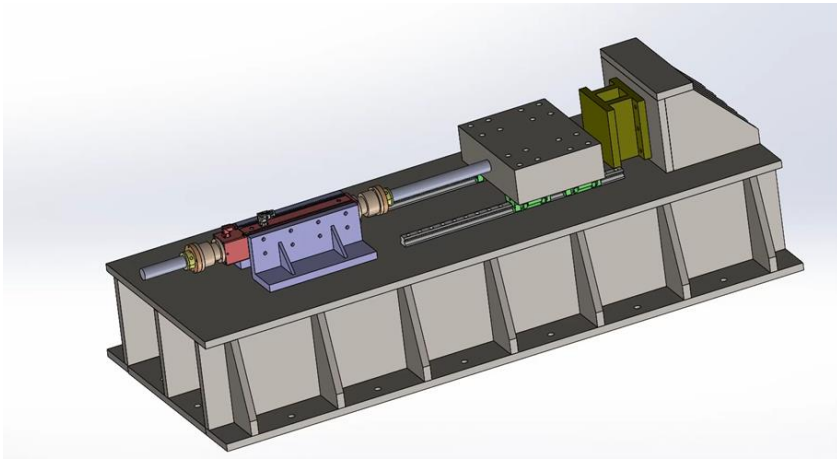
Table 1. Comparative Evaluation of Mechanical Testing Systems.

System	Loading Rate Range	Application	Strength	Limitation
UTM	Low rate (quasi-static) (Motra et al., 2014)	Tension, compression	High accuracy	Limited dynamic capability
Servo-hydraulic	Intermediate rate (1–200 s ⁻¹) (Othman et al., 2009)	Dynamic testing	High force capacity	Oscillations, signal distortion
Drop-weight	Intermediate to high rate (Murali et al., 2024)	Impact	Simple energy control	Noise, data scatter
SHPB	Very high rate (Zou et al., 2024)	Dynamic characterization	Strong theoretical basis	Indirect measurement
Electromagnetic system	Wide range (Šleichrt et al., 2025)	Dynamic / precision testing	Fast response and control	Limited integration
Proposed unified platform	Wide loading rate range	Multi-mode testing	Comparable data under consistent conditions	Limited availability in literature

4. System Design and Working Principle

The proposed system is based on a modular mechanical structure combined with an electromagnetic actuation mechanism. The overall configuration of the platform is shown in Figure 2.

Figure 2. Overall configuration of the proposed electromagnetic test platform, including the structural frame, linear motion system, and actuator integration.

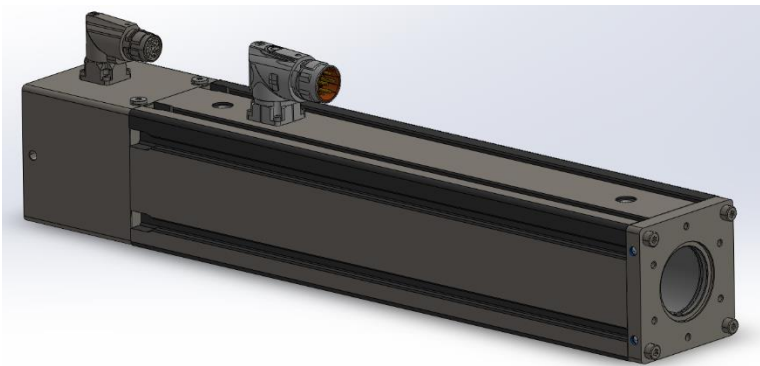


The structure consists of a rigid base frame designed to minimize deformation and ensure stable loading conditions. A moving carriage is integrated into the system to enable controlled linear motion along a single axis. This motion is directly driven by an electromagnetic tubular motor, as illustrated in Figure 3.

Unlike conventional hydraulic systems, the direct-drive nature of the electromagnetic actuator eliminates the need for complex transmission components. This simplifies the system architecture and improves response characteristics. Electromagnetic actuation systems are known for their fast dynamic response and precise controllability, particularly in applications requiring rapid changes in loading conditions (Šleichrt et al., 2025). The working

principle of the system is based on controlled linear displacement applied to the specimen. Depending on the test configuration, the actuator can operate at low speeds for quasi-static loading or at higher velocities for dynamic and impact conditions. Since all test modes share the same mechanical path, alignment and boundary conditions remain consistent.

Figure 3. Electromagnetic tubular linear motor used for direct actuation of the moving carriage.



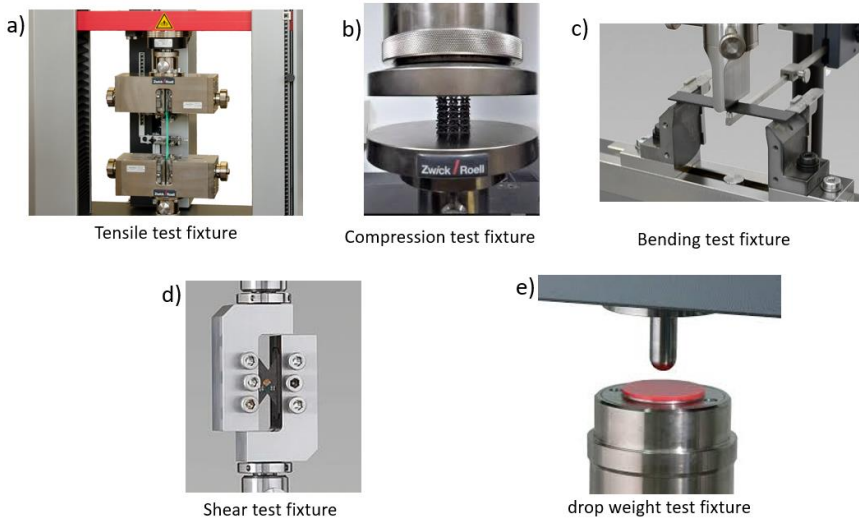
This integrated design enables seamless transitions between different loading regimes without requiring hardware reconfiguration. As a result, the system provides a more coherent experimental environment compared to conventional multi-device setups.

5. Multi-Functional Testing Capability and Flexibility

One of the key features of the proposed platform is its ability to perform multiple types of mechanical tests using interchangeable fixtures. The different fixture configurations supported by the system are shown in Figure 4. These fixtures allow the implementation of tensile, compression, bending, shear, and composite-specific tests within the same platform. In addition, configurations for fatigue

loading and penetration testing can be realized without modifying the main system structure.

Figure 4. Interchangeable fixture configurations supported by the proposed test platform, including tensile, compression, bending, shear, and impact test setups.



<https://www.zwickroell.com/>

The use of interchangeable fixtures significantly enhances the flexibility of the platform. Instead of relying on separate machines for different test types, the system can be adapted by changing the fixture configuration. This reduces equipment requirements while maintaining consistency in test conditions. Another important aspect is that all tests are conducted along the same loading axis and using the same measurement system. This ensures that variations in experimental results are primarily due to material behavior rather than differences in test setup. Consequently, more reliable comparisons can be made across different loading regimes.

The combination of multi-mode capability and modular fixture design makes the platform suitable for a wide range of applications, from fundamental material characterization to advanced structural testing.

6. Conclusion

This chapter has examined the limitations of conventional mechanical testing systems and presented a unified approach based on electromagnetic actuation. The analysis of existing methods shows that the use of separate devices for different loading regimes introduces inconsistencies in boundary conditions, measurement techniques, and data interpretation. These limitations become more pronounced when comparing material behavior across a wide range of loading rates.

In response to these challenges, a unified electromagnetic test platform has been proposed. The concept focuses on performing quasi-static, dynamic, and impact tests within a single mechanical structure while maintaining a common loading axis and measurement system. This approach enables more consistent experimental conditions and improves the comparability of results obtained under different loading regimes.

The system design integrates a rigid structural frame with a direct-drive electromagnetic tubular motor, allowing controlled linear motion over a broad range of velocities. The absence of complex transmission components simplifies the system architecture and enhances responsiveness. In addition, the use of interchangeable fixtures enables multiple test configurations to be implemented without modifying the main structure.

One of the key contributions of the proposed approach is the combination of multi-mode testing capability with a unified experimental framework. By eliminating the need for multiple independent devices, the platform reduces experimental complexity

while preserving measurement consistency. This is particularly relevant for materials with strain-rate dependent behavior, where reliable comparison across different loading conditions is essential.

Overall, the proposed system represents a step toward a more integrated methodology in mechanical testing. Rather than treating different loading regimes as separate problems, the unified platform provides a consistent basis for evaluating material behavior across a continuous range of conditions. This perspective may support the development of more reliable experimental data and contribute to improved modeling and design practices.

References

García-Pérez, A., Sorribes-Palmer, F., Alonso, G., & Ravanbakhsh, A. (2019). FEM simulation of space instruments subjected to shock tests by mechanical impact. *International Journal of Impact Engineering*, 129, 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.12.008>

Hsiao, H. M., & Daniel, I. M. (1998). Strain rate behavior of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 29(5), 521–533. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00008-0)

Khosravani, M. R., & Weinberg, K. (2018). A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 1264–1283. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.187>

Kostic, S., Milojkovic, J., Simunovic, G., Vukelic, D., & Tadic, B. (2022). Uncertainty in the determination of elastic modulus by tensile testing. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 25, 100998. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.002>

Motra, H. B., Hildebrand, J., & Dimmig-Osburg, A. (2014). Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 17(4), 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.07.006>

Murali, G., Wong, L. S., & Abid, S. R. (2024). A comprehensive review of drop weight impact testing: Evaluating the pros and cons in fiber-reinforced concrete performance assessment. *Journal of Building Engineering*, 94, 109934. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109934>

Othman, R., Guégan, P., Challita, G., Pasco, F., & LeBreton, D. (2009). A modified servo-hydraulic machine for testing at intermediate strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 36(3), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.06.003>

Peng, G., Xu, F., Chen, J., Hu, Y., Wang, H., & Zhang, T. (2020). A cost-effective voice coil motor-based portable micro-indentation device for in situ testing. *Measurement*, 165, 108105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108105>

Rajput, M. S., Burman, M., Segalini, A., & Hallström, S. (2018). Design and evaluation of a novel instrumented drop-weight rig for controlled impact testing of polymer composites. *Polymer Testing*, 68, 446–455. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.022>

Rana, K. P. S. (2011). Fuzzy control of an electrodynamic shaker for automotive and aerospace vibration testing. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11335–11346. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.184>

Sánchez-Ávila, D., Orozco-Caballero, A., Martínez, E., Portolés, L., Barea, R., & Carreño, F. (2021). High-accuracy

compliance correction for nonlinear mechanical testing: Improving Small Punch Test characterization. *Nuclear Materials and Energy*, 26, 100914. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100914>

Šleichrt, J., Falta, J., Kylar, J., Kotek, V., Rada, V., & Fíla, T. (2025). Measurement of forces and velocities during mechanical experiments with linear motors at intermediate strain rates. *Measurement: Sensors*, 38, 101674. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101674>

Xia, Y., Zhu, J., & Zhou, Q. (2015). Verification of a multiple-machine program for material testing from quasi-static to high strain-rate. *International Journal of Impact Engineering*, 86, 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.07.010>

Zou, S., Gao, Y., Yang, Z., Yang, C., Qian, L., & Zhou, Y. (2024). Development of the split-Hopkinson pressure bar and its application in testing the dynamic mechanical properties of quasi-brittle materials: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 9463–9483. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.244>

Flauder, S., Langhof, N., & Schafföner, S. (2025). The role of alignment for valid tensile testing of ceramic matrix composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 45(3), 117001. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117001>

<https://www.zwickroell.com/>

BÖLÜM 8

PHYSICS-BASED SIMULATION AND DATA- DRIVEN MODELING: AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR ENGINEERING SYSTEMS

HİKMET İMAMOĞLU¹
SÜLEYMAN MURAT BAĞDATLI²

Introduction

Simulation has become a central component of modern engineering practice, serving not only as a numerical analysis tool but also as a structured methodology for investigating complex physical systems. Foundational works in computational mechanics highlight its role in engineering analysis and design (Bathe, 1996; Zienkiewicz et al., 2025). In problems involving transient dynamics, multiphysics coupling, or limited experimental accessibility, analytical solutions may be insufficient and experimentation costly or impractical. Simulation therefore enables investigation of system behavior through mathematically formulated representations of physical mechanisms.

¹ PhD Candidate, Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Manisa, Türkiye, Orcid: 0000-0002-5683-6478

² Prof.Dr., Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Manisa, Türkiye, Orcid: 0000-0002-5152-9604

Rather than reproducing physical reality directly, simulation constructs structured approximations based on explicit modeling assumptions. As emphasized by (Winsberg, 2010), it operates as a representational scientific practice in which models function as analytical instruments. The credibility of simulation thus depends on coherence between physical assumptions, mathematical formulation, numerical implementation, and appropriate verification–validation procedures (Roy & Oberkamp, 2011).

Engineering modeling should be viewed as purposeful abstraction guided by analytical objectives. Classical system-dynamics formulations demonstrate that complex behavior can often be captured through simplified yet physically meaningful models (Karnopp et al., 2012). Modern engineering systems frequently integrate mechanical, electrical, and hydraulic subsystems with structurally similar mathematical representations, enabling cross-domain modeling approaches such as bond-graph methods (Borutzky, 2011; Broenink, 1999).

Recent developments increasingly combine physics-based modeling with data-driven techniques. Hybrid frameworks integrating physical models and machine learning improve predictive capability and parameter identification in complex systems (Brunton & Kutz, 2019; Karniadakis et al., 2021; Raissi et al., 2019). Within this perspective, this chapter presents simulation as an integrated engineering methodology unifying physical abstraction, mathematical representation, numerical realization, and mechanism-oriented interpretation.

Foundations of Physics-Based Simulation

Computational simulation relies on mathematical representations derived from fundamental conservation principles. Classical computational mechanics literature emphasizes conservation of mass, momentum, and energy as the analytical

foundation of engineering modeling (Bathe, 1996; Zienkiewicz et al., 2025). These principles are expressed through Newtonian dynamics in discrete systems and differential equation formulations in continuum mechanics, enabling physical processes to be translated into computational models.

Engineering systems often exhibit nonlinear behavior due to contact, large deformation, friction, material plasticity, or multiphysics interactions. While nonlinear formulations provide higher fidelity, linearized models frequently offer practical first-order insight. The choice between linear and nonlinear representation should therefore align with analytical objectives and required model fidelity (*Continuous System Simulation*, 2006).

Transformation of mathematical models into computational simulations requires discretization and appropriate numerical strategies. Spatial discretization methods—such as finite element, finite difference, and finite volume approaches—approximate continuous fields while balancing accuracy and computational cost (Bathe, 1996; Zienkiewicz et al., 2025). Structural formulations commonly involve stiffness matrix representations derived from continuum mechanics principles (Němec et al., 2016).

Simulation reliability depends on consistency among physical assumptions, mathematical formulation, numerical implementation, and interpretation. Verification ensures correct solution of governing equations, whereas validation evaluates physical representativeness within defined uncertainty limits (*Guide: Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002))*, 1998; Roy & Oberkampf, 2011); Meaningful engineering insight therefore arises not solely from numerical output but from interpretation of the governing physical mechanisms. Meaningful engineering insight therefore arises not solely from numerical output but from interpretation of the governing physical mechanisms.

Cross-Domain Modeling

Engineering systems from different physical domains are often described by differential equations with similar mathematical structures despite involving different physical quantities. Electrical current–voltage relations, hydraulic pressure–flow dynamics, and mechanical force–displacement interactions frequently lead to governing equations of comparable form. Such structural similarities between physical domains have long been recognized in system dynamics and cross-domain modeling approaches (Borutzky, 2011; Broenink, 1999; Karnopp et al., 2012). Representative governing equations illustrate this correspondence. This analogy reflects the common structure of energy storage, dissipation, and power transfer across physical domains.

Electrical system

$$L \frac{di}{dt} + Ri = e(t) \quad (1)$$

Hydraulic system

$$C \frac{dP}{dt} + RP = q(t) \quad (2)$$

Mechanical system

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t) \quad (3)$$

Despite representing different physical phenomena, these equations share analogous terms corresponding to energy storage, dissipation, and external excitation. This structural similarity enables unified modeling strategies and supports cross-domain representation of engineering systems (Karnopp et al., 2012). It also facilitates the use of common analytical tools, such as transfer-function representations and block-diagram modeling, for analyzing multiphysics engineering systems within a consistent framework.

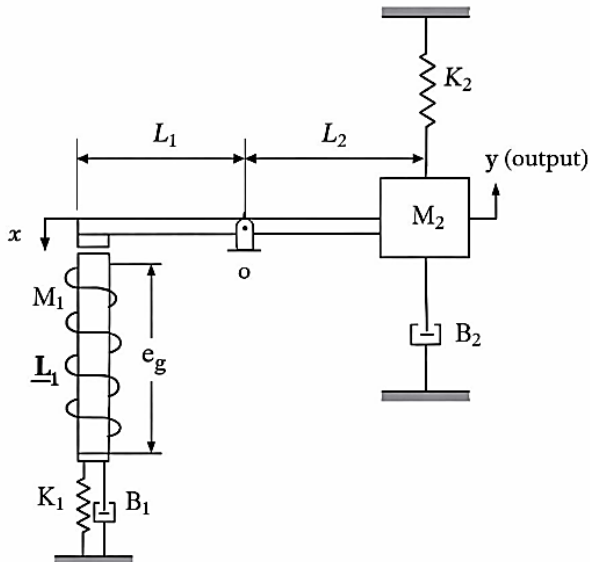
Electromechanical System Modeling

This case study demonstrates the application of the simulation methodology introduced in the previous sections. Rather than focusing on device-specific optimization, the objective is to illustrate how a coupled engineering system can be represented and analyzed within a unified modeling framework.

System Description

A simplified electromechanical system is considered to illustrate the proposed modeling approach. The system consists of an electrical excitation circuit coupled to a mechanical mass–spring–damper structure, as shown in Figure 1.

Figure 1 Coupled electromechanical system consisting of an electrical excitation circuit and a mass–spring–damper subsystem.



The configuration represents the coupling between the electrical excitation circuit and the mechanical mass–spring–damper subsystem.

Mathematical Model

The electromechanical system in Figure 4.1 is modeled using coupled differential equations for the electrical and mechanical subsystems. Under linear small-displacement assumptions, the electrical circuit dynamics are given by

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = e(t) \quad (4)$$

where L and R denote the circuit inductance and resistance, and $e(t)$ represents the input voltage. The electromagnetic interaction converts electrical current into mechanical force acting on the mechanical subsystem, which can be expressed as

$$Fm(s) = Km I(s) \quad (5)$$

The mechanical subsystem is represented by a mass–spring–damper model governed by

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F_m(t) \quad (6)$$

Combining the electrical and mechanical dynamics provides a unified representation of the coupled electromechanical system. Transforming the governing equations into the Laplace domain yields the overall transfer relationship between the input voltage and the mechanical displacement.

Numerical Simulation Strategy

To illustrate the dynamic behavior of the coupled electromechanical system, simulations were performed within a linear modeling framework using a representative parameter set. Mechanical inertia, damping, and electrical resistance were varied while other parameters remained constant. The parameters were defined as $m_1 = m_2 = [5; 50; 100]$ and $B_1 = B_2 = [5; 50; 100]$, and the electrical resistance as $R = [30; 50; 100; 200]$. This

parametric analysis evaluates the influence of inertia, damping, and electrical excitation on system dynamics.

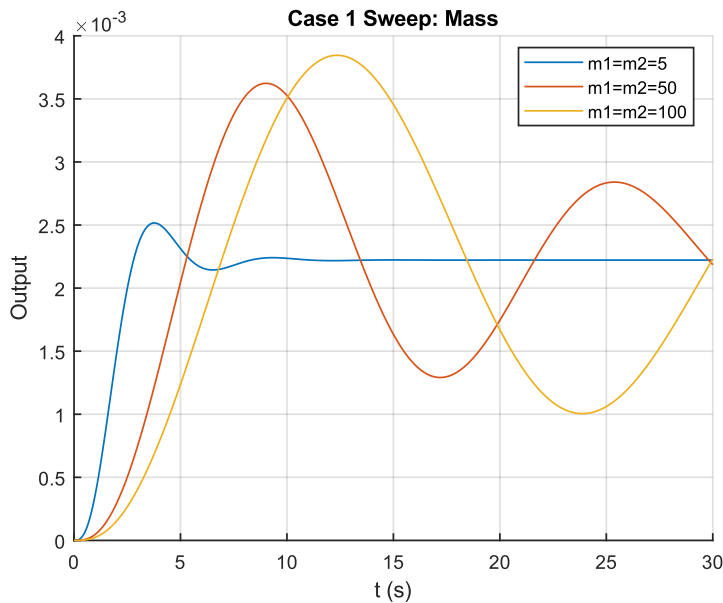
Parametric Analysis and Mechanical Interpretation

Based on the governing equations, a transfer-function representation of the coupled system was derived and implemented in the simulation framework. Parametric variations were then applied, and selected transient responses are presented to illustrate the influence of key system parameters.

Mass (Inertia) Effects

Variations in inertia significantly affect the transient response, including oscillation amplitude and settling behavior. Increasing mass generally leads to larger oscillation amplitudes and slower dynamics, whereas lower inertia produces faster but more oscillatory motion. The corresponding responses are shown in Figure 2.

Figure 2 Transient response for different inertia values.

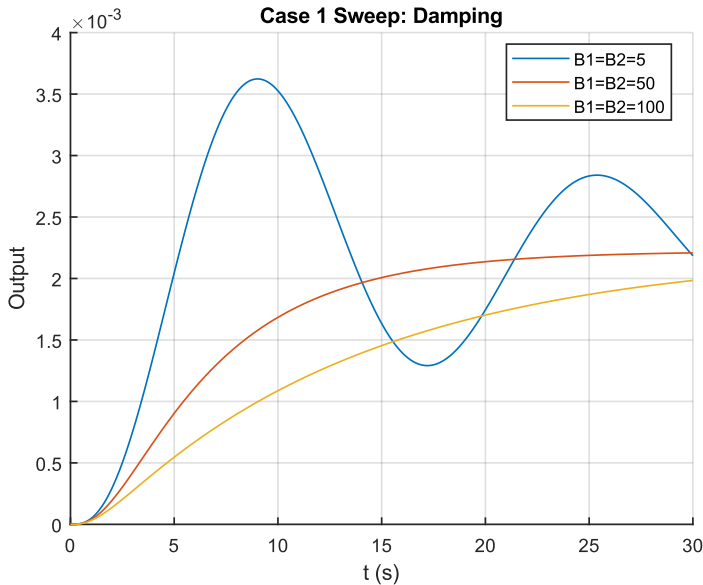


Increasing inertia increases oscillation amplitude during the initial transition. At higher mass levels, however, amplitude growth becomes less pronounced, indicating reduced sensitivity to further inertia increases.

Damping Effects

Damping governs energy dissipation in the coupled electromechanical system and affects transient oscillations. Increasing viscous damping reduces oscillation amplitude and smooths the response, whereas low damping produces pronounced underdamped behavior. The corresponding responses are shown in Figure 3.

Figure 3 Transient displacement response for different damping values.

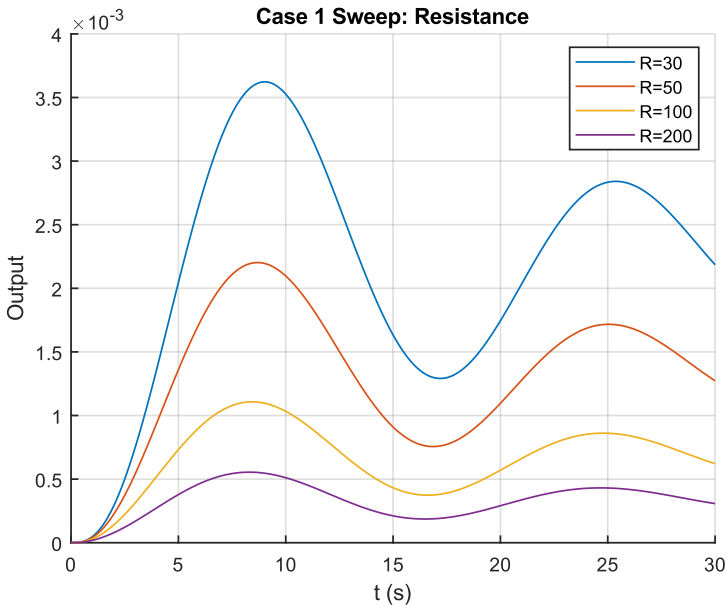


Increasing damping progressively suppresses oscillatory behavior in the transient response. Higher damping levels reduce overshoot and lead the system toward a smoother and more stable convergence.

Electrical Parameter Effects

Electrical parameters affect the transient response through their influence on current evolution and electromagnetic force generation. Increasing electrical resistance reduces excitation intensity and suppresses oscillation amplitude, whereas lower resistance produces stronger transient responses. The corresponding simulated responses are shown in Figure 4.

Figure 4 Transient response of the system for different electrical resistance values.



Higher electrical resistance weakens electromagnetic excitation and reduces the oscillation amplitude of the mechanical response.

Mechanism-Oriented Interpretation

The transient response of the coupled system results from the interaction of energy storage and dissipation across the electrical and mechanical domains (Borutzky, 2011; Karnopp et al., 2012).

Mechanical inertia governs response delay and oscillatory persistence, damping controls energy attenuation, stiffness determines oscillation frequency, and electrical parameters regulate electromagnetic excitation. Together, these effects provide a physically consistent interpretation of the system dynamics.

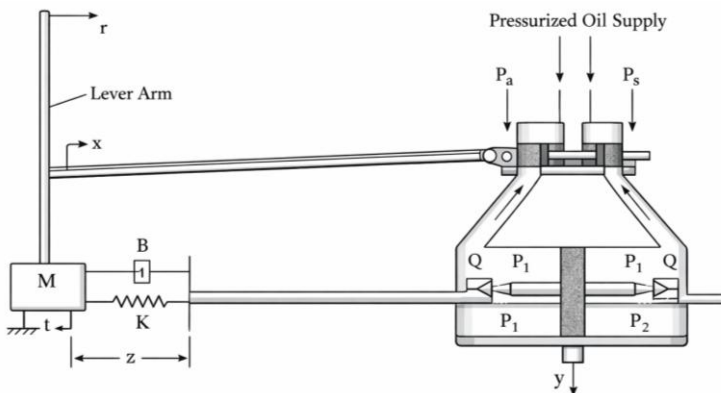
Hydraulic Valve–Cylinder System Modeling

This example extends the previous electromechanical case to a fluid–mechanical multiphysics system, illustrating how coupled hydraulic–mechanical dynamics can be represented within a consistent modeling framework.

System Description

A simplified hydraulic valve–cylinder system is considered, consisting of a valve-controlled flow source and a piston–cylinder actuator converting hydraulic pressure into mechanical displacement. Such configurations are widely used in industrial motion systems. A schematic representation is shown in Figure 5.

Figure 5 Hydraulic valve–cylinder system illustrating valve-controlled flow and piston load dynamics.



The figure highlights the interaction between hydraulic pressure generation and mechanical load dynamics. This

configuration forms the basis of the mathematical model used in the simulations.

Mathematical Model

The hydraulic valve–cylinder system can be described using a set of coupled relations representing the kinematic linkage, hydraulic flow dynamics, and mechanical motion.

Lever Kinematics; The geometric relation between valve displacement and cylinder motion is

$$X(s) = \frac{a}{a+b} R(s) - \frac{b}{a+b} Z(s) \quad (7)$$

Valve Flow Dynamics; Valve flow depends on spool displacement and pressure differential:

$$q(t) = Kv X(t) - Kp \Delta P(t) \quad (8)$$

This relation captures both flow actuation and pressure feedback.

Cylinder Continuity; Fluid continuity relates volumetric flow to piston velocity:

$$q(t) = A_s \dot{Y}(t) \quad (9)$$

where A_s denotes piston area.

Mechanical Load Dynamics; The mechanical motion of the piston–load assembly follows

$$M\ddot{Z}(t) + B_s\dot{Z}(t) + KZ(t) = F(t) \quad (10)$$

Pressure–Force Coupling; Hydraulic pressure generates actuator force:

$$F(t) = A_s \Delta P(t) \quad (11)$$

These relations describe the essential hydraulic–mechanical coupling of the system and form the basis of the simulations presented in the following section.

Numerical Simulation Strategy

The simulation framework follows the methodology used in the electromechanical case study. Parameter sensitivity was evaluated by varying $m_1 = m_2 = [1.25; 5; 10; 20]$, $B = [10; 50; 100; 250]$ and $A_s = [3.5; 5; 10; 15]$. While other parameters remained constant. The valve gains K_v, K_p were fixed to preserve consistent flow–pressure scaling.

Engineering and Methodological Interpretation

The parametric analysis shows that the transient response of the hydraulic actuator system arises from the interaction of energy storage and dissipation mechanisms across hydraulic and mechanical domains (Borutzky, 2011; Karnopp et al., 2012). Inertia and fluid compressibility act as primary energy storage elements, while damping governs energy dissipation and hydraulic parameters regulate the transmission of pressure-generated forces to the mechanical load. The dynamic balance between these mechanisms determines not only oscillatory behavior but also system stability and responsiveness under varying operating conditions.

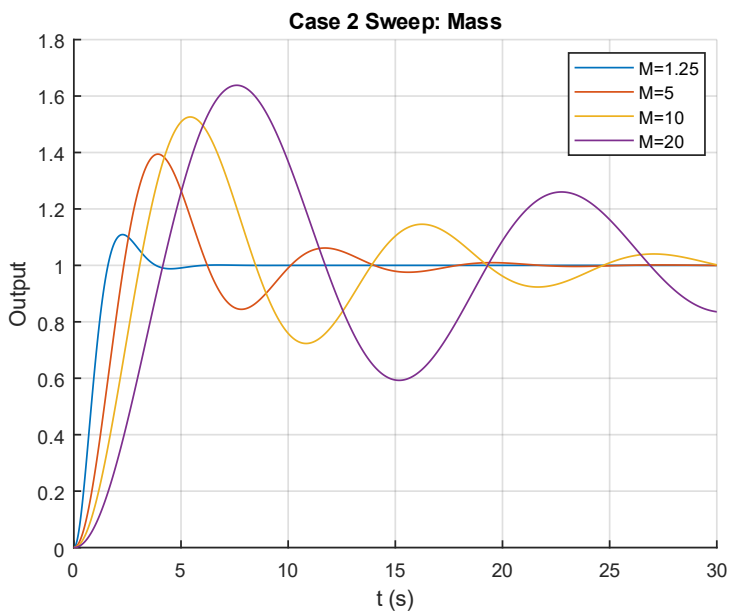
Beyond the specific actuator configuration considered here, these results highlight the role of simulation as a mechanism-oriented framework for analyzing multiphysics engineering systems. Transfer-function-based modeling provides a physically transparent representation of subsystem interactions while maintaining computational simplicity. Such interpretation supports model simplification, parameter selection, and early-stage engineering design decisions. By revealing the dominant energy pathways and

coupling effects, simulation thus enables engineers to prioritize critical parameters while avoiding unnecessary model complexity.

Mass (Inertia) Effects

System inertia strongly influences the transient response of the coupled hydraulic–mechanical system. Higher inertia increases kinetic energy storage, resulting in larger oscillation amplitudes and slower dynamics. The responses are shown in Figure 6.

Figure 6 Transient response for different inertia values.



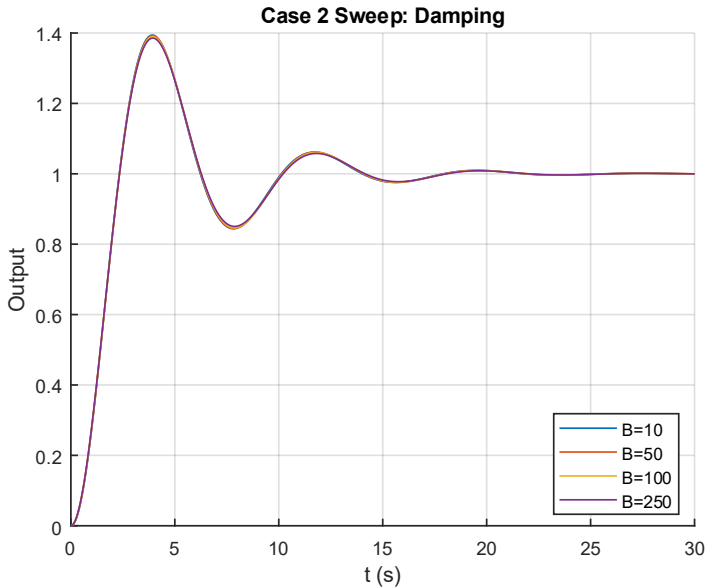
Increasing inertia produces higher oscillation amplitudes and delays the stabilization of the response. This behavior reflects the increased kinetic energy storage associated with larger system inertia.

Damping Effect

Increasing damping generally reduces oscillation amplitude and produces smoother transient responses through enhanced energy

dissipation. However, within the investigated range, damping variations lead to only moderate changes in the overall response of the coupled hydraulic–mechanical system. The simulated responses corresponding to damping variation are presented in Figure 7.

Figure 7 Transient response for different damping values.

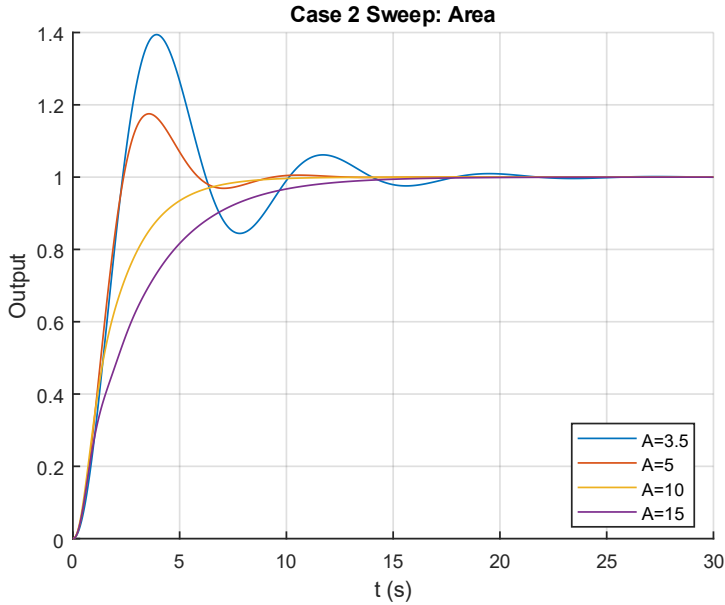


Increasing damping slightly attenuates oscillations and improves response smoothness. However, the overall transient behavior shows limited sensitivity to damping variation within the investigated range.

Cylinder Area Effect

Cylinder area determines the coupling between hydraulic pressure and mechanical force generation. Increasing piston area strengthens force transmission but also modifies hydraulic flow dynamics. Within the investigated range, piston area variations produce only moderate changes in the transient response. The corresponding responses are shown in Figure 8.

Figure 8 Transient response for different piston area values.



Increasing piston area slightly changes oscillation amplitude and response speed, while the overall transient behavior remains only weakly sensitive within the investigated range.

High-Fidelity and Hybrid Simulation

The previous case studies illustrate the application of the proposed simulation methodology to representative engineering systems. However, modern engineering simulation increasingly extends beyond simplified models toward high-fidelity multiphysics simulations and hybrid physics–data modeling paradigms.

High-Fidelity and Multiphysics Simulation

High-fidelity simulation aims to represent physical system behavior with sufficient accuracy to capture dominant engineering mechanisms (Zhang & Abushaikha, 2021). As emphasized in computational mechanics literature, the objective is the accurate

representation of governing physical processes rather than increased model complexity (Bathe, 1996; Zienkiewicz et al., 2025).

Modern engineering systems often involve coupled phenomena such as structural deformation, wave propagation, fluid–structure interaction, and control–mechanical coupling. Multiphysics simulation enables systematic analysis of these interactions and supports the identification of dominant mechanisms, parameter sensitivities, and design trade-offs (Hazell et al., 2009).

Hybrid Physics–Data Modeling

Recent developments increasingly integrate physics-based modeling with data-driven approaches. Machine learning methods can complement physics-based models through parameter identification, surrogate modeling, and efficient prediction of complex system behavior (Brunton & Kutz, 2019; Brunton et al., 2016; Karniadakis et al., 2021; Raissi et al., 2019). Digital twin frameworks exemplify this hybrid paradigm by combining physics-based models with real-time data for monitoring, predictive maintenance, and system-level optimization while preserving physical interpretability.

Reliability and Future Directions

All simulation models rely on assumptions and simplifications that limit their validity. Verification and validation frameworks emphasize that transparent documentation of modeling assumptions and systematic validation procedures are essential for establishing simulation credibility (Roy & Oberkampf, 2011).

Engineering simulation is therefore evolving toward interdisciplinary and data-supported computational frameworks. Developments such as digital twins, real-time simulation, and AI-assisted modeling continue to expand the role of simulation in

engineering practice while physics-based modeling remains fundamental for ensuring interpretability and reliability.

Conclusions and Research Perspectives

This section summarizes the main insights of the chapter and discusses their implications for future developments in engineering simulation. First, the role of simulation as an integrated engineering methodology is highlighted. Subsequently, emerging directions related to hybrid simulation paradigms and data-supported modeling approaches are briefly discussed.

Simulation as an Engineering Methodology

This chapter has presented simulation not merely as a numerical tool but as an integrated engineering methodology. The modeling process—from physical abstraction and mathematical formulation to numerical implementation, verification–validation, and mechanism-oriented interpretation—has been treated as a coherent analytical framework rather than a set of isolated computational procedures.

Within this framework, simulation supports engineering reasoning, enables early design decisions, and allows system behavior to be evaluated prior to physical prototyping. However, simulation should be regarded as complementary to experimentation rather than a substitute, since experimental observations remain essential for model calibration and validation.

Because all simulation models rely on assumptions and approximations, methodological transparency and explicit recognition of model limitations are essential for scientific reliability. Ultimately, the value of simulation lies not only in numerical accuracy but also in the physical interpretability of the obtained results. In this respect, simulation functions as a bridge between theoretical modeling and practical engineering application,

linking physical understanding with design-oriented decision making.

Future Directions and Hybrid Simulation

Engineering simulation is increasingly evolving toward interdisciplinary and data-supported computational frameworks. Advances such as artificial intelligence–assisted modeling, digital twins, and high-performance computing continue to expand the role of simulation in engineering practice. Despite these developments, physics-based modeling remains essential for ensuring interpretability and reliability. Data-driven methods can enhance prediction efficiency and parameter identification, but their effectiveness is maximized when integrated with physically grounded models.

Future research will likely emphasize balanced hybrid strategies that combine physics-based simulation with data-driven approaches. In this evolving paradigm, simulation continues to function not only as a numerical analysis tool but also as a central framework for understanding and designing complex multiphysics engineering systems. In this context, the framework presented in this chapter demonstrates how physics-based modeling, cross-domain system representation, and simulation-based analysis can be integrated to support the analysis and design of complex engineering systems. The sustainable development of such hybrid frameworks will depend on maintaining a careful balance between data-driven flexibility and physics-based interpretability.

REFERENCES

- Bathe, K.-J. (1996). *Finite element procedures*. Prentice Hall.
- Borutzky, W. (Ed.). (2011). *Bond Graph Modelling of Engineering Systems*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9368-7>

Broenink, J. F. (1999). *Introduction to Physical Systems Modelling with Bond Graphs*.

Brunton, S. L. ., & Kutz, J. Nathan. (2019). *Data-driven science and engineering: machine learning, dynamical systems, and control*. Cambridge University Press.

Brunton, S. L., Proctor, J. L., & Kutz, J. N. (2016). Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 3932–3937. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517384113>

Continuous System Simulation. (2006). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/0-387-30260-3>

Guide: Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002)). (1998). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. <https://doi.org/10.2514/4.472855>

Hazell, P. J., Cowie, A., Kister, G., Stennett, C., & Cooper, G. A. (2009). Penetration of a woven CFRP laminate by a high velocity steel sphere impacting at velocities of up to 1875m/s. *International Journal of Impact Engineering*, 36(9), 1136–1142. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.001>

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>

Karnopp, D. C., Margolis, D. L., & Rosenberg, R. C. (2012). *System Dynamics*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118152812>

Němec, I., Trcala, M., Ševčík, I., & Štekbauer, H. (2016). New Formula for Geometric Stiffness Matrix Calculation. *Journal of*

- Applied Mathematics and Physics*, 04(04), 733–748.
<https://doi.org/10.4236/jamp.2016.44084>
- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- Roy, C. J., & Oberkampf, W. L. (2011). A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(25–28), 2131–2144.
<https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.03.016>
- Winsberg, E. (2010). *Science in the Age of Computer Simulation*. University of Chicago Press.
<https://doi.org/10.7208/chicago/9780226902050.001.0001>
- Zhang, N., & Abushaikh, A. S. (2021). An implementation of mimetic finite difference method for fractured reservoirs using a fully implicit approach and discrete fracture models. *Journal of Computational Physics*, 446, 110665.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110665>
- Zienkiewicz, O. C. ., Taylor, R. L. ., & Govindjee, Sanjay. (2025). *The finite element method: its basis and fundamentals*. Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.

BÖLÜM 9

SÜRDÜRÜLEBİLİR MOTOR TEKNOLOJİLERİNDE YAĞ VE YAKIT KATKILARI

MEHMET SİNAN¹

Giriş

Modern içten yanmalı motorlar, artan performans beklentileri, yakıt ekonomisi gereksinimleri ve emisyon standartları doğrultusunda yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu zorlu çalışma ortamı, motor yağları ve yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde ciddi bir yük oluşturmaktadır. Temel (katkısız) yağlar ve saf yakıtlar, oksidasyon direnci, termal kararlılık ve aşınma önleme açısından çoğu zaman bu gereksinimleri tek başına karşılayamamaktadır. Bu nedenle modern motor teknolojilerinde katkı maddeleri vazgeçilmez bir unsur hâline gelmiştir.

Motor yağlarına eklenen kimyasal katkı maddeleri, yağın performansını artırarak motor parçalarının korunmasını sağlamaktadır. Viskozite geliştiriciler, yağın farklı sıcaklıklarda uygun akışkanlık seviyesini korumasına yardımcı olmakta ve soğuk çalıştırma sırasında aşınmayı azaltmaktadır. Deterjan ve dispersan katkılar, yanma sonucu oluşan kurum, tortu ve asidik bileşiklerin motor içinde birikmesini engelleyerek temiz bir çalışma ortamı oluşturmaktadır. Aşınma önleyici ve sürtünme azaltıcı katkılar ise metal yüzeyler arasında koruyucu bir film tabakası oluşturarak mekanik kayıpları en aza indirmekte ve motor ömrünü uzatmaktadır.

Yakıt katkı maddeleri de motor performansı ve çevresel etkiler açısından önemli rol oynamaktadır. Oktan artırıcılar, benzinli motorlarda vuruntu oluşumunu önleyerek daha verimli ve dengeli bir yanma süreci sağlamaktadır. Setan artırıcılar, dizel motorlarda tutuşma gecikmesini azaltarak yanma kalitesini iyileştirmektedir. Temizleyici katkılar, enjektör ve supap yüzeylerinde biriken tortuları gidererek yakıt püskürtme kalitesini artırmakta ve yakıt tüketimini düşürmektedir. Ayrıca korozyon önleyici ve su tutucu katkılar, yakıt sisteminin uzun vadeli dayanıklılığını desteklemektedir.

Katkı maddelerinin çevresel etkileri de günümüzde önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Uygun katkı formülasyonları, yanma verimini artırarak karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde emisyonlarını azaltmaktadır. Bununla birlikte bazı metal bazlı katkıların uzun vadede katalitik konvertörler üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği bilinmektedir. Bu nedenle güncel çalışmalar, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir katkı

Motor teknolojisindeki gelişmeler, daha sıkı toleranslar ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarını beraberinde getirmiştir. Ham petrolün rafine edilmesiyle elde edilen baz yağlar

¹ Öğr. . Gör.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü. ORCID No:0000-0001-5346-6814

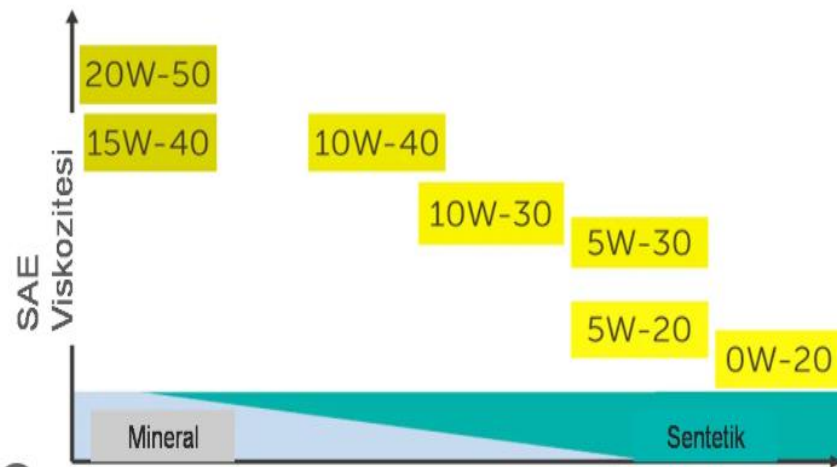
ve yakıtlar, tek başlarına korozyonu önleme, temizleme ve yağlama görevlerini tam olarak yerine getiremezler. Bu noktada devreye giren "katkı maddeleri", baz sıvının özelliklerini iyileştiren veya ona yeni özellikler kazandıran kimyasal bileşiklerdir (Stachowiak & Batchelor, 2014).

İçten yanmalı motorlar, artan performans talepleri, yakıt ekonomisi hedefleri ve giderek sıkılaştan çevre mevzuatları doğrultusunda yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Turboşarjlı sistemlerin yaygınlaşması, doğrudan enjeksiyon teknolojileri ve downsizing uygulamaları, motorların termal ve mekanik yüklerini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, motor yağları ve yakıtların yalnızca temel özelliklerinin yeterli olmamasına yol açmış; katkı maddelerini motor teknolojilerinin vazgeçilmez bir unsuru hâline getirmiştir.

Motor yağları, yalnızca sürtünmeyi azaltmakla kalmayıp aynı zamanda soğutma, sızdırmazlık sağlama, temizlik ve korozyon önleme gibi birçok kritik işlevi yerine getirmektedir. Ancak baz yağlar, yüksek sıcaklıkta oksidasyona uğrama, viskozite kaybı ve tortu oluşumu gibi olumsuzluklara karşı sınırlı dayanım göstermektedir. Bu nedenle çeşitli katkı maddeleri ile desteklenmektedir.

Motor Yağı Katkı Maddeleri

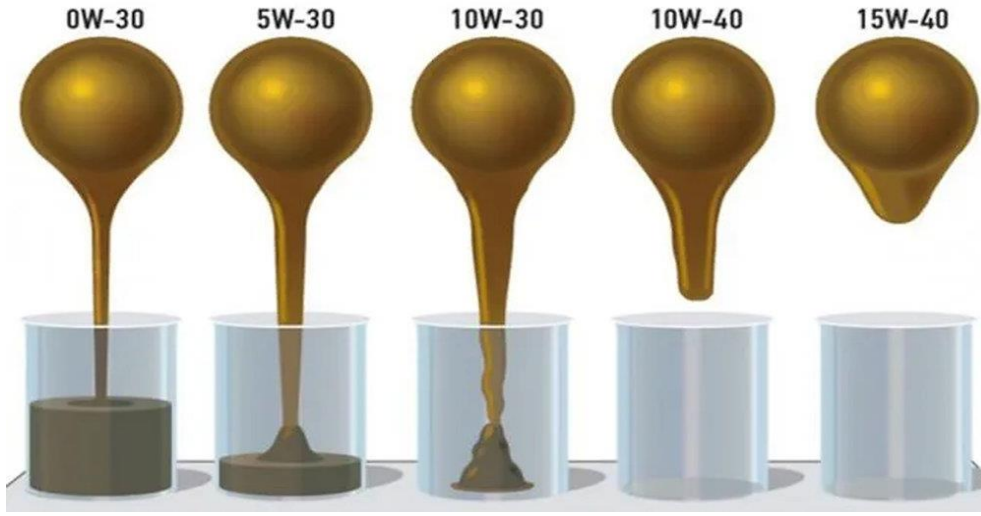
Motor yağı, %75-85 oranında baz yağdan ve %15-25 oranında katkı paketinden oluşur. Bu katkıların temel amacı sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı önlemek ve yağın ömrünü uzatmaktır. Modern içten yanmalı motor yağları, temelde iki ana bileşenden oluşur: baz yağ (base oil) ve katkı maddeleri (additives). Motor yağı formülasyonu, tipik olarak %75–85 oranında baz yağ ve %15–25 oranında katkı paketinden meydana gelir. Bu oranlar, katkı paketinin motor yağının performansını iyileştirmek ve motor parçalarını korumak için kritik önemde olduğunu göstermektedir. Bu oranlar çeşitli literatürde yaklaşık %75–90 aralığında verilmektedir; motor yağı üreticileri formülasyonlarını motor yüküne ve uygulama tipine göre optimize ederler (ör. yaklaşık %80 baz yağ ve %20 katkı maddesi) .



Şekil1: Yağ numaralarına göre yağ yapısı

Vizkozite İndeksi Geliştiriciler (Viscosity Index Improvers - VII)

Yağın sıcaklık değişimlerine karşı direncini artırır. Polimer yapılı bu maddeler, yüksek sıcaklıkta genişerek yağın çok incelmesini engeller. Rudnick (2017)'e göre, bu polimerler çok dereceli (örneğin 5W-30) yağların üretilmesini mümkün kılan temel bileşendir.



Şekil2: Motor yağ numaralarına göre vizkosite yapısı

Motor yağlarının performansını belirleyen temel özelliklerden biri viskozite indeksidir (VI). Viskozite indeksi, yağın viskozitesinin sıcaklık değişimine olan duyarlılığını gösterir; yüksek VI değeri, viskozitenin sıcaklıkla daha az değiştiği anlamına gelir (Wikipedia). Viskozite indeksi geliştiriciler (viscosity index improvers – VII’ler) bu özelliği kontrol etmeye yarayan yüksek moleküler ağırlıklı polimer katkılarıdır.

Polimer yapılı VII’ler soğuk ve sıcak koşullarda farklı davranış sergilerler. Düşük sıcaklıklarda polimer zincirleri moleküler olarak daha derli toplu ve çekik bir konformasyon sergiler; bu durumda polimerin baz yağın akışkanlığı üzerine etkisi sınırlıdır, bu da yağın soğukta yeterli akışkanlıkta kalmasını sağlar. Sıcaklık arttıkça, polimer molekülleri özgül hacimlerini artırarak genişler ve yağ molekülleri ile daha büyük etkileşim yüzeyleri oluşturur; bu da yüksek sıcaklıklarda yağın gereğinden fazla incelmesinin önlenmesine yardımcı olur (VI geliştirici polimerler sıcaklıkla şişer).

Bu “akıllı” mekanizma sayesinde motor yağı, tek bir formülasyonla hem soğukta kolay pompalanabilir hem de sıcaklık arttığında yeterli yağlama filmi kalınlığını koruyabilir. Böylece çok dereceli yağlar (örneğin SAE 5W-30) üretmek mümkün olur; bu yağlar hem düşük sıcaklıkta “5W” olarak akışkan, hem de çalışma sıcaklığında “30” viskozitesine sahip olacak şekilde formüle edilir (soğuk ve sıcak performansı aynı anda sağlar).

Rudnick (2017) tarafından derlenen *Lubricant Additives: Chemistry and Applications* gibi kapsamlı kaynaklarda, VII’lerin polimer yapısının ve moleküler özelliklerinin yağın viskozite-sıcaklık davranışını düzenlemedeki kritik rolü açık olarak vurgulanmaktadır. Bu çalışmada, polimerik katkıların motor yağının viskozite indeksini artırarak çok dereceli yağların geliştirilmesinde temel bileşen oldukları ifade edilmektedir (Rudnick, 2017). Polimer yapılı VI geliştiriciler tipik olarak olefin kopolimerleri, polimetakrilatlar ve hidrojenli styren-diye bazlı polimerler gibi yüksek moleküler ağırlıklı organizmalardır ve moleküler yapılarının sıcaklıkla değişen viskoziteye adaptasyon sağlaması, bu katkıların etkisini belirler.

Deterjanlar ve Dağıtıcılar (Detergents and Dispersants)

Yanma sonucu oluşan kurum, asit ve çamurun metal yüzeylere yapışmasını engellerler.

- Deterjanlar: Genellikle kalsiyum veya magnezyum sülfonat içerirler ve asitleri nötralize ederler.
- Dağıtıcılar: Katı parçacıkları askıda tutarak (süspansiyon) yağ filtresine taşınmasını sağlarlar (Spikes, 2015).

Yanma süreci sırasında yakıt ve yağın yüksek sıcaklıkta parçalanması sonucu kurum (is), asidik bileşikler ve çamur (sludge) oluşur. Bu yanma yan ürünleri, özellikle piston, segman, silindir cidarı ve yatak yüzeyleri gibi metal bileşenlere yapışarak aşınma, korozyon ve performans kayıplarına neden olabilir. Bu olumsuz etkileri önlemek amacıyla motor yağlarında deterjan ve dağıtıcı (dispersant) katkı maddeleri kullanılır.



Şekil 3: Yanma sonucu oluşan motor içi kurum

Deterjan katkıları, genellikle kalsiyum veya magnezyum bazlı sülfonatlar, fenatlar ve salisilatlar içerir. Bu katkıları, yanma sonucu oluşan sülfürik ve nitrik asit gibi asidik bileşiklerini nötralize ederek yağın toplam baz numarasını (TBN) korur. Böylece metal yüzeylerde korozyon oluşumu engellenir ve motor parçalarının temiz kalması sağlanır. Ayrıca deterjanlar, yüksek sıcaklıklarda metal yüzeylere yapışma eğiliminde olan tortuların çözünmesine yardımcı olarak motor içi temizliği destekler (Spikes, 2015).

Dağıtıcı katkıları ise genellikle kül oluşturmeyen polimerik bileşiklerdir ve temel görevleri, kurum ve diğer katı yanma artıklarını yağ içerisinde süspansiyon halinde tutmaktır. Bu sayede parçacıklar birbirleriyle birleşerek çamur veya tortu oluşturamaz ve yağ devridaimi sırasında yağ filtresine taşınarak sistemden uzaklaştırılır. Dağıtıcıların etkinliği, özellikle dizel motorlarda ve uzun yağ değişim aralıklarında kritik öneme sahiptir (Spikes, 2015).

Aşınma Önleyiciler (Anti-wear Agents)

Aşınma önleyici katkı maddelerinin en bilinen ve yaygın kullanılan örneği Çinko Dialkilditiyofosfat (ZDDP) bileşiğidir. ZDDP, motor yağlarında hem aşınma önleyici (anti-wear) hem de antioksidan özellikleri nedeniyle uzun yıllardır kullanılmaktadır. Özellikle supap mekanizması, kam mili, segmanlar ve yataklar gibi yüksek temas basıncına maruz kalan motor parçalarının korunmasında kritik bir role sahiptir.

ZDDP, metal yüzeyler arasında doğrudan metal-metal temasının gerçekleştiği sınır yağlama koşullarında, yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerek mikroskobik ölçekte camsı-fosfat yapılı bir tribofilm oluşturur. Bu koruyucu film tabakası, kayma sırasında kendini yenileyebilen bir yapıya sahiptir ve yüzeyler arasındaki sürtünmeyi ve aşınmayı önemli ölçüde azaltır. Böylece motor bileşenlerinin servis ömrü uzatılır ve mekanik kayıplar minimize edilir (Spikes, 2004).



Şekil 4: Pistonlarda oluşan aşınmalar

Ayrıca ZDDP'nin termal olarak bozunması sonucunda oluşan fosfor ve kükürt içeren bileşikler, metal yüzeylerde enerji sönmüleyici bir tabaka oluşturarak adezif aşınma ve yüzey yırtılmalarını önler. Bununla birlikte, yüksek fosfor içeriğinin egzoz sonrası arıtma sistemleri (özellikle katalitik konvertörler) üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmesi nedeniyle, modern motor yağlarında ZDDP miktarı emisyon regülasyonları doğrultusunda sınırlandırılmaktadır (Totten, 2017).

Yakıt Katkı Maddeleri

Yakıt katkıları, yanma verimliliğini artırmak, yakıt sistemini temiz tutmak ve motor performansını korumak amacıyla benzinli ve dizel motorlarda yakıtı ilave edilen kimyasal bileşiklerdir. Bu katkıları; enjektörler, emme supapları, yanma odası ve yakıt hatlarında biriken tortu, reçine ve karbon esaslı kalıntıların oluşumunu önleyerek sistemin temiz kalmasını sağlar.

Yakıt katkılarının önemli bir grubu olan deterjan katkıları, özellikle enjektör uçlarında ve emme supaplarında biriken karbon tortularını çözerek yakıtın daha iyi atomize olmasına katkı sağlar. Daha homojen yakıt-hava karışımı elde edilmesi, yanma sürecinin daha kontrollü gerçekleşmesine ve özgül yakıt tüketiminin azalmasına yardımcı olur. Bu durum aynı zamanda CO ve HC emisyonlarının düşürülmesini sağlar (Heywood, 2018).



Şekil 5: Hava yakıt karışımından önce motor girişinde oluşan kurum

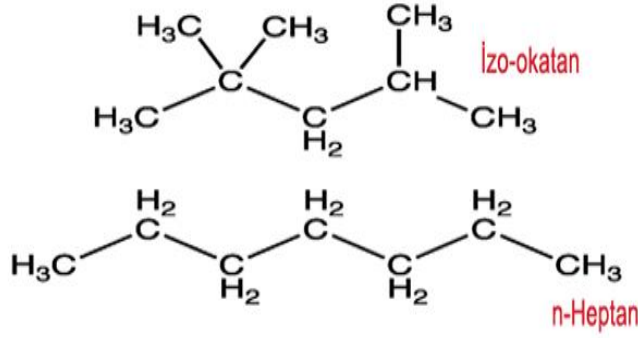
Setan sayısı artırıcı katkıları (dizel yakıtlarda), tutuşma gecikmesini azaltarak yanmanın daha erken ve düzgün başlamasını sağlar. Böylece motor gürültüsü azalır, soğuk çalıştırma performansı iyileşir ve partikül madde (PM) oluşumu sınırlandırılır. Benzer şekilde oktan sayısı artırıcı katkıları ise benzinli motorlarda vuruntu riskini azaltarak motorun daha yüksek sıkıştırma oranlarında güvenli çalışmasına olanak tanır (Speight, 2020).

Bunun yanında korozyon inhibitörleri, su tutucu (demulsifier) katkıları ve antioksidanlar, yakıt sistemindeki metal yüzeyleri korur, yakıtın oksidatif bozulmasını geciktirir ve depolama süresince yakıt kalitesinin korunmasını sağlar. Tüm bu katkı türleri birlikte değerlendirildiğinde, yakıt katkıları motorun uzun ömürlü, temiz ve verimli çalışmasında önemli bir rol üstlenmektedir.

Oktan ve Setan Artırıcıları

Benzinli motorlarda vuruntu (knocking) olgusunun önlenmesi amacıyla oktan sayısı artırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Vuruntu, sıkıştırma strokunun sonunda yakıt-hava karışımının kontrolsüz ve kendiliğinden tutuşması sonucu ortaya çıkar ve silindir içinde ani basınç yükselmelerine neden olarak motor bileşenlerinde mekanik zorlanma, güç kaybı ve uzun vadede hasar oluşturur. Oktan sayısı artırıcı katkıları, yakıtın oto-tutuşma direncini yükselterek yanmanın kontrollü ve buji ateşlemesine bağlı şekilde gerçekleşmesini sağlar. Bu sayede motor daha yüksek sıkıştırma oranlarında güvenli biçimde çalışabilir ve termodinamik çevrim verimi (özellikle Otto çevrimi) olumlu yönde etkilenir (Guibet, 1999).

Dizel motorlarda ise yanma süreci, yakıtın silindir içine püskürtülmesiyle başlayan kendiliğinden tutuşma prensibine dayanır. Bu bağlamda, dizel yakıtın setan sayısı, yakıtın tutuşma eğilimini ve tutuşma gecikme süresini belirleyen temel bir parametredir. Setan artırıcı katkıları, yakıtın kimyasal reaktivitesini yükselterek tutuşma gecikmesini kısaltır, böylece yanma daha erken ve düzenli başlar. Tutuşma gecikmesinin azalması; basınç artış hızını düşürerek motor gürültüsünü sınırlar, daha dengeli bir ısı salınımı sağlar ve dizel çevriminin etkinliğini artırır (Guibet, 1999).



Şekil 6: Oktan Setan bağlantı yapısı

Her iki motor tipinde de oktan ve setan sayısını iyileştiren katkıları, yanma fazının krank mili açısına daha uygun bir zamanlamada gerçekleşmesini sağlayarak maksimum silindir basıncının ideal noktaya yaklaşmasına katkıda bulunur. Bu durum, özgül yakıt tüketiminin azalmasına, mekanik kayıpların düşmesine ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesine olanak tanır. Dolayısıyla oktan ve setan artırıcı katkıları, yalnızca motor koruması açısından değil, aynı zamanda motorun termodinamik verimliliğini doğrudan etkileyen kritik yakıt parametreleri olarak değerlendirilmektedir.

Tortu Kontrol Katkıları (Deposit Control Additives)

Yakıt sisteminde kullanılan yakıt katkıları ve deterjan özellikli bileşenler, enjektörler ve emme valfleri üzerinde oluşan karbon ve reçinemi tortuların oluşumunu önlemede önemli rol oynar. Bu tortular, özellikle düşük kaliteli yakıt kullanımı, kısa mesafeli sürüşler ve eksik yanma koşulları sonucunda zamanla birikerek yakıt sisteminin verimli çalışmasını olumsuz etkiler.

Enjektörlerde karbon birikmesi, yakıtın püskürtme karakteristiğini bozarak damlacık çapının büyümesine ve püskürtme açısının daralmasına neden olur. Bu durum, silindir içerisindeki yakıt-hava karışımının homojenliğini azaltır ve yanma sürecinin düzensiz gerçekleşmesine yol açar. Sonuç olarak özgül yakıt tüketimi artar, motor performansı düşer ve karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) emisyonları yükselir (Heywood, 2018).

Benzer şekilde emme valflerinde oluşan karbon birikintileri, hava akış kesitini daraltarak silindire giren hava miktarını sınırlar. Bu durum volumetrik verimi düşürür ve özellikle doğrudan enjeksiyonlu benzinli motorlarda ciddi performans ve emisyon problemlerine yol açabilir. Düzenli olarak kullanılan yakıt katkıları, bu tür birikintilerin çözünmesini sağlayarak enjektörlerin tasarlanan püskürtme formunda çalışmasına ve motorun daha temiz, verimli ve çevreci bir şekilde işletilmesine katkı sağlar (Speight, 2020).

Korozyon Önleyiciler ve Demülsifikatörler

Yakıt deposunda ve hatlarında paslanmayı önlerler. Demülsifikatörler ise yakıtı karışan suyun ayrışmasını sağlayarak suyun motora zarar vermesini engeller.

Yakıt sistemlerinde kullanılan korozyon inhibitörü katkıları, yakıt deposu, yakıt hatları, pompa ve enjektör gibi metal bileşenlerde paslanma ve oksidatif korozyon oluşumunu önlemek

amacıyla geliştirilmiştir. Yakıt içerisinde çözünebilen bu katkıları, metal yüzeylerde ince bir koruyucu film tabakası oluşturarak oksijen, nem ve asidik bileşiklerin metal yüzeyle temasını sınırlar. Özellikle biyoyakıt içeren benzin ve dizel yakıtlar, higroskopik özellikleri nedeniyle su tutma eğiliminde olduğundan, korozyon riski artmakta ve bu katkıların önemi daha da belirgin hale gelmektedir (Speight, 2020).



Şekil 7: Motor içi oluşan korozyon

Demülsifikatör katkıları ise yakıt içerisinde karışan suyun yakıt fazı içerisinde dağılmış (emülsiyon halinde) kalmasını önleyerek, suyun ayrışmasını ve çökmesini sağlar. Böylece serbest suyun yakıt filtresinde veya su ayırıcı sistemlerde tutulması mümkün olur. Yakıtlarla birlikte motora ulaşan su; enjektör iğnelerinde aşınmaya, yanma düzensizliklerine, kavitasyona ve düşük sıcaklıklarda donma riskine neden olabileceğinden, demülsifikatörler motor güvenliği açısından kritik bir rol üstlenir. Ayrıca suyun yakıt içerisinde çözünmeden ayrılması, mikrobiyal büyümenin ve buna bağlı çamur oluşumunun da önüne geçer (Totten, 2017).

Çevresel Etkiler ve Gelecek Perspektifi

Katkı maddeleri sadece motoru korumakla kalmaz, aynı zamanda tam yanmayı teşvik ederek karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarını azaltır. Ancak, ZDDP gibi fosfor ve sülfür içeren bazı yağ katkılarının, araçların katalitik konvertörlerine zamanla zarar verebildiği bilinmektedir (Spikes, 2015). Bu nedenle, güncel araştırmalar "Düşük SAPS" (Düşük Sülfat Külü, Fosfor ve Sülfür) içeren biyobozunur katkı maddelerine odaklanmaktadır.

Katkı maddeleri, yalnızca motor bileşenlerini aşınma, korozyon ve tortu oluşumuna karşı korumakla kalmaz; aynı zamanda yanma sürecini iyileştirerek tam yanmayı teşvik eder. Özellikle deterjan, dağıtıcı ve yanma iyileştirici özelliklere sahip katkıları sayesinde yakıt-hava karışımı daha homojen hale gelir ve yanma odasında oluşan eksik yanma ürünleri azalır. Bu durum, karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında kayda değer düşüşler sağlanmasına katkıda bulunur. Tam yanmanın desteklenmesi, hem yakıt verimliliğini artırmakta hem de egzoz gazlarının çevresel etkisini azaltmaktadır (Heywood, 2018).

Bununla birlikte, motor yağlarında yaygın olarak kullanılan Çinko Dialkilditiyofosfat (ZDDP) gibi fosfor ve sülfür içeren katkı maddelerinin, uzun vadede araçların egzoz sonrası arıtma sistemleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildiği bilinmektedir. ZDDP'nin yanma ve yağ tüketimi sonucu ortaya çıkan fosfor bileşikler, katalitik konvertör yüzeyinde birikerek aktif katalizör bölgelerini kaplar ve bu durum katalitik zehirlenme (catalyst poisoning) olarak

adlandırılır. Sonuç olarak katalitik konvertörün CO, HC ve NOx dönüşüm verimi düşer ve emisyon kontrol performansı zamanla zayıflar (Spikes, 2015).

Bu olumsuz etkiler nedeniyle, özellikle Euro 6, Euro 7 ve benzeri sıkı emisyon regülasyonlarının yürürlüğe girmesiyle birlikte motor yağı formülasyonlarında önemli bir dönüşüm yaşanmıştır. Güncel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar, “Düşük SAPS” (Low Sulphated Ash, Phosphorus and Sulphur) içeriğine sahip katkı maddelerine odaklanmaktadır. Düşük SAPS teknolojisi; katalitik konvertörler ve dizel partikül filtreleri (DPF) ile uyumlu olacak şekilde, kül oluşturmeyen veya biyobozunur katkıların kullanımını teşvik etmektedir. Bu sayede hem motorun aşınma direnci korunmakta hem de egzoz sonrası arıtma sistemlerinin ömrü uzatılmaktadır (Totten, 2017).

Ayrıca biyobozunur ve çevre dostu katkı maddeleri, yağın çevresel etkisini azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlar. Bu yaklaşım, modern motor teknolojilerinde performans, dayanıklılık ve çevresel sorumluluk arasındaki dengeyi sağlanmasından açısından kritik bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç

Motor yağları ve yakıtlara eklenen katkı maddeleri, modern içten yanmalı motorların yüksek performans, uzun ömür ve düşük emisyon hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde yer alan bulgular, uygun katkı teknolojilerinin motor verimliliğini artırdığını, bakım maliyetlerini azalttığını ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda katkı maddelerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar, otomotiv sektörünün geleceği açısından büyük önem taşımaktadır.

Motor yağları ve yakıtlardaki katkı maddeleri, otomotiv mühendisliğinin görünmez kahramanlarıdır. Sürtünmeyi azaltarak enerji tasarrufu sağlarlar, parçaları temiz tutarak bakım maliyetlerini düşürürler ve emisyonları kontrol altında tutarak çevreye katkıda bulunurlar. Gelecekte, elektrikli araçlara geçiş olsa bile, hibrit sistemler ve aktarma organları için bu kimyasalların gelişimi önemini koruyacaktır.

Motor yağlarının geniş bir sıcaklık aralığında etkin biçimde çalışabilmesi, büyük ölçüde bu polimerik viskozite indeks geliştiricilerin varlığına ve performansına bağlıdır. Bu katkılar, motorun hem düşük sıcaklıklarda kolay çalıştırılmasını hem de yüksek sıcaklıklarda yeterli yağlama filmi kalınlığı sağlayarak aşınmayı minimize etmesini sağlar.

Deterjan ve dağıtıcı katkıların birlikte çalışması sayesinde motor yağları; metal yüzeyleri temiz tutar, aşınmayı azaltır, korozyonu önler ve motorun uzun süre verimli bir şekilde çalışmasına katkı sağlar.

ZDDP, motor yağlarında aşınmaya karşı en etkili katkı maddelerinden biri olup, uygun oranlarda kullanıldığında motorun kritik parçalarının korunmasını sağlayarak performans ve dayanıklılığı artırmaktadır.

Korozyon inhibitörleri ve demülsifikatör katkıları, yakıt sisteminin uzun ömürlü, güvenli ve verimli çalışmasını sağlayarak bakım maliyetlerini düşürür ve motor arızalarının önlenmesine katkıda bulunur.

Motor yağları ve yakıt sistemlerinde kullanılan katkı maddeleri, modern içten yanmalı motorların performans, dayanıklılık ve çevresel uyumluluk gereksinimlerini karşılamada

vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Aşınma önleyici katkılar arasında öne çıkan Çinko Dialkilditiyofosfat (ZDDP), özellikle yüksek temas basıncı ve sınır yağlama koşullarında metal yüzeyler üzerinde koruyucu bir tribofilm oluşturarak kritik motor bileşenlerinin aşınmasını etkin biçimde sınırlandırmaktadır. Uygun konsantrasyonlarda kullanıldığında, ZDDP motorun mekanik kayıplarını azaltmakta, çalışma güvenilirliğini artırmakta ve motorun servis ömrünü uzatarak uzun vadeli performans sürekliliği sağlamaktadır.

Korozyon inhibitörleri ve demülsifikatör katkıları, yakıt sisteminin yapısal bütünlüğünün korunmasında belirleyici bir etkiye sahiptir. Korozyon inhibitörleri metal yüzeyleri oksidatif ve elektrokimyasal bozulmaya karşı korurken, demülsifikatörler yakıt içerisinde karışan suyun ayrışmasını sağlayarak suyun enjektörler, pompalar ve yanma odası üzerinde oluşturabileceği mekanik ve kimyasal hasarların önüne geçmektedir. Bu katkıların birlikte çalışması, yakıt sisteminde tortu oluşumunu, paslanmayı ve düzensiz yanmayı azaltarak bakım aralıklarının uzatılmasına, arıza risklerinin düşürülmesine ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Dolayısıyla, hem motor yağı hem de yakıt katkı maddelerinin doğru seçimi ve dengeli formülasyonu; motor verimliliği, emisyon kontrolü ve sistem güvenilirliği açısından kritik bir mühendislik parametresi olarak değerlendirilmeli, özellikle güncel emisyon regülasyonları ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda düşük SAPS ve çevre dostu katkı teknolojilerine yönelim desteklenmelidir.

Kaynaklar

- Guibet, J. C. (1999). *Fuels and engines: Technology, energy, environment*. Éditions Technip.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Lacroix-Andrivet, O., Hubert-Roux, M., Loutelier Bourhis, C., Moualdi, S., & Mendes Siqueira, A. L. (2023). Characterization of base oil and additive oxidation products from formulated lubricant by ultra-high resolution mass spectrometry. *Lubricants*, 11(8), Article 345. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080345>
- Purdue University Extension. (2025, June 24). *Engine oils and their filters*. <https://ag.purdue.edu/departement/extension/ppp/resources/ppp-124.html>
- Rudnick, L. R. (Ed.). (2017). *Lubricant additives: Chemistry and applications* (3rd ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2020). *Fuels, chemicals and energy from biomass*. Elsevier.
- Speight, J. G. (2020). *The chemistry and technology of petroleum* (5th ed.). CRC Press.
- Spikes, H. (2004). The history and mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 17(3), 469–489. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044495.26882.b5>
- Spikes, H. (2015). Friction modifier additives. *Tribology Letters*, 60(1), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0589-z>
- Spikes, H. (2015). The history and mechanisms of lubricant additives. *Tribology Letters*, 60(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0582-7>
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Totten, G. E. (2017). *Handbook of lubrication and tribology: Volume I – Application and maintenance*. CRC Press.
- U.S. Department of Energy. (2015). *Lubricant formulations to enhance engine performance*. OSTI.
- Viscosity index. (n.d.). In *Wikipedia*. Retrieved February 2026, from https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity_index
- Viscosity index improvers. (n.d.). *Top Polymers*. Retrieved February 2026, from <https://www.toppolymers.com/viscosity-index-improvers-viis-why-theyre-the-unsung-hero-of-engine-oils/>
- Viskozite indeksi (VI). (n.d.). *Opet Fuchs Türkiye*. Retrieved February 2026, from <https://www.opetfuchs.com.tr/tr/viskozite-indeksi-vi>

BÖLÜM 10

MICROSTRUCTURAL ENGINEERING OF AL-FE ALLOYS IN ADDITIVE MANUFACTURING: FROM SUSTAINABLE RECYCLING TO HIGH- TEMPERATURE APPLICATIONS

AHMED ALSAKKAF¹

RAHMI ÜNAL²

İRFAN ÜNAL³

Introduction

Aluminum-iron (Al-Fe) alloys have been identified as potential candidates for additive manufacturing (AM) owing to their low density, better thermal stability, and high-temperature behavior as compared to conventional aluminum alloys. While iron is often viewed as an impurity in aluminum, the rapid solidification characteristic of additive manufacturing processes like laser powder bed fusion and directed energy deposition results in a refined microstructure with finely dispersed Al-Fe intermetallics. The presence of these metastable or nano-scale intermetallics results in greater strength, better wear resistance, and greater thermal stability, while mitigating the brittleness typically associated with coarse Fe-rich phases in cast alloys.

¹ Ahmed ALSAKKAF, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orcid: 0000-0001-6692-1310

² Prof. Dr. Rahmi ÜNAL, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5379-5159

³ Öğr. Gör. İrfan ÜNAL, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orcid: 0000-0002-9758-9848

The design of Al-Fe alloys for additive manufacturing includes a broad spectrum of chemical compositions aiming to leverage various phase transformations and strengthening mechanisms. This chapter categorizes these systems into three groups: Binary Al-Fe Systems, Transition Metal (TM) Modifications, and Rare Earth (RE) Modifications.

- **Binary Systems:** The basic category consists of binary Al-Fe alloys comprising near-eutectic compositions such as Al-2.5Fe and hypereutectic compositions such as Al-15Fe. Baseline processing windows and microstructural hierarchies for these alloys have been established (Qi et al., 2020; Wang et al., 2022). The main mechanisms include the formation of the metastable Al_6Fe phase mainly in melt pools (while stable $\theta\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ may persist at melt pool boundaries in hypereutectic compositions) and the formation of nano-sized eutectic structures which are thermally stable up to 300 °C.
- **Transition Metal Modifications:** The introduction of transition metals (Ni, Cr, V, and Mn) to enhance thermal stability and mechanical properties at over 300 °C has been a subject of research. These elements have a low diffusivity in aluminum and change the nature of iron-bearing precipitates. For example, the Al-Fe-V-Si system is capable of reproducing the high-temperature behavior of rapidly solidified AA8009 due to thermally stable silicides. Similarly, Al-Fe-Ni alloys utilize the eutectic Al_9FeNi phase to prevent hot cracking and improve creep resistance. Contrarily, the strengthening of Al-Fe-Cr alloys comes from the formation of icosahedral quasicrystals.
- **Rare Earth and Inoculant Modifications** The third group involves adding rare earth elements like cerium or inoculants like scandium and zirconium. The intermetallic $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ is

highly stable and enables the alloy to resist coarsening at temperatures up to 400 °C due to cerium's strong tendency to bond with aluminum. The presence of scandium and zirconium causes the precipitation of coherent $L1_2$ - $Al_3(Sc,Zr)$ phases, which work synergistically with Fe-rich dispersoids to pin grain boundaries while additionally providing precipitation hardening.

This chapter presents an outline of solidification behavior, microstructural evolution and phase formation of Al–Fe alloys during the AM process and the significance of process parameters on the intermetallic morphology and distribution. The connection between mechanical properties like strength at elevated temperatures and creep resistance with microstructure is discussed. The challenges of printability, cracking susceptibility, and post-processing strategies are also outlined. Overall, Al–Fe alloys are a low-cost and recyclable alloy system with great promise for high-temperature and wear-resistant applications in additive manufacturing.

THE RENAISSANCE OF IRON IN ALUMINUM METALLURGY

The metallurgical narrative of iron (Fe) in aluminum alloys has historically been one of avoidance and mitigation. In the context of conventional casting and wrought processing, iron is ubiquitously categorized as the most detrimental "tramp" element. This

characterization stems from the extremely low equilibrium solid solubility of iron in the aluminum matrix (α -Al), which is less than 0.05 at% at equilibrium. During the relatively slow cooling rates characteristic of traditional casting processes (typically below 100 K/s), solute iron rejected into the interdendritic liquid precipitates as coarse, brittle intermetallic compounds. Specifically, in Al-Si systems, the presence of iron promotes the formation of the monoclinic β -Al₅FeSi phase. As noted by Dong et al. (2022), this phase typically exhibits a coarse, acicular (needle-like) morphology. These platelets act as severe stress concentrators within the microstructure, significantly degrading ductility and fracture toughness. Furthermore, the formation of β -Al₅FeSi phases is associated with porosity formation because they block interdendritic feeding channels during the final stages of solidification.

Consequently, traditional metallurgical strategies have focused on keeping Fe levels to an absolute minimum or neutralizing its effects by adding correctors such as Manganese (Mn), which promotes the formation of the less harmful cubic α -Al(FeMn)Si phase. Nonetheless, the introduction of Laser Powder Bed Fusion (LPBF) has completely changed this paradigm, initiating a “Renaissance of Iron” in aluminum. The LPBF process is based on localized laser melting followed by extremely rapid solidification with cooling rates of 10^4 to 10^7 K/s. As a result of these far-from-equilibrium thermodynamic conditions, the other stable, brittle equilibrium phases that govern cast alloys cannot form. In fact, fast cooling rates trap solute and develop a metastable structure that strengthens rather than embrittles (Fig.1).

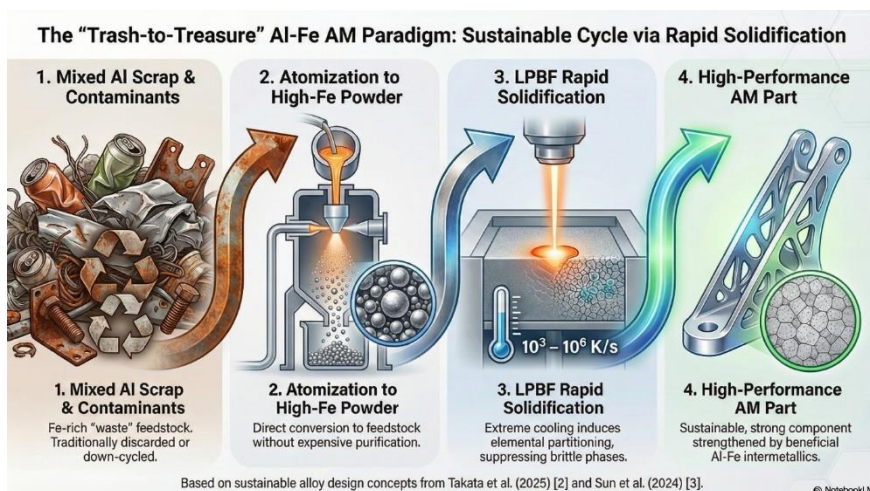
Instances exist where the equivalent equilibrium phase cannot precipitate via the pathway thermodynamically preferred due to kinetic restrictions. In binary alloy systems processed by LPBF, for example, coarse, equilibrium θ -Al₁₃Fe₄ formation is kinetically inhibited in the melt pool interior. This facilitates the replacement of

the equilibrium phase by a non-equilibrium, metastable Al_6Fe or Al_mFe phase, which subsequently precipitates as nanoscale dispersoids or forms ultrafine eutectic networks, for instance. Likewise for Al-Si-Fe systems, rapid solidification inhibits the growth of large $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ needles, favoring the formation of a cellular microstructure whereby iron either remains in the supersaturated $\alpha\text{-Al}$ solid solution or is segregated into sub-micron eutectic boundaries. This evolution from “harmful needles” to “strengthening networks” allows iron to be redefined from a defect to a designed alloying element that improves thermal stability and mechanical strength without the catastrophic loss of ductility observed in casting.

Table 1: Classification of Al-Fe Alloy Families in Additive Manufacturing

Alloy Family	Key Alloying Elements	Primary Strengthening Phases	Target Properties	Key References
Binary Al-Fe	Fe (2.5–15 wt%)	Metastable Al_6Fe , Nano-eutectic $\alpha\text{-Al}/\text{Al}_6\text{Fe}$	Baseline processability, moderate thermal stability	Qi et al. (2020); Wang et al. (2022)
TM-Modified	Ni, Cr, V, Mn, Si	Al_9FeNi , $\text{Al}_{13}(\text{Fe,Cr})_4$, $\text{Al}_{12}(\text{Fe,V})_3\text{Si}$, Icosahedral Quasicrystals	High-temperature strength ($>300\text{ }^\circ\text{C}$), Creep resistance	Ding et al. (2021); Pérez-Prado et al. (2022); Sun et al. (2017)
RE/Inoculant-Modified	Ce, Sc, Zr	$\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$, $\text{L}_{12}\text{-Al}_3(\text{Sc,Zr})$	Castability, coarsening resistance, bimodal grain structures	Park et al. (2023); Wang et al. (2021); Arcieri et al. (2025)

Fig1. Schematic illustration of the "Trash-to-Treasure" upcycling concept for Al-Fe alloys in additive manufacturing. The cycle demonstrates the conversion of iron-contaminated aluminum scrap into high-performance components by leveraging the rapid solidification of Laser Powder Bed Fusion (LPBF) to suppress brittle β -Al₃FeSi phases and promote strengthening metastable phases. Source/Basis: Conceptualized based on the alloy design strategy proposed by Takata et al. (2025) and Wu et al., (2022).



References: Takata et al. (2025) and Wu et al., (2022)

Table 1.2 summarizes the competitive landscape. Al-Fe systems, particularly those modified with small amounts of V or Ce, demonstrate a clear advantage in maximum service temperature ($T_{\max}$), maintaining structural integrity up to 350–400 °C. While their ductility is generally lower than AlSi10Mg, recent developments in grain refinement and alloy design (e.g., Takata et al., 2025; Wu et al., 2022) have begun to close this gap.

Table 1.2: Benchmarking Al-Fe AM Alloys against Commercial Standards

Metric	AlSi10Mg (Standard)	Scalmalloy® (High-End)	Al-Fe Systems (Emerging)
Primary Alloying	Si, Mg	Mg, Sc (>0.6%), Zr	Fe, (Ni/V/Ce)
Feedstock Cost	Low	Very High	Low to Moderate
Sustainability	Moderate (Requires high purity)	High (Lightweighting)	Excellent (Fe-tolerant / Recycling)
Max Service Temp	< 200 °C	~ 250 °C	300 – 400 °C
Yield Strength (RT)	220 – 270 MPa	450 – 520 MPa	191 – 666 MPa
Strengthening Mechanism	Precipitation (Mg ₂ Si)	Grain Refinement (Al ₃ Sc)	Dispersion (Al ₆ Fe / Silicides) & Precipitation (L1 ₂)
Key Reference	Commercial Data	Commercial Data	Tang et al. (2025); Takata et al. (2025)

References: Tang et al. (2025), Takata et al. (2025)

The Sustainability Imperative: "Trash-to-Treasure"

The drive for aluminum-iron alloys is not only driven by mechanical performance, but there is also the need for sustainability. The energy input for the production of primary aluminum is very high, while the recycling of secondary aluminum requires only around 5% of the energy of bauxite smelting. The increasing global demand for aluminum is resulting in the generation of more aluminum scrap. The challenge towards achieving a closed-loop circular economy is the accumulation of impurity elements, mainly iron, which are extremely difficult to eliminate during traditional recycling. In mixed scrap streams, iron contamination is nearly unavoidable as steel bolts, rivets, and shredder technology introduce it. Due to the high cost of conventional purification, the industry faces a major problem for how to use “dirty” scrap without material performance loss.

The constant presence of iron in aluminum scrap has spurred a “recyclable” alloy design philosophy, aimed at creating compositions robust to high levels of iron. Takata et al. (2025) put forth a fresh design framework for sustainable Al-Fe multi-elemental alloys suitable for LPBF. At the heart of this strategy is the control of elemental partitioning during fast solidification. By choosing suitable alloying elements depending upon their liquidus transients, partition coefficients, and solubility limits, it is possible to ensure the desired impurity partitions to a desired microstructural constituent where it is beneficial. The non-equilibrium solidification of the melt pool involves separating the elements in the solid and liquid phases and this is the basis of this process.

Elements that segregate into the liquid phase, e.g., Fe, Cu, and Mn, form a metastable eutectic network (e.g., Al₆Fe) which provides eutectic strengthening. On the other hand, the elements which partition to the grains, like Ti, provide solid-solution strengthening and grain refinement. The discrete partitioning behavior permits the development of a microstructure consisting of a ductile α -Al matrix and a hard thermally stable eutectic network using feedstock which otherwise goes to waste as low-grade scrap. In addition, Sun et al. (2025) demonstrated this approach by making an Al-Fe-Mo-Si-Zr alloy system that accommodates iron intrusion. Keeping a set atomic ratio of $(\text{Fe}+\text{Mo})/\text{Si} = 3$, they effectively promoted the formation of a beneficial BCC Al₁₂(Fe,Mo)₃Si phase during LPBF. This phase is stable when exposed to thermal influences and possesses a high strength at elevated temperatures (up to 300 °C), and practically makes the iron impurity a significant strengthener. The ability for upcycling signifies that Al-Fe alloys may serve as a benchmark for sustainable additive manufacturing.

FUNDAMENTALS OF SOLIDIFICATION IN AL-FE SYSTEMS

The laser powder bed fusion (LPBF) processing of aluminum-iron (Al-Fe) alloys creates a thermodynamic and kinetic environment considerably different from conventional casting. LPBF processes exhibit extreme thermal gradients and rapid solidification rates, resulting in a specific phase selection hierarchy and microstructural heterogeneity. This part explains the physical principles of these changes that govern phenomena such as the suppression of equilibrium phases, extension of solid solubility limits, and microstructural variation in the melt pool.

Thermodynamics of Rapid Solidification

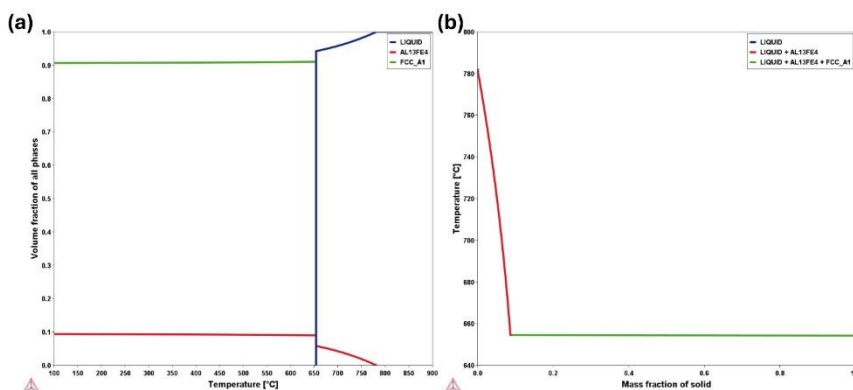
The solidification of Al-Fe alloys in LPBF is controlled by non-equilibrium thermodynamics because of cooling rates in the range of 10^4 to 10^7 K/s. In conventional casting, the Al-Fe system is characterized by the development of the θ -Al₁₃Fe₄ phase (monoclinic, space group C2/m) in equilibrium. This phase is brittle, usually creating coarse acicular platelets which seriously impair the mechanical properties.

Equilibrium vs. Non-Equilibrium Phase Selection

The primary deviation from equilibrium in LPBF Al-Fe alloys is the kinetic displacement of the stable θ -Al₁₃Fe₄ phase by metastable phases such as Al₆Fe (orthorhombic, oC28) or Al_mFe. As detailed by (Wu et al., 2022) and (Wang et al., 2020), the formation of these phases is highly competitive and depends heavily on the degree of undercooling (ΔT) achieved at the solidification front. At lower solidification velocities, the growth of the equilibrium θ -Al₁₃Fe₄ phase requires a smaller undercooling compared to the metastable Al₆Fe phase. However, as the solidification velocity increases, which is characteristic of the rapid scan speeds in LPBF

($v > 100$ mm/s, far exceeding the critical velocity for phase suppression), the undercooling required for the growth of θ -Al₁₃Fe₄ rises much more steeply than that for Al₆Fe. Consequently, once a critical velocity is reached, the growth temperature of the metastable Al₆Fe phase exceeds that of the stable phase, resulting in the complete kinetic suppression of θ -Al₁₃Fe₄. This phenomenon perfectly explains why LPBF can produce tough, crack-free components from compositions that are otherwise highly brittle in their cast state.

Fig2 Calculated solidification property diagrams for the binary Al-5Fe (wt%) alloy using Thermo-Calc software. (a) Solidification path under equilibrium cooling conditions, predicting the early formation of the coarse, stable θ -Al₁₃Fe₄ phase; (b) Solidification path under Scheil-Gulliver non-equilibrium cooling conditions, demonstrating the kinetic suppression of the equilibrium phase and the extension of the freezing range characteristic of rapid solidification.



Solute Trapping and Supersaturation

Solute trapping is a solidification phenomenon which is probably the most critical thermodynamic effect in LPBF

processing. At the eutectic temperature, approximately 0.052 wt% (0.025 at%) represents the equilibrium solid solubility of iron in aluminum. As a result of slow cooling, the solidifying α -Al interface almost completely rejects Fe, which segregates into the liquid and forms intermetallics. However, the high interface speeds inherent to LPBF (in the range of ~ 0.01 – 1 m/s) may exceed the diffusivity of solute atoms in the melt and trap Fe within the fcc-Al matrix.

Research conducted by Sun et al. (2025), which included quantitative experimentation on Al-Fe-Mo-Si-Zr alloys, reported that the as-built α -Al matrix had an Fe concentration of around 0.9 at%, which is significantly higher than the equilibrium solubility limit of 0.025 at%. This increased solid solubility causes large lattice distortion and solid-solution strengthening. In a similar study, Wu et al. (2022) observed an average Fe concentration of 0.45 wt% in the α -Al matrix of an LPBF Al-2Fe alloy. This state of supersaturation is thermodynamically unstable, and heating the system during the deposition of individual layers or during post-process heat treatment provides the driving force for the precipitation of nano-sized Fe-rich dispersoids. The strengthening measures covered in the coming chapters are based on this effect.

Microstructural Hierarchy in LPBF

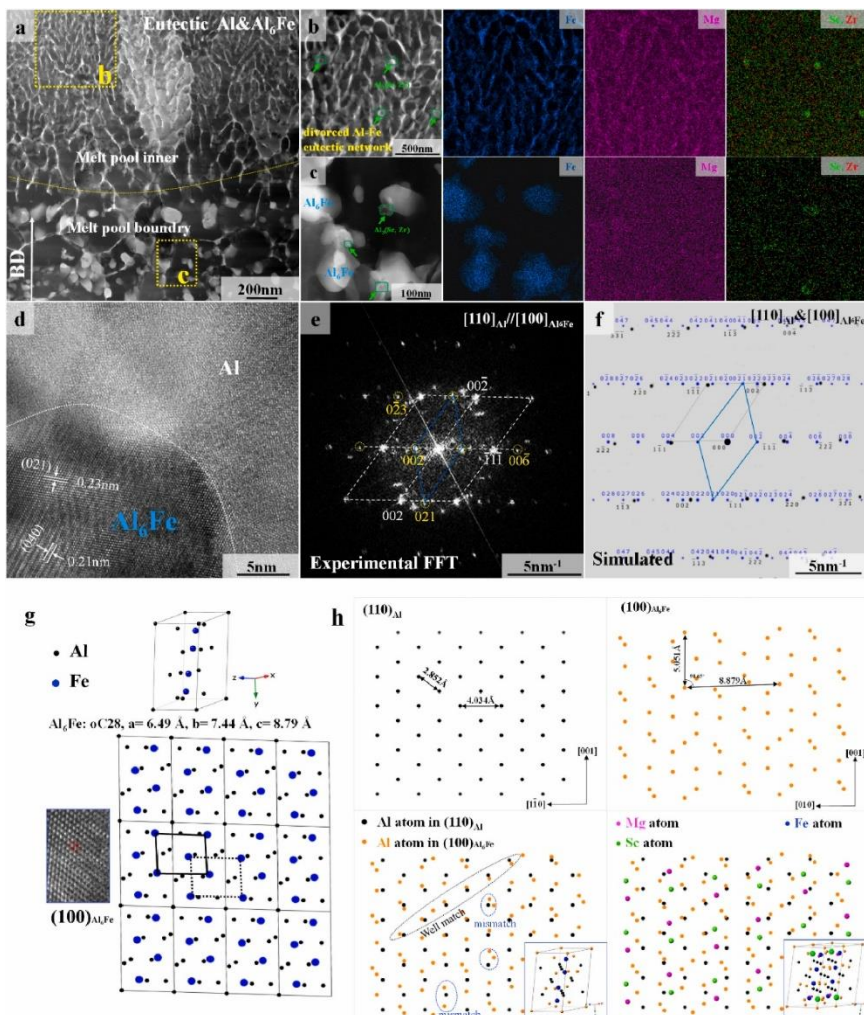
The LPBF microstructure of Al-Fe alloys is neither uniform nor random, but hierarchical and dictated by the local thermal history of the melt pool. Laser-powder interaction forms a semi-circular melt pool characterized by steep thermal gradients (G) and variable solidification growth rates (R), respectively.

Melt Pool Dynamics and Constitutional Supercooling

The morphology of solidification is governed by the ratio G/R , whereas the scale of the microstructure is controlled by the cooling rate ($G \times R$). At the melt pool boundary (MPB), the thermal gradient G is at its maximum, but the growth rate R approaches zero.

As solidification proceeds toward the melt pool centerline, G decreases and R increases drastically. This fluctuation causes Constitutional Supercooling ahead of the solidification front. In Al-Fe alloys, the rejection of solute Fe into the liquid forms a solute-rich boundary layer. When the actual temperature of the liquid falls below its liquidus temperature (modified by the solute concentration), the planar solidification front destabilizes, giving rise to a cellular-dendritic solidification mode that characterizes LPBF microstructures. In this type of cellular structure, the cell core is composed of primary α -Al (usually supersaturated), and the cell walls are enriched with segregated solute elements, such as Fe, or Fe, Mg, and Sc in more complex systems, alongside intercellular precipitates. Y. Wang et al. (2024) identified these walls as a continuous network of metastable Al_6Fe or eutectic phases separating the α -Al channels.

Fig. 3. (a) STEM micrograph showing typical FG and eutectic microstructure at MPB. HAADF image and associated STEM-EDS hypermap of (b) eutectic structure and (c) equiaxed grains. (d) Atomic resolution TEM micrograph of α -Al and Al_6Fe phases, with corresponding (e) fast Fourier transform (FFT) image and (f) simulated SADP; (g) Crystal structure of Al_6Fe and atomic arrangement viewed from (002) Al_6Fe plane; (h) Al atomic arrangement in (1 1 1)Al and (002) Al_6Fe plane and the occupancy of Sc and Mg atoms



Reference: Wang et al. 2024

Zonal Breakdown: FZ, HAZ, and RBZ

The layer-by-layer nature of LPBF engenders a complex thermal history in which material is repeatedly melted, solidified, and reheated by subsequent passes. Sun et al. (2015, 2017) extensively classified the discrete microstructural zones developed in Al-Fe-V-Si alloys, providing a rigorous model that is broadly applicable to Al-Fe systems:

- **Fusion Zone (FZ):** FZ, HAZ, and RBZ The layer-by-layer nature of LPBF results in a complex thermal history where material is melted, solidified, and then reheated by subsequent passes. Sun et al. (2015, 2017) provided a rigorous classification of the distinct microstructural zones formed in Al-Fe-V-Si alloys, which serves as a general model for Al-Fe systems:
- **Heat Affected Zone (HAZ):** This zone represents the region of the previously solidified layer that is reheated by the deposition of a new layer but not remelted. The temperatures here are sufficient to trigger solid-state phase transformations. Sun et al. (2015, 2017) noted that in the HAZ, the ultrafine cellular network can break down, leading to the precipitation of fine spherical dispersoids (e.g., $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$) embedded in the α -Al matrix, effectively undergoing an intrinsic aging treatment.
- **Remelting Border Zone (RBZ) / Melt Pool Boundary (MPB):** corresponds to the overlap between adjacent tracks or layers. Crucially, the bottom of the melt pool experiences the lowest growth rate (R), resulting in the lowest local cooling rate, estimated by Sun et al. (2015) at 10^3 K/s. Qi et al. (2022) and Sun et al. (2015) stressed that this minimized cooling rate enables heavy solute partitioning and the creation of coarser, frequently equilibrium phases. For example, in Al-Fe-V-Si alloys, coarse rectangular Al_mFe particles (Sun et al., 2015) or θ - $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ particles (Zheng et al., 2015) measuring 0.2 to 0.8 μm are formed in this area, which starkly contrasts with the nanoscale dispersoids found in the FZ.

BINARY AL-FE ALLOYS: THE BASELINE

Hypoeutectic and Near-Eutectic Alloys (Al-2.5Fe)

The Al-2.5 wt% Fe (Al-2.5Fe) alloy may be regarded as a reference system for the additive manufacturing of aluminum-iron alloys. Typically, this alloy has been characterized as a hypoeutectic composition under equilibrium conditions, as the eutectic point lies at around 1.8 wt% Fe. However, the rapid solidification rates involved in LPBF shift the coupled zone. As a result, the composition can behave like a near-eutectic or "anomalous eutectic" system. The processing windows, defect mechanisms and resulting microstructural architectures that form the baseline for Al-Fe AM alloys are reviewed.

Processing Windows: Laser Power and Scan Speed Optimization

In order to achieve successful densification of Al-2.5Fe through LPBF, the energy input needs to be carefully controlled so that melt fluidity is balanced with rapid solidification which is needed to prevent occurrence of the equilibrium phases. The alloy processing map was produced for this alloy by Qi et al. (2020) by varying the laser power (P) and scan speed (v). Usually, a substantial amount of energy must be supplied to attain relative densities that exceed 99%. They concluded that the samples would be fully dense if the parameters are optimized with $P = 204 \text{ W}$ and $v \leq 800 \text{ mm/s}$. These parameters are often related to volumetric energy density through the relationship: $E = P / (v \cdot h \cdot t)$, where h is hatch spacing and t is layer thickness. Qi et al. (2020) however proposed that for the Al-2.5Fe system the $P \cdot v^{-1/2}$ metric, based on the deposited energy density model (ΔH), gives a more accurate threshold for densification than the volumetric energy density model. The findings suggest that to eradicate process-induced porosity, ensuring a relative density of 99.8%, a $P \cdot v^{-1/2}$ of greater than $6.5 \text{ W mm}^{-1/2} \text{ s}^{1/2}$

is needed. Subsequently, a study that looked at tensile performance by Qi et al. (2022) took this forward with a volumetric energy density (VED) of approximately 113–170 J/mm³. They found that an increase in the VED, by raising P from 204 W to 230 W, or reducing v, resulted in a deeper melt pool and an increase in volume fraction of <001>-oriented grains. However, an excessive amount of energy input can induce harmful microstructural coarsening.

Defect Mechanisms: Lack of Fusion vs. Keyholing

The dynamics of the melt pool, derived directly from the P-v combination, decisively control the porosity profile in Al-2.5Fe alloys. Qi et al. (2020) classified these defect mechanisms into two primary regimes.:

- **Lack of Fusion (Process-Induced Porosity):**

Under low energy conditions (for example, P = 179 W and v = 600 mm/s), the supplied energy remains insufficient to penetrate the powder layer. It also fails to remelt the underlying substrate adequately. Irregularly shaped pores exceeding 50 μm in size characterize this lack-of-fusion regime. More extreme instances exist. At P = 102 W and v = 800 to 1400 mm/s, unmelted alloy powder particles get lodged within these connecting voids. These trapped particles act as significant stress concentrators, ultimately reducing the relative density below 80%.

- **Keyhole and Gas Porosity:**

Conversely, the second regime operates under high-energy conditions. At high laser powers (P = 204 W) and lower scan speeds (v = 600 mm/s), sufficient energy density effectively eliminates lack-of-fusion voids. Yet, Qi et al. (2020) observed a critical distinction. While the melt pool depth increased, keyhole-mode melting was not observed. Instead, fine spherical pores formed. This phenomenon is likely caused by the entrapment of inert shielding gas. Another

possibility is the evolution of dissolved hydrogen during the rapid solidification of the aluminum. The Al-2.5Fe system demonstrates high resistance to cracking. These micropores, however, remain a persistent microstructural feature within the high-energy regime.

Microstructural Baseline: Grain Structure and Phase Distribution

The as-built microstructure of Al-2.5Fe differs significantly from its cast counterpart. This structural deviation is primarily defined by the suppression of the equilibrium θ -Al₁₃Fe₄ phase in favor of metastable variant.

- **Grain Morphology:** The α -Al matrix in LPBF-processed Al-2.5Fe typically possesses a columnar grain structure elongated parallel to the building direction (Z-axis). EBSD examination by Qi et al. (2021) revealed that these columnar grains exhibit a mean width of approximately 20.8 μm . A number of Al-Si alloys exhibit a high-intensity $\langle 001 \rangle$ fiber texture. The Al-2.5Fe alloy, however, often presents a weaker crystallographic texture alongside a fairly high density of low-angle boundaries within the elongated grains. This specific substructure may indicate the accumulation of high residual stresses and dislocation densities during the rapid thermal cycling inherent to the LPBF process.
- **Phase Constitution:** The rapid solidification rates (10^5 to 10^6 °C/s) is achieved in the melt pool center successfully suppress the brittle, needle-like monoclinic θ -Al₁₃Fe₄ phase typically found in cast alloys. Instead, the microstructure is dominated by the metastable orthorhombic Al₆Fe phase. These Al₆Fe precipitates manifest as numerous nanoscale particles (approximately 60 nm) homogeneously dispersed within the α -Al grains (Wang et al., 2020; Qi et al., 2022). However, this microstructure remains heterogeneous across

the melt pool. Qi et al. (2022) highlighted that while the melt pool interior contains these ultrafine, interconnected Al₆Fe particles, the melt pool boundaries exhibit a coarser, sub-micron cellular structure. At these boundaries, where local cooling rates are reduced by heat accumulation and remelting, the Al-Fe intermetallics connect to form a cellular network. Furthermore, at higher energy densities, Qi et al. (2022) observed the localized re-emergence of the equilibrium θ -Al₁₃Fe₄ phase within the cellular structure at the melt pool boundaries, a direct result of the reduced cooling rates and complex thermal histories in these overlap regions.

The as-built Al-2.5Fe alloy achieves a Vickers hardness of approximately 90 to 94 HV, which is more than double the ~39 HV typical of as-cast Al-Fe binary alloys (Qi et al., 2020; Qi et al., 2022). This hardening correlates to a combination of Orowan strengthening from nanodispersed Al₆Fe particles and solid-solution strengthening from supersaturated Fe trapped within the α -Al matrix (Qi et al., 2022). Understanding this baseline is critical, as it delineates the fundamental trade-off inherent to LPBF processing. The necessity for high relative density dictates processing parameters toward higher energy inputs; however, this increased energy inherently reduces cooling and growth rates during solidification. Consequently, this reduction facilitates the local precipitation of the brittle equilibrium θ -Al₁₃Fe₄ phase, particularly at the melt pool boundaries (Qi et al., 2022). This inherent microstructural sensitivity necessitates the advanced alloying strategies discussed in subsequent sections.

Hypereutectic Alloys (Al-15Fe)

While hypoeutectic compositions like Al-2.5Fe provide an excellent baseline for studying the Al-Fe system in additive

manufacturing, they remain fundamentally limited by the available volume fraction of their strengthening phases. To achieve superior high-temperature strength, recent studies have shifted toward hypereutectic compositions, specifically Al-15 wt% Fe (Al-15Fe). In conventional casting, such elevated iron concentrations inevitably precipitate massive, brittle primary intermetallics (θ -Al₁₃Fe₄), which severely degrade mechanical properties. Notably, the rapid cooling rates involved in LPBF induce distinct solidification pathways that engender the formation of a "nano-sized eutectic."

The “Nano-sized Eutectic” Mechanism

The solidification microstructure of LPBF-processed Al-15Fe displays a characteristic hierarchy dictated by local thermal histories. The interior of the melt pools entirely avoids the formation of coarse primary dendrites typical of cast alloys (Wang et al., 2022). Instead, the extreme solidification rate of approximately 10^5 K/s fully suppresses the equilibrium solidification path (Wang et al., 2020). This suppression facilitates a coupled growth mechanism, inducing the formation of a nanoscale eutectic microstructure composed of an α -Al matrix and the metastable Al₆Fe phase. Through transmission electron microscopy (TEM), Wang et al. (2022) demonstrated that these eutectic colonies consist of a continuous cellular network where the Al₆Fe phase forms cell walls separating the α -Al channels. The average spacing of this cellular eutectic remains strictly less than 50 nm (Wang et al., 2020). This refinement is critical; the fine spacing effectively impedes dislocation motion, resulting in an exceptionally high hardness of approximately 200 HV in the as-built state—nearly double that of binary Al-Fe alloys with lower Fe content.

Nevertheless, the microstructure is not entirely homogeneous. Regions at the melt pool boundaries experience lower

cooling rates owing to thermal cycling from adjacent tracks, which correlates to the localized precipitation of relatively coarsened, stable θ -Al₁₃Fe₄ phases measuring several micrometers in length (Wang et al., 2020; Wang et al., 2022). These phases exhibit a distinct leaf-shaped morphology. Despite these localized equilibrium phases, the bulk of the material retains the metastable nano-eutectic structure, which directly dictates the alloy's remarkable compressive yield strength of approximately 540 MPa at room temperature and ~340 MPa at 300 °C (Wang et al., 2022). In spite of that, these localized equilibrium phases, the bulk of the material retains the metastable nano-eutectic structure, which is directly responsible for the alloy's remarkable compressive yield strength of approximately 540 MPa at room temperature and ~340 MPa at 300 °C (Wang et al., 2022).

Primary Phase Suppression

The susceptibility of Al-15Fe to catastrophic fracture can be wholly suppressed by preventing the primary θ phase from forming. The liquidus temperature of Al-15Fe under equilibrium conditions is much higher than the eutectic temperature, resulting in a large freezing range that favours the natural formation of coarse primary plates. In LPBF, however, the high undercooling redirects the solidification path. According to the findings presented by Wang et al. (2020) and Wang et al. (2024), the undercooling required for the growth of θ -Al₁₃Fe₄ is larger than that for Al₆Fe which causes the stable θ -Al₁₃Fe₄ phase to be kinetically displaced by the metastable Al₆Fe phase. As a result, the liquid can reach supercooling to a sufficient degree in order to completely skip the nucleation of the primary θ -Al₁₃Fe₄ in the bulk melt pool and to nucleate the α -Al/Al₆Fe eutectic. This fast solidification method has enabled compositions usually considered un-castable to become a structural material.

Thermal Instability: The “Achilles Heel”

While Al-Fe alloys attain remarkable strength in the as-built state, they have one significant limitation, which is thermal instability. The two main strengthening phases, the supersaturated solid solution and the metastable Al₆Fe, are thermodynamically unstable. At increased temperatures (e.g., above 300 to 350 °C), the system seeks equilibrium. Consequently, the metastable Al₆Fe particles dissolve into the matrix, after which the stable, incoherent θ -Al₁₃Fe₄ phase nucleates and grows (Wang et al., 2024). This transformation is frequently accompanied by severe microstructural coarsening, which rapidly degrades the material's mechanical strength.

Decomposition Kinetics and Phase Transformation

The process of decomposition solely depends on the diffusion of iron in aluminum. The diffusion of Fe is considerably slower compared to the diffusion of Si or Mg. However, high service temperatures between 300 °C and 500 °C provide sufficient thermal energy for atomic movement. A thorough examination of the decomposition kinetics in Al-2.5Fe alloys was presented by Qi et al. (2021). According to observations, by annealing the alloy at a temperature of 300 °C for 10 hours, the metastable phase Al₆Fe undergoes an increased growth, while at the same time, its localized transformation to the stable equilibrium θ -Al₁₃Fe₄ phase takes place at the cellular structures at melt pool boundaries. Under this specific thermal condition, the diffraction intensities of Al₆Fe increase, indicating that precipitation is ongoing from the supersaturated solid solution. As a result, the material maintains a relatively high hardness of ~87 HV.

Nonetheless, the kinetics of transformation accelerates drastically after a critical temperature is reached. According to Qi et

al. (2021), annealing at 500 °C gives rise to the rapid, bulk formation of a stable θ -Al₁₃Fe₄ phase. The XRD patterns of the samples annealed at 500 °C show high-intensity peaks corresponding directly to θ -Al₁₃Fe₄, which has completely replaced the Al₆Fe peaks that were in the as-built and 300 °C annealed samples. This shows a total and significant crystallographic transition from the metastable orthorhombic Al₆Fe structure to the stable monoclinic θ -Al₁₃Fe₄ structure.

Impact on Mechanical and Physical Properties

The microstructural evolution has a strong influence on the mechanical and functional properties of the material. The appearance of stable θ -Al₁₃Fe₄ at 500 °C leads to a significant reduction of mechanical strength. According to Qi et al. (2021), the Vickers hardness decreases from ~90 HV in as fabricated to ~50 HV after 10 h annealing at 500 °C. The weakening of both solid-solution and Orowan strengthening mechanisms is responsible for the softening. This occurs due to the depletion of iron from the α -Al solid solution and the severe coarsening of the precipitates. In particular, the plate-like θ phases extend over several hundred nanometers, thus making them less effective obstacles to dislocation movement.

Alternatively, this material will have higher thermal and electrical conductivity due to this decomposition (Tatsumi et al., 2025). The thermal conductivity of the as-built α -Al matrix is reduced due to the presence of supersaturated Fe atoms as electron scatterers. The precipitation of Fe from the solid solution during annealing effectively “cleans” the matrix. According to Qi et al. (2021), as-fabricated thermal conductivity is about 150 W m⁻¹ K⁻¹; however, the authors measured conductivity after 500 °C annealing at about 209 W m⁻¹ K⁻¹. Consequently, in binary Al-Fe alloys, there is a fundamental trade-off: the high-temperature annealing required

to optimize conductivity induces coarsening and phase transformation that degrade mechanical strength. Therefore, the analysis shows the necessity of the ternary and quaternary alloying strategies (Zr, Sc, Ce) which are described in subsequent sections to prevent microstructural decompositions at elevated temperatures.

ALLOY DESIGN STRATEGY I: TRANSITION METAL (TM) ADDITIONS

The Al-Fe-V-Si System (High-Temperature Stability)

The alloy system AA8009 (nominally Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si wt%) is the most advanced of rapid solidification metallurgies for high-temperature applications. Designed for aerospace applications up to 673 K (400 °C), this alloy displays performances that are entirely dependent on its microstructure: a highly coherent microstructure comprising a high volume fraction of ultrafine, thermally stable silicide dispersoids in an aluminum matrix. While PFC or spray deposition followed by hot consolidation have been able to make this alloy for a while now, additive manufacturing (AM) allows for the fabrication of complex geometries while still achieving the cooling rates (10^4 to 10^7 K s⁻¹) required to prevent the formation of brittle equilibrium phases.

Replicating AA8009 Performance in AM

The main metallurgical objective of laser powder bed fusion (LPBF) processing of an Al-Fe-V-Si alloy is the replication of the metastable, BCC Al₁₂(Fe,V)₃Si phase either directly from the melt or

by means of intrinsic heat treatment. Sun et al. (2015) successfully manufactured Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si parts by selective laser melting (SLM). Furthermore, the relative density achieved was about 99.3% with a mean microhardness of about 246 HV_{0.1}. This hardness was significantly greater than that of the as-cast alloy. The consolidation quality has an acute sensitivity to the processing window. The production of SLM Al-Fe-V-Si components remains a challenge as as-produced samples possess a poorly defined microstructure and microcellular solidification structure. Under optimized conditions, the chemical composition of the deposited material is very similar to that of the precursor powder, which entails a minor loss in aluminum and a low oxygen take-up, thereby confirming that LPBF is viable for this system.

Formation of Thermally Stable Silicides

The strengthening mechanism of the Al-Fe-V-Si system is governed by the Al₁₂(Fe,V)₃Si dispersoids. The coarsening rates of these silicides are much slower than for any other Al-Fe intermetallics. The low diffusivity of Fe and V in the aluminum matrix combined with the low interfacial energy of the dispersoid with the matrix α -Al is the reason for this stability. In this LPBF as-built microstructure, these silicides fall within a distinct hierarchical zonal structure dictated by the thermal history of each layer as following :

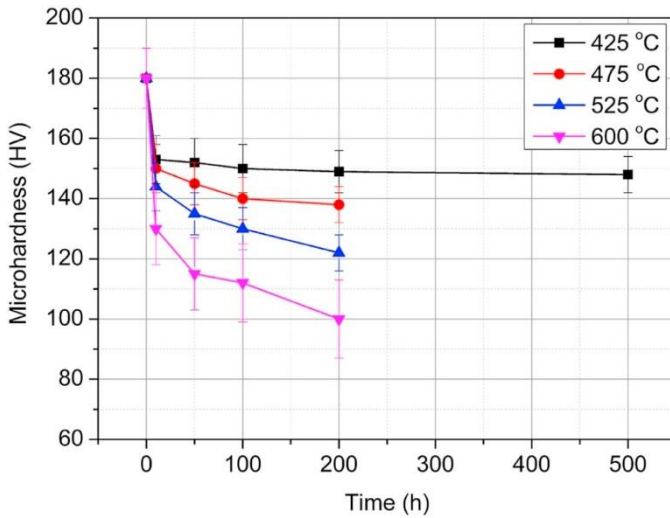
- **Fusion Zone (FZ):** The microstructure in the center of the melt pool, where cooling rates are the highest, consists of ultrafine, continuous cellular α -Al networks. Sun et al. (2017) detected a micro-quasicrystalline phase that forms in the intercellular regions of the FZ and transforms to Al₁₂(Fe,V)₃Si upon heating.
- **Heat Affected Zone (HAZ):** The Heat Affected Zone (HAZ) is reprocessed by subsequent laser passes and is, therefore,

an area of intrinsic aging. Spherical $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ particles 10-70 nm in diameter are uniformly distributed in the α -Al matrix (Sun et al., 2015).

Microstructural Evolution and Thermal Stability

The Al-Fe-V-Si alloy processed from LPBF has great thermal stability. Analysis through Differential Scanning Calorimetry (DSC) demonstrates the presence of an exothermic peak at approximately 400 °C, which relates to the decomposition of the micro-quasicrystalline phase and that of the supersaturated α -Al solid solution into stable $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ dispersoids. Long-term exposure tests show these silicides have excellent resistance to coarsening. It is shown by Sun et al. (2017) that the microstructure remains completely stable during 425 °C for 500 hours after the sample is annealed at 400 °C for 60 minutes to homogenise the structure. The $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{V})_3\text{Si}$ particles retained their morphology and size, providing sustained hardness. Nevertheless, coarsening eventually becomes apparent at elevated temperatures (475 °C and 525 °C). This coarsening follows the Lifshitz-Slyozov-Wagner (LSW) mechanism, governed by volume and grain-boundary diffusion of Fe.

Fig. 4. Variation of the microhardness of SLM alloy with increasing annealing time. The annealing temperature was fixed to 425, 475, 525 and 600 °C



Reference: Sun et al. 2017

Al-Fe-Ni Eutectic Engineering

The new addition of nickel (Ni) in aluminum-iron (Al-Fe) systems is known as a “eutectic engineering” strategy to refine intermetallic networks and to completely stop solidification cracking (Ding et al., 2021). Iron is the main strengthening agent through aluminides formation, while the binary Al-Fe system is sensitive to develop coarse brittle primary phases at iron contents higher than the coupled eutectic zone. Nickel possesses similar transition-metal characteristics like iron. Nickel has an extremely low solubility (< 0.05 at%) and low diffusivity in the α -Al matrix (Ding et al., 2021; Loginova et al., 2020). Nickel modifies this solidification pathway. This aids in the development of the ternary Al₃FeNi phase in a completely eutectic microstructure (Ding et al., 2021).

Modifying the Eutectic Reaction and Crack Susceptibility

The main problem with processing Al-Fe-Ni alloys with LPBF is controlling the freezing range to prevent hot tearing. The final phases of solidification are typically when hot tearing happens because liquid films remain between dendrites that are coalescing.

As per Kou's criterion, if the separation rate of neighbouring grains is larger than the sum of the liquid feeding rate and the grain growth rate towards each other, hot cracks will definitely initiate at either pre-nucleation sites or free surfaces at the end of solidification. To optimize the alloy composition, Ding et al. (2021) solved this by rigorous application of the hot-crack-susceptibility index ($|dT/d(f_s^{0.5})|$). The authors conducted a thermodynamic assessment of the Al-Fe-Ni ternary system, fixing the mass ratio of Fe/Ni at 1.4 to strongly favor the formation of the Al₉FeNi phase. Through systematic evaluations of solidification curves performed at various Fe contents (0.7 to 6.3 wt%), it is seen that the susceptibility index maximizes at compositions with broad freezing ranges. It, however, significantly drops at a eutectic composition. The research directed by Ding and co-workers (2021) found that an Al-1.75Fe-1.25Ni (wt%) alloy has the narrowest solidification range and the lowest hot-crack susceptibility index value. This optimized composition allows solidification to circumvent the broad 'mushy zone' of off-eutectic alloys, with the liquid being transformed almost instantaneously into solid solution and intermetallics. This guarantees that dendrites receive adequate liquid feeding until the solidification process is completely finished.

Suppression of Primary Al₉FeNi Phases

Alloys with higher contents of Fe and Ni suffer from the development of coarse primary Al₉FeNi due to slow cooling rates in conventional casting (Ding et al., 2021). Nonetheless, the rapid cooling rates associated with LPBF ($\sim 10^5$ K s⁻¹) can change this phase-selection hierarchy. It was observed in the study conducted by Loginova et al. (2020) and Ding et al. (2021) that under laser-melting conditions, the formation of primary Al₉FeNi is kinetically suppressed. The Al₉FeNi phase precipitates as a fine coupled eutectic network or as sub-micron particles homogeneously dispersed within the α -Al cells, rather than coarse faceted crystals. The as-built alloy

Al-1.75Fe-1.25Ni has a fully eutectic microstructure consisting of an α -Al solid solution and a cellular network of Al₉FeNi (Ding et al., 2021). It is this microstructural refinement that drastically improves mechanical hardness. The hardness of the Al-1.75Fe-1.25Ni alloy made using LPBF is 220% of the hardness of the as-cast alloy of the exact same composition. Loginova et al. (2020) demonstrated that “higher-alloyed” compositions, such as Al-2.5Fe-7.5Ni, can achieve hardness values of ~190 HV, representing almost three times higher hardness over the as-cast counterparts.

Al-Fe-Cr and Quasicrystalline Reinforcement

The introduction of chromium (Cr) into Al-Fe systems creates a most unusual metallurgical pathway for quasicrystal (QC) formation. Unlike traditional crystalline phases that possess periodic translational symmetry, quasicrystals have long-range orientational order but no translational periodicity (e.g., icosahedral symmetry). This unique arrangement of atoms imparts unique properties such as high hardness, low coefficients of friction, and low thermal conductivity. The Al-Fe-Cr system is of particular interest in LPBF for the in situ formation of the metastable icosahedral phase (i-phase), which creates a metal-matrix composite with exceptional strength.

Formation of Icosahedral Al-Fe-Cr Quasicrystals

The formation of the i-phase in Al-Fe-Cr alloys is highly sensitive to the cooling rate and chemical composition. Kang et al. (2023) studied a new Al-Fe-Cr alloy designed explicitly for LPBF. It was shown that the non-uniform rapid solidification characteristic of the single molten pool leads to a highly heterogeneous distribution of quasicrystalline reinforcements. The LPBF process produces a graded temperature gradient (G) and solidification rate (R) across the melt pool (Kang et al., 2023). Near the melt pool boundary (MPB), where G is high and R is low, pre-existing icosahedral atomic

clusters in the melt act as nucleation cores. These cores coalesce nearby small icosahedral particles to form relatively coarse quasicrystalline particles with spherical or flower-like shapes of approximately 700 nm. In sharp contrast, the icosahedral clusters precipitate as ultrafine, spherical Al-Fe-Cr ι -phase particles (100–300 nm) that are thoroughly dispersed within the α -Al columnar grains due to the increased solidification rate in the laser fusion zone (LFZ).

Crystallographic Orientation and Interface Engineering

The nature of the quasicrystalline phase's interface with the aluminum matrix is a key factor in its strengthening efficiency. An incoherent interface would act as a structural weak point that promotes void nucleation during deformation. Kang et al. (2023) stated that in the center of the melt pool, the α -Al dendrites grow radially around the quasicrystal particles, effectively forming a cellular structure. This morphology enhances load transfer from the ductile matrix to the hard quasicrystalline particles, resulting in maximized Orowan strengthening (Pedrazzini et al., 2016).

ALLOY DESIGN STRATEGY II: RARE EARTH & SC/ZR ADDITIONS

Binary Al-Fe systems are limited due to the formation of coarse and brittle equilibrium phases during thermal cycling and a susceptibility to hot cracking in certain compositional ranges, necessitating advanced alloying strategies. The second core pillar of microstructural engineering involves the addition of Rare Earth (RE)

elements, such as Cerium (Ce), and other powerful inoculants, such as Scandium (Sc) and Zirconium (Zr). These additions fundamentally alter the solidification pathways in LPBF, enabling crack mitigation and a dual-precipitation strengthening mechanism.

The Al-Fe-Ce System: Processability and Thermal Stability

Due to the formation of high volume fractions of thermally stable intermetallics ($\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$) with high creep resistance, cerium is a transformative alloying element for additive manufacturing. In the case of Al-Fe alloys, Arcieri et al. (2025) demonstrated that Ce addition allows for the printing of high-solute alloys that would otherwise be prone to hot tearing.

Solidification Dynamics and Crack Mitigation

Solidification cracking, which occurs in the final stages of freezing, is a major challenge during the LPBF processing of high-strength aluminum alloys. Arcieri et al. (2025) investigated an existing powder metallurgy Al-8Fe-4Ce (wt%) alloy (AA 8019). The research utilized Scheil-Gulliver solidification simulations to identify the narrow freezing range of the composition. This narrow range is critical for maintaining adequate liquid feeding between dendrites during the rapid cooling of melt pools. The simulations predicted a solidification path where primary $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, $\alpha\text{-Al}$, and subsequently $\text{Al}_{10}\text{Fe}_2\text{Ce}$ and $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ would form in a eutectic reaction. The resultant narrow solidification interval minimizes the thermal strain build-up that leads to cracking, rendering the manufacture of fully dense parts (99.5% relative density) possible using a heated building platform at 150 °C.

Microstructural Hierarchy in LPBF

Due to the inherent cooling rates of LPBF (on the order of 10^4 to 10^7 K/s), the resulting microstructure differs dramatically from equilibrium state predictions. The as-built microstructure of the Al-

8Fe-4Ce alloy is dominated by a chemically heterogeneous cellular network (Arcieri et al., 2025). The LPBF process inhibits the formation of the stable $\text{Al}_{10}\text{Fe}_2\text{Ce}$ phase, in contrast to cast alloys which create large primary phases. Instead, the microstructure consists of:

- **Hierarchical Intermetallic Distribution:** Coarse $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ intermetallics were found to concentrate at the boundaries of the melt pool, while there is a uniform distribution of ultrafine $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ and metastable Al_6Fe dispersoids in the cellular network and the centers of the melt pools.
- **Intermetallic Dispersion Strengthening:** Rather than being attributed to solid-solution strengthening, the alloy derives its strength from a high-volume fraction of these fine and evenly dispersed intermetallic phases. This refinement is distinct from casting, which results in large needle-like and plate-like morphologies; in LPBF, the intermetallics are nanoscale and topologically interconnected, providing a rigid skeleton for the soft aluminum matrix.

Thermal Stability and Mechanical Performance

The Al-Fe-Ce system is characterized by its exceptional resistance to thermal softening. The Al-8Fe-4Ce alloy maintained its microstructural integrity, according to Arcieri et al. (2025), up to 580 °C. This stable microstructure is due to the low diffusivity of cerium and iron in the aluminum matrix. This restricted diffusivity prevents the coarsening of the strengthening phases, a process known as Ostwald ripening. Mechanical testing indicated that the as-built Ultimate Tensile Strength (UTS) reached approximately 530 MPa, which compares well with high-strength commercial alloys such as AA7075 but does not suffer from a rapid loss of strength at elevated temperatures. Although the intermetallic volume fraction is high and elongation is limited, the alloy displays a degree of ductility, as

evidenced by the presence of dimples on the fracture surface. Moreover, the adaptation of this traditional powder metallurgy alloy for LPBF allows its inherent susceptibility to solid-state cracking to be reduced while achieving a relative density as high as 99.5%.

Dual-Precipitation Strengthening (Sc/Zr)

The second primary strategy involves the addition of Sc and Zr to Al-Fe alloys. This method leverages a dual-precipitation phenomenon where the alloy is strengthened by both iron-based intermetallics (Al_6Fe) and coherent L_{12} -structured $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ nanoprecipitates.

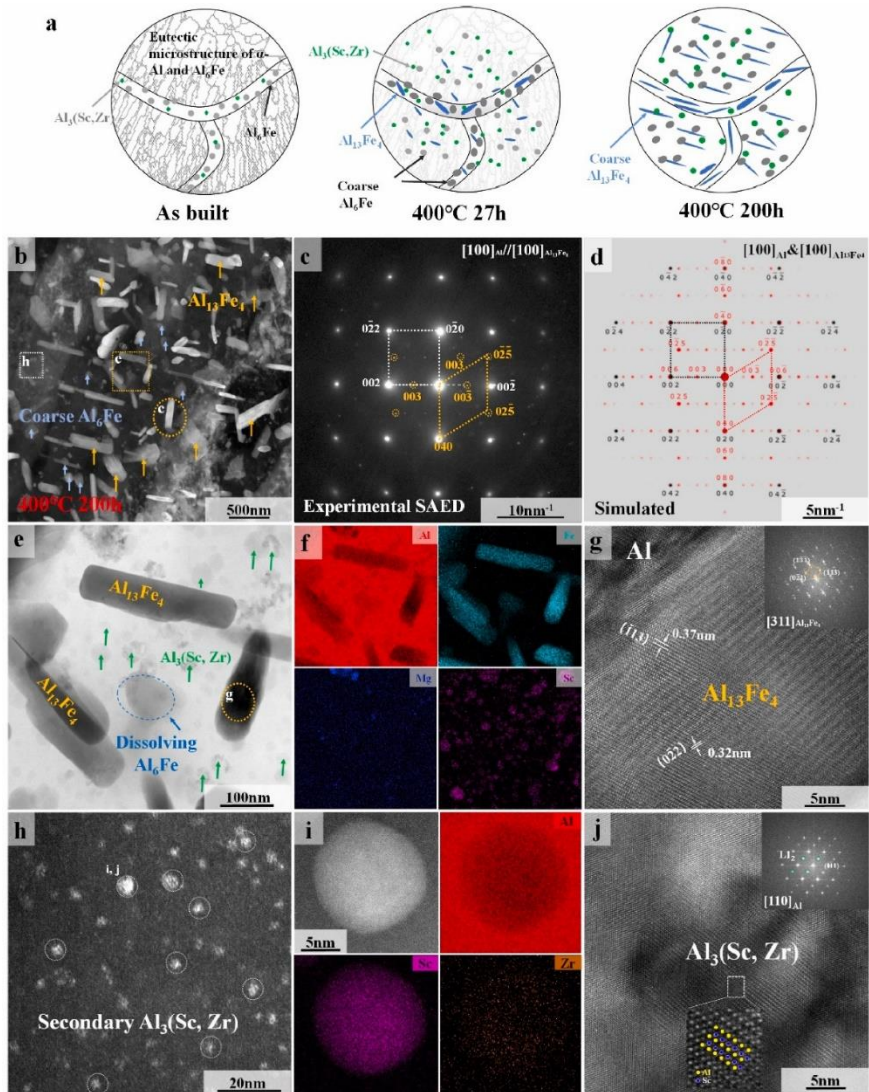
Synergy between Fe-Dispersoids and L_{12} Precipitates

Wang et al. (2024) developed a novel Al-5Fe-1Mg-0.6Sc-0.3Zr alloy for LPBF that achieved a record-high tensile strength of 189 MPa at 400 °C. The strengthening mechanism in this system is hierarchical:

- **Stabilization of Al_6Fe :** The addition of Sc and Zr effectively stabilizes the metastable Al_6Fe phase at elevated temperatures. In binary Al-Fe alloys, Al_6Fe typically decomposes into the brittle equilibrium $\theta\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ phase when heated above 350 °C. According to Wang et al. (2024), Sc atoms segregate at the $\text{Al}_6\text{Fe}/\text{Al}$ interface. This reduces the local lattice distortion and interfacial energy. This segregation alleviates local lattice distortion, while Sc atoms prevent the diffusion of Fe by forming atomic clusters with it. Moreover, Sc interstitially reinforces the atomic bonding of the Al_6Fe phase, which retards its transformation to $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ and allows the fine metastable dispersoids to persist at higher temperatures
- **L_{12} Precipitation:** Simultaneously, Sc and Zr precipitate as coherent, nanoscale $\text{L}_{12}\text{-Al}_3(\text{Sc,Zr})$ particles. According to

Wang et al. (2024), these coherent $L1_2$ particles act as nucleating sites for the Al_6Fe phase, reducing the diameter of the Fe-rich intermetallics by nearly 10%. Additionally, the $L1_2$ particles physically hinder the growth of the brittle θ - $Al_{13}Fe_4$ phase during thermal exposure by compressing it into a stubby shape.

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the microstructure evolution in different thermally exposed conditions. (b) STEM image showing the microstructure following thermal exposure, (c) corresponding SAED pattern and (d) simulated diffraction pattern of the $Al_{13}Fe_4$ and Al. (e) HAADF image marked in b and (f) corresponding EDS maps. (g) Atomic planes for the Fe-rich precipitate; (h) STEM image showing the $Al_3(Sc, Zr)$ particle with corresponding (i) EDS maps. (j) SAED pattern and atomic arrangement of $Al_3(Sc, Zr)$.



Reference: Wang et al. 2024

Bimodal Grain Structures and Deformation Resistance

The addition of Zr is also critical for controlling the grain structure during LPBF processing. Xu et al. (2023) conducted a detailed investigation into an Al-1Fe-0.6Cu-1.3Zr (at.%) alloy,

revealing a unique heterogeneous microstructure characterized by alternating zones of coarse and fine grains.

- **Formation of Bimodal Structures:** Due to the Gaussian energy distribution of the laser beam, the melt pool experiences spatially varying thermal histories. Xu et al. (2023) identified two distinct regions: (1) Fine-Grained Zones (FGZ) located at the melt pool boundaries (MPB), comprised of ultrafine equiaxed grains ($\sim 0.45 \mu\text{m}$) driven by the high concentration of primary Al_3Zr nucleants; and (2) Coarse-Grained Zones (CGZ) in the melt pool interior, consisting of coarser equiaxed grains ($\sim 0.95 \mu\text{m}$) due to the high Zr content increasing nucleation density and reducing the thermal gradient.
- **High-Temperature Stability and Deformation Resistance:** The stability of this alloy at elevated temperatures is driven by resistance to grain boundary sliding (GBS) and dislocation movement. Xu et al. (2023) noted that Fe and Cu co-segregate at the grain boundaries alongside nano-sized Fe-rich particles. These intergranular precipitates effectively impede grain boundary sliding, as evidenced by the lack of grain coarsening at 473 K. Simultaneously, the intragranular $\text{L}_{12}\text{-Al}_3\text{Zr}$ particles exhibit high resistance to dislocation cutting. This heterogeneous bimodal structure provides high strength over a wide temperature range, attributed to the combination of precipitation strengthening and grain-boundary strengthening.

FUNCTIONAL PROPERTIES: CONDUCTIVITY AND CORROSION

In addition to the enhancement of mechanical properties, the commercial viability of laser powder bed fusion (LPBF) produced Al-Fe alloys depends on their functional attributes, particularly thermal and electrical conductivities and corrosion resistance. These attributes are often antagonistic in their relationship to strength, creating pivotal trade-offs that must be managed via meticulous microstructural engineering.

The Strength-Conductivity Trade-off

Aluminum alloys are prized for their high thermal and electrical conductivity, making them essential in the design of heat exchangers and electrical conductors. Nevertheless, the strengthening mechanisms invoked in LPBF-processed Al-Fe alloys—specifically solid-solution strengthening and lattice distortion—adversely affect conductivity. As a result, a classic materials science paradox emerges, which is often illustrated in Ashby plots where alloys lie along a curve of high strength/low conductivity or low strength/high conductivity.

Physics of Electron Scattering in LPBF Alloys

Matthiessen's rule states that the electrical resistivity of a metal, and inversely its thermal conductivity, is the sum of the resistivities resulting from thermal vibrations of the atoms, soluble impurity atoms (solutes), and imperfections in the crystal structure (such as grain boundaries and dislocations). In the as-built state of LPBF Al-Fe alloys, rapid solidification traps a substantial quantity of iron into the supersaturated α -Al matrix. Owing to iron's status as a transition metal with a large scattering cross-section, it markedly impedes electron transport. This phenomenon was reported by Qi et al. (2021) in a binary Al-2.5Fe (wt%) alloy. The as-built material,

with its high solute Fe content, exhibited a relatively low thermal conductivity of approximately $150 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

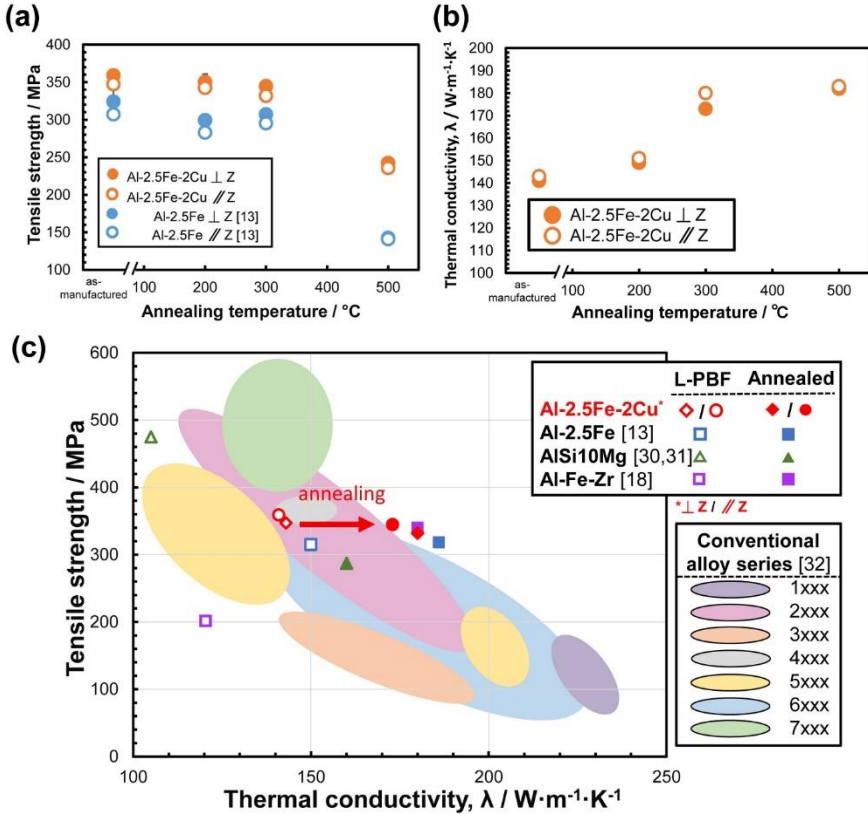
Optimizing the Balance via Post-Processing

To recover conductivity, the matrix must be "cleaned" of solute atoms. Post-process annealing serves as the critical lever here. Qi et al. (2021) demonstrated that annealing a binary Al-2.5Fe (wt%) alloy at 500°C initiates the pronounced transformation of the metastable Al_6Fe phase into the stable $\theta\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ phase. Although this transition does reduce mechanical hardness, it significantly reduces lattice scattering, boosting the thermal conductivity to approximately $209 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Recent alloy designs attempt to escape this trade-off by promoting precipitates that increase the strength of the material without leaving elevated solute levels in the matrix. Cheng et al. (2024) developed an Al-2.5Fe-2Cu (mass %) alloy in which the addition of copper promotes the formation of $\text{Al}_{23}\text{CuFe}_4$ phases. This alloy achieved a superior balance, exhibiting a tensile strength exceeding 350 MPa and a thermal conductivity maintained at $175 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ following annealing at 300°C , effectively pushing the material's performance toward the upper-right sector of the strength-conductivity chart. Similarly, Pauzon et al. (2022) utilized an Al-Fe-Zr system to achieve a yield strength of 310 MPa combined with a thermal conductivity of $180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, attributing this success to the precipitation of plate-like $\theta\text{-Al}_{13}\text{Fe}_4$ and coherent $\text{L}_{12}\text{-Al}_3\text{Zr}$ nanoprecipitates, which strengthen the matrix while leaving the aluminum lattice relatively pure.

Fig. 6. Changes in (a) tensile strength and (b) thermal conductivity of PBF-LB-produced Al–2.5Fe–2Cu alloy by annealing at various temperatures for 100 h. (c) Ashby chart of tensile strength as a

*function of thermal conductivity for the experimental alloy,
compared with reported results*



References: Cheng et al. 2024

Corrosion Behavior

The presence of iron in aluminum is traditionally considered catastrophic for corrosion resistance. Intermetallic phases like Al_3Fe (or $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$) are electrochemically noble (cathodic) relative to the α -Al matrix. In an electrolyte, these phases act as micro-cathodes, driving the preferential dissolution (pitting) of the surrounding aluminum matrix. However, the unique microstructure of LPBF alloys modifies this behavior.

Micro-Galvanic Coupling in Refined Structures

The size and distribution of the cathodic intermetallics governs the corrosion performance of LPBF Al-Fe alloys. In cast alloys, coarse Al-Fe intermetallics create large, localized galvanic cells that lead to severe pitting. In contrast, LPBF processing refines these phases to the nanoscale. Revilla et al. (2025) investigated the corrosion behavior of an Al-Fe-Zr alloy. They found that the ultrafine distribution of Fe-rich phases results in a more uniform distribution of micro-galvanic couples. Because of this ultrafine distribution, the maximum Volta potential difference between the intermetallics and the matrix is significantly reduced (100–150 mV), indicating a diminished galvanic driving force for localized corrosion. Consequently, the alloy exhibits fewer active pitting sites; however, localized attack still occurs and preferentially aligns along melt pool boundaries (MPBs) driven by coarser intermetallics and inclusion-free zones (IFZs).

Passive Film Stability

The alloying elements also influence the stability of the protective oxide film. Revilla et al. (2025) noted that adding zirconium can modify the properties of the passive layer. Their potentiodynamic polarization tests in NaCl solution revealed that the LPBF Al-Fe-Zr alloy exhibits a rapid increase in anodic current density just above the corrosion potential, suggesting that the corrosion potential is closely associated with the pitting potential. However, the breakdown potential (E_{pit}) was influenced by the presence of the Fe-rich phases. The study highlights that while the refined microstructure improves corrosion uniformity, the inherent potential difference between the Fe-rich precipitates and the matrix remains a challenge that requires careful control of additive manufacturing process parameters and post-process heat treatments to minimize microstructural heterogeneity at the melt pool level.

Creep Resistance and Fatigue Performance

While tensile strength provides a baseline for mechanical performance, the applicability of Al-Fe alloys in dynamic, high-temperature environments (e.g., automotive pistons or turbine components) depends critically on their resistance to time-dependent deformation (creep) and cyclic loading (fatigue).

Mechanisms of Creep Resistance

Conventional aluminum alloys (e.g., Al-Si-Mg) lose structural integrity above 200 °C due to the rapid coarsening of precipitation phases. In contrast, LPBF-processed Al-Fe alloys exhibit outstanding creep resistance due to their thermally stable dispersoids. Rakhmonov et al. (2022) conducted a detailed creep study on an Al-3.6Mn-2.0Fe-1.8Si-0.9Zr (wt%) alloy, revealing a threshold stress of approximately 74 MPa at 300 °C. This threshold stress, which represents the critical stress required to activate dislocation climb, is attributed to the effective pinning of dislocations by semi-coherent α -Al(FeMn)Si precipitates.

The mechanism is distinct from classical Orowan bowing. Rakhmonov et al. (2022) observed that at elevated temperatures, dislocations are pinned by the semi-coherent dispersoids, requiring a climb mechanism to bypass them. Rather than relying primarily on nanoscale precipitates, which produce only a minor effect, the creep resistance is predominantly controlled by a high volume fraction (~15 vol%) of submicron α -Al(FeMn)Si precipitates, whose script-like, elongated morphology significantly slows the dislocation climb rate. Furthermore, the bimodal grain structure characteristic of this alloy contributes to creep resistance. Rather than relying on coarser grains in the melt pool interior to resist grain boundary sliding, a standard failure mode in fine-grained materials at high temperatures, the alloy suppresses grain boundary sliding through the dense decoration of grain boundaries by thermally stable α -Al(FeMn)Si precipitates.

Fracture Behavior and Defect Sensitivity

Fracture behavior in Al-Fe AM alloys is intimately linked to the population of processing defects. Zhu et al. (2024) highlighted that in high-solute alloys, such as the Al-Si-Fe-Mn-Ni system, tensile fracture tends to occur at the melt pool boundaries, which act as weak zones. Furthermore, circular porosity originating from unescaped gas during the deposition process is an inevitable fabrication defect that appears on the fracture surfaces, contributing to failure.

However, when defects are minimized, the fracture toughness of LPBF Al-Fe alloys can be significantly enhanced by their unique structural features. Lin et al. (2022) demonstrated in an AlFe5Zr1 alloy that the heterogeneous bimodal grain structure (alternating coarse and fine grains) acts as a barrier to crack propagation. As a crack tip encounters this heterogeneous structure, it is often deflected or branched, dissipating energy and retarding growth through crack tip blunting. This "crack deflection" mechanism is a unique advantage of the hierarchical heterogeneous microstructure produced by LPBF.

PROCESSABILITY AND DEFECT CONTROL

The translation of advanced Al-Fe alloy designs from thermodynamic concepts to structural components relies fundamentally on the material's processability in the laser powder bed fusion (LPBF) environment. Unlike traditional casting, where cooling rates are dictated by mold geometry, LPBF involves a dynamic interaction between a high-intensity laser beam and a

powder bed, resulting in complex thermal histories characterized by rapid melting, solidification (10^3 to 10^6 K/s), and intrinsic cyclic reheating. The attainment of fully dense, crack-free parts therefore demands a rigorous optimization of Volumetric Energy Density (VED) and a profound understanding of solidification cracking susceptibility.

Volumetric Energy Density (VED) Optimization

The densification behavior of Al-Fe alloys is governed by the energy input delivered to the powder bed. The Volumetric Energy Density (VED), defined as $E = P/(v \cdot h \cdot t)$, where P is the laser power, v is the scanning speed, h is the hatch spacing, and t is the layer thickness, serves as a critical design parameter. The processing window is typically bounded by two failure modes: "lack of fusion" at low energy densities and "keyhole porosity" at excessive energy densities.

Defining the Processing Window

Zhu et al. (2024) conducted a systematic optimization for a novel Al-Si-Fe-Mn-Ni alloy. Their investigation revealed that a laser power of 350 W and a scanning speed of 1300 mm/s was optimal. They found that at lower energy inputs (e.g., low laser power or high scanning speeds up to 1600 mm/s), the insufficient energy leads to the formation of large, irregular unfused pores. Conversely, excessive energy input (e.g., overly high power or slower scanning speeds down to 1150 mm/s) causes element burning and the formation of metallurgical pores. Furthermore, high energy inputs in Al-Fe systems can lead to excessive remelting of previous layers, which may inadvertently coarsen the nanoscale metastable precipitates (e.g., Al_6Fe) that are critical for strengthening, transforming them into deleterious equilibrium phases (Zhu et al., 2024; Bahari-Sambran et al., 2026).

Alternative Energy Density Models

Although standard VED is widely used, Qi et al. (2020) proposed that it may not fully capture the physics of melt-pool dimensions in binary Al-Fe alloys. In their study of Al-2.5Fe, they utilized the deposited energy density model based on enthalpy (ΔH). They established that a parameter of $P \cdot v^{-1/2}$ of $6.5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1/2} \cdot \text{s}^{1/2}$ is the critical threshold for achieving densities of $\sim 99\%$. This parameter better accounts for the thermal diffusion distance and the laser's residence time, providing a more robust criterion for avoiding process-induced porosity in near-eutectic Al-Fe systems.

Hot Cracking Mitigation

Hot cracking (or solidification cracking) remains the most persistent barrier to the printability of high-strength aluminum alloys. This phenomenon occurs in the "mushy zone" during the final stages of solidification, where dendrites coalesce, and liquid films persist at grain boundaries. If the thermal shrinkage strain exceeds the ductility of these liquid films, decohesion occurs.

Solidification Cracking Criteria

The susceptibility to hot cracking is often quantified using the hot crack susceptibility index (HCS), defined as $|dT/d(f_s^{0.5})|$. However, Ding et al. (2021) applied the maximum value of $|dT/d(f_s^{0.5})|$ before reaching the solidus temperature to the Al-Fe-Ni system. By simulating solidification curves for varying Fe and Ni contents, they found that compositions far from the eutectic point exhibit wide freezing ranges and steep temperature gradients at the end of solidification, leading to high HCS values. However, by designing the alloy to be near-eutectic (e.g., Al-1.75Fe-1.25Ni), Ding et al. (2021) successfully minimized the freezing range. In this optimized composition, the liquid-to-solid transformation occurs almost isothermally, ensuring that liquid feeding remains operative until the very end of solidification. This "Eutectic Engineering"

approach effectively eliminated solidification cracks, resulting in fully dense parts.

The Role of Grain Morphology (CET)

Grain morphology also plays a decisive role in crack propagation. Columnar grains, typical in AM due to high thermal gradients along the build direction, are prone to forming continuous liquid films spanning multiple layers at grain boundaries, which can facilitate long intergranular cracks. Wang et al. (2021) demonstrated that inducing a Columnar-to-Equiaxed Transition (CET) is a potent mitigation strategy in Al-Fe-Sc-Zr alloys. The addition of Sc and Zr promotes the formation of primary $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ particles which act as heterogeneous nucleation sites for α -Al grains. This results in a refined equiaxed grain structure that disrupts the continuity of liquid films and accommodates thermal strain more isotropically, thereby suppressing crack initiation. Similarly, Arcieri et al. (2025) reported that the Al-8Fe-4Ce alloy, despite high solute content, avoids hot tearing due to the short solidification range of this alloy, although solid-state cracks were still observed.

Post-Processing Heat Treatment Strategies

The non-equilibrium nature of as-built LPBF Al-Fe alloys necessitates a careful approach to heat treatment. Standard protocols for wrought alloys (e.g., T6: Solutionize + Quench + Age) are often detrimental to Al-Fe AM alloys because high-temperature solutionizing ($>500^\circ\text{C}$) dissolves the beneficial metastable cellular networks and triggers the formation of coarse, brittle equilibrium phases.

The Case Against T6 Solutionizing

Conventional T6 treatments involve holding the material at high temperatures to dissolve solutes, followed by quenching. In Al-Fe systems, however, the primary strengthening features—the

cellular segregation network and metastable nano-precipitates—are thermally sensitive. Qi et al. (2021) demonstrated that annealing binary Al-Fe alloys at 500 °C (simulating solutionizing temperatures) causes the decomposition of the metastable Al₆Fe phase into coarse θ -Al₁₃Fe₄ platelets. This transformation results in a catastrophic loss of hardness (from ~90 HV to ~50 HV) and tensile strength. Although the drastic softening results in higher overall elongation, the coarse platelets act as stress concentrators and crack initiation sites that limit further tensile ductility. Therefore, traditional T6 cycles are generally unsuitable for Al-Fe alloys where the "frozen-in" microstructure is the primary strengthening agent.

Direct Aging (T5) and Stress Relief

Instead of T6, "Direct Aging" (T5) is the preferred thermal processing route. This involves heating the as-built part to a moderate temperature (typically 300–400 °C) without a prior solution step. The objectives are twofold:

1. **Stress Relief:** Rapid thermal cycling during LPBF processing generates significant residual stresses. A T5 treatment relaxes these stresses, improving dimensional stability (Pauzon et al., 2022; Tatsumi et al., 2025).
2. **Precipitation Strengthening:** In alloys containing Sc, Zr, or V, the T5 treatment triggers the precipitation of secondary strengthening phases from the supersaturated solid solution. For example, Pauzon et al. (2022) utilized a direct aging treatment at 400 °C for Al-Fe-Zr alloys. This regime promoted the dual precipitation of coherent nano-Al₃Zr and plate-like Al₁₃Fe₄, resulting in a dual-precipitation hardening effect that maximized mechanical performance (increasing yield strength up to 310 MPa).

The Annealing Window

Establishing the correct "Annealing Window" is critical. Research suggests a safe processing zone below 300 °C for most Al-Fe systems.

- **< 300 °C:** Safe zone. Metastable phases (Al₆Fe) remain stable; residual stresses are partially relieved.
- **300–450 °C:** Critical zone (Alloy dependent). In Al-Fe-Ce systems, intermetallics remain stable (Arcieri et al., 2025). In binary Al-Fe, coarsening begins.
- **> 500 °C:** Danger zone. Rapid transformation to equilibrium phases (θ -Al₁₃Fe₄), grain growth, and loss of mechanical properties.

SUMMARY AND FUTURE OUTLOOK

The investigation of Al-Fe alloys in additive manufacturing represents a paradigm shift in the field of light metal metallurgy. By exploiting the extreme non-equilibrium conditions inherent to laser powder bed fusion (LPBF), researchers have been able to transform iron, which conventionally constitutes the most problematic impurity in aluminum, into an effective strengthening agent

The Circular Economy: Al-Fe as the Standard for Recycled AM Materials

The global aluminum industry faces a looming crisis in terms of the build-up of "tramp" elements, especially iron, in recycled scrap flows. Conventional purification processes are energy-prohibitive. However, a recycling-friendly alloy design

paradigm, as proposed by Sun et al. (2025) and Takata et al. (2025), provides a feasible resolution (see Figure 1). Empirical evidence indicates that LPBF processes not only tolerate but actually benefit from iron concentrations that far exceed the limits of wrought alloys. Sun et al. (2025) showed that it is possible to synthesize an Al-Fe-Mo-Si-Zr alloy with a high Fe intrusion tolerance during the recycling process. In parallel, de Araujo et al. (2021) explicitly demonstrated the successful synthesis of a quasicrystal-forming $\text{Al}_{95}\text{Fe}_2\text{Cr}_2\text{Ti}_1$ alloy using actual recycled material (aluminum cans) as feedstock. The rapid solidification inherent to LPBF suppresses the formation of coarse $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ platelets, which normally embrittle cast alloys, while promoting the development of beneficial metastable precipitates such as BCC $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mo})_3\text{Si}$. Takata et al. (2025) refined this approach by implementing an alloy design strategy grounded in elemental partitioning, employing liquid-partitioning elements (Fe, Mn, Cu) to generate strengthening eutectic networks and solid-partitioning elements (Ti) to refine the matrix. This lends credence to Al-Fe alloys as the forthcoming standard for sustainable, low-carbon-footprint additive manufacturing, thereby facilitating the direct upcycling of contaminated scrap into high-performance components.

In-Situ Composites: Growing Reinforcements During Printing

The development trajectory of Al-Fe alloys goes beyond simple solid solutions and eutectic systems to enter the realm of in-situ metal-matrix composites (MMCs). Kang et al. (2023) underscored the capacity of LPBF to synthesize quasicrystal-reinforced composites in a single processing step. Through the use of an atomized Al-Fe-Cr pre-alloyed powder, they were able to realize an in-situ reaction, which precipitated nanosized icosahedral quasicrystalline (i-QC) phases within the aluminum matrix. Unlike ex-situ composites where ceramic particles (e.g., SiC , TiB_2) are mechanically mixed and often suffer from poor interfacial wetting or

agglomeration, in-situ phases such as the i-QC in Al-Fe-Cr exhibit semi-coherent interfaces with the matrix. This setup provides excellent load transfer and strong interfacial bonding. Kang et al. (2023) reported this microstructure to have a high ultimate tensile strength (530 MPa) with a reduction in plasticity, which is attributed to Orowan strengthening from nano-quasicrystalline particles and grain boundary strengthening from fine α -Al grains. Consequently, this in-situ methodology allows for the tailoring of "hierarchical microstructures," where the size and distribution of the reinforcement is spatially controlled by modulating the laser parameters.

Industrial Scalability and Performance Benchmarking

To evaluate the industrial viability of Al-Fe alloys, it is essential to benchmark them against the prevailing leaders in additive manufacturing: the workhorse alloy AlSi10Mg and the high-performance aerospace alloy Scalmalloy®.

The Cost-Performance Gap

AlSi10Mg dominates the AM market due to its excellent processability and low cost. Nonetheless, it suffers from limited high-temperature performance, losing significant strength above 200 °C due to Mg₂Si phase coarsening. On the opposite spectrum, Scalmalloy® (Al-Mg-Sc-Zr) delivers outstanding strength and specific modulus but at a prohibitive cost attributable to its high scandium content (~0.6–1.0 wt%).

Al-Fe alloys occupy a strategic "Goldilocks" zone. They offer high-temperature performance that is superior to AlSi10Mg and comparable to that of titanium alloys, but at a fraction of the material cost compared to Scalmalloy®. By utilizing iron, an easily available, low-cost element often acting as a contaminant, these alloys form a sustainable, cost-effective solution for components

requiring thermal resistance, such as heat exchangers, casing covers, and engine brackets.

References

Ai, X., Wang, J., Wen, T., Yang, F., Dong, X., Yang, H., & Ji, S. (2022). A high Fe-containing AlSi12 alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 18. (Note: Cited in-text as Dong et al. due to corresponding authorship)

Arcieri, N., Marola, S., Actis Grande, M., & Manfredi, D. (2025). Al-Fe-Ce alloy processed by laser powder bed fusion microstructure and mechanical characterization. *Materials Science & Engineering A*, 947, 149252.

Bahari-Sambran, F., Carreño, F., Medina, J., Orozco-Caballero, A., & Cepeda-Jiménez, C. M. (2026). Microstructure, mechanical properties and thermal stability of a high-strength AlFeCrSi alloy processed by laser powder bed fusion. *Materials Science & Engineering A*, 952, 149687.

Cheng, Y., Miyawaki, T., Wang, W., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2024). Laser-beam powder bed fusion of Al-Fe-Cu alloy to achieve high strength and thermal conductivity. *Additive Manufacturing Letters*, 8, 100191.

de Araujo, A. P. M., Pauly, S., Batalha, R. L., Coury, F. G., Kiminami, C. S., Uhlenwinkel, V., & Gargarella, P. (2021). Additive manufacturing of a quasicrystal-forming Al95Fe2Cr2Ti1 alloy with remarkable high-temperature strength and ductility. *Additive Manufacturing*, 41, 101960.

Ding, H., Xiao, Y., Bian, Z., Wu, Y., Yang, H., Wang, H., & Wang, H. (2021). Design, microstructure and thermal stability of a novel heat-resistant Al-Fe-Ni alloy manufactured by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 885, 160949.

Kang, N., Zhang, Y., El Mansori, M., & Lin, X. (2023). Laser powder bed fusion of a novel high strength quasicrystalline Al-Fe-

Cr reinforced Al matrix composite. *Advanced Powder Materials*, 2(2), 100108.

Lin, Y., et al. (2022). Heterogeneous structure and mechanical properties of strong and tough Al alloys prepared by selective laser melting. *Acta Metallurgica Sinica*, 58.

Loginova, I. S., Sazerat, ... Loginov, Pozdniakov, Popov, & Solonin. (2020). Evaluation of microstructure and hardness of novel Al-Fe-Ni alloys with high thermal stability for laser additive manufacturing. *JOM*.

Park, H. S., Ekaputra, C. N., & Dunand, D. C. (2023). Effect of Fe additions on microstructure and mechanical properties in near-eutectic Al–Ce alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 882, 145409.

Pauzon, C., Buttard, M., Després, A., Chehab, B., Blandin, J.-J., & Martin, G. (2022). A novel laser powder bed fusion Al-Fe-Zr alloy for superior strength-conductivity trade-off. *Scripta Materialia*, 219, 114878.

Pedrazzini, S., Galano, M., Audebert, F., Collins, D. M., Hofmann, F., Abbey, B., Korsunsky, A. M., Liebllich, M., Garcia Escorial, A., & Smith, G. D. W. (2016). Strengthening mechanisms in an Al-Fe-Cr-Ti nano-quasicrystalline alloy and composites. *Materials Science and Engineering: A*, 672, 175–183.

Pérez-Prado, M. T., Martin, A., Shi, D. F., Milenkovic, S., & Cepeda-Jiménez, C. M. (2022). An Al-5Fe-6Cr alloy with outstanding high temperature mechanical behavior by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 55, 102828.

Qi, X., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2020). Laser powder bed fusion of a near-eutectic Al–Fe binary alloy: Processing and microstructure. *Additive Manufacturing*, 35, 101308.

Qi, X., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2021). Managing both high strength and thermal conductivity of a laser powder bed fused Al–2.5Fe binary alloy: Effect of annealing on microstructure. *Materials Science & Engineering A*, 805, 140591.

Qi, X., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2022). Change in microstructural characteristics of laser powder bed fused Al–Fe binary alloy at elevated temperature. *Journal of Materials Science & Technology*, 97, 38–53.

Rakhmonov, J. U., Vo, N. Q., Croteau, J. R., Dorn, J., & Dunand, D. C. (2022). Laser-melted Al-3.6Mn-2.0Fe-1.8Si-0.9Zr (wt%) alloy with outstanding creep resistance via formation of α -Al(FeMn)Si precipitates. *Additive Manufacturing*, 60, 103285.

Revilla, R. I., et al. (2025). Corrosion behaviour of novel Al-Fe-Zr alloy developed for additive manufacturing. *Corrosion Science*, 257, 113292.

Sun, S. B., Zheng, L. J., Liu, J. H., & Zhang, H. (2017). Selective laser melting of an Al–Fe–V–Si alloy: Microstructural evolution and thermal stability. *Journal of Materials Science & Technology*, 33, 389–396.

Sun, S. B., Zheng, L. J., Liu, Y. Y., Liu, J. H., & Zhang, H. (2015). Characterization of Al–Fe–V–Si heat-resistant aluminum alloy components fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research*, 30(10), 1661-1669.

Sun, Z., Roscher, M., Paolantonio, M. C., Soh, V., Liu, C., Tsai, S.-P., Ng, C. K., Tan, C. C., Wang, P., & Jägle, E. A. (2025). Additive manufacturing of sustainable and heat-resistant Al-Fe-Mo-Si-Zr alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 177118.

Takata, N., et al. (2025). Design of high-performance sustainable aluminum alloy series for laser additive manufacturing. *Nature Communications*, 16.

Tang, X., Zhang, H., Xue, P., Wu, L., Zhang, J., Zhang, L., Liu, F., Ni, D., Xiao, B., & Ma, Z. (2025). Ultrahigh strength heat-resistant Al-Fe-V-Si-Sc alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Science & Technology*, 239, 299–306.

Tatsumi, R., et al. (2025). Variations in mechanical, electrical, thermal properties, and residual stress of laser powder bed fused Al-Fe binary alloy by annealing. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 7835–7846.

Wang, W., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2020). Formation of multiple intermetallic phases in a hypereutectic Al-Fe binary alloy additively manufactured by laser powder bed fusion. *Intermetallics*, 125, 106892.

Wang, W., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2022). High-temperature strength sustained by nano-sized eutectic structure of Al-Fe alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Materials Science & Engineering A*, 838, 142782.

Wang, W., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M., & Kato, M. (2022). Microstructural variations in laser powder bed fused Al-15%Fe alloy at intermediate temperatures. *Materials*, 15(13), 4497.

Wang, Y., Li, R., Li, J., Zou, L., Yuan, T., Li, J., Liu, X., & Lai, D. (2024). Toward the superior high-temperature strength of Al-5Fe alloy for powder bed fusion-laser beam: Stabilizing Al₆Fe nanoprecipitate by Sc and Zr elements. *Materials Science & Engineering A*, 897, 146351.

Wang, Y., Li, R., Yuan, T., Zou, L., Wang, M., & Yang, H. (2021). Microstructure and mechanical properties of Al-Fe-Sc-Zr alloy additively manufactured by selective laser melting. *Materials Characterization*, 180, 111397.

Wu, Y., Zhang, T., Chen, C., Hosseini, S. R. E., Zhang, X., & Zhou, K. (2022). Microstructure and mechanical property evolution

of additive manufactured eutectic Al-2Fe alloy during solidification and aging. *Journal of Alloys and Compounds*, 897, 163243.

Xu, J.-Y., Zhang, C., Liu, L.-X., Guo, R., Sun, M.-J., & Liu, L. (2023). Achieving high strength in laser powder-bed fusion processed AlFeCuZr alloy via dual-nanoprecipitations and grain boundary segregation. *Journal of Materials Science & Technology*, 137, 56–66.

Zheng, L., Liu, Y., Sun, S., & Zhang, H. (2015). Selective laser melting of Al–8.5Fe–1.3V–1.7Si alloy: Investigation on the resultant microstructure and hardness. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(2), 564–569.

Zhu, H., Sun, J., Guo, Y., Xu, X., Huang, Y., Jiang, Z., Wu, G., Li, J., & Liu, W. (2024). Selective laser melting of a novel Al-Si-Fe-Mn-Ni alloy with superior mechanical properties at both room and elevated temperatures: Influence of processing parameters and heat treatment. *Materials Characterization*, 214, 114098.

BÖLÜM 11

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM: EMİSYON REGÜLASYONLARI VE SU BUHARI ENJEKSİYONU

MEHMET SİNAN¹

Giriş

Küresel ısınma, hava kirliliği ve fosil yakıt kaynakların tükenmesi gibi sorunlar, otomotiv sektörünü sürdürülebilir odaklı bir dönüşüme zorlamaktadır.

Hava kirliliği, atmosfere yabancı maddelerin girişiyle oluşurken; yağış, rüzgâr, nem sıcaklık, basınç ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik faktörler de bu durumu yaygın hale getirmektedir. Plansız kentleşmenin bir sonucu olarak, yeşil alanların yetersizliği ve her türlü amaç için kullanılan katı sıvı ve gaz yakıtlar da hava kirliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu kirliletiç unsurların başında kuşkusuz, fosil yakıt tüketimi yapan motorlu araçlar gelmektedir. Bu bağlamda, motorlu araçlarda ki “yanma” olayı, hava kirliliğinin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. İçten yanmalı motorlarda bu yanma sonrası ortaya çıkan emisyonlar, tüm dünyanın mücadele ettiğı ciddi bir sorun haline gelmiştir.

Otomotiv sektöründe fosil yakıt kullanımını azaltmaya yönelik elektrikli, hibrit ve hidrojen yakıt hücreli araçlar gibi çeşitli “yeşil dönüşüm” çözümleri geliştirilmektedir. Emisyonları azaltmada en etkili yol, motor içi verimlilik artırıcı önlemler ile egzoz gazı arıtım sistemlerinin birlikte kullanılmasıdır. Elektronik kontrollü enjeksiyon, EGR ve katalitik konvertör gibi teknolojilerle zararlı emisyonlar önemli ölçüde azaltılmaktadır. Ayrıca, düşük kükürtlü yakıtlar ve biyoyakıt katkıları, emisyon kontrolünde önemli rol oynarken, su buharı enjeksiyonu gibi yenilikçi sistemler de NOx emisyonlarını sınırlamaktadır.

Düzenli araç bakımları ile daha temiz yanma sağlanabilirken, uzun vadede fosil yakıtlardan tamamen uzaklaşmak adına elektrikli ve karbon nötr teknolojilere geçiş zorunludur. Bu dönüşüm, sadece teknolojik gelişmelerle değil, aynı zamanda düzenleyici politikalar, teşvikler ve kamu bilinciyle desteklenmelidir. Uluslararası standartlara uyum, Ülkemizde emisyon kontrolünün kurumsallaşmasını hızlandıracaktır. Bu sayede, daha temiz ve sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı mümkündür.

Günümüzde çevre sorunları, küresel ölçekte insanlığın karşı karşıya kaldığı en önemli tehditlerden biri haline gelmiştir. Özellikle hava kirliliği, hem insan sağlığına hem de ekosisteme olan olumsuz etkileri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Hızla artan dünya nüfusunun, beraberinde getirdiğı sanayileşme ve kentleşme ile birlikte hava kalitesinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır. Fosil yakıtların yoğun olarak kullanıldığı ulaşım, enerji üretimi ve sanayi gibi sektörler, atmosfere salınan zararlı gazların başlıca kaynaklarıdır. Bu olumsuz koşulları minimize etmek amacı ile alternatif güç kaynaklarına daha popüler bir tanımlama ile “Yeşil Dönüşüm”e yönelmiştir. Tam elektrikli hibrit veya Hidrojen yakıt hücreli çalışmalar tüm sektörün çalışma alanına dönüşmüş durumdadır. Oluşan bu emisyonları kontrol altında tutmak

¹ Öğr. . Gör.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü. ORCID No:0000-0001-5346-6814

amacıyla hergün biraz daha geliştirilen standartlar yasal zorunluluklar uygulanmaya devam etmektedir

Enerji Tüketimi

Dünya genelindeki enerji tüketiminin büyük bir kısmı, petrol türevleri ve sentetik yakıtların yakılmasıyla karşılanmaktadır. Ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılan taşıtlar, ihtiyaç duydukları enerjiyi içten yanmalı motorlar aracılığıyla, büyük ölçüde fosil yakıtların kullanılmasıyla elde etmektedir. Ancak bu motorlarda genellikle tam yanma sağlanamamakta, bunun sonucunda çeşitli zararlı emisyonlar oluşmaktadır. Bu emisyonlar, başta hava kirliliği olmak üzere çevresel birçok soruna neden olmaktadır.

Fosil yakıtlar, Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu kapsamda akaryakıtlar (motorin, benzin, LPG), özellikle ulaştırma sektörünün temel enerji kaynağını teşkil etmektedir. Ancak bu tüketim aynı zamanda çevresel etkileri ve dışa bağımlılığı da artırmaktadır.(ETKB (2023))

Petrol Sanayi Derneği'nin (PETDER) 2023 yılı raporuna göre, aşağıdaki tabloda yer alan veriler Türkiye'de gerçekleşen akaryakıt tüketimini ortaya koymaktadır. 2023 yılı itibarıyla alternatif enerji kaynaklarıyla çalışan araçların sayısında artış olmasına rağmen, petrol türevli yakıtların tüketiminde belirgin bir artış yaşanmıştır.

Tablo1 2022-2023 yılları akaryakıt tüketimi

Yakıt Türü	2022 Tüketimi (milyon ton)	2023 Tüketimi (milyon ton)	Değişim (%)
Motorin (Dizel)	30,2	32,0	+6,0%
Benzin	4,0	5,0	+25,0%
LPG (Otogaz)	3,1	3,1	0,0%
Toplam	37,3	40,1	+7,5%

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi son yıllarda özellikle elektrikli araçların sayısı artmasına rağmen fosil yakıtlardaki tüketim artmaya devam etmektedir. kullanılan her yakıtın hava kirliliğine olan etkisi de özellikle metropollerde tehlikeli boyutlara ulaşmaktadır. Egzoz Emisyon standartları kısıtlamaları her geçen zaman azaltmaya devam etse de trafikteki mevcut araçların önemli bir kısmı belirli bir yaşın üzerindedir. Bu durum emisyon açısından tehlike boyutlarının üzerindedir.

Özellikle karayolu taşımacılığının ticari alandaki baskın rolü nedeniyle, dizel yakıt kullanan araçların akaryakıt tüketimindeki payı oldukça yüksektir. Yıllık motorin tüketimi yaklaşık 32 milyon ton seviyesine ulaşırken, benzinli araçların tüketimi yıllık ortalama 5 milyon ton civarındadır. Bu durum, ulaştırma sektörünün dizel motorlara olan bağımlılığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır

TÜİK verilerine göre 2024 yılı itibarıyla Türkiye’de yaklaşık 29 milyon motorlu kara taşıtı bulunmaktadır. Bunların yaklaşık %40’ı dizel yakıtlı, %35’i LPG’li, %25’i ise benzinlidir.(TÜİK (2024)) Ayrıca, 2023 yılında elektrikli araçların sayısında yaşanan artışa rağmen, benzin tüketimi bir önceki yıla göre %25 oranında artış göstermiştir. Motorin tüketiminde ise yalnızca %6’lık bir artış yaşanmasına rağmen, toplam tüketim miktarı benzin tüketiminin yaklaşık altı katına ulaşmıştır. Bu veriler, Türkiye’de fosil yakıtlara dayalı ulaşım sisteminin hâlen baskın olduğunu ve alternatif enerji kaynaklarının etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Fosil yakıtlarda yanma ve emisyonlar

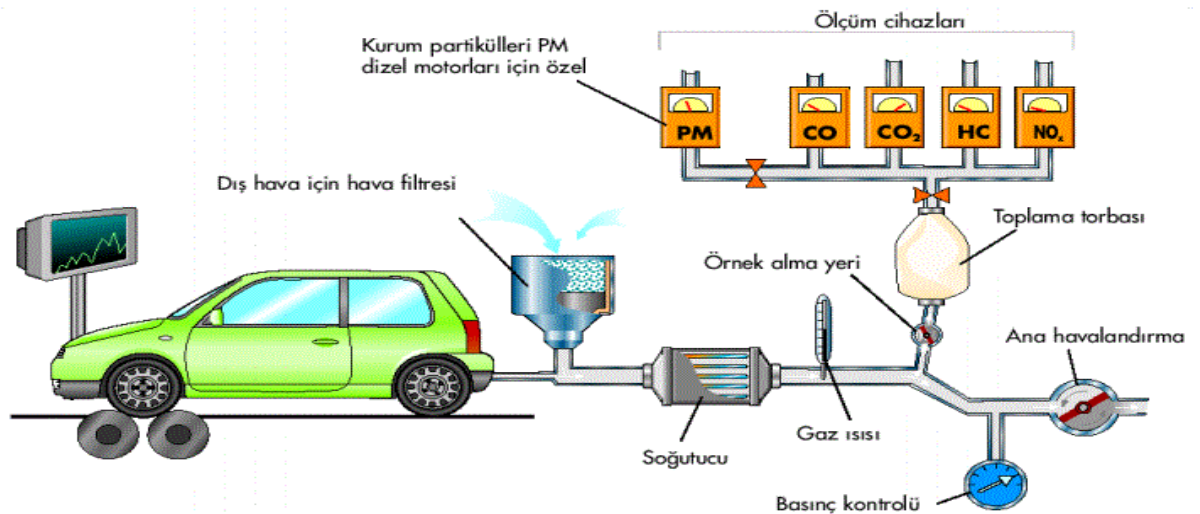
Enerji ihtiyacının karşılanmasında uzun yıllardır kullanılan fosil yakıtlar, içerdikleri karbon ve hidrojen elementleri sayesinde yüksek ısısal enerji sağlar. Ancak bu yakıtların yanma süreci, atmosferik kirleticilerin başlıca kaynaklarından biridir (Demirbaş, A. 2003).

Yanma Süreci: Temel Kimya

Fosil yakıtların bileşimi büyük oranda hidrokarbonlardan oluşur. Tipik bir yanma tepkimesi şu şekildedir:



İdeal yanma, yakıtın içerdiği karbon ve hidrojenin oksijenle tam olarak reaksiyona girerek yalnızca karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) oluşturduğu kimyasal süreçtir. Bu durum 1/14,7 Air/Fuel (hava-yakıt) oranı olarak tüm çalışmaların ana amacı olmuş durumdadır. Motorlarda kullanılan tüm elektronik entegre sistemler yaygın adıyla ECU (Elektronik Kontrol Üniteleri) bu karışım oranını elde etmek amacıyla uygun olarak tasarlanmıştır (Ekinci, A. 2017)



Şekil 1: egzoz emisyonları çeşitliliği

Tam yanma koşulları sağlanamazsa karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (HC) ve partikül maddeler gibi zararlı bileşenler ortaya çıkar (5). Ayrıca yüksek sıcaklıkta yanma, atmosferdeki azotun oksijenle reaksiyona girerek azot oksitleri (NO_x) oluşturmaya neden olur.

Tablo 2. 2022-2023 yılları akaryakıt tüketimi

Kirletici	Kaynak	Çevresel Etki
CO ₂	Tam yanma	Sera etkisi, küresel ısınma
CO	Eksik yanma	Zehirli gaz, insan sağlığına zarar
HC	Yanmamış yakıt	Zehirli gaz, insan sağlığına zarar
NO _x	Yüksek sıcaklıkta yanma	Asit yağmurları, ozon oluşumu
SO ₂	Kükürt içeren yakıtlar	Asit yağmurları, solunum hastalıkları
PM (Partikül madde)	Yanmamış karbon parçacıkları	Akciğer hastalıkları, kanser riski

yanma sonucu oluşan bu istenmeyen emisyonları kısaca tanımlayacak olursak

Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit (CO₂), doğrudan insan sağlığı üzerinde toksik bir etki yaratmasa da, çevresel açıdan son derece kritik bir sera gazıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan CO₂'nin yaklaşık %50'si atmosferde birikmekte ve bu durum atmosferdeki CO₂ yoğunluğunu giderek artırmaktadır. Son 20 yılda salınan insan kaynaklı CO₂'nin yaklaşık dörtte üçü fosil yakıtların yakılmasından, geri kalanı ise ormansızlaşma gibi arazi kullanımındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Ekinci, A. 2017)

Karbonmonoksit (CO)

Karbonmonoksit (CO), eksik yanma sonucu oluşan, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Küresel CO emisyonlarının %70'inden fazlası ulaşım sektörüne aittir. CO'nun hemoglobine

bağlanma kapasitesi, oksijeninkinden yaklaşık 200 kat daha fazladır. Bu bağlanma, kandaki oksijen taşınmasını engeller, dokuların oksijen almasını önleyerek ciddi zehirlenmelere neden olabilir. Özellikle kalp hastalığı olan bireylerde bu durum ölümcül sonuçlara yol açabilir (Özcan, F. 2010).

Azot Oksitler (NO_x)

Azot oksitler (NO_x), yüksek sıcaklıklarda havadaki azot ve oksijenin tepkimeye girmesiyle oluşur. NO_x gazları, hemoglobine bağlanabildiği gibi, akciğerlerdeki nemle birleşerek nitrik asit (HNO₃) oluşturarak solunum yollarında tahrişe neden olur. Bu bileşiklerin uzun süreli maruziyeti, özellikle solunum sistemi hastalıkları ve akciğer kanseri riskini artırabilir. Ayrıca, NO_x gazları doymamış hidrokarbonlarla tepkimeye girerek kimyasal duman (smog) oluşumuna neden olur; bu da hava kirliliğini artıran önemli bir etkidir (Ekinci, A. 2017)

Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbonlar (HC), içten yanmalı motorlarda yakıtın tam yanmaması nedeniyle oluşur. Zengin karışımla çalışan motorlarda yeterli oksijenin bulunmaması, fakir karışımlarda ise düşük sıcaklık ve cidara yakın bölgelerdeki alev sönmeleri HC oluşumunu artırmaktadır. Atmosferdeki HC bileşenleri, NO_x ile güneş ışığı altında tepkimeye girerek fotokimyasal duman (smog) oluşumuna neden olur. Bu durum özellikle yaz aylarında daha belirgindir. HC bileşenleri doğrudan zehirli olmasa da bazı türleri solunum yollarında tahrişe neden olabilir (Yıldız, A. 2020).

Partikül Maddeler (PM)

Partikül maddeler, içten yanmalı motorlardan çıkan is (karbon tanecikleri) şeklinde ortaya çıkar. Dizel motorlarda, yanma sırasında hidrojenin karbona göre daha aktif olması nedeniyle oksijen ilk olarak hidrojenle birleşir. Yeterli oksijen veya zaman bulunmadığında karbon yanmadan kalır ve egzoz yoluyla dışarı atılır. Bu parçacıklar solunum yoluyla vücuda girdiğinde ciddi sağlık sorunlarına ve hava kirliliğine yol açabilir (Ekinci, 2017).

Sanayileşmenin artması ve motorlu taşıt kullanımının yaygınlaşması ile birlikte çevre kirliliği küresel bir sorun haline gelmiştir. Özellikle içten yanmalı motorların çalışması sırasında ortaya çıkan egzoz emisyonları, hava kalitesinin bozulmasına ve iklim değişikliğine neden olan en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, araçlardan kaynaklanan emisyonları sınırlandırmak amacıyla uluslararası düzeyde çeşitli emisyon standartları oluşturulmuştur. (European Commission., 2022)

Türkiye, 2009 yılından itibaren AB ile uyumlu olarak Euro emisyon standartlarını uygulamaya başlamıştır. Halihazırda yeni tescil edilen araçlarda Euro 6d-TEMP normu zorunlu kılınmıştır. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bu uygulamalardan sorumludur. (European Commission., 2022)

Motorlu taşıtlar, şehir içi hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biridir. Avrupa Birliği, 1992 yılından itibaren "Euro" adını verdiği emisyon sınırlamaları ile araçlardan kaynaklanan kirlleticileri aşamalı olarak azaltmayı amaçlamaktadır. Bu standartlar, karbon monoksit (CO),

azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC), partikül madde (PM) ve karbondioksit (CO₂) gibi zararlı gazların emisyonlarını sınırlar.

Tablo 1. Avrupa Birliği Emisyon standartları

Euro Seviyesi	Yürürlük Yılı	Benzinli CO (g/km)	Dizel NO _x (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	1992	2.72	-	-
Euro 2	1996	2.2	0.7	-
Euro 3	2000	2.3	0.5	-
Euro 4	2005	1.0	0.25	0.025
Euro 5	2009	1.0	0.18	0.005
Euro 6	2014	1.0	0.08	0.005

2025 yılında yürürlüğe girmesi planlanan Euro7 standartları elektrikli ve hibrit araçları da içerecek şekilde dizayn edilmeye devam etmektedir.

Dönüşümler ve Emisyon Regülasyonları

Otomotiv sektöründe son yılların gündemi iki ana kavram etrafında şekillenmektedir: “Çevre Kirliliği” ve “Dönüşüm”. Bu iki kavram birbirini tetiklemekte ve aynı zamanda otomotiv sektöründeki Ar-Ge çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. “DÖNÜŞÜM” kavramı. Artan olumsuz çevresel koşullar, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren paydaşları yeni çalışmalara yönlendirmiştir. Bu süreçte yapılan pek çok çalışma sonucunda inovatif fikirler ortaya çıkmıştır. Otomotiv sektöründe “Yeşil Dönüşüm” olarak ifade edilen birçok alternatif yaklaşım hayata geçirilmektedir. Tam elektrikli, hibrit veya hidrojen yakıt hücreli araçlar gibi, fosil yakıtların etkisini en aza indirmeyi hedefleyen çeşitli çalışmalar devam etmektedir

Enerji dönüşümü, karbon yoğun enerji kaynaklarından düşük karbonlu veya karbon nötr kaynaklara geçiş sürecidir. Bu süreç; güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynakların kullanımını arttırmayı amaçlar (IEA. (2023). Elektrik üretiminde güneş ve rüzgârın payı her yıl artmakta, enerji depolama ve akıllı şebeke teknolojileri bu dönüşümü desteklemektedir.

Otomotiv sektörü de dönüşümün merkezinde yer almaktadır. Elektrikli araçlar (EV), hibrit sistemler ve hidrojen yakıt hücreli araçlar geleneksel içten yanmalı motorların yerine geçmektedir. Avrupa Birliği 2035 yılı itibariyle benzinli ve dizel araç satışlarını yasaklamayı planlamaktadır (Özcan, F. ,2010).

Tüm bu çalışmalar ileriye dönük üretim çalışmalarında daha düşük emisyon değerleri elde etmeye yönelik faaliyetler olarak değerlendirilebilir. Dönüşümler üretime yönelik çalışmalar mevcut araçların yaydığı emisyonların tehlikesini etkilememektedir. Mevcut

araçların ise yanma verimliliğini artırmak, zararlı gaz üretimini kaynağında azaltır. Yanma esnasında bu fonksiyonlar ise şu şekilde sıralanabilir

Yakıt Enjeksiyon Kontrolü

Elektronik olarak yönetilen sistemler, hava-yakıt oranını optimize eder (Heywood, J. B. 1988). Daha iyi ve etkin bir yanma sonucu istenmeyen emisyon değerleri minimize edilmiş olur.

EGR (Egzoz Gazı Devirdaimi)

Egzoz gazlarının bir kısmının tekrar yanma odasına gönderilmesiyle NO_x üretimi azaltılır (Karagöz, Y. (2022)). Dizel motorlarda özellikle yanma sonu sıcaklığı çok yüksek değerlere ulaşıldığından oluşan NO_x salınımını azaltmak amacı ile, egzoz gazlarının bir kısmını silindir içine gönderilir. Yanma kötüleştirilerek sıcaklık düşürülmüş olur

Ateşleme zamanlaması optimizasyonu

Yanma zamanının uygun şekilde ayarlanması ile CO ve HC salınımı düşer. (Karagöz, Y. (2022))

Yanma zamanının (ateşleme avansı ve püskürtme zamanlaması) motor çalışma koşullarına uygun şekilde ayarlanması, yanma veriminin artırılmasında ve egzoz emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ateşleme veya yakıt enjeksiyonunun piston üst ölü noktaya (ÜÖN) göre optimum konumda gerçekleştirilmesi, maksimum silindir basıncının uygun krank açısında oluşmasını sağlayarak yakıtın daha etkin şekilde yanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, eksik yanma eğilimini azaltmakta ve karbon monoksit (CO) ile yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

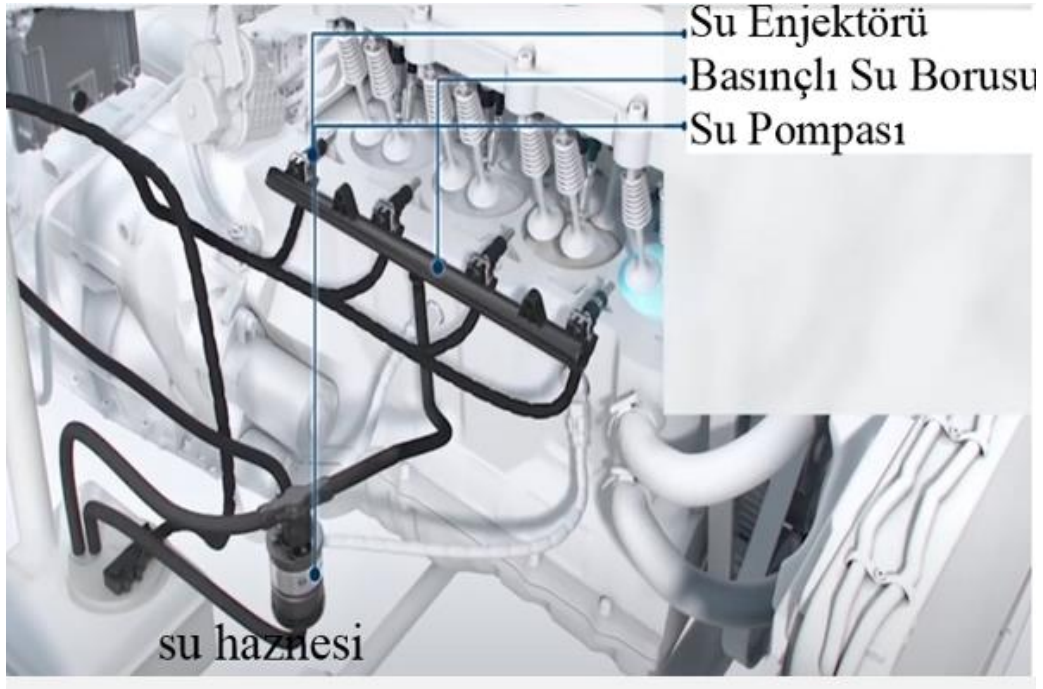
Yanma zamanlamasının gecikmesi durumunda, yanma süreci genişleme zamanına sarkmakta ve silindir içi sıcaklıklar düşmektedir. Bu durum, yakıtın tam oksidasyonunu engelleyerek CO ve HC oluşumunu artırmaktadır. Benzer şekilde, aşırı erken yanma zamanlaması ise vuruntu eğilimini artırmakta ve yanma kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle optimum yanma zamanlamasının belirlenmesi, performans ve emisyon kontrolü arasında hassas bir denge kurulmasını gerektirmektedir (Heywood, 1988; Turns, 2013).

Su Buharı Enjeksiyonu

Su buharı enjeksiyonu (Water Vapor Injection, WVI), yanma odasına belirli oranlarda suyun sıvı veya buhar fazında püskürtülmesi esasına dayanan bir emisyon kontrol yöntemidir. Bu yöntemde su, yanma süreci sırasında buharlaşarak ortamdan ısı absorbe etmekte ve silindir içi maksimum sıcaklığın düşürülmesini sağlamaktadır. Böylece sıcaklığa duyarlı emisyon bileşenlerinin oluşumu üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

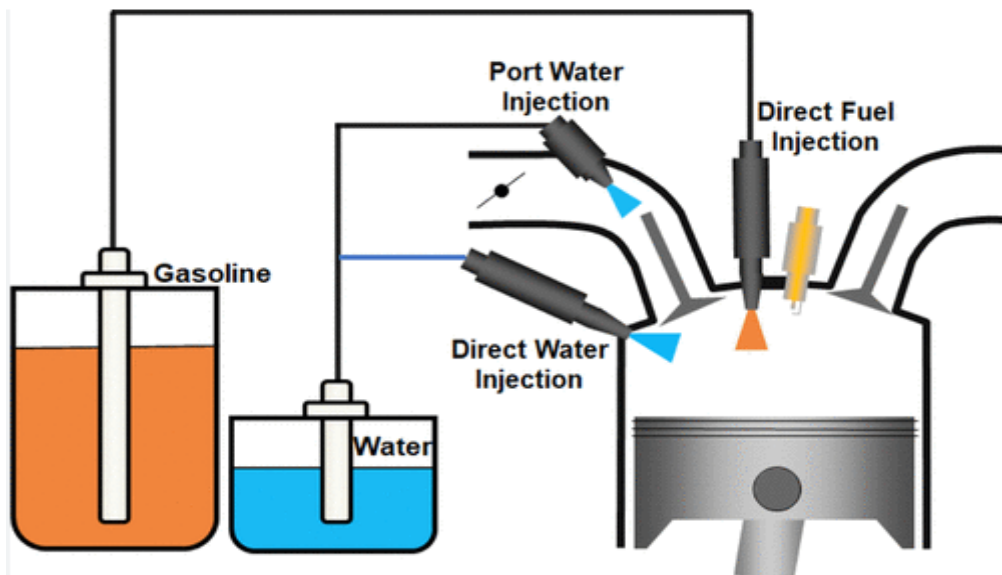
Bu uygulamanın egzoz emisyonlarına olan etkileri, literatürde farklı kirletici türleri açısından kapsamlı biçimde incelenmiştir. Öncelikle, yanma sıcaklığının düşürülmesi sayesinde termal NO_x oluşumu önemli ölçüde sınırlandırılmakta ve uygun su/hava oranlarında NO_x emisyonlarında %40–60 seviyelerine varan azalmalar rapor edilmektedir (Lefebvre & Ballal, 2010). Bununla birlikte, su enjeksiyonu yanma verimini belirli oranlarda

azaltabildiğinden, optimum seviyelerin aşılması durumunda karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında %10–20'ye varan artışlar meydana gelebilmektedir (Basha & Anand, 2011; Turns, 2013).



Şekil2: su buharı enjeksiyonu

Dizel motor uygulamalarında ise WVI, yakıt atomizasyonunu iyileştirerek ve zengin karışım bölgelerini azaltarak kurum (soot) oluşumunu sınırlandırmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, su/dizel oranının %20 seviyelerine kadar yükseltilmesi hâlinde partikül madde kütlesinde %30–50 oranında azalma sağlanabildiği belirtilmektedir (Johnson, 2009; Heywood, 1988).



Şekil3: püskürtme modeli

Ayrıca WVI sistemlerinin enjeksiyon zamanlaması, püskürtme basıncı, damlacık boyutu ve dağılım homojenliği gibi parametrelere bağlı olarak farklı performans ve emisyon sonuçları verdiği bilinmektedir. Bu nedenle modern motorlarda, su enjeksiyonu sistemleri elektronik kontrol üniteleri ile entegre edilerek motor yükü ve devir sayısına bağlı olarak dinamik biçimde yönetilmekte, böylece emisyon azaltımı ile motor verimi arasında optimum denge kurulması hedeflenmektedir.

Su buharı enjeksiyonu (Water Vapor Injection, WVI), yanma odasına su (sıvı veya buhar halinde) enjekte edilmesiyle çalışan bir yöntemdir. Bu uygulamanın emisyonlara etkisi, literatürde emisyon çeşitliliği açısından şöyle özetlenebilir

NOx emisyonları:

Su enjeksiyonu yanma sıcaklığını düşürerek NOx oluşumunu azaltır. Su/hava oranının %10'a kadar çıkarılmasıyla NOx emisyonlarının %40-60 oranında azalabileceği gösterilmiştir (Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R., 2010).

Su enjeksiyonu, yanma odasına kontrollü miktarda suyun püskürtülmesi yoluyla alev sıcaklığını düşüren etkili bir emisyon azaltma yöntemidir. Su, buharlaşma sırasında yüksek miktarda gizli ısı absorbe ederek yanma ortamındaki maksimum sıcaklığı azaltmakta ve böylece sıcaklığa duyarlı olan termal NOx oluşum mekanizmasını baskılamaktadır. Özellikle Zeldovich mekanizmasına bağlı olarak oluşan NOx emisyonları, yanma sıcaklığıyla doğrudan ilişkili olduğundan, sıcaklıktaki düşüş emisyon seviyelerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar, su/hava oranının %10 seviyelerine kadar artırılması durumunda, yanma stabilitesi korunarak NOx emisyonlarında yaklaşık %40–60 oranında azalma elde edilebildiğini ortaya koymaktadır (Lefebvre & Ballal, 2010). Bununla birlikte, su enjeksiyonunun yalnızca emisyonlar üzerinde değil, motor performansı üzerinde de etkileri bulunmaktadır. Uygun oranlarda uygulandığında vuruntu eğilimini azaltmakta ve daha yüksek sıkıştırma oranlarının kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ancak aşırı su enjeksiyonu, yanma gecikmesine, yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarının artmasına ve özgül yakıt tüketiminin yükselmesine neden olabilmektedir.

Ayrıca su enjeksiyonu sistemi; enjeksiyon zamanlaması, damlacık boyutu, püskürtme basıncı ve dağılım homojenliği gibi parametrelere bağlı olarak farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle sistemin motor karakteristiklerine uygun şekilde tasarlanması ve elektronik kontrol üniteleriyle optimize edilmesi, hem emisyon azaltımı hem de performans korunumu açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde su enjeksiyonu, özellikle ağır hizmet dizel motorları ve yüksek performanslı benzinli motorlarda, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) ve seçici katalitik indirgeme (SCR) gibi sistemlerle birlikte tamamlayıcı bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. (Turns, S. R. (2012).

CO ve HC emisyonları:

Yanma sıcaklığı düştüğünde yanma verimi azalabileceğinden CO (karbon monoksit) ve HC (hidrokarbon) emisyonları artabilir. Eksik yanma nedeniyle CO'da %10-20 artış raporlanmıştır. (Turns, S. R. (2012)

Su buharı enjeksiyonu uygulamalarında yanma ortamına ilave edilen suyun buharlaşması, silindir içi maksimum sıcaklığı düşürerek NOx oluşumunu sınırlandırırken,

belirli sınırların aşılması durumunda yanma veriminin azalmasına neden olabilmektedir. Yanma sıcaklığının düşmesi, yakıt-hava karışımının tutuşma ve oksidasyon süreçlerini yavaşlatmakta; bu durum özellikle karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında artışa yol açmaktadır. Düşük sıcaklık koşullarında karbonun tam oksidasyonu gerçekleşmemekte ve CO'nun karbondioksit (CO_2) dönüşümü sınırlanmaktadır.

Deneyisel çalışmalar, su buharı enjeksiyonu oranının optimum seviyelerin üzerine çıkması hâlinde, eksik yanma eğiliminin arttığını ve CO emisyonlarında yaklaşık %10–20 oranında yükselme meydana geldiğini göstermektedir (Basha & Anand, 2011; Heywood, 1988). Benzer şekilde, düşük yanma sıcaklıkları alev yayılma hızını düşürerek yanmamış hidrokarbonların silindir dışına atılmasına neden olmakta ve HC emisyonlarının artmasına katkı sağlamaktadır (Turns, 2013).

Bu nedenle su buharı enjeksiyonu sistemlerinin tasarımında, NO_x azaltımı ile yanma verimi arasındaki dengenin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Enjeksiyon miktarı, zamanlaması ve dağılım homojenliği uygun şekilde ayarlanmadığı takdirde, emisyon kontrolünde sağlanan kazanımlar performans kayıplarıyla dengelenebilmektedir. Güncel motor kontrol sistemlerinde, su enjeksiyonunun elektronik kontrol üniteleri aracılığıyla yük ve devir koşullarına bağlı olarak dinamik biçimde düzenlenmesi, CO ve HC artışlarının sınırlandırılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

4.4.3. Partikül madde (PM):

Dizel motorlarda su enjeksiyonu kurum (soot) oluşumunu azaltır. Su/dizel oranı %20'ye kadar artırıldığında partikül kütleinde %30-50 azalma gözlenmiştir. (Basha, J. S., & Anand, R. B. 2011)

Dizel motorlarda su enjeksiyonu, yanma sürecinde silindir içi sıcaklık ve lokal oksijen dağılımını düzenleyerek kurum (soot) oluşumunun azaltılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Su, yanma ortamında buharlaşarak yakıt püskürtme jetinin atomizasyonunu iyileştirmekte, yakıt-hava karışımının homojenliğini artırmakta ve zengin karışım bölgelerinin oluşumunu sınırlandırmaktadır. Bu durum, özellikle difüzyon alevi bölgelerinde meydana gelen eksik yanma süreçlerini azaltarak partikül oluşum mekanizmasını baskılamaktadır.

Deneyisel çalışmalar, su/dizel oranının %20 seviyelerine kadar yükseltilmesi hâlinde, yanma stabilitesi korunarak partikül madde kütleinde yaklaşık %30–50 oranında azalma sağlanabildiğini göstermektedir (Basha & Anand, 2011; Johnson, 2009). Bununla birlikte, su enjeksiyonu sayesinde silindir içi sıcaklıkların düşmesi, kurum oksidasyon sürecini de destekleyerek oluşan partiküllerin egzoz çıkışına ulaşmadan önce kısmen parçalanmasına katkı sağlamaktadır (Heywood, 1988).

Ancak su enjeksiyonu oranının aşırı artırılması durumunda, yanma gecikmesinin uzaması ve alev sıcaklığının kritik seviyelerin altına düşmesi nedeniyle HC ve CO emisyonlarında artış meydana gelebilmektedir. Bu nedenle sistemin, motor yükü, devir sayısı ve püskürtme karakteristiklerine bağlı olarak optimize edilmesi gerekmektedir. Güncel dizel motor uygulamalarında su enjeksiyonu, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) ve dizel partikül filtresi (DPF) sistemleriyle birlikte kullanılarak, hem birincil hem de ikincil emisyon kontrol stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

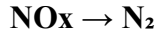
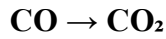
Egzoz Gazı Arıtım Sistemleri

Avrupa Birliği Euro normları, ABD EPA standartları ve Japonya'nın JP normları gibi uluslararası emisyon düzenlemeleri, motor üreticilerini egzoz emisyonlarını azaltmaya zorlamış ve bu doğrultuda çeşitli **egzoz gazı arıtım sistemlerinin** geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu sistemler, motor performansını mümkün olan en az etkiyle korurken emisyonları yasal sınırların altına indirmeyi hedefler. Katalitik konvertörler, dizel partikül filtreleri (DPF), seçici katalitik redüksiyon (SCR) sistemleri, oksidasyon katalizörleri (DOC) ve egzoz gazı devridaim (EGR) sistemleri gibi farklı teknolojiler, motor türüne ve hedef emisyona göre özelleştirilmiştir . (Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006)

Günümüzde kullanılan başlıca egzoz gazı arıtım sistemleri genel olarak belirtilmiş, çalışma prensipleri, etkinlikleri kısaca açıklanmıştır.

Katalitik konvertörler:

CO, HC ve NO_x bileşenlerini zararsız bileşiklere dönüştürür. Benzinli motorlarda yaygın. Üç zararlı gazı aynı anda azaltır:



Yüksek sıcaklıkta platin, paladyum veya rodyum gibi katalizörler görev alır. (Heywood, J. B. 1988).

Dizel Partikül Filtresi (DPF)

2.5 mikron altındaki partikülleri tutarak havaya salımını önler. Dizel motorlardan çıkan kurum (soot) partiküllerini tutar. Egzoz sıcaklığı belirli bir seviyeye ulaştığında “rejenerasyon” yaparak partikülleri yakar. Partikül emisyonunu %85-95 oranında azaltır. (Johnson, T. V. 2009).

SCR (Seçici Katalitik İndirgeme)

AdBlue gibi üre bazlı çözeltiler kullanılarak NO_x gazları su buharına ve azota dönüştürülür. NO_x emisyonlarını azaltmak için dizel motorlarda kullanılır. Egzoza üre (AdBlue) enjekte edilir; amonyak (NH₃) oluşur ve NO_x ile tepkimeye girerek zararsız N₂ ve H₂O üretir. NO_x'i %70-95 oranında azaltabilir. (Majewski, W. A., & Khair, M. K. ,2006)

Sonuçlar

Fosil yakıtlı motorların neden olduğu egzoz emisyonları, hem çevresel hem de halk sağlığı açısından ciddi sorunlar yaratmaktadır. Karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC), partikül madde (PM) ve karbondioksit (CO₂) gibi kirleticilerin atmosfere salımı, iklim değişikliği, hava kirliliği, asit yağmurları ve solunum yolu hastalıkları gibi çok

boyutlu sonuçlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, bu motor teknolojilerinde zararlı gazların azaltılması, yalnızca teknik bir iyileştirme değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe, uluslararası emisyon standartlarına ve kamu sağlığına yönelik bir zorunluluktur.

Yapılan analizler göstermektedir ki, emisyon azaltımı için en etkili yol çoklu stratejilerin birlikte uygulanmasıdır. Öncelikle motor içi önlemlerle yakıtın daha verimli ve temiz bir şekilde yakılması, kaynakta emisyon oluşumunu azaltmaktadır. Elektronik kontrollü yakıt enjeksiyonu, egzoz gazı devirdaimi (EGR), ateşleme zamanlaması optimizasyonu gibi sistemler sayesinde motor performansı korunurken emisyon değerleri düşürülmektedir. Bununla birlikte, egzoz gazı arıtım sistemleri—örneğin katalitik konvertörler, dizel partikül filtreleri ve SCR sistemleri—yakıt yanması sonrası oluşan zararlı bileşenlerin atmosfere salınmasını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Yakıt kalitesinin artırılması da emisyon kontrolünde kritik rol oynamaktadır. Düşük kükürtlü yakıtların ve biyoyakıt katkılarının kullanımı, özellikle NO_x ve partikül emisyonlarını minimize etmektedir. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen su buharı enjeksiyonu gibi yenilikçi uygulamalar, NO_x oluşumunun termodinamik olarak sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu tür yöntemler, geleneksel teknolojilere düşük maliyetli ve uygulanabilir çözümler sunarak geçiş sürecini kolaylaştırmaktadır.

Motorlu Taşıtların belirli periyotlarda yapılması gereken bakımlar aksatılmadığı takdirde iyi bir yanma elde edileceğinden emisyon salınımları da azaltılacaktır.

Uzun vadede yalnızca teknik önlemlerle sınırlı kalmak yeterli olmayacaktır. Fosil yakıt bağımlılığının azaltılması için elektrikli araçlar, hidrojen yakıt hücreli sistemler ve karbon nötr yakıt teknolojilerine geçiş kaçınılmazdır. Bu dönüşüm yalnızca mühendislik çabalarıyla değil, aynı zamanda regülasyonlar, teşvikler ve kamu bilinci ile desteklenmelidir. Uluslararası standartlara (Euro 6, Tier 3 vb.) uyumun artırılması, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde de emisyon kontrolünün kurumsallaşmasını hızlandıracaktır.

Fosil yakıtlı motorlarda zararlı gazların azaltılması teknik, çevresel ve politik boyutları olan karmaşık bir süreçtir. Mevcut sistemlerin iyileştirilmesi, yenilikçi çözümlerin teşvik edilmesi ve uzun vadeli politikalarla desteklenmesi sayesinde daha temiz, daha sağlıklı ve daha sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı mümkün olacaktır.

Kaynaklar

- Basha, J. S., & Anand, R. B. (2011). Effects of water injection on emissions reduction in a DI diesel engine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36, 1407–1416.
- Demirbaş, A. (2003). Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 44(1), 203–213.
- Ekinci, A. (2017). Motorlu taşıtlarda egzoz emisyonları ve çevreye etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 30(3), 417–429.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Türkiye ulusal enerji planı ve 2053 net sıfır emisyon stratejisi*. ETKB.
- European Commission. (2021). *Fit for 55 package*. <https://ec.europa.eu>
- European Commission. (2022). *Vehicle emissions standards*. <https://ec.europa.eu>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA.
- Johnson, T. V. (2009). Diesel emission control in review. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 1(1), 68–81.
- Karagöz, Y. (2022). Fosil yakıtlı motorlarda emisyon azaltımı için yenilikçi yaklaşımlar *Makina Mühendisliği Dergisi*, 31(4), 122–130.
- Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions* (3rd ed.). CRC Press.
- Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006). *Diesel emissions and their control*. SAE International.
- Özcan, F. (2010). *Buji ateşlemeli bir motorda LPG ve CNG (sıkıştırılmış doğalgaz) kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- PETDER. (2023). *Akaryakıt ürünleri tüketim raporu 2023*. <https://www.petder.org.tr>
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2023). *Motorlu taşıtlarda emisyon uygulamaları raporu*.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024). *Motorlu kara taşıtları istatistikleri*. TÜİK.
- Turns, S. R. (2013). *An introduction to combustion: Concepts and applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Yıldız, A. (2020). *İçten yanmalı motorlarda emisyonların oluşumu ve azaltılması* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi.

