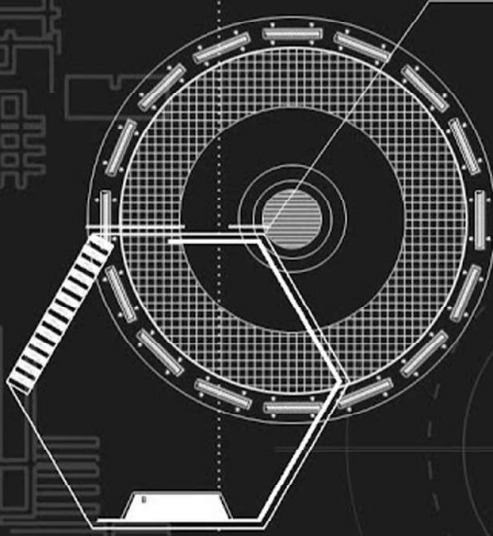


MEKANİK SİSTEMLERİN TASARIMI VE ANALİZİ:

AKIŞKAN DAVRANIŞI, ROBOTİK YAPILAR
VE İMALAT MEKANİĞİ

EDİTÖRLER:
PROF. DR. SÜLEYMAN NEŞELİ
ÖĞR. GÖR. GÖKHAN YALÇIN



MEKANİK SİSTEMLERİN TASARIMI VE ANALİZİ:

**AKIŞKAN DAVRANIŞI, ROBOTİK YAPILAR
VE İMALAT MEKANİĞİ**

EDİTÖRLER:

**PROF. DR. SÜLEYMAN NEŞELİ
ÖĞR. GÖR. GÖKHAN YALÇIN**

EĞİTİM
yayınevi

MEKANİK SİSTEMLERİN TASARIMI VE ANALİZİ: AKIŞKAN DAVRANIŞI, ROBOTİK YAPILAR VE İMALAT MEKANİĞİ

Editörler: Prof. Dr. Süleyman Neşeli, Öğr. Gör. Gökhan Yalçın

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Tasarım Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-735-6

1. Baskı, Aralık 2025

Kütüphane Kimlik Kartı

MEKANİK SİSTEMLERİN TASARIMI VE ANALİZİ: AKIŞKAN DAVRANIŞI, ROBOTİK YAPILAR VE İMALAT MEKANİĞİ

Editörler: Prof. Dr. Süleyman Neşeli, Öğr. Gör. Gökhan Yalçın

IV+129 s., 160x240 mm

Kaynakça var, izin yok.

E-ISBN: 978-625-385-735-6

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM
yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42
bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.
P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America
americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
sevkiyat@egitimyayinevi.com

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye
+90 332 499 90 00
bilgi@egitimkitabevi.com

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr
bilgi@kitapmatik.com.tr

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
yayınevi

Kitapmatik
internetteki kitaplarınız

Kitapmatik
yayınevi

EĞİTİM
kitabevi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
------------	----

BÖLÜM 1

SİKLON AYIRICILARIN AKIŞ DİNAMİĞİ VE GEOMETRİK TASARIM PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİ.....	1
--	---

Osman KOCAASLAN, Gökhan YALÇIN

BÖLÜM 2

SANTRİFÜJ POMPALARDA KAVİTASYON OLGUSU: SAYISAL ve DENEYSEL BULGULAR.....	31
--	----

Osman KOCAASLAN, Yusuf Çağlar KAĞITCI

BÖLÜM 3

SAVUNMA SANAYİ İÇİN KONVEYÖR ENTEGRELİ ROBOT KOLU TASARIMI VE KİNEMATİK ANALİZİ.....	57
---	----

Zeynep CESUR, Gökhan YALÇIN

BÖLÜM 4

İMALATTA KESME MEKANİĞİ: FREZELEME KUVVET TEORİSİ VE ÖLÇÜM ESASLARI.....	88
---	----

Yusuf Çağlar KAĞITCI, Süleyman NEŞELİ

BÖLÜM 5

CNC TAKIM TEZGÂHLARININ MODERN ÜRETİMDEKİ ROLÜ VE GELECEĞİ	114
---	-----

Muhammed NOYAT, Ramazan BARAN

ÖNSÖZ

Makine mühendisliği disiplininin temel çalışma alanları olan akışkanlar mekaniği, kavitasyon olgusu, pompa sistemleri, robotik mekanizmalar ve talaşlı imalat süreçleri, günümüzde hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda kritik bir konumda yer almaktadır. Bu konuların kuramsal temelleri ile uygulamalı yönlerini bütüncül biçimde ele alan kaynaklara duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu doğrultuda hazırlanan bu kitap, makine mühendisliği alanındaki temel prensipleri, deneysel bulguları ve mühendislik analizlerini sistematik bir yaklaşımla okuyucuya sunmayı amaçlamaktadır.

Kitapta yer alan bölümler; siklon ayırıcıların akış dinamiği ve tasarım parametreleri, kavitasyonun fiziksel mekanizması ve sayısal–deneysel değerlendirmeleri, robot kollarının kinematik analizi, mekanik bileşenler üzerinde gerçekleştirilen gerilme ve yapı analizi ile talaşlı imalatta kesme kuvveti modellerinin teorik temelleri gibi geniş bir içerik bütününe kapsamaktadır. Her bölüm, ilgili alandaki güncel literatür ışığında hazırlanmış olup, gerekli matematiksel altyapı ve mühendislik bağıntıları akademik bir çerçevede sunulmuştur.

Bu çalışmanın temel amacı; lisans ve lisansüstü düzeyde eğitim gören öğrenciler için nitelikli bir ders başvuru kaynağı oluşturmak, araştırmacılara güncel gelişmeleri içeren bütünlüklü bir akademik metin sağlamak ve mühendislik uygulamalarında görev alan profesyonellere kavramsal ve analitik bir referans sunmaktır. Kitabın, makine mühendisliği alanındaki eğitim-öğretim süreçlerine

katkı sağlayacağı, araştırmalara ve projelere destek sunacağı değerlendirilmektedir.

Bu eserin hazırlanmasında bilimsel katkılarını esirgemeyen tüm araştırmacılara, öğrencilere ve kurumsal paydaşlara teşekkür ederiz.

Editörler

Prof. Dr. Süleyman Neşeli
Öğr. Gör. Gökhan YALÇIN

BÖLÜM 1

SİKLON AYIRICILARIN AKIŞ DİNAMİĞİ VE GEOMETRİK TASARIM PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİ

Osman KOCAASLAN* Gökhan YALÇIN**

GİRİŞ

Gaz akımları içinde taşınan katı partiküllerin ayrıştırılması; çevresel emisyonların azaltılması, ekipman ömrünün korunması ve proses verimliliğinin artırılması açısından endüstriyel sistemlerde kritik bir gerekliliktir. Bu amaçla farklı prensiplere dayalı ayırma sistemleri kullanılmaktadır. Günümüzde endüstriyel toz tutma teknolojileri arasında filtrasyon, elektrostatik çöktürme, ıslak yıkama (scrubbing) ve merkezkaç ayırma (siklon) yöntemleri öne çıkmaktadır. Siklon ayırıcılar, gaz–katı karışımların ayrıştırılmasında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Enerji üretim tesislerinden gemi boşaltma sistemlerine, akışkan yataklı reaktörlerden gıda işleme proseslerine kadar birçok endüstriyel

* Öğr. Gör. Dr., Selçuk Üniversitesi, Huğlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Konya, okocaaslan@selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-7848-6974

* Öğr. Gör., Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Konya, gyalcin@ktun.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-5929-917X

uygulamada etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca madencilik ve kimya endüstrilerinde gerçekleştirilen kırma, öğütme, ayırma ve kalsinasyon gibi işlemler sırasında oluşan partiküllerin uzaklaştırılmasında da önemli bir rol üstlenirler (Gimbun vd., 2005; Hsiao vd., 2009; Parker vd., 1981; Hsiao vd., 2009; Bernado vd., 2006; He vd., 2012; Barnhart vd., 1982; Wang ve Sui, 2023).

Endüstriyel ayırma uygulamalarında siklon ayırıcılar, karmaşık mekanik sistemler gerektirmeyen sade tasarımları, yüksek sıcaklık ve basınca karşı dayanıklı olmaları ve bakım gereksinimlerinin azlığıyla öne çıkmaktadır (Wang ve Sui, 2023; Du vd., 2016; Qi vd., 2012). Endüstriyel ayırma sistemlerinin üretiminde kullanılan çelik yapıların imalatında, çevresel etkileri minimize eden MQL (Minimum Miktarla Yağlama) gibi sürdürülebilir yöntemlerin AISI 5115 gibi alaşımlar üzerindeki başarısı, imalat verimliliğini artırmaktadır (Sayın Kul & Yamaner, 2025). Siklon bileşenlerinin üretiminde tercih edilen metal alaşımların işlenebilirlik sınırları, özellikle takım radyüsü ve kesme kuvvetleri gibi değişkenler üzerinden optimize edilerek operasyonel maliyetler düşürülebilir (Yamaner & Sayın Kul, 2025). Mühendislik sistemlerinin tasarım aşamasında, karmaşık geometrilerin akış karakteristikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla gelişmiş simülasyon ve analiz tekniklerinden yararlanılmaktadır (Neşeli vd., 2018a). İmalat süreçlerinde yüksek hassasiyet gerektiren mekanik sistemlerin tasarımı, operasyonel verimliliği doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır (Neşeli vd., 2019). Siklonlar, taşıyıcı gaz fazına kazandırılan dönel hareketin yarattığı merkezkaç kuvveti sayesinde, partikülleri akışkan fazdan ayıran mekanik sistemlerdir. Genellikle silindirik bir gövde, konik bir alt kısım ve bir çıkış borusundan oluşurlar. Gaz, teğetsel olarak giriş yapan bir akımla hazneye girer; dönme hareketiyle birlikte parçacıklar duvar yüzeyine savrulur ve burada hızlarını kaybederek alt toplama haznesine düşer. Alan yazın incelendiğinde, siklon ayırıcıların akış yapısı ve performans karakteristiklerine ilişkin çok sayıda deneysel ve sayısal çalışmanın bulunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bu çalışmaların önemli bir kısmının belirli bir geometrik parametreye ya da sınırlı bir işletme koşuluna odaklandığı; geometrik tasarım değişkenlerinin akış yapısı, basınç kaybı ve ayırma verimi üzerindeki eş zamanlı ve bütüncül etkilerinin ise çoğu zaman ayrı ayrı ele alındığı dikkat çekmektedir. Özellikle giriş geometrisi, konik profil, gövde oranları ve çıkış borusu konfigürasyonu gibi temel tasarım unsurlarının, birbirleriyle etkileşimli

biçimde akış alanını nasıl şekillendirdiğine dair genelleştirilebilir çıkarımların sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, klasik ampirik modeller ile modern CFD tabanlı yaklaşımlar arasında köprü kuran, farklı geometrik konfigürasyonların performans sonuçlarını akış fiziği temelli bir bakış açısıyla birlikte değerlendiren çalışmaların görece az olduğu anlaşılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda siklon ayırıcıların tasarımında karşılaşılan temel problemlerden biri, yüksek ayırma verimi ile düşük basınç kaybı arasındaki dengenin sağlanmasının çoğu zaman deneme–yanılma temelli yaklaşımlara dayanmasıdır. Uygulamada sıklıkla tercih edilen standart geometrik oranlar, farklı proses koşulları ve partikül özellikleri altında her zaman optimum performansı garanti edememekte; bu durum enerji tüketiminde artışa veya beklenen ayırma etkinliğinin elde edilememesine yol açabilmektedir. Bu bağlamda, siklon ayırıcıların iç akış yapısını belirleyen geometrik tasarım parametrelerinin, türbülanslı akış karakteristikleri ve parçacık taşınım mekanizmaları ile ilişkili olarak daha açık ve sistematik biçimde ortaya konmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstriyel sistemlerde enerji tüketiminin minimize edilmesi ve operasyonel verimliliğin artırılması amacıyla farklı irtifa ve çalışma koşullarının etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmelidir (Aksoy ve Kazan, 2022). Sistem performansına etki eden parametrelerin belirlenmesinde regresyon analizi ve makine öğrenmesi gibi matematiksel modelleme yöntemleri, deneysel verilerin anlamlandırılmasında güçlü araçlar sunmaktadır (Ağaçayak, 2024; Ağaçayak vd., 2018b). Bu çalışma, söz konusu ihtiyaca yanıt verebilmek amacıyla, siklon ayırıcıların akış dinamiğini ve geometrik tasarım parametrelerinin performans üzerindeki etkilerini, literatürde yer alan deneysel ve sayısal bulgular ışığında bütüncül bir çerçevede ele almayı hedeflemektedir.

SİKLON AYIRICILARIN GEOMETRİK YAPILARI VE TASARIM ÖNERİLERİ

Siklon ayırıcıların endüstriyel kullanımına yönelik tarihsel gelişimi incelendiğinde ilk tasarımlar 19. yüzyılın sonlarına uzanır. İlk örnekleri 1870’li yıllarda metalurji ve tahıl işleme tesislerinde yerçekimi çöktürme odalarının alternatifi olarak uygulanmıştır. 1930’lu yıllar, siklon tasarımının teorik olarak tanımlanmaya başladığı dönemdir; Shepherd & Lapple (1939) ve Lapple (1951) tarafından geliştirilen ampirik korelasyonlar, ayırma verimi ve kesme çapı hesaplamalarında uzun

yıllar temel referans kabul edilmiştir (Shepherd vd., 1939; Lapple vd., 1951; Wang, 2004). Stairmand (1951) tarafından önerilen standart geometrik oranlar ise, akış kararlılığı ve basınç kaybı optimizasyonu açısından önemli bir dönüm noktası olmuştur (Stairmand, 1951; Wang, 2004). 1960’lardan itibaren yapılan çalışmalar, Barth (1956), Leith ve Licht (1972) gibi araştırmacıların katkılarıyla ampirik verim–basınç korelasyonlarını istatistiksel temellere oturtmuş; böylece siklonlarda basınç kaybı ile ayırma verimi arasındaki ilişki daha doğru biçimde tanımlanmıştır (Barth, 1956; Leith ve Licht, 1972; Wang, 2004). Biyomedikal ve endüstriyel frezeleme süreçlerinde oluşan kesme kuvvetlerinin literatürdeki etkileri, işleme stratejilerinin geliştirilmesinde temel teşkil etmektedir (Kağıtçı ve Neşeli, 2024). İşleme süreçlerinde meydana gelen sıcaklık değişimlerinin kontrolü, malzemenin yapısal bütünlüğünün korunması açısından Taguchi gibi optimizasyon yöntemleriyle analiz edilebilir (Kağıtçı ve Neşeli, 2025). Siklon ayırıcıların iç geometrisinde yüksek performans ve düşük basınç kaybı elde edebilmek için imalat aşamasındaki yüzey kalitesi kritik bir parametredir. Benzer şekilde, imalat teknolojilerinde AISI 1040 çeliği gibi malzemelerin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme parametreleri arasındaki ilişki, parçanın son kullanım performansını doğrudan etkilemektedir (Yamaner & Sayın Kul, 2024). Akış dinamiklerini optimize eden hassas geometrik yapıların üretiminde, AA 6082 alüminyum alaşımı gibi malzemelerin işlenebilirlik karakteristiklerinin ve kesme kuvvetlerinin doğru analiz edilmesi, boyutsal toleransların korunması açısından önem arz eder (Yamaner & Sayın Kul, 2025).

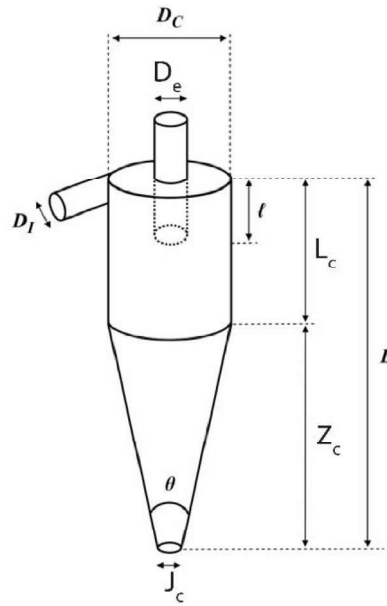
Bilgisayar teknolojilerinin ilerlemesiyle 1990’lardan sonra siklonlar üzerine yapılan çalışmalar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemlerinin etkin biçimde kullanıldığı yeni bir döneme girmiştir. *Texas A&M Cyclone Design (TCD)* modeli, farklı geometrik oranlara sahip tasarımlarda optimum giriş hızlarının belirlenmesine ve basınç düşümü tahminlerinin doğrulanmasına olanak sağlamıştır [out]. Günümüzde CFD tabanlı çalışmalar, siklon içindeki akış alanını üç boyutlu olarak çözümleyebilmekte; kısa devre akımı (short-circuit flow), halka boşluk resirkülasyonu ve eksenel kayma akımı (eccentric flow) gibi ikincil akış yapılarını ayrıntılı biçimde incelemektedir (Wang ve Sui, 2023). Bu sayede klasik ampirik modellerin ötesine geçilerek, geometrik ve operasyonel parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkileri daha kapsamlı şekilde değerlendirilebilmektedir.

Diğer partikül ayırma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, siklon ayırıcıların belirgin avantajları şunlardır:

- Basit ve sağlam geometrik yapıya sahip olmaları,
- Hareketli parça içermemeleri nedeniyle düşük bakım ve işletme maliyeti,
- Yüksek sıcaklık, aşındırıcı veya korozif ortamlarda güvenle çalışabilmeleri,
- Sürekli ve kesintisiz işletmeye uygun olmaları.

Buna karşın, siklon ayırıcılar ince partiküllerin ($<5 \mu\text{m}$) tutulmasında düşük verim gösterir ve yüksek dönel hızlarda basınç kaybı (ΔP) artışıyla enerji tüketimini yükseltir. Bu nedenle genellikle iri ve orta boyutlu partiküllerin (örneğin $>10 \mu\text{m}$) ayrıştırılmasında veya çok kademeli toz tutma sistemlerinin ön ayırıcı (pre-separator) basamağında tercih edilirler (Wang, 2004).

Siklon ayırıcılar basit bir geometrik yapıya sahiptirler. Günümüzde Lapple siklonunun yaygın kullanıldığı konfigürasyonda partikül barındıran akışkan silindirik gövdeye teğetsel olarak giriş yapar. Partiküllerin ayrıştırıldığı temiz akışkan siklon ayırıcı çıkış bölümünden sisteme yönlendirilir. Şekil 1’de siklon ayırıcının şematik görünümü ve tasarım parametreleri sunulmuştur. Lapple siklon konfigürasyonunda giriş kesiti dörtgensel olup ilgili çalışmada kesit yüksekliği “ H_c ” ve kesit genişliği “ B_c ” olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 1. Siklon konfigürasyonunun şematik yapısı ve tasarım değişkenleri (de Sá da Silva vd., 2024)

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan siklon ayırıştırıcılar için silindirik gövde çapına (D) referans ile tasarım değişkenleri türetilmektedir. Literatürde 1D2D, 1D3D, 2D2D konfigürasyonları kullanılarak siklon tasarımları yer almaktadır. İfade edilen konfigürasyonlarda silindirik ve konik gövdelerin uzunlukları belirtilmektedir. Örneğin 1D2D konfigürasyonunda silindirik gövde uzunluğu, silindirik gövde çapı kadar iken konik gövde uzunluğu bu çap değerinin iki katı kadardır (Wang, 2004). Siklon tasarım önerilerine yönelik her bir konfigürasyon için tasarım parametrelerine ilişkin bağıntılar Tablo 1’de verilmiştir (Wang, 2004). Siklon ayırıştırıcı konfigürasyonlarından 1D3D ve 2D2D konfigürasyonlarının 100 μm ’den düşük partikül boyutları için önerilmektedir (Wang vd., 2000). Simpson ve Parnell (1995), pamuk temizleme süreçlerinde karşılaşılan lif döngüsü sorununu azaltmak amacıyla düşük basınç kayıplı yeni bir siklon modeli olan 1D2D tasarımını geliştirmiştir (Simpson ve Parnell, 1995; Wang, 2004). Daha sonraki çalışmalar, özellikle yüksek lif içerikli karışımların ayırıştırılmasında, 1D2D yapısının 1D3D ve 2D2D tiplerine kıyasla daha elverişli performans sunduğunu göstermiştir (Wang vd., 1999; Wang, 2004).

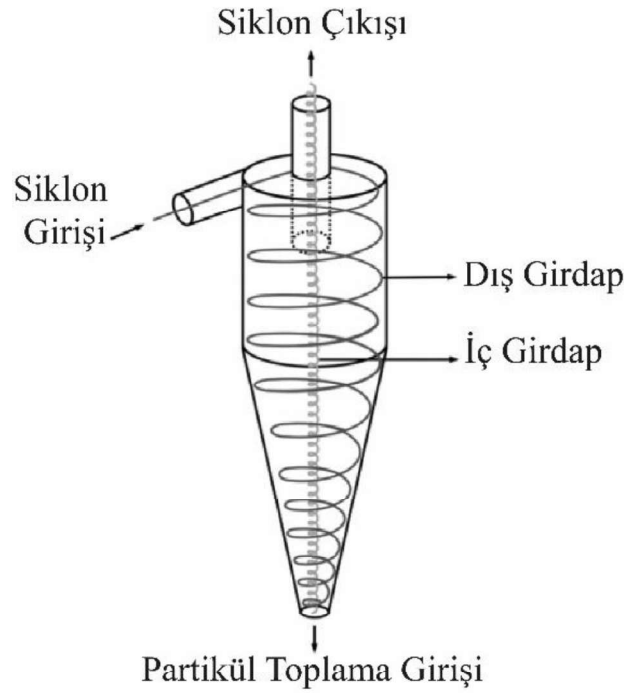
Tablo 1. Siklon ayırıştırıcılara yönelik tasarım değişken önerileri (Wang, 2004)

Konfigürasyonlar	Tasarım Değişkenleri						
	B_c	J_c	S_c	L_c	D_c	H_c	Z_c
1D3D	D/4	D/4	D/8	D	D/2	D/2	3D
1D2D	D/4	D/2	5D/8	D	D/1.6	D/2	2D
2D2D	D/4	D/4	D/8	2D	D/2	D/2	2D

SİKLON AYIRICILARDA AKIŞ YAPISI

Gaz–katı siklon ayırıcılarda akış düzeni, teğetsel giriş geometrisinin akıma kazandırdığı açısal momentumun etkisiyle oluşan karakteristik çift vorteks yapısı üzerinden şekillenir. Sisteme teğetsel olarak giren akım, Şekil 2’de görüldüğü üzere siklonun silindirik gövdesi içerisinde dış vorteksi oluşturarak aşağı yönde ilerler; akışın bu bölümünde hız alanı Rankine tipi bir vorteks davranışı sergiler (Nakhaei vd., 2020). Merkez bölgesinde katı cisim dönmesine benzeyen bir profil gözlenirken, duvar bölgesine yaklaştıkça kayıpsız vorteks karakteri belirginleşir. Dış vorteks konik bölgeye yaklaştıkça eksenel momentumunu yitirir ve akım yön değiştirerek iç vorteks hâline gelir. Bu dönüşümün gerçekleştiği nokta

literatürde vorteksin ‘ucu’ ya da ‘kuyruk bölgesi’ olarak anılmakta; bu nokta ile vorteks bulucusunun alt kenarı arasındaki eksensel mesafe ise ‘doğal vorteks uzunluğu’ olarak tanımlanmaktadır (Towler ve Sinnott, 2022). İç vorteks, genellikle gövde içine uzatılan çıkış borusu boyunca yukarı doğru yönlendirilerek temiz gaz akımı olarak sistemden uzaklaştırılır. Bu süreç boyunca, akımla taşınan partiküller merkezkaç etkisiyle duvarlara doğru taşınır ve duvar yakınındaki akışın sürüklemesiyle konik bölümün altındaki tahliye haznesine yönelir. Böylece, siklon içinde dönel akış alanı korunurken gaz fazı üst bölgeden çıkmakta, katı faz ise aşağıdan uzaklaştırılmaktadır (Nakhaei vd., 2020; Wang ve Sui, 2023; de Sá da Silva vd., 2024). Bu iki girdap yapısı arasında gelişen basınç gradyeni, momentum aktarımı ve duvar etkileri, siklonun enerji tüketimini ve ayırma verimini doğrudan belirler. Özellikle iç ve dış akım arasındaki keskin dönüş bölgesi, basınç kaybı ve akış kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir (Hoffmann vd., 1991).



Şekil 2. Siklon ayırıcılardaki akış yapıları (de Sá da Silva vd., 2024)

SİKLON AYIRICILARIN PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELERE YÖNELİK SAYISAL VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Siklon ayırıcılar, basit geometrileri ve hareketli parça içermeyen yapıları sayesinde endüstriyel gaz–katı ayırımında en sık tercih edilen ekipmanlardan biridir. Ancak bu sistemlerin ayırma verimi, basınç kaybı ve operasyonel kararlılığı; hem akış koşullarına hem de geometrik tasarım parametrelerine duyarlıdır. Bu nedenle, bir siklon ayırıcının performansını değerlendirmek veya tasarımı optimize etmek için, akış dinamiğini şekillendiren temel parametrelerin bütüncül olarak ele alınması gerekir.

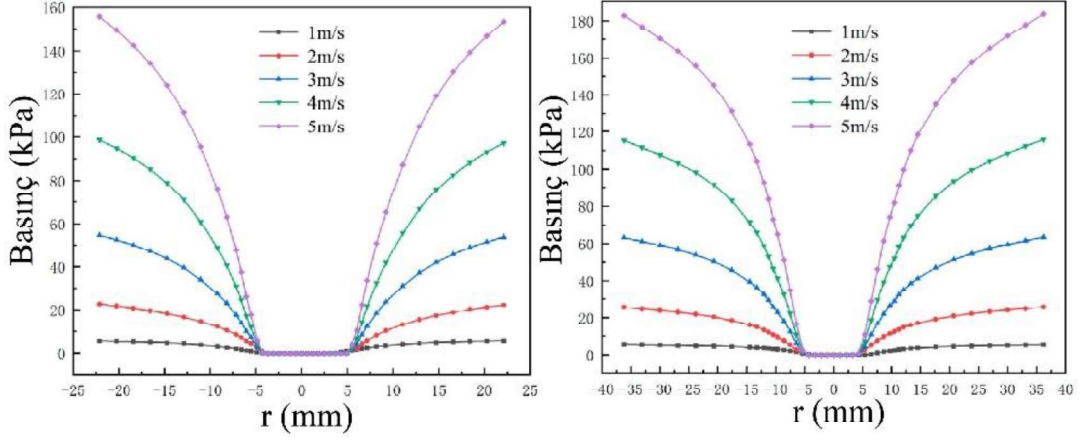
Gaz–katı faz ayırmanın söz konusu olduğu proseslerde, siklon ayırıcıların işletim performansı temel belirleyicilerden biridir. Bu performans, çoğunlukla iki ana gösterge üzerinden değerlendirilir: partikül toplama etkinliği ve basınç kaybı (Guo vd., 2024; Wang vd., 2019; Huang vd., 2018). Toplama etkinliği, sistemin parçacıkları akıştan uzaklaştırma kapasitesini ortaya koyarken; basınç kaybı, ayırıcının çalışması sırasında akımın uğradığı enerji tüketimini niceliksel olarak ifade eder. Her iki parametre de, siklonun farklı işletme koşulları altındaki davranışını karakterize etmede önemli bir yere sahiptir.

Literatürde siklon performansını etkileyen değişkenler genel olarak geometrik konfigürasyon, akış koşulları, partikül özellikleri ve çalışma rejimi başlıkları altında sınıflandırılmaktadır. Geometri; gövde çapı, giriş kesiti, silindirik kısım yüksekliği, konik bölüm açısı ve çıkış (vortex finder) boyutları ile tanımlanırken, akış koşulları çoğunlukla giriş hızı, türbülans seviyesi ve işletme basıncı üzerinden tanımlanır. Bunun yanında, partikülün yoğunluğu, boyutu, şekli ve yüklenme oranı da ayırım sürecinin merkezkaç kuvveti ile kaçış eğilimleri arasındaki dengesini belirleyen kritik faktörlerdir (Guo vd., 2024; de Sá da Silva vd., 2024; Santana vd., 2021).

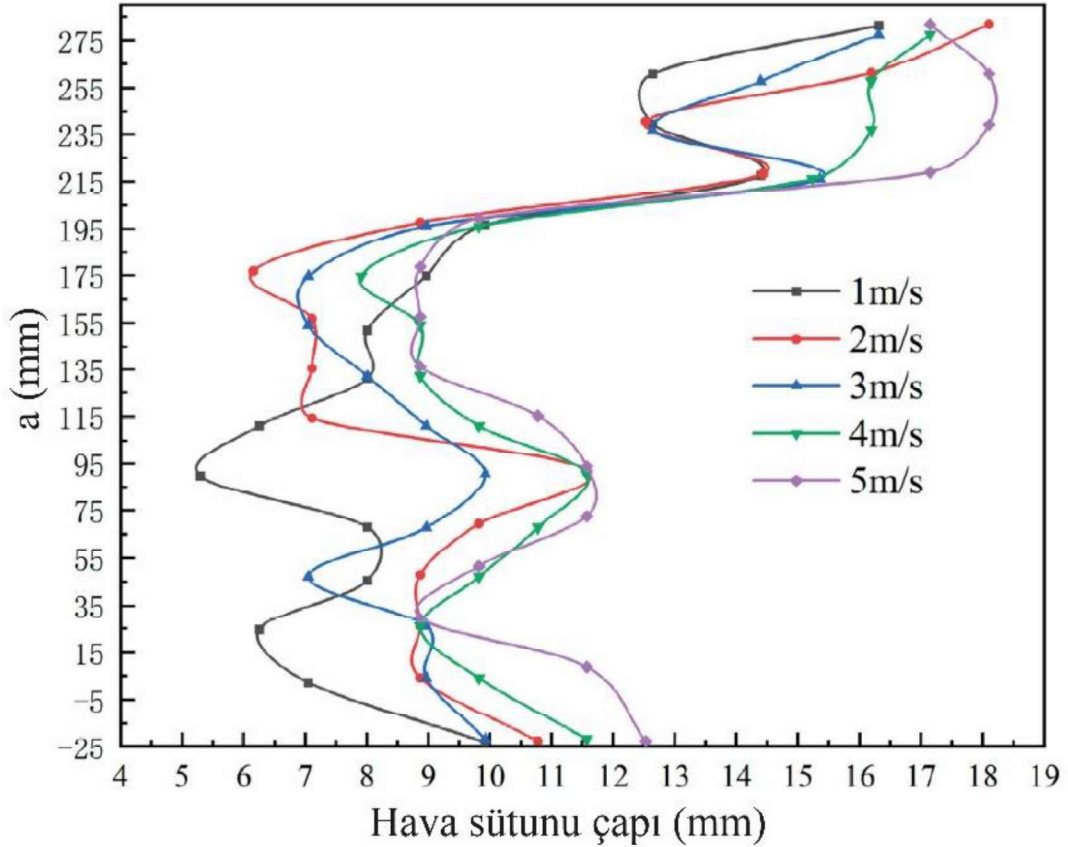
Siklon ayırıcıların performansı, büyük ölçüde içinden geçen gaz akımının karakteristiklerine bağlıdır. Giriş hızı, türbülans seviyesi ve işletme basıncı gibi akış koşulları, girdap yapılarının oluşumu, merkezkaç kuvvetinin etkinliği ve dolayısıyla partikül ayırma verimi üzerinde belirleyici rol oynar. Li vd., farklı akışkan hızlarında siklon ayırıcıların performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, çok düşük veya çok yüksek giriş hızlarında parçacık yer değiştirmesinin arttığını ve bunun ayırma veriminde düşüşe yol açtığını göstermektedir. Simülasyonlar

ayrıca, giriş konsantrasyonu ile giriş hızı arasında belirgin bir etkileşim olduğunu ortaya koymuştur. Düşük giriş hızlarında, kesme boyutu ve ayırma hassasiyeti, giriş konsantrasyonu %1–%9 aralığında değişirken düzenli bir şekilde artıp azalmamakta, dönüşümlü bir davranış sergilemektedir. Bu durum, parçacıklar arasındaki etkileşimin artmasına karşın, türbülans şiddetinin giriş konsantrasyonunun yükselmesiyle kademeli olarak azalmasından kaynaklanmaktadır. Giriş konsantrasyonu %20,25’in üzerine çıktığında ise parçacıklar arası etkileşim, türbülans azalmasının etkisini baskılayarak kesme boyutunun hızla artmasına ve ayırma hassasiyetinin düşmesine yol açmaktadır. Ayrıca, parçacıklar arasındaki etkileşimin azalması hem teğetsel hem de eksenel akış hızını düşürmekte ve bu durum akış alanının kararlılığını bozarak partiküllerin radyal dağılımını olumsuz etkilemektedir. Giriş hızı arttıkça, kesme boyutu giriş konsantrasyonuna bağlı olarak büyümekte ve buna bağlı olarak kesme kabiliyeti azalmaktadır. Bununla birlikte, 5–8 m/s giriş hızında ve %1–%9 giriş konsantrasyonu aralığında yüksek performanslı bir hidrosiklon elde edilebilmektedir. Giriş konsantrasyonu yaklaşık %20,25 olarak sabitlendiğinde ise ayırma performansı 15 m/s giriş hızında optimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu bulgular, giriş hızının uygun şekilde artırılmasının, giriş konsantrasyonundaki dalgalanmaların olumsuz etkilerini azaltarak beklenen kesme boyutuna ulaşmayı ve ayırma hassasiyetini artırmayı mümkün kıldığını göstermektedir (Feng vd., 2020). Zhang vd., giriş besleme hızının siklon içerisinde basınç dağılımı, hız alanı, hava sütunu oluşumu, türbülans kinetik enerjisi üzerine etkisini sayısal olarak irdelemiştir. Şekil 3’te farklı eksenel konumlarda ($z=0$ mm konik cidarın alt konumudur) verilen statik basınç dağılımı incelendiğinde besleme hızı değişse dahi statik basınç alanının genel davranışının benzer kaldığı ve dağılımın eksenel olarak simetrik olduğu görülmektedir. Statik basınç, çevresel duvar boyunca en yüksek değerine ulaşmakta, duvardan eksene doğru ilerledikçe kademeli bir azalma göstermekte ve eksen bölgesinde negatif değerlere dönmektedir. Bu durum, eksen boyunca bir düşük basınç hattının oluştuğunu ve akabinde bir hava sütununun meydana geldiğini göstermektedir. Duvardan eksene doğru basınçtaki bu düşüşün temel nedeni, aynı yönde teğetsel hızın artmasıdır; bu artış, statik basıncın giderek daha fazla kinetik enerjiye dönüşmesine yol açmaktadır. Ayrıca, besleme hızının 1 m/s’den 5 m/s’ye yükseltilmesiyle birlikte, maksimum statik basınç değerinin 5.49 kPa’dan 182.78 kPa’a çıktığı, yani toplamda 177.29 kPa’lık bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 4’te hava

sütununun eksen boyunca değişen çap dağılımını görülmektedir. Besleme hızının artmasıyla birlikte hava sütunu çapındaki dalgalanmaların belirgin biçimde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, besleme hızının yükseltilmesinin hava sütununun oluşma süresini kısalttığını ve yapısal bütünlüğünü güçlendirdiğini göstermektedir (Zhang vd., 2022).



Şekil 3. a) $z=90$ mm ve b) $z=170$ mm konumlarında statik basınç dağılımı (Zhang vd., 2022)



Şekil 4. Eksenel doğrultu boyunca hava sütunu çap dağılımı (Zhang vd., 2022)

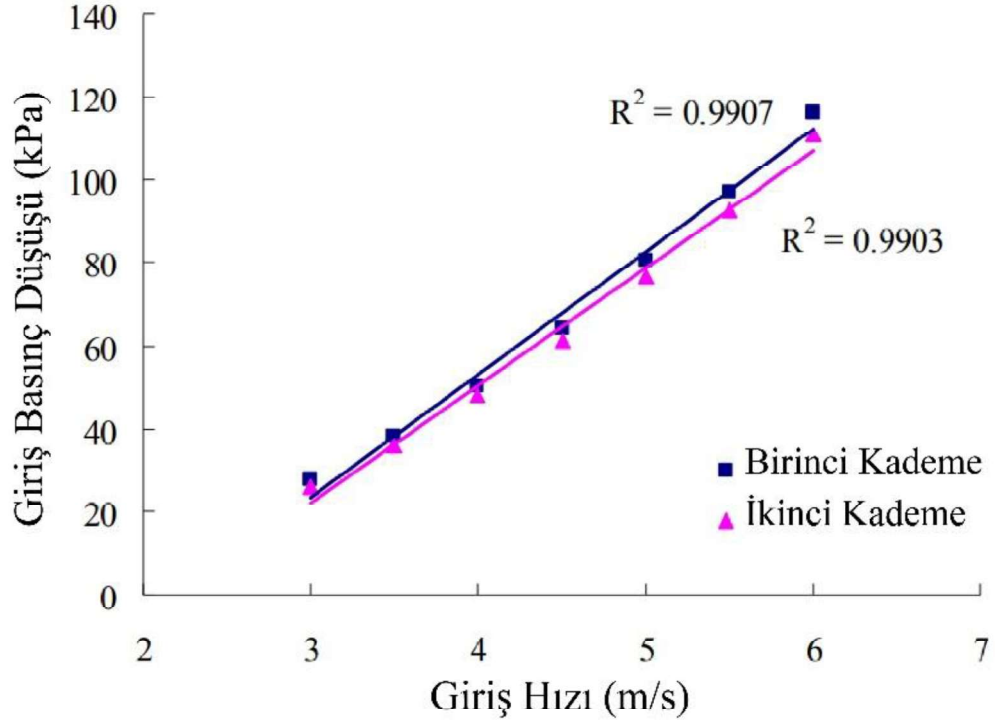
Misiulia vd., 0.22–7.54 LPM hacimsel debi aralığında yüksek verimli siklonda akış yapısı, basınç kayıpları ve partikülün penetrasyonunu

deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Siklonun performansını değerlendirmek üzere Euler Sayısı, kesme uzunluğu (ing. cut-size) ve penetrasyon doğrultusunu kullanılmıştır (Misiulia vd., 2022). Tyeb vd., hidrosiklon tasarım koşullarına özgü karakteristik özellikleri belirlemek amacıyla su bölünme (water split) davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, özellikle yüksek besleme debilerinde hidrosiklon içerisinde akışın tamamen gelişmiş ve kararlı bir girdap yapısına ulaştığını, bunun sonucunda su bölünme oranının “kararlı bölünme değeri” olarak ifade edilen tutarlı bir seviyede sabitlendiğini ortaya koymuştur (Tyeb vd., 2023). Guo vd., hidrosiklon separatörlerin aerobik granüler çamur (AGS) süreçlerindeki rolünü incelemiş ve bu ekipmanın askıda katı maddeyi önemli ölçüde azaltarak çamur çökeltme performansını iyileştirdiğini göstermiştir. Hidrosiklonun oluşturduğu kayma gerilmesi ve merkezkaç kuvvetleri granül oluşumunu desteklemiş; özellikle 0.3 m/s giriş hızının 400 µm üzeri granüller için %97’nin üzerinde ayırma verimi sağladığı belirlenmiştir. Büyük tane boyutuna sahip taşıyıcı materyaller (GAC, seramsit vb.) ile kullanıldığında hidrosiklonun sürekli AGS üretimi için uygulanabilir bir seçenek olduğu ortaya konmuştur (Guo vd., 2022). Zhu 5 mm çapındaki bir mini hidrosiklonun akış davranışını ve parçacık ayırma performansını CFD ve DNS yöntemleriyle incelemektedir. Sonuçlar, merkezkaç kararsızlığının etkisiyle düşük Reynolds sayısında ($Re = 300$) akışın geçiş rejimine girdiğini ve zamana bağlı düzensiz davranış sergilediğini göstermiştir. Akışta sınır tabakada gelişen Görtler girdaplarının tüm hidrosiklon içi akış alanını etkilediği belirlenmiştir. Parçacık izleme analizleri, giriş hızının artırılmasıyla daha küçük kesim boyutu (d_{50}) ve daha keskin ayırma eğrisi elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu iyileşme, akışın türbülanslı rejime geçişi sırasında oluşan karakteristik akış yapılarıyla ilişkilendirilmiştir (Zhu vd., 2012). Jiang vd., iki kademeli bir hidrosiklon tasarımı (TS) önerilmiş ve giriş hızının akış alanı ile ayırma performansına etkisi HAD ile incelenmiştir. TS hidrosiklonun iç akış alanını simüle etmek ve parçacık sınıflandırma verimliliğini hesaplamak amacıyla RSM ve TFM modelleri kullanılmıştır. Simülasyonlarda hidrosiklon girişinde “velocity-inlet” sınır koşulu uygulanmış, su ve katı parçacıklar aynı hızda (3–6 m/s aralığında) hareket etmiştir. Çıkışta “pressure-outlet” sınır koşulu uygulanmış ve çıkış basıncı standart atmosferik basınç olarak sabitlenmiştir. TFM modelinde kullanılan katı parçacıklar, yoğunluğu 2650 kg/m³ olan SiO₂ parçacıklarıdır ve parçacık boyut dağılımı Tablo 2’de verilmiştir. Beslemedeki toplam katı hacim

oranı %3,5'tir. Hidrosiklon duvarları için kayma yok (no-slip) sınır koşulu uygulanmıştır. Basınç-hız çiftinin çözümlemesinde SIMPLE algoritması kullanılmış, basınç denklemleri için PRESRO, diğer kontrol denklemleri için QUICK ayrıklaştırma şeması uygulanmıştır. Her fazın giriş ve çıkış akış hızının zaman-ortalamasına dayalı denge durumu, simülasyonun yakınsama kriteri olarak belirlenmiştir. Simülasyon zaman adımı $1,0 \times 10^{-4}$ s olarak seçilmiştir. Sayısal çalışmaların sonucu olarak Şekil 5'te görüldüğü üzere hidrosiklon giriş hızı arttıkça, basınç düşümü lineer olarak artmaktadır. Giriş hızı 3 m/s'den 6 m/s'ye yükseldiğinde, hidrosiklonun birinci kademesindeki basınç düşümü 27,81 kPa'dan 116,21 kPa'ya, ikinci kademedeki basınç düşümü ise 26,14 kPa'dan 111,17 kPa'ya yükselmektedir (Jiang vd.,2019)

Tablo 2. Siklon çalışmalarında kullanılan partikül boyutu dağılımları (Jiang vd.,2019)

Partikül Boyutları (μm)	Ortalama boyut (μm)	Geri kazanım (%)	Hacim Fraksiyonu (%)
0-2.5	1	4.88	0.1708
2.5-7.5	5	7.21	0.2524
7.5-15	10	9.55	0.3343
15-25	20	15.33	0.5366
25-35	30	20.88	0.7308
35-45	40	16.59	0.5807
45-55	50	11.38	0.3983
55-65	60	8.31	0.2909
65-80	75	5.87	0.2055



Şekil 5. Hidrosiklonda basınç kaybı- giriş hız dağılımı (Jiang vd.,2019)

Siklon performansı, büyük ölçüde besleme akımındaki katı partiküllerin fiziksel özelliklerine bağlıdır; özellikle partikül boyutu, yoğunluğu ve hacimsel fraksiyon değişkenleri kritik rol oynar (Svarovsky, 1984). İri parçacıklar merkezkaç kuvveti etkisiyle alt akıma yönlendirilirken, çok ince parçacıklar taşma akımına sürüklenir; bu nedenle giriş akımındaki boyut dağılımı, sınıflandırmanın hassasiyetini doğrudan etkiler. Partikül yoğunluğu, sıvıya göre farklılık gösterdiğinde ayırıştırma verimini belirler; yüksek yoğunluklu parçacıklar alt akıma kolay yönlendirilirken, sıvıya yakın yoğunluktakiler taşma akımına karışabilir. Akım içindeki katı hacimsel fraksiyonu da hidrosiklon içindeki akış karakteristiklerini etkiler; yüksek konsantrasyon basınç düşümünü ve türbülansı artırabilirken, düşük konsantrasyon ayırıştırma kapasitesinin tam kullanılmamasına yol açabilir.

Li vd., farklı hidrosiklon konfigürasyonlarında besleme katı partikül yoğunluğu ve katı partikül malzeme yoğunluğunun ayrılma sayısı (ing. partition number) üzerine etkisini irdeleyerek sayısal modeller ortaya koymuşlardır. Sayısal çalışmalarda kullanılan siklon konfigürasyon ve katı partikül özelliklerinin dağılımları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te verilen hidrosiklon tasarım parametrelerinin oransal değer aralıkları, ilgili parametrelerin siklon gövde çapına normalize edilmesiyle türetilmiştir.

Sayısal analizlerden elde edilen bulgular, partikül yoğunluğundaki artışın ayırma eğrisini daha düşük değerlere doğru kaydırıldığını ortaya koymuştur. Bu kaymanın, kesim çapında belirgin bir azalmaya neden olduğu da ifade edilmiştir (Li vd.,2019).

Tablo 3. Sayısal çalışmalarda kullanılan değişken aralıkları (Li vd.,2019)

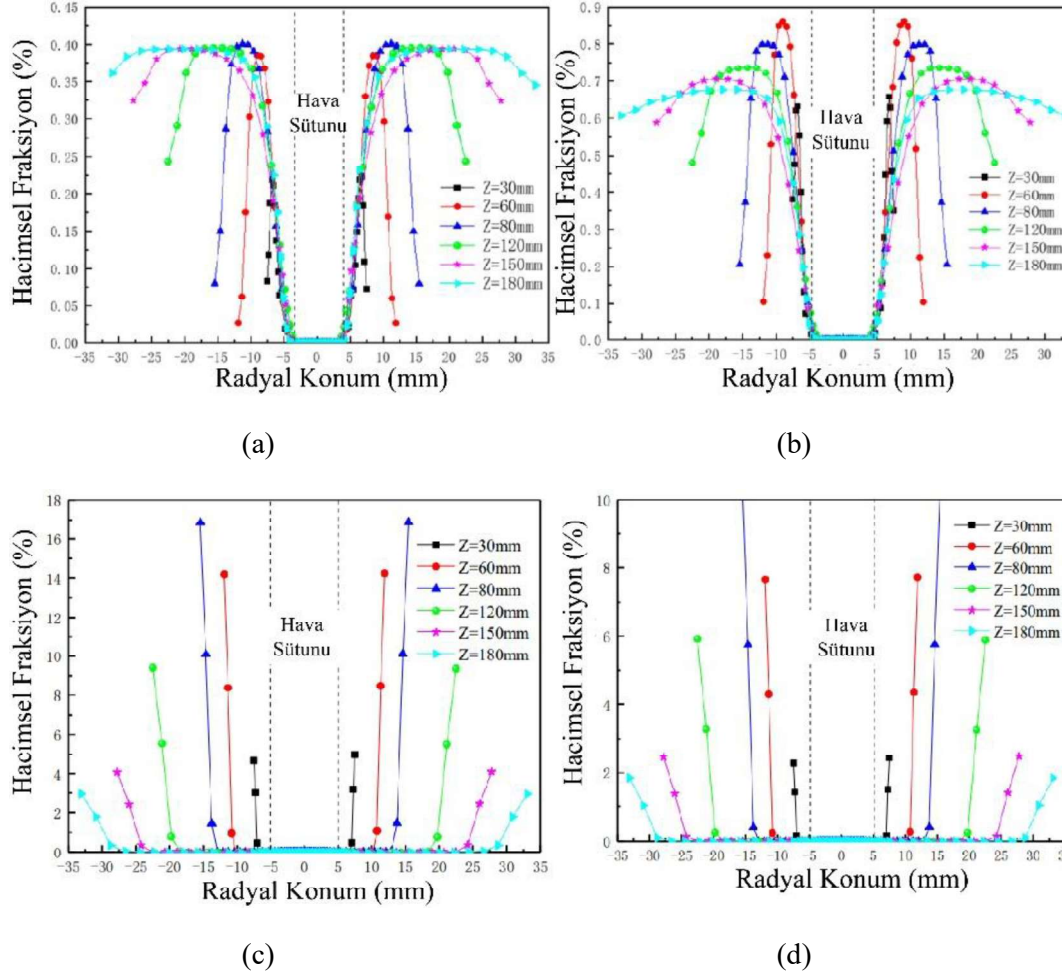
Değişkenler	Değer
Siklon giriş kanalı yükseklik oran aralığı	0.14~0.53
Siklon çıkış çap oran aralığı	0.27~0.67
Siklon gövde çap aralığı	0.075~1
Katı partikül medyan boyut aralığı [mm]	0.015~0.8
Katı partikül hacimsel konsantrasyonu	0.04~0.3

Cui vd., 50 mm çapındaki bir hidrosiklon için optimal gövde çap aralığının HAD çözümleriyle belirlendiği ve bu aralığın akış kararlılığı ile ayırma etkinliğini birlikte gözettiği ifade edilmiştir. Bulgular, alt sınırının düşük türbülans şiddeti ve daha kararlı akış koşullarıyla tanımlandığını; bu değerler altında ince tanelerin önemli bir kısmının alt akıma yöneldiğini göstermektedir. Üst sınırın ise ayırma performansındaki düşüşle ilişkili olduğu, özellikle kaba tanelerin alt akıma geri kazanımının sıfır düşey hız hattındaki dışa kayma ve tanelerin denge yarıçapındaki içe hareket nedeniyle azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca, gövde çapının optimum aralıkta bulunması hâlinde besleme dağılımındaki değişimlerin ayırma eğrileri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı; ancak gövde çapı bu aralığın üzerine çıktığında hem kaba tanelerin alt akım veriminde hem de ayırma keskinliğinde gerileme gözlemlendiği aktarılmaktadır. Sonuç olarak çalışmada, uygun gövde çap aralığının hidrosiklonun farklı tane boyu dağılımlarına uyum sağlayabilmesi açısından önemli olduğu ve bu yaklaşımın akış yapısına dayalı genel bir tasarım yöntemi olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir (Cui vd., 2017).

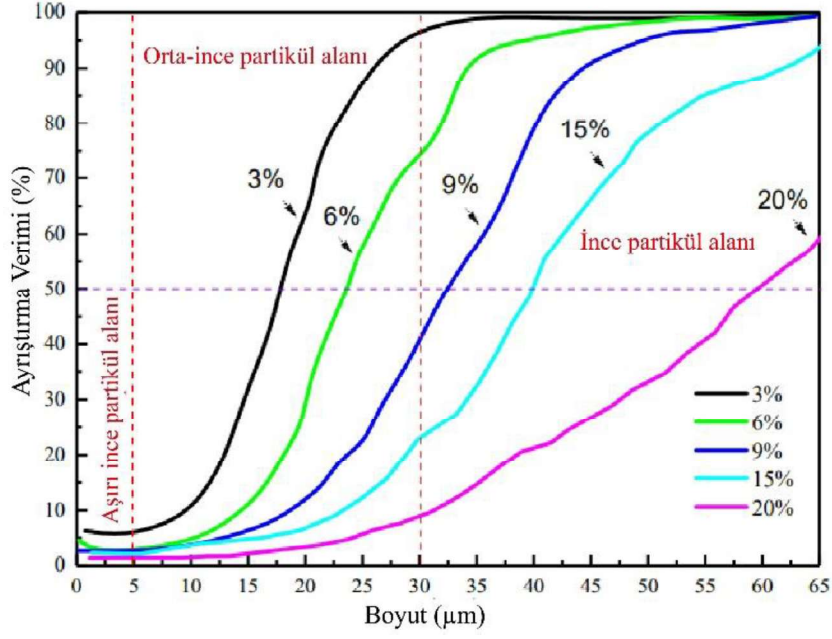
Chen vd., parçacık boyutu dağılımının yoğun ortam siklonu performansı üzerindeki etkilerinin, HAD ile Ayrık Elemanlar Yönteminin (DEM) birlikte kullanılmasıyla ayrıntılı biçimde incelendiği belirtilmektedir. Çalışmada, çok çeşitli dağılım tiplerini temsil edebilen Johnson'un S_B fonksiyonunun, kömürün tane boyu dağılımını tanımlamak

üzere tercih edildiği ve bu fonksiyonun, belirli bir boyut aralığı için medyan tane boyu ($d_{0.5}$) ile dağılım parametresi (σ_j) olmak üzere iki temel parametreye bağlı olduğu ifade edilmektedir. Bulgulara göre, σ_j sabit tutulduğunda $d_{0.5}$ 'in 6 mm'den 40 mm'ye yükselmesi, işletme basıncında ve ortam basınç farkında belirgin bir azalmaya yol açmakta ve buna paralel olarak ayırma veriminde hızlı bir bozulma gözlenmektedir. $d_{0.5}$ sabit olduğunda ise DMC'nin performansının σ_j parametresine oldukça duyarlı olduğu, özellikle hem $d_{0.5}$ hem de σ_j küçük olduğunda bu etkinin daha belirgin hâle geldiği rapor edilmektedir. σ_j değerinin 0.4'ten 1.0'a çıkmasıyla ortam basınç farkının değerinin önce azaldığı, ardından yaklaşık sabit bir seviyede kaldığı; ayırma performansının da benzer bir eğilim izlediği aktarılmaktadır (Chen vd., 2016). Yang vd., giriş bölümü karmaşık eğrisel bir yapı ile tasarlanmış bir hidrosiklon modeli geliştirilmiş ve ardından sayısal yöntemler aracılığıyla, modelin hem giriş haznesinde hem de genelinde parçacıkların dağılımı ile birikme eğilimleri analiz edilmiştir. Sayısal çalışmalarda partikül boyutu olarak 0.5 μm , 4 μm , 15 μm , 25 μm ve 60 μm değerleri kullanılmıştır. Partikül konsantrasyonuna yönelik çalışmalar sonuçlar üç bölümde irdelenmiştir. Bunlar sırası ile extra-ince partiküller ($\leq 5 \mu\text{m}$), yarı-iri partiküller (5~30 μm) ve iri partiküllerdir ($>30 \mu\text{m}$). Şekil 6'da hidrosiklonun çap doğrultusu boyunca farklı tane boyu sınıflarına ait parçacıkların eksenel yöndeki dağılımı gösterildiği ifade edilmektedir. Extra-ince partiküller (0.5 μm) için, hacimsel fraksiyonun duvardan merkeze doğru ilerledikçe önce arttığı, ardından azaldığı belirtilmektedir. Bu dağılım yapısının, akış alanındaki serbest ve zorlanmış girdap bölgelerinin birleşik yapısıyla uyumlu olduğu ve söz konusu boyuttaki tanelerin her iki bölge içinde de bulunabildiği; ayrıca türbülans kaynaklı yayılım kuvvetlerinin bu sınıfta baskın bir rol oynadığı aktarılmaktadır. İnce taneler (4 μm) için hacimsel fraksiyonun eksen doğrultusunda önce yükseldiği, ardından düştüğü; Z = 60 mm konumunda ise belirgin bir maksimumun ortaya çıktığı ve bunun iç sirkülasyon ile birleşme bölgelerinin etkisiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir. Daha iri sınıflardaki taneler olan yarı kaba (25 μm) ve kaba (60 μm) fraksiyonlarda ise hacimsel fraksiyon dağılımının bölgesel bir karakter sergilediği ve merkezde sifıra ulaştığı ifade edilmektedir. Şekil 8'de verilen verim eğrileri ile parçacık derişimi arttıkça, ince tanelerin apeks hattına geri kazanım oranının kademeli olarak azaldığı aktarılmaktadır. Ayrıca derişimdeki artışın, verimlilik eğrisinin sağa doğru kaymasına neden olduğu; bunun da hidrosiklonun kesim boyutunda bir

küçülmei işaret ettiği belirtilmektedir. Derişimin %20'nin üzerine çıkması durumunda, 50 μm 'den küçük tanelerin apeks üzerinden geri kazanımının yaklaşık %60 seviyesinde kaldığı; bu nedenle ince tanelerin taşınımının belirginleştii ve sınıflandırma hassasiyetinin belirgin ölçüde düştüğü ifade edilmektedir (Yang vd., 2025).



Şekil 6. Farklı eksenel konumlarda partikül hacimsel fraksiyon dağılımları a) 0.5 μm , b) 4 μm c) 25 μm ve d) 60 μm (Z=15 mm konumu siklon partikül toplama girişı olup Z=195 mm ise konik bölgenin başlangıç konumudur.) (Yang vd., 2025)



Şekil 7. Partikül konsantrasyonunun hidrosiklon verim dağılımına etkisi (Yang vd., 2025)

Siklon ayırıcıların performansı; akış yapısı, partikül tutma verimi ve basınç kaybı gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Bu performansın belirlenmesinde en kritik unsurlardan biri de geometrik konfigürasyondur. Çünkü siklonun şekli, akışın nasıl döneceğini, merkezdeki geri akış bölgesinin konumunu ve partiküllerin duvarlara yönlendirilme etkinliğini doğrudan belirler. Geometrik konfigürasyon; gövde (Sun vd., 2024; Mahat vd., 2023), konik kısım (Abdo vd., 2024; Pandey ve Brar, 2022; Pandey vd., 2022), giriş kanalı (Elsayed ve Lacor, 2011; Casal vd., 1983; Zhao vd., 2006; Li vd., 2021; Wu vd., 2023; Pathirikattu ve Vakamalla, 2025; Zhang vd., 2023; Guo vd., 2024) ve çıkış borusu (Pandey vd., 2022; Hwang vd., 2020; Su ve Zhang, 2022; Zhang vd., 2022) gibi yapı elemanlarının boyutları, oranları ve yerleşimleri ile tanımlanır. Bu değişkenlerin her biri akışın dönme şiddetini, hız dağılımını ve partiküllerin siklon içinde izlediği yolu değiştirir. Dolayısıyla, geometrik bir parametrede yapılan küçük bir değişiklik bile siklonun ayırma verimini veya basınç kaybını anlamlı şekilde değiştirebilir.

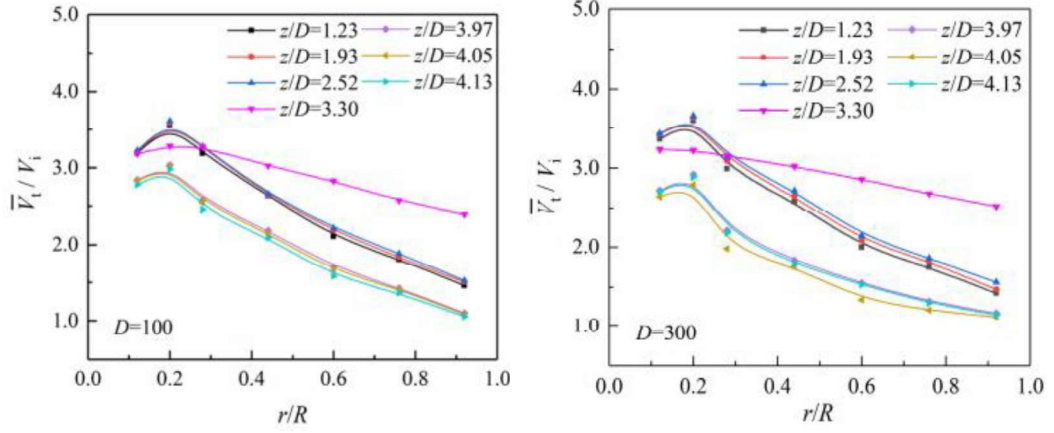
Siklon tasarımında tipik olarak değiştirilebilen başlıca geometrik konfigürasyon unsurları şunlardır:

- Giriş kanalının şekli ve boyutları: Genişlik/yükseklik oranı, dikdörtgen veya eğimli giriş tasarımları akışın siklona giriş hızını ve swirl oluşumunu belirler (Elsayed ve Lacor, 2011; Casal vd., 1983; Zhao vd., 2006; Li vd., 2021)

- Gövde çapı ve yüksekliği: Siklonun ana gövdesi dönen akışın temel karakteristiğini belirler. Çap büyüdükçe partiküllerin merkezkaç kuvveti azalır (Sun vd., 2024; Mahat vd., 2023).
- Konik bölümün açısı ve uzunluğu: Konik yapı, dönen akışı aşağı doğru yönlendirirken aynı zamanda hız dağılımını daraltır. Konik açısı ayırma verimi ve basınç kaybı üzerinde kritiktir (Abdo vd., 2024; Pandey ve Brar, 2022; Pandey vd., 2022).
- Çıkış borusu (vortex finder) çapı ve daldırma uzunluğu: Bu yapı, temiz gazın çıkışını sağlar ve geri akış bölgesini kontrol eder. Daldırma uzunluğu arttıkça kısa devre akışı azaltılabilir (Hwang vd., 2020; Su ve Zhang, 2022; Zhang vd., 2022).
- Toz çıkış ağzının boyutları: Çok küçük olması tıkanma riskini artırırken çok büyük olması akış alanını bozabilir (Schmidt vd., 2004; Obermair ve Staudinger, 2001; Xiang ve Lee, 2008).

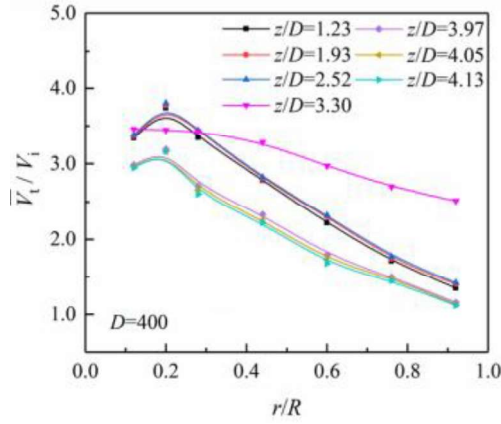
Geometrik konfigürasyonun performansa etkisinin temel sebebi, akışın siklon içinde iki ana bölge oluşturmastır: dış bölgede yüksek dönme hızına sahip aşağı yönlü akış ve iç bölgede yukarı yönlü geri akış. Bu iki bölgenin şekillenmesi tamamen siklon geometrisine bağlıdır. Daha güçlü ve stabil bir girdap yapısı, partiküllerin duvarlara doğru daha hızlı taşınmasını sağlar ve ayırma verimini artırır. Öte yandan, uygunsuz bir geometri yüksek basınç kaybı ve düşük ayırma performansı ile sonuçlanabilir. Elsayed ve Lacor giriş kanalının boyutlarının siklonun akış yapısına ve performansına etkileri RSM türbülans modeliyle incelenmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, giriş kesitinin büyümesi siklon içindeki maksimum teğetsel hızın azalmasına neden olmakta ve akış alanında belirgin bir hızlanma görülmemektedir; teğetsel hız dağılımı siklon boyunca büyük ölçüde sabit kalmaktadır. Ayrıca daha geniş giriş ölçüleri basınç kaybını düşürürken, kesim çapının artmasına yol açarak girdap kuvvetini zayıflatmakta ve buna bağlı olarak ayırma verimini olumsuz etkilemektedir. Yazar, özellikle kesim çapı açısından giriş genişliğindeki değişimlerin giriş yüksekliğine kıyasla daha belirleyici olduğunu vurgulamakta ve b/a oranı için 0.5–0.7 aralığını uygun bir tasarım aralığı olarak önermektedir (Elsayed ve Lacor, 2011). Casal ve Martinez-Benet çalışmalarında Denklem 1’de verilen bağıntıda boyutsuz basınç kaybını (Euler sayısı, E_u) tanımlamak üzere bir ampirik bağıntı sunmaktadır (Casal ve Martinez-Benet, 1983).

$$E_u = 11.3 \left(\frac{ab}{D_x} \right)^2 + 2.33 \quad (1)$$



(a)

(b)



(c)

Şekil 8. Farklı gövde çaplarına sahip siklonlarda a) $D=100$ mm, b) $D=300$ mm ve c) $D=400$ mm teğetsel hız dağılımları (Li vd., 2021)

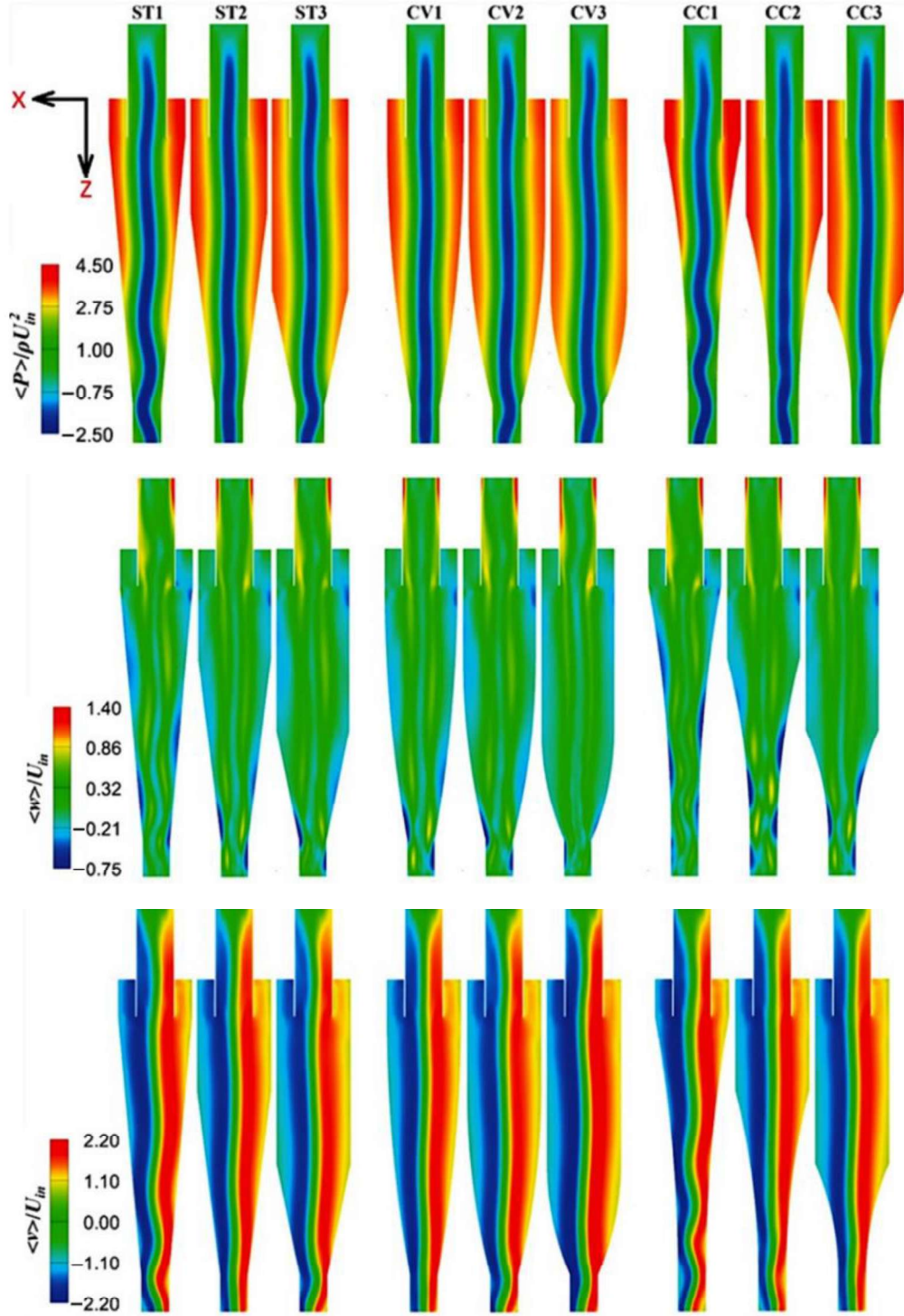
Li vd., dikdörtgen bir giriş yapısının ayırma performansı açısından dairesel bir girişe göre daha avantajlı olabildiği, ancak giriş yüksekliği ile genişliği arasındaki oranın nasıl belirlenmesi gerektiğine dair ayrıntılı bilginin sınırlı olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda, çalışmalarında 75 mm çapındaki bir hidrosiklon için dikdörtgen girişin yükseklik/genişlik oranının performansa etkisini sayısal olarak incelemiştir. Basınç dağılımı, hız alanı, hava çekirdeği davranışı, türbülans yapısı ve ayırma verimi birlikte değerlendirildiğinde, yükseklik/genişlik oranı arttıkça basınç kaybı ve teğetsel hızın önce yükseldiği ardından azaldığı; buna karşılık türbülans enerjisinin ise önce düştüğü sonra tekrar arttığı belirtilmiştir. Oranın 3 olduğu durumda kısa devre akışının ve türbülans

seviyesinin en düşük, ayırma hassasiyetinin ise en yüksek olduğu ifade edilmektedir. Sonuç olarak, 75 mm çapındaki hidrosiklon için giriş yüksekliği/genişlik oranının 3 ile 4 aralığında seçilmesinin uygun olacağı ve bu bulgunun giriş geometrisi tasarımı için yol gösterici nitelikte olduğu belirtilmiştir (Li vd., 2021).

Sun vd., siklonların iç akış alanı özelliklerine silindir gövde çapı ve çıkış borusu çapının etkisi deneysel olarak incelendiği belirtilmektedir. Araştırmada farklı çap kombinasyonlarına sahip siklonlarda anlık teğetsel hızlar sıcak tel anemometresi ile ölçülmüş ve bu veriler zaman ve frekans analizleriyle değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda Şekil 8’de görüldüğü üzere silindir çapı farklı olan siklonlarda dönel akışın eğriliği ve parçacıkların tutulma süresi değiştiği için, silindir çapındaki artışın maksimum teğetsel hızı hafif düzeyde yükselmektedir (Sun vd., 2024). Mohamad vd., hidrosiklon içerisindeki çok fazlı akışın sayısal olarak incelendiği ve özellikle silindirik bölüm çapının ayırma verimine etkisinin değerlendirildiği ifade edilmektedir. CFD tabanlı analizlerde RSM türbülans modeli ile sıvı–hava çekirdeği etkileşimini tanımlayan VoF yaklaşımı kullanılmış; elde edilen akış alanı sonuçları DEM ile parçacık hareketlerinin izlenmesinde temel alınmıştır. Bulgular, silindirik bölüm çapının artmasıyla teğetsel hız ve dolayısıyla merkezkaç kuvvetinin yükseldiğini, bunun da ince taneler için daha yüksek toplama verimine katkı sunduğunu göstermektedir. Ayrıca çap artışının parçacıkların hidrosiklon içinde kalma süresini uzatarak döngüsel hareketlerini artırdığı ve böylelikle ayırma netliğini iyileştirdiği belirtilmektedir. Sayısal sonuçlara göre 5 µm boyutundaki taneler için ayırma veriminin yaklaşık %34’ten %44 seviyesine çıktığı rapor edilmiştir. Genel olarak, silindirik bölüm çapındaki değişimin hidrosiklon performansını belirgin şekilde etkilediği vurgulanmaktadır (Mahat vd., 2023). Abdo vd., eğrisel konik bölümlere sahip yeni tip gaz siklonlarının performansı incelendiği ve farklı eğrilik boyutlarına sahip sekiz tasarımın karşılaştırıldığı ifade edilmektedir. CFD analizlerinde RSM türbülans modeli kullanılarak akış alanı ve basınç kayıpları değerlendirilmiş, konik profilin Bézier eğrisiyle tanımlandığı ve eğriyi belirleyen kontrol noktalarının siklon geometrisini doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre eğrilik arttıkça basınç kaybının azaldığı, özellikle dışbükey konik tasarımların yüksek debilerde daha iyi performans gösterdiği, içbükey tasarımlarda ise basınç kaybının arttığı rapor edilmiştir. Kontrol noktasının ana yarıçap konumunda olduğu dışbükey modelde basınç düşüşünün yaklaşık %50

oranında iyileştiği ve belirli çalışma koşullarında bu tasarımın geleneksel modellere kıyasla daha yüksek parçacık toplama verimi sağlayabileceği belirtilmektedir (Abdo vd., 2024). Satyanand ve Lakhbir çalışmalarında konik bölümün farklı geometrik formlarının siklon performansı üzerindeki etkisinin incelendiği belirtilmektedir. Bu kapsamda, doğrusal, içbükey, dışbükey ve bunların hibrit türleri olan içbükey–dışbükey ile dışbükey–içbükey profiller olmak üzere toplam beş konik yapı analiz edilmiştir. Tüm modeller için Reynolds stres modeli kullanılmış ve iki farklı basınç-gerinim yaklaşımı (lineer ve stress–omega) karşılaştırılmıştır; özellikle stress–omega modelinin ortalama hız alanını, koherent dalgalanmaları ve girdap çekirdeğinin preansiyon frekansını daha doğru yakaladığı ifade edilmiştir. Sonuçlar, konik duvar profilindeki değişimlerin basınç kaybı üzerinde, toplama verimine kıyasla daha belirgin bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Yüksek debilerde dışbükey profilin hem temel modelden hem de diğer varyantlardan daha iyi performans sergilediği ve geleneksel tasarımlara alternatif olabileceği aktarılmaktadır. Buna karşılık içbükey profilin en yüksek basınç düşüşünü oluşturduğu, ancak toplama veriminde artış sağladığı da rapor edilmiştir (Pandey ve Brar, 2022). Pandey vd., siklon ayırıcı performansının iyileştirilmesi amacıyla silindir ve konik bölüm yüksekliklerinin yanı sıra konik profil geometrisinin etkisini incelemektedir. H/D oranları (0.5, 1.0, 1.5) ve üç farklı koni şekli (düz (ST), içbükey (CC), dışbükey (CV)) için, üç giriş hızı kapsamında toplam 27 RSM çözümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 9’da verilen kontur sonuçlarına göre tüm modellerde statik basınç dağılımı benzer olup, merkezde negatif basınç bölgesi görülürken dış duvarlarda basınç maksimumdur. Eksenel hız alanı dışta aşağı yönlü dış vorteks ve içte yukarı yönlü iç vorteksten oluşur; iç vorteks bölgesi CC modelinde daha dar, CV modelinde daha geniştir. Teğetsel hız dağılımı ise modeller arasında büyük ölçüde benzerdir; eksen yakınında sıfıra iner, çekirdek bölgede maksimuma ulaşır ve bu bileşen siklondaki merkezkaç kuvvetini ve performansı belirleyen en kritik parametredir (Pandey vd., 2022). Hwang vd., VF (çıkış borusu) uzunluğunun akış yapısı üzerindeki etkisini incelemiş ve VF uzunluğu azaldığında çıkış borusu çevresindeki kısa devre akımının merkez ile dış duvar arasındaki basınç farkını düşürdüğünü rapor etmiştir. Yazarların belirttiğine göre bu durum, girdap şiddetinin zayıflamasına ve doğal girdap uzunluğunun kısalmasına neden olmaktadır. Öte yandan, VF uzunluğu artırıldığında kısa devre akımı azalsa da, basınç farkı ve dönme yoğunluğu da birlikte azaldığı için doğal girdap uzunluğu tekrar kısalmaktadır. Bu

bulgulara dayanarak yazarlar, VF uzunluğunun belirli bir değerin üzerine çıkarılmasının uygun olmadığını ve maksimum toplama verimi için optimum bir VF uzunluğunun mevcut olduğunu ifade etmektedir (Hwang vd., 2020).



Şekil 9. Giriş hızının 10 m/s olduğu sayısal çalışmalarda soldan sağa doğru farklı siklon modelleri, yukarıdan aşağıya doğru ise sırası ile ortalama statik basınç, ortalama eksenel hız ve ortalama teğetsel hız dağılımları (Hwang vd., 2020).

Tenglong ve Yifei, hidrosiklonlardaki ayırma verimini ciddi biçimde düşüren ve ayırışmadan doğrudan çıkış borusu üzerinden tahliye olan kısa devre akımının davranışını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada RSM, VOF ve Mixture modelleri kullanılarak kısa devre akımı, kısa devre akımının giriş debisine oranı ve ayırma verimi değerlendirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalara göre, daha küçük çıkış borusu çapı, kalın duvarlı çıkış borusu tasarımı ve orta seviyede bir çıkış borusu uzunluğu kısa devre akımını bastırmada ve kesim çapını (d_{50}) azaltmada etkilidir. Ayrıca, giriş hızının ve besleme yoğunluğunun artması kısa devre akımını yükseltmekle birlikte, kısa devre akım oranını düşürmektedir. Nispeten yüksek giriş hızının ve düşük besleme yoğunluğunun d_{50} değerini azaltarak ayırma verimini artırdığını belirtmektedir (Su ve Zhang, 2022). Zhang vd., çıkış borusuna ait yapısal parametrelerin (çap oranı ve daldırma derinliği) siklonlardaki güçlü türbülanslı akış alanı ve ayırma performansı ile olan ilişkisini açıklığa kavuşturmayı amaçlamıştır. Bu kapsamda, çıkış borusu çapı ve daldırma derinliği için 0.3D, 0.4D, 0.5D, 0.6D ve 0.7D değerleri incelenmiş; taşma borusu çapı, daldırma derinliği ve Reynolds sayısının teğetsel hız indeksi (n) ve ayırma verimi üzerindeki etkileri hem CFD analizleri (Fluent/RSM–DPM), hem deneyler hem de yapay sinir ağı tabanlı tahmin modelleriyle değerlendirilmiştir. Deneysel verileri operasyonel basınç kaybı ve ayırma verimi üzerinden elde etmiş ve CFD sonuçlarının doğrulanmasında kullanılmıştır. Ayrıca, sayısal simülasyonlarla elde edilen 336 veri seti kullanılarak 5–5–1 mimarisinde bir geri yayımlı yapay sinir ağı modeli kurulmuş ve n değeri ile geometrik/işlemsel parametreler arasındaki ilişki başarıyla tahmin edilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, çıkış borusu çapının artırılması aynı giriş hızında siklon genel basınç kaybını azaltmakta; bu da enerji kayıplarını düşürerek ince tanelerin ayrılma verimini iyileştirmektedir. Bunun yanında, çıkış borusu daldırma derinliğinin artırılması n değerini yükseltmektedir. Yazarlar, akış alanının kararlılığı ve enerji dağılımı dikkate alındığında optimum S/D aralığının 0.5–0.6 olduğunu önermektedir (Zhang vd., 2022).

Bilindiği üzere deneysel, sayısal ya da teorik çalışmalar ile elde edilen sayısal dataların anlamlı hale dönüştürülerek ilgili mühendislik probleme dair modellemelerin yapılabilmesi için makine öğrenmesi, derin öğrenme, yapay zeka, Taguchi Yöntemi gibi algoritmalar kullanılmaktadır (Park vd., 2020; Çelikdelen vd., 2025; Gencer vd., 2025; Kagitci ve Neseli, 2025; Ağaayak, 2024). Özellikle mühendislik tasarımı ve endüstri mühendisliği

disiplinlerinde, tasarım değişkenlerinin sistematik biçimde düzenlenmesi yoluyla mevcut sistemlerin performansının iyileştirilmesini amaçlayan istatistiksel bir optimizasyon aracı olarak kullanılmasıyla deneysel çalışmalarda, imalat süreçlerinde ürün kalitesinin artırılmasına yönelik olarak yaygın biçimde uygulanan Taguchi deney tasarımı yaklaşımından yararlanılabilmektedir. Taguchi yöntemi, sınırlı sayıda deney veya simülasyonla çok sayıda tasarım parametresinin performans üzerindeki etkisini değerlendirmeye olanak tanıyan yapısı sayesinde, siklon ayırıcıların ayırma verimi, basınç kaybı ve enerji etkinliği gibi temel performans göstergelerinin optimize edilmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ortogonal dizilere dayalı bu yaklaşım, yalnızca optimum parametre kombinasyonlarının belirlenmesini değil, aynı zamanda parametrelerin önem derecelerinin istatistiksel olarak ortaya konulmasını da mümkün kılarak, siklon tasarımına yönelik rasyonel ve tekrarlanabilir bir optimizasyon erevesi sunmaktadır.

SONUÇ ve TARTIşMA

Siklon ve hidrosiklon ayırıcıların performansını belirleyen akış yapısı, geometrik konfigürasyonlar ve işletme koşulları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Siklonların basit fakat son derece karmaşık bir türbülanslı akış alanına sahip olduğu; merkezkaç kuvveti, basınç gradyenleri, ikincil girdap yapıları, kısa devre akımı ve doğal girdap uzunluğu gibi çok sayıda değişkenin ayırma verimini doğrudan etkilediği görülmüştür. alışmalar genel olarak, geometri–akış etkileşiminin siklon performansında belirleyici olduğunu göstermektedir.

Giriş kanalının şekli ve en–boy oranı, silindirik gövde çapı, konik bölümün profili, çıkış borusu (vortex finder) apı ve daldırma derinliği gibi parametrelerde yapılan değişikliklerin; teğetsel hız, basınç kaybı, türbülans yoğunluğu, kısa devre akımı ve parçacıkların radyal dağılımı üzerinde doğrudan etkili olduğu anlaşılmıştır. Özellikle giriş geometrisi ve çıkış borusu tasarımı, kısa devre akımını kontrol etme ve ayırma hassasiyetini artırma açısından kritik rol oynamaktadır. İnce tanelerin ayrılmasında teğetsel hızın ve kararlı hava çekirdeğinin önemi vurgulanırken, iri tanelerin alt akıma yönlendirilmesi için merkezkaç kuvvetinin yeterli düzeyde korunması gerektiği görülmüştür.

HAD tabanlı sayısal çalışmaların, deneysel yöntemlerle ölçülmesi zor olan üç boyutlu akış yapısını ayrıntılı biçimde inceleme olanağı sunduğu

ve modern siklon tasarımlarında vazgeçilmez bir araç hâline geldiği de ortaya konmuştur. CFD–DEM ve CFD–ANN hibrit yöntemlerinin kullanımıyla, hem parçacık hareketlerinin hem de akış alanının daha doğru tahmin edilebildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar, optimum performansın tek bir geometrik oranla değil, geometrik parametrelerin birlikte optimize edilmesiyle sağlanabileceğini göstermektedir.

Genel olarak sonuçlar göstermektedir ki :

- Konik ve gövde geometrisinin optimize edilmesi, hem basınç kaybını azaltmakta hem de ayırma verimini iyileştirmektedir.
- Dışbükey konik profiller, birçok çalışma kapsamında yüksek debilerde daha düşük basınç kaybı ve daha iyi ayırma kabiliyeti sunmaktadır.
- Vortex finder çapı ve daldırma derinliği, kısa devre akımını bastırma ve doğal vorteks uzunluğunu koruma açısından en kritik parametreler arasındadır.
- Giriş hızının uygun seçimi, özellikle çok fazlı akışlarda hem hava çekirdeğinin stabilitesini hem de d_{50} değerini belirleyen temel bir etkidir.
- Partikül özellikleri (boyut, yoğunluk, konsantrasyon) hidrodinamik davranışı doğrudan etkiler ve optimum akış koşulları parçacık sınıfına göre değişebilir.
- HAD destekli tasarım, karmaşık girdap yapılarının anlaşılmasını kolaylaştırarak yeni nesil yüksek verimli siklon tasarımlarına olanak tanımaktadır.

Siklon ayırıcıların performans analizlerinde geometrik parametreler ve akış dinamiği etkileri yaygın olarak incelenirken, aşınma ve yapısal dayanım gibi malzeme odaklı özellikler son yıllarda artan bir ilgi görmektedir. Özellikle aşındırıcı akışkan koşullarında kompozit malzemelerin yüksek aşınma direnci ve dayanıklılığı, geleneksel metal veya seramik yüzeylere göre avantaj sağlayabilmektedir (Kagitci ve Tarakcioglu, 2016; Wang vd., 2024). Bu bağlamda gelişen kompozit malzeme teknolojileri, siklonların iç yüzey kaplamaları veya gövde elemanları için potansiyel avantajlar sunmakta olup, malzeme bilimindeki kompozit araştırmalarından elde edilen sonuçlar siklon ayırıcı performansı değerlendirmelerinde tamamlayıcı kaynak olarak ele alınabilir.

KAYNAKÇA

- Abdo, T. A., Elnady, A. O., Elsayed, K., ve El-shaer, Y. I. (2024). Design and analysis of gas cyclone with arc-shaped cone using Bézier curve for improved performance. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2811/1/012009>
- Ağaçayak, A. C. (2018). Buck/boost konvertörün TEG’de uygulanması. T. Güngör, G. B. Kılıç, A. Uymaz ve S. Görgülü (Ed.), Gece kitaplığı (1. baskı). Gece Kitaplığı.
- Ağaçayak, A. C., Terzioğlu, H., Çimen, H., Neşeli, S., ve Yalçın, G. (2018a). The effects of speed and flow rate on power in thermoelectric generators. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 6(1), 65–71. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2018637932>
- Ağaçayak, A. C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., ve Yalçın, G. (2018b). Mathematical modeling of thermoelectric generator by regression analysis. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 17(3), 132–143.
- Ağaçayak, A. C., Terzioğlu, H., Neşeli, S., ve Yalçın, G. (2018c). Small power wind turbine design. M. Hatipoğlu ve K. Gündoğan (Ed.), *Academic studies in engineering* (1. baskı). Gece Kitaplığı.
- Aksoy, S., ve Kazan, F. A. (2022). Investigation of the effect on the drone’s energy consumption of flying at different altitudes. S. Neşeli ve H. Terzioğlu (Ed.), *New trends in engineering* (1. baskı, s. 129–140). Tablet Kitabevi.
- Barnhart, J., ve Laurendeau, N. (1982). Pulverized coal combustion and gasification in a cyclone reactor. 1. Experiment. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 21, 671-680.
- Barth, W. (1956). Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations. *Brennstoff-Warme-Kraft*, 8, 1-9.
- Bernado, S., Mori, M., Peres, A. P., ve Dionisio, R. P. (2006). 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles. *Powder Technology*, 162, 190-200.
- Casal, J., ve Martinez-Benet, J. M. (1983). A better way to calculate cyclone pressure drop. *Chemical Engineering*, 90(2), 99-100.
- Chen, J., Chu, K., Zou, R., Yu, A., Vince, A., Barnett, G. D., ve Barnett, P. J. (2016). Systematic study of effect of particle size distribution in a dense medium cyclone by Johnson's SB function. *Minerals Engineering*, 91, 16-33.
- Chen, J., Jiang, Z., Yang, B., Wang, Y., ve Zeng, F. (2022). Effect of inlet area on the performance of a two-stage cyclone separator. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 44, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.06.003>
- Cui, B., Zhang, C., Wei, D., Lu, S., ve Feng, Y. (2017). Effects of feed size distribution on separation performance of hydrocyclones with different vortex finder diameters. *Powder Technology*, 322, 114-123.
- Çelikdelen, S. Ö., Inan, O., Servi, S., ve Bilici, R. (2025). Diagnostic value of machine learning models in inflammation of unknown origin. *Journal of Clinical Medicine*, 14(19), 7116. <https://doi.org/10.3390/jcm14197116>
- de Sá da Silva, D. P., Morimoto, M. G., de Oliveira Silva, D., Barrozo, M. A., ve Vieira, L. G. (2024). Effect of operational and geometric variables in hydrocyclones to improve separation efficiency and reduce energy consumption: A review and new insights. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2418636>
- Du, Q., Su, L., Dong, H., Gao, J., Zhao, Z., Lv, D., ve Wu, S. (2016). The experimental study of a water-saving wet electrostatic precipitator for removing fine particles. *Journal of Electrostatics*, 81, 42-47.

- Elsayed, K., ve Lacor, C. (2011). The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Applied Mathematical Modelling*, 35(4), 1952-1968. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007>
- Fatahian, H., Fatahian, E., ve Erfani, R. (2023). Square cyclone separator: Performance analysis optimization and operating condition variations using CFD-DPM and Taguchi method. *Powder Technology*, 428, 118789. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118789>
- Gencer, Y. D., Servi, S., ve Taspinar, Y. S. (2025, Temmuz 1-3). Detection of drone and non-drone objects with machine learning methods using visual data [Bildiri sunumu]. 2025 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Barselona, İspanya.
- Gimbin, J., Chuah, T. G., Fakhru'l-Razi, A., ve Choong, T. S. Y. (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44, 7-12.
- Guo, D., Jiang, X., Guo, M., Zeng, M., Hao, L., ve Wang, C. (2022). Role of hydrocyclone separator on the formation and separation of aerobic granular sludge: Evaluating granulation efficiency and simulating hydrodynamic behavior. *Separation and Purification Technology*, 283, 120231. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120231>
- Guo, M., Yang, L., Son, H., Le, D. K., Manickam, S., Sun, X., ve Yoon, J. Y. (2024). An overview of novel geometrical modifications and optimizations of gas-particle cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 329, 125136. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125136>
- He, P., Luo, S., Cheng, G., Xiao, B., Cai, L., ve Wang, J. (2012). Gasification of biomass char with air-steam in a cyclone furnace. *Renewable Energy*, 37, 398-402.
- Hoffmann, A., Arends, H., ve Sie, H. (1991). An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solids loading on cyclone performance. *Filtration & Separation*, 28, 188-193.
- Hsiao, T., Chen, D., ve Son, S. Y. (2009). Development of mini-cyclones as the size-selective inlet of miniature particle detectors. *Journal of Aerosol Science*, 40, 481-491.
- Hu, B., Liu, S., Wang, C., ve Gao, B. (2023). Structural optimization of high-pressure polyethylene cyclone separator based on energy efficiency parameters. *Processes*, 11(3), 691. <https://doi.org/10.3390/pr11030691>
- Huang, A. N., Ito, K., Fukasawa, T., Fukui, K., ve Kuo, H. P. (2018). Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 90, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.12.016>
- Hwang, I. S., Jeong, H. J., ve Hwang, J. (2020). Effects of vortex finder length on flow field and collection efficiency of cyclone in an industrial scale circulating fluidized bed boiler: Numerical study. *International Journal of Energy Research*, 44, 7229-7241. <https://doi.org/10.1002/er.5430>
- Jiang, L., Liu, P., Zhang, Y., Yang, X., ve Wang, H. (2019). The effect of inlet velocity on the separation performance of a two-stage hydrocyclone. *Minerals*, 9(4), 209. <https://doi.org/10.3390/min9040209>
- Kagitci, Y. C., ve Neseli, S. (2025). Determination of temperature effects on cortical bone milling using Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10115-y>
- Kagitci, Y. C., ve Tarakcioglu, N. (2016). The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1125-1135. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8007-0>

- Kağıtçı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2015, Ağustos 25-28). Weld line problem related to flow on a reinforced of glass fibre polymer composite part [Bildiri sunumu]. The International Conference on Science, Ecology and Technology I (ICONSETE'2015), Viyana, Avusturya.
- Kağıtçı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2016, Ekim 14-16). The investigation of weld line on polyamide based fiber reinforced composites [Bildiri sunumu]. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE'2016), Barselona, İspanya.
- Lapple, C. E. (1951). Processes use many collector types. *Chemical Engineering*, 58(5), 144-151.
- Leith, D., ve Licht, W. (1972). The collection efficiency of cyclone type particle collectors - A new theoretical approach. *AIChE Symposium Series*, 126(68), 196-206.
- Li, F., Liu, P., Yang, X., Zhang, Y., Jiang, L., ve Wang, H. (2021). The effects of the height-to-width ratio of the rectangular inlet on the flow field and separation performance by hydrocyclone. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42, 3137-3154.
- Li, F., Liu, P., Yang, X., Zhang, Y., ve Zhao, Y. (2020). Effects of inlet concentration on the hydrocyclone separation performance with different inlet velocity. *Powder Technology*, 375, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.110>
- Li, J., Jiang, C., Shibo, K., Zheng, Q., Kaiwei, C., ve Aibing, Y. (2019). Prediction of separation performance of hydrocyclones by a PC-based model. *Separation and Purification Technology*, 211, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.073>
- Mahat, M. M., Husain, H., ve Mohmad, N. S. (2023). Separation efficiency analysis of multiphase flow inside hydrocyclone using CFD. *Journal of Advanced Engineering and Digital Systems*, 3(1), 51-65.
- Misiulia, D., Lidén, G., ve Antonyuk, S. (2022). Performance characteristics of a small scale cyclone separator operated in different flow regimes. *Journal of Aerosol Science*, 163, 105980. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.105980>
- Nakhaei, M., Lu, B., Tian, Y., Wang, W., Dam-Johansen, K., ve Wu, H. (2020). CFD modeling of gas–solid cyclone separators at ambient and elevated temperatures. *Processes*, 8(2), 228. <https://doi.org/10.3390/pr8020228>
- Neşeli, S., Terzioğlu, H., Yalçın, G., ve Ağaçayak, A. C. (2018a, Ekim 25-26). Düşük hızlı hava araçları için ön kanatçık tasarımı ve akış analizi [Bildiri sunumu]. International Science and Academic Congress'18, Konya, Türkiye.
- Neşeli, S., Yalçın, G., Terzioğlu, H., ve Ağaçayak, A. C. (2019, Nisan 18-20). Nano yüzey kalitesi oluşturmak için lepleme makinesi tasarımı [Bildiri sunumu]. V Science Technology and Innovation Congress, Ankara, Türkiye.
- Obermair, S., ve Staudinger, G. (2001). The dust outlet of a gas cyclone and its effects on separation efficiency. *Chemical Engineering & Technology*, 24, 1259-1263.
- Pandey, S., ve Brar, S. L. (2022). On the performance of cyclone separators with different shapes of the conical section using CFD. *Powder Technology*, 407, 117629. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117629>
- Pandey, S., Saha, I., Prakash, O., Mukherjee, T., Iqbal, J., Roy, A. K., Wasilewski, M., ve Brar, L. S. (2022). CFD investigations of cyclone separators with different cone heights and shapes. *Applied Sciences*, 12(10), 4904. <https://doi.org/10.3390/app12104904>
- Parker, R., Jain, R., Calvert, S., Drechsel, D., ve Abbott, J. (1981). Particle collection in cyclones at high temperature and high pressure. *Environmental Science & Technology*, 15, 451-458.
- Pathirikattu, A., ve Vakamalla, T. R. (2025). Investigating the effect of inlet connecting angle and flow aligners on the performance of a large hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design*.
- Qi, L., ve Liu, J. (2012). Study of metallurgical industry smoke characteristics and the affect to the performance of electrical precipitator. *Advanced Materials Research*, 402, 371-373.

- Santana, J., Arnosti, S. Z., ve Coury, J. R. (2001). Performance of cylindrical-conical cyclones with different geometrical configurations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 18, 233-241.
- Sayın Kul, B., & Yamaner, A. S. (2025). A Comparative Evaluation Of Dry-Mql Turning Applications For A1s1 5115 Steel. *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 6(1), 23–32.
- Schmidt, S., Blackburn, H. M., ve Rudman, M. (2004, Aralık). Impact of outlet boundary conditions on the flow properties within a cyclone [Bildiri sunumu]. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, Sydney, Avustralya.
- Shepherd, C. B., ve Lapple, C. E. (1939). Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors. *Industrial and Engineering Chemistry*, 31(8), 972-984.
- Simpson, S., ve Parnell, J. B. (1995, Ocak). New low-pressure cyclone design for cotton gins [Bildiri sunumu]. 1995 Beltwide Cotton Production Conferences, Memphis, TN, ABD.
- Stairmand, C. J. (1951). The design and performance of cyclone separators. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 29(1), 356-373.
- Su, T., ve Zhang, Y. (2022). Effect of the vortex finder and feed parameters on the short-circuit flow and separation performance of a hydrocyclone. *Processes*, 10(4), 771. <https://doi.org/10.3390/pr10040771>
- Sun, L., Xie, M., Dong, Y., Li, J., ve Song, J. (2024). Effects of diameter parameters on gas flow field characteristics in cyclones: An experimental investigation. *Processes*, 12(3), 474. <https://doi.org/10.3390/pr12030474>
- Svarovsky, L. (1984). *Hydrocyclones*. Holt, Rinehart & Winston.
- Terzioğlu, H., ve Ağaayak, A. C. (2024). Electrical and mechanical load design for induction motors. 2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies (ICSIS 2024) (s. 597–603).
- Towler, G., ve Sinnott, R. (2013). *Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design*. Elsevier.
- Trakumas, S., Willeke, K., Reponen, T., Grinshpun, S. A., ve Friedman, W. (2001). Comparison of filter bag, cyclonic, and wet dust collection methods in vacuum cleaners. *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association*, 62, 573-583.
- Tyeb, M. H., Mishra, S., ve Majumder, A. K. (2023). Asymptotic water split behavior of hydrocyclones; A unique design characterization methodology. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 45(7), 803-813. <https://doi.org/10.1080/08827508.2023.2243006>
- Wang, C., Ma, Y., ve Sui, W. (2023). The secondary flows in a cyclone separator: A review. *Processes*, 11(10), 2935. <https://doi.org/10.3390/pr11102935>
- Wang, D., Zhao, B., ve Su, Y. (2019). Flow pattern and pressure drop for small long-cylinder cyclones operating at high flow rates. *Chemical Engineering & Technology*, 42(9), 1960-1969. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800511>
- Wang, L. (2004). Theoretical study of cyclone design [Doktora tezi, Texas A&M University].
- Wang, L., Parnell, C. B., ve Shaw, B. W. (1999). Performance characteristics for the 1D2D, 2D2D, 1D3D and barrel cyclones [Bildiri sunumu]. 1999 ASAE Annual Meeting, Toronto, Kanada.
- Wang, L., Parnell, C. B., ve Shaw, B. W. (2000). 1D2D, 1D3D, 2D2D cyclone fractional efficiency curves for fine dust [Bildiri sunumu]. 2000 Beltwide Cotton Production Conferences, San Antonio, TX, ABD.
- Wang, Y., Han, H., Liang, Z., Yang, H., Li, F., Zhang, W., ve Zhao, Y. (2024). Analysis of the effect of structural parameters on the internal flow field of composite curved inlet body hydrocyclone. *Processes*, 12(12), 2654. <https://doi.org/10.3390/pr12122654>
- Wu, Z., Qi, Z., Yu, L., Kou, Y., Luan, L., Yang, J., ve Sheng, Y. (2023). Influence of taper angle on the inner field and separation performance of a hydrocyclone. *International Journal of*

- Coal Preparation and Utilization, 43(3), 560-576.
<https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2064453>
- Xiang, R., ve Lee, K. W. (2008). Effects of exit tube diameter on the flow field in cyclones. *Particulate Science and Technology*, 26, 467-481.
- Yang, H., Meng, F., Wang, S., Liang, Z., Wei, L., Ge, Y., Fu, Y., ve Li, F. (2025). Analysis of particle distribution and aggregation characteristics in a hydrocyclone with a complex curved inlet structure. *Processes*, 13(11), 3540. <https://doi.org/10.3390/pr13113540>
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2024). Aısı 1040 Çeliğinin Kuru Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti Ve Kesme Sıcaklığı İncelemeleri. Presented At The 4th International Conference On Scientific And Academic Research (Icsar 2024), Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Machinability Of 6082 Aluminum Alloy With Respect To Cutting Force And Surface Roughness. Presented At The 2nd International Conference On Recent And Innovative Results İn Engineering And Technology Icrıret 2025, Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Tool Radius And Machining Parameters On Cutting Forces And Surface Roughness For Aa 6082 Aluminum Alloy. *European Mechanical Science*, 9(2), 125–138.
- Zhang, S., Cui, B., Zhao, S., Shen, Y., ve Zhao, Q. (2023). Understanding the effects of inlet structure on separation performance based on axial velocity wave zone characteristics. *Separations*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.3390/separations10010003>
- Zhang, Y., Xu, M., Duan, Y., Yang, X., Yang, J., ve Tang, X. (2022). Influence of feed rate on the performance of hydrocyclone flow field. *Separations*, 9(11), 349. <https://doi.org/10.3390/separations9110349>
- Zhang, Z. W., Li, Q., Zhang, Y. H., ve Wang, H. L. (2022). Simulation and experimental study of effect of vortex finder structural parameters on cyclone separator performance. *Separation and Purification Technology*, 286, 120394. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120394>
- Zhao, B. Y., Su, Y., ve Zhang, J. (2006). Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design*, 84, 1158-1165.
- Zhu, G. F., Liow, J. L., ve Neely, A. (2012). Computational study of the flow characteristics and separation efficiency in a mini-hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 2135-2147.

BÖLÜM 2

SANTRİFÜJ POMPALARDA KAVİTASYON OLGUSU: SAYISAL ve DENEYSEL BULGULAR

Osman KOCAASLAN* Yusuf Çağlar KAĞITCI**

GİRİŞ

Pompa sistemleri, akışkanların kontrollü biçimde taşınması, basınçlandırılması ve süreç koşullarına uygun şekilde dağıtılması için hemen her endüstriyel yapının temel bileşenlerinden biridir. Modern üretim hatlarında, altyapı sistemlerinde ve enerji dönüşüm süreçlerinde akışkan transferinin sürekliliği hem operasyonel verimliliğin hem de tesis güvenilirliğinin kritik bir belirleyicisidir. Bu nedenle pompalar yalnızca yardımcı ekipmanlar değil, endüstriyel süreçlerin sürekliliğini sağlayan stratejik bileşenler olarak değerlendirilmektedir. Akışkan transferinin endüstriyel süreçlerdeki rolü, proses gereksinimlerine göre değişmekle birlikte; debi, basınç, sıcaklık ve akış rejimi gibi parametrelerin hassas kontrolü çoğu uygulamada doğrudan ürün kalitesini ve üretim hızını etkilemektedir. Bu bağlamda pompaların doğru seçilmesi, sistem

* Öğr. Gör. Dr., Selçuk Üniversitesi, Huğlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Konya, okocaaslan@selcuk.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-7848-6974

** Öğr. Gör. Dr, Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Metal Teknolojileri Bölümü, Konya, yckagitci@ktun.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-6544-5284

bileşenleriyle uyumlu çalışması ve proses dinamiklerine uygun şekilde optimize edilmesi, endüstriyel işletmeler için hem ekonomik hem de operasyonel bir zorunluluktur.

Pompalar; evsel ve ticari kullanım alanlarından tarımsal sulamaya, belediye su ve atıksu hizmetlerinden farklı endüstriyel proseslere kadar çok geniş bir yelpazede akışkan taşımak için kullanılmaktadır. Bu kapsam içinde özellikle santrifüj pompalar, su temini, atıksu transferi, arıtma uygulamaları ve sulama sistemleri gibi pek çok uygulamada en yaygın kullanılan pompa tipleri arasında yer almaktadır (Babayiğit vd., 2017; Perez vd., 2010; Nataraj ve Singh, 2014; Kocaaslan vd., 2016). Santrifüj pompa bileşenlerinin üretiminde kullanılan Al7075 T6 alüminyum alaşımı gibi malzemelerin torna tezgahında işlenebilirliği, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri açısından hassas bir şekilde değerlendirilmelidir (Baran ve Neşeli, 2025b). Pompa parçalarının imalat sürecinde değişken kesme hızlarının takım ucu sıcaklığına ve kesme kuvvetlerine etkisi, parçanın yapısal bütünlüğü ve üretim maliyetleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Baran ve Neşeli, 2025c, 2025d). İmalat sonrası uygulanan tamburlu kumlama gibi işlemlerin, bilya püskürtme süresine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri, pompa kanatçıklarının hidrodinamik performansı için kritik olan yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir (Baran ve Neşeli, 2024).

Su temini ve arıtım tesislerinde kesintisiz debi kontrolü, enerji santrallerinde ısı transfer akışkanlarının devridaimi, kimya ve petrokimya tesislerinde reaktif akışların hassas dozajlaması ya da gıda sektöründe hijyenik koşullarda akışkan transferi gibi süreçler, pompa performansının doğrudan etkilediği operasyonlardır. Santrifüj pompalarda işletme koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan en kritik akış kaynaklı problemlerden biri kavitasyon olgusudur. Kavitasyon, yerel basıncın akışkanın doymuş buhar basıncının altına düşmesiyle birlikte buhar kabarcıklarının oluşması ve daha yüksek basınç bölgelerinde ani olarak çökmesi sonucu meydana gelmekte; bu süreç pompa performansında düşüş, enerji kayıplarında artış, titreşim ve gürültü seviyelerinde yükselme ile uzun vadede çark ve gövde üzerinde malzeme hasarına yol açabilmektedir. Özellikle modern tesislerde artan debi talepleri, değişken işletme koşulları ve yüksek verim beklentileri, santrifüj pompaların kavitasyona daha duyarlı rejimlerde çalışmasına neden olmaktadır.

Alan yazın incelendiğinde, kavitasyonun oluşum mekanizmaları ve temel etkileri uzun süredir araştırılmakla birlikte, kavitasyonun zamansal–uzaysal evriminin, farklı kavitasyon türlerinin ve bu süreçlerin titreşim, akustik davranış ve enerji kayıpları ile olan ilişkilerinin bütüncül bir bakış açısıyla ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, sayısal ve deneysel yaklaşımların birlikte değerlendirilmesine yönelik çalışmaların, özellikle erken kavitasyon evrelerinin anlaşılması ve izlenmesi açısından geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, bu kitap bölümünde santrifüj pompalarda kavitasyon olgusu; oluşum mekanizması, kavitasyon türleri ve gelişim süreçleri çerçevesinde ele alınmakta; sayısal ve deneysel çalışmalar ışığında kavitasyonun pompa performansı, akış karakteristiği, titreşim ve hasar mekanizmaları üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Sunulan değerlendirmelerin, kavitasyonun daha iyi anlaşılmasına katkı sağlaması ve santrifüj pompaların tasarım, işletme ve izleme süreçlerine yönelik çalışmalara referans oluşturması amaçlanmaktadır.

SANTRİFÜJ POMPALAR

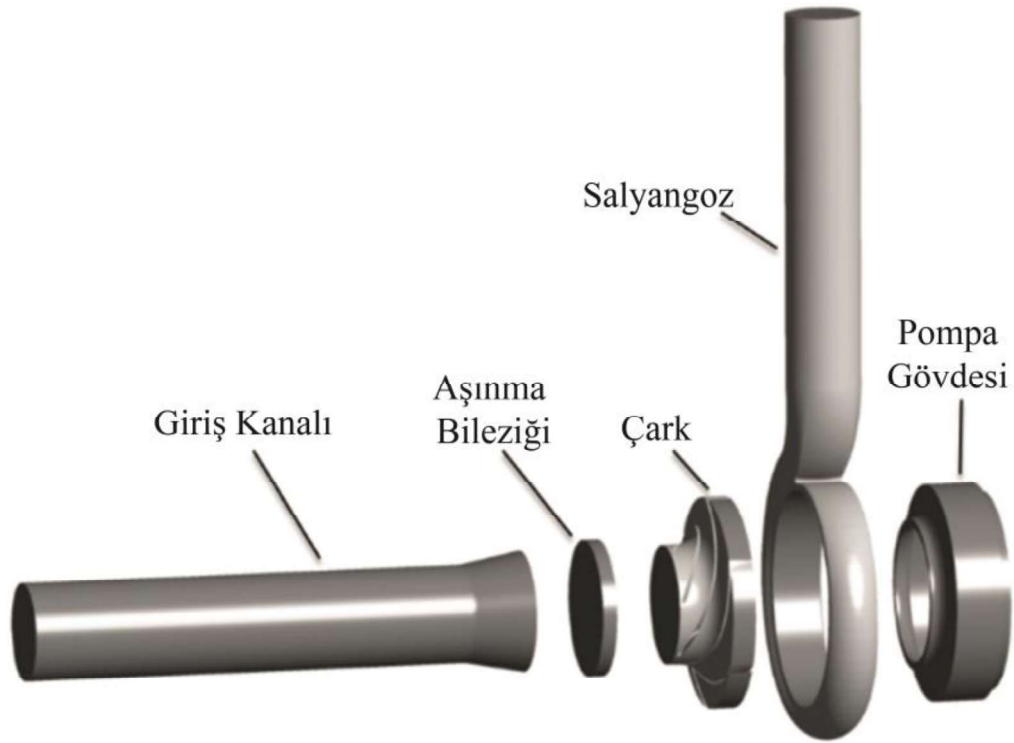
Endüstriyel uygulamaların çeşitliliği, pompaların farklı akışkan türleri, proses koşulları ve işletme gereksinimlerine uyum sağlayacak biçimde sınıflandırılmasını zorunlu kılmıştır. Genel olarak pompalar, akışkanı harekete geçirme prensiplerine göre pozitif deplasmanlı (positive displacement) pompalar ve dinamik (rotodinamik) pompalar olmak üzere iki ana kategori altında incelenmektedir (Reul, 1991; Turton ve RogerC.Baker, 1993). Bu sınıflandırma, pompa performans karakteristiklerinin, debi–basınç ilişkilerinin ve kullanım alanlarının anlaşılması açısından temel bir çerçeve sunmaktadır.

Pozitif deplasmanlı pompalar, çalışma prensibi gereği belirli bir hacimdeki akışkanı mekanik olarak yakalayıp basma hattına ileten, bu nedenle her çevrimde sabit bir hacim transfer eden pompa türleridir. Bu pompalar düşük debilerde dahi yüksek basınç üretme kabiliyetleri, viskozitesi yüksek akışkanları verimli şekilde taşıyabilmeleri ve debinin basınçtan büyük ölçüde bağımsız olması nedeniyle özellikle kimya, gıda, yağlama ve proses kontrollü dozajlama uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Toet vd., 2019; Shcherba, 2022).

Dinamik pompalar ise akışkana sürekli bir enerji aktarımı sağlayarak hız ve basınç kazandıran, genellikle döner çark veya pervane gibi hidrodinamik bileşenlerle çalışan pompa grubudur. Bu pompalar yüksek debilerin gerekli olduğu su temini, enerji santralleri, HVAC sistemleri, atıksu taşımacılığı ve genel proses uygulamalarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Debi, çalışma noktasına ve sistem direncine bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği için bu pompaların performans eğrileri tasarım sürecinde önemli bir belirleyici olmaktadır (Yalçın, 1998).

Her iki pompa sınıfı arasındaki temel fark, akışkana enerji aktarım mekanizmasından ve bunun sonucunda ortaya çıkan performans karakteristiklerinden kaynaklanmaktadır. Pozitif deplasmanlı pompalar daha sabit debi sunan ve basınç dalgalanmalarına karşı daha kararlı çalışan sistemlerdir; buna karşın dinamik pompalar geniş debi aralıklarında daha yüksek hacimsel kapasiteyle çalışabilir ancak debi doğrudan basınç koşullarından etkilenir. Bu farklar, pompa seçim sürecinde akışkan özellikleri, proses gereksinimleri ve sistem hidrolik karakteristiklerinin birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılar.

Santrifüj pompalar Şekil 1’de görüldüğü üzere temel olarak döner elemanlardan (çark) ve sabit elemanlardan (gövde) oluşan iki ana yapısal bileşen grubuna sahiptir (Narsimha ve Narayana, 2016; Chitale vd., 2021). Santrifüj pompalarda bir çarkın (impeller) dönmesiyle akışkana teğetsel yönde enerji kazandırılması ve bu enerjinin salyangoz ya da difüzör yapısı içinde basınca dönüştürülmesi prensibiyle çalışır. Çark kanatlarının şekli, giriş ve çıkış açıları, kanat sayısı, tip açıklığı, dönme hızı ve volüt geometrisi gibi tasarım parametreleri akış karakteristiğini doğrudan etkiler. Bu nedenle santrifüj pompalar; tek kademeli, çok kademeli, radyal akışlı, karışık akışlı ve eksensel akışlı gibi farklı alt sınıflara ayrılır. Uygulama gereksinimlerine bağlı olarak yüksek basınç elde etmek için çok kademeli pompa yapıları tercih edilirken, yüksek debi gerektiren proseslerde daha geniş çark ve uygun volüt tasarımları kullanılmaktadır (Yalçın, 1998).



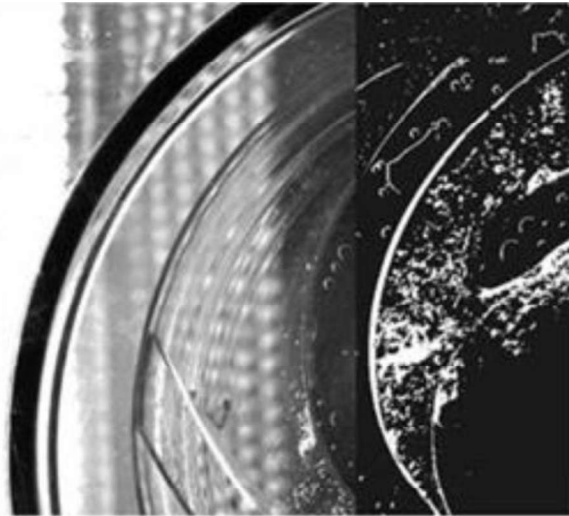
Şekil 1. Santrifüj pompanın şematik görünümü (Si vd., 2023)

Santrifüj pompaların hidrodinamik karakteristikleri, akışkanın çark girişinde maruz kaldığı basınç koşullarıyla yakından ilişkilidir. Bu noktadaki basıncın akışkanın buharlaşma basıncına yaklaşması veya altına düşmesi durumunda, akışkan içinde buhar boşluklarının oluşmasıyla tanımlanan kavitasyon olgusu ortaya çıkabilmektedir. Kavitasyon, santrifüj pompalar için önemli ölçüde zararlı bir olgudur; akış ve basma yüksekliğinde hızlı bir düşüşe yol açmasının yanı sıra çark, volüt ve diğer bileşenlerde malzeme yüzeyinin aşınmasına, titreşim ve gürültü oluşumuna neden olur. Bu etkiler, pompanın düzenli çalışmasını olumsuz etkileyerek hizmet ömrünün kısalmasına sebep olabilir (Cui vd., 2023; Lu vd., 2024). Kavitasyon, pompanın tasarımına, çalışma noktasına ve sistem hidrolik koşullarına bağlı olarak farklı biçimlerde gelişebilir ve akışkan-katı etkileşimi, performans eğrileri ve işletme güvenilirliği üzerinde etkiler yaratabilir. Özellikle debi-karakteristik uyumsuzlukları, yüksek giriş hızları veya yetersiz NPSH koşulları, kavitasyon eğilimlerinin artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle pompa tasarımı ve işletme stratejilerinde, kavitasyonun oluşum mekanizmasının, türlerinin ve süreç üzerindeki etkilerinin anlaşılması kritik bir gereklilik oluşturmaktadır.

KAVİTASYON MEKANİZMASI ve TÜRLERİ

Kavitasyon, akışkanın yerel basıncının buharlaşma basıncının altına düşmesi sonucunda sıvı içerisinde buhar kabarcıklarının oluşması, büyümesi ve akış alanında yeniden yüksek basınca maruz kalarak şiddetli biçimde çökmesiyle ortaya çıkan bir akış olgusudur (Ebada vd., 2025; Rakibuzzaman vd., 2025; Zhang, 2025). Şekil 2’de bir pompa çarkı içerisinde görüntülenmiş kavitasyon rejimleri yalnızca pompada değil aynı zamanda türbin ve denizel hidrodinamik uygulamalar gibi yüksek hız gradyanlarının ve basınç değişimlerinin belirgin olduğu sistemlerde yaygın biçimde gözlenir. Bu süreç yalnızca hidrolik performansın düşmesine değil, aynı zamanda malzeme yüzeylerinde erozyon, titreşim, gürültü ve verim kaybı gibi çeşitli mühendislik problemlerine yol açar. Kavitasyonun oluşum mekanizmasının anlaşılması ve farklı şekillenme tiplerinin doğru tanımlanması hem pompa tasarımı hem de işletme koşullarının optimize edilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

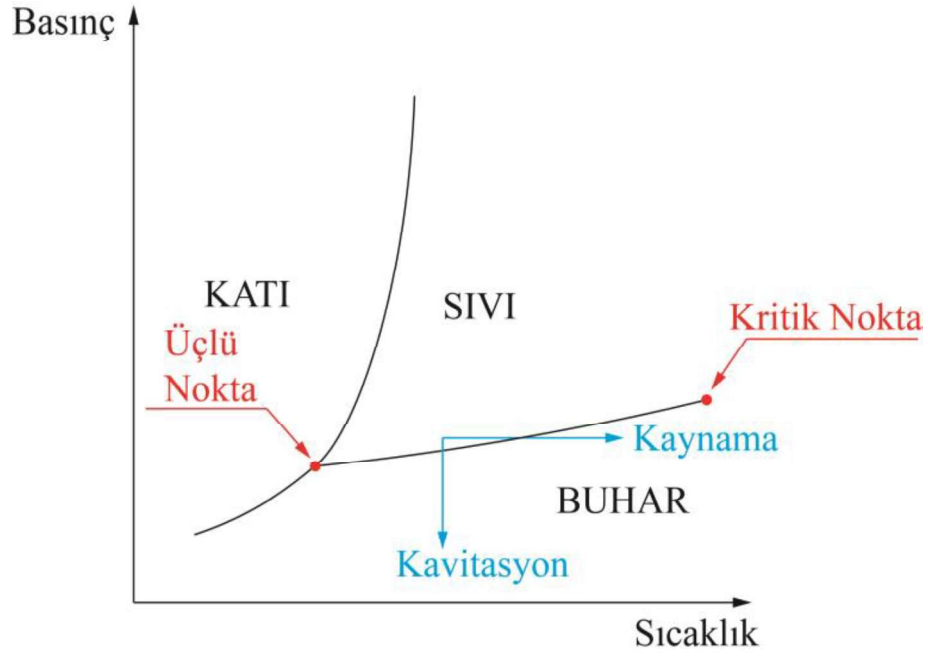
Saf bir sıvı, belirli ve üniform bir sıcaklık altında buhar basıncının altındaki bir basınca maruz kaldığında çekme gerilimi (tension) altında kabul edilir. Ortamda buhar fazı mevcut değilse, bu çekme durumu kararlı olabilir ve saf bir sıvı, katı malzemelere benzer şekilde, buhar boşlukları oluşturmaksızın oldukça yüksek negatif basınçlara dayanabilir. Bu durum, sıvıların yoğunlukları ve moleküller arası etkileşim kuvvetleri bakımından katılara benzer özellikler göstermesi dikkate alındığında şaşırtıcı değildir. Nitekim teorik olarak saf bir sıvının (veya katının) dayanabileceği çekme geriliminin 10^4 – 10^5 atmosfer mertebesinde olduğu öngörülmektedir (Brennen, 2005; Brennen, 2011).



Şekil 2. Kavitasyon morfolojisine yönelik şematik görünüm (Cui vd., 2023)

Sıvılarda kavitasyonun ortaya çıkmasına neden olan başlıca çekirdeklenme mekanizması dört ana grupta incelemek mümkündür. Homojen çekirdeklenme, moleküllerin rastgele ısı hareketleri sonucu, sıvı içerisinde geçici ve mikroskobik boşlukların kendiliğinden oluşmasıyla gerçekleşmektedir. Yeterince yüksek çekme gerilimi altında bu boşluklar büyüyerek buhar kabarcıklarına dönüşebilmesidir. Heterojen çekirdeklenme, sıvı ile temas hâlindeki katı yüzeylerde (kap iç yüzeyleri, pompa bileşenleri veya askıda bulunan katı partiküller) meydana gelen çekirdeklenme türüdür. Yüzey pürüzlülüğü ve ara yüzey özellikleri bu mekanizmayı önemli ölçüde etkiler. Mikro-kabarcık kaynaklı çekirdeklenme, sıvı içerisinde yüzey gerilimi etkisiyle kararlı hâlde bulunan çok küçük gaz kabarcıklarının, artan çekme gerilimi altında büyüyerek makroskobik buhar kabarcıklarına dönüşmesiyle oluşur. Son olarak radyasyon etkisiyle çekirdeklenme, yüksek enerjili parçacıkların sıvı molekülleriyle etkileşimi sonucunda lokal enerji birikimi meydana gelmesiyle tetiklenen çekirdeklenme mekanizmasıdır. Bu etki, özellikle deneysel sistemlerde gözlemlenmektedir (Brennen, 2011).

Kavitasyon belirli bir sıcaklıkta sıvı içindeki yerel basıncın, akışkanın doymuş buhar basıncının altına düşmesiyle ortaya çıkan bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Bu koşullar altında Şekil 3'te görüldüğü üzere sıvı içinde mevcut olan mikroskobik kavitasyon çekirdekleri hızla büyüyerek belirli boyutlarda buhar boşlukları oluşturur. Oluşan bu boşluklar daha yüksek basınçlı bölgelere taşındığında ise çevre akışkanın etkisiyle büzülme, salınım ve ani çökme davranışı sergiler. Bu buhar boşluklarının oluşumu, gelişimi, titreşimi ve çökmesi sırasında meydana gelen karmaşık fiziksel etkileşimlerin bütünü, kavitasyon olgusu olarak adlandırılmaktadır ve bu boşlukların çökmesi ile ilgili yüzeyde yüksek deformasyon meydana gelmektedir (Zhu vd., 2024; Franc ve Michel, 2006; Al-Obaidi, 2018; Sun ve Tan, 2020).



Şekil 3. Suyun faz diyagramı ve doymuş sıvı–buhar denge eğrisi (Brennen, 2011)

Gerek vana gibi yapılar gerekse santrifüj pompalarda kavitasyon gelişimi süreci giriş basıncı ile doğrudan ilintilidir (Liu vd., 2020; Sun ve Tan, 2020). Sun vd., çalışmalarında santrifüj pompalardaki kavitasyonun zamansal ve uzaysal gelişimini üç temel evrede gerçekleştirdiğini ifade etmektedir. Bunlar sırası ile gelişim, kopma (ing. shedding) ve çökme evreleridir. Kavitasyon döngüsünün çark dönme periyodunun dörtte birine ($1/4T$) karşılık geldiğini ve bu sürecin, çark dönme frekansının dört katına eşdeğer bir karakteristik frekansla ($4f_i$) ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Relatif vortisite taşınım denklemi üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmeler ile boşluk yapısının uzamasında relatif girdap gerilmesi (ing. relative vortex stretching,) teriminin, büyüme sürecinde ise relatif girdap genişmesi (ing. relative vortex dilation,) teriminin belirleyici rol oynadığını ifade etmektedir (Sun ve Tan, 2020).

Pompa sistemlerinde kavitasyon, olduğu bölge, akış koşulları ve boşlukların dinamik davranışına bağlı olarak farklı biçimlerde ortaya çıkabilmektedir. Bu farklılıklar, kavitasyonun hem hidrodinamik etkilerini hem de pompa bileşenleri üzerindeki hasar karakterini belirlemektedir. Literatürde pompalarda gözlenen kavitasyon türleri genel olarak aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırılmaktadır.

- **Başlangıç Kavitasyonu:** Akış alanında yerel basıncın minimum değerinin doymuş buhar basıncına yaklaşmasıyla birlikte kavitasyon başlangıçlı gözlenir ve ilk buhar kabarcıkları oluşmaya başlar (Kaya,

2020). Öngörücü bakım yaklaşımları açısından değerlendirildiğinde, kavitasyonun geri dönüşü olmayan hasarlara yol açan bulut kavitasyonu aşamasına ilerlemeden önce, başlangıç kavitasyonunun tespit edilmesi kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, başlangıç kavitasyonunun güvenilir biçimde tanımlanmasına yönelik çeşitli teknik zorluklar hâlen devam etmektedir (Dina, 2003). Pompa sistemlerinde bu erken evrede, basınç dalgalanmaları, basma yüksekliğinde belirgin düşüşler, güçlü titreşimler veya ayırt edici gürültü seviyeleri gibi ölçülebilir göstergeler çoğu zaman net biçimde ortaya çıkmamaktadır. Buna ek olarak, kavitasyonun zamansal ve uzaysal gelişimi, akış alanı içerisinde mevcut olan çok sayıda hidrodinamik uyarım kaynağından etkilenmektedir. Bu durum, kavitasyona bağlı sinyallerin dönen çark çevresindeki farklı uyarıcı bileşenler tarafından modüle edilmesine neden olmakta ve söz konusu sinyallerin, pompanın normal işletme koşullarında hâkim olan yüksek seviyeli arka plan gürültüsü ile gözlemlenmesine yol açmaktadır (Chu vd.,2020).

- **Baloncuk Kavitasyonu:** Kavitasyon sayısının azalması ya da giriş akışındaki çekirdeklenme yoğunluğunun artması sonucunda kavitasyon şiddetinin yükselmesi durumunda, oluşan kavitasyon yapıları karşılıklı etkileşime girerek ana akış alanının karakteristiğinde belirgin değişimlere yol açmaya başlamaktadır (Kaya, 2020). Kavitasyon sayısı (σ) Denklem 1’de verilmiştir. Denklem 1’de verilen ifadede U_∞ , p_∞ ve T_∞ sırası ile referans hız, basınç ve sıcaklıktır. $p_v(T_\infty)$ doymuş buhar basıncı iken ρ_L sıvı yoğunluğudur (Brennen, 2005).

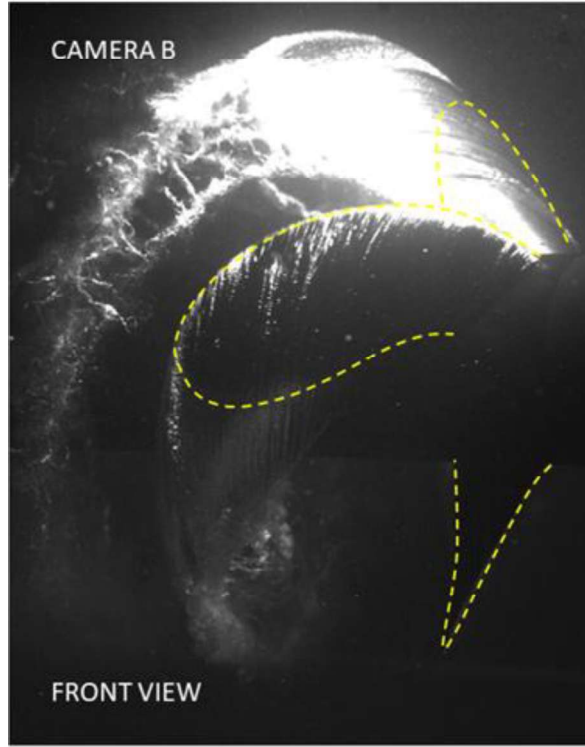
$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v(T_\infty)}{\frac{1}{2} \rho_L U_\infty^2} \quad (1)$$

- **Tabaka Kavitasyonu:** Genellikle hidrofiller veya pompa sistemlerinde katı yüzeyler boyunca uzanan bir buhar tabakasının oluştuğu; sıvı ve buhar fazları arasındaki zamana bağlı etkileşimlerin hâkim olduğu, kararsız buhar yapılarıyla tanımlanan karmaşık bir akışkanlar dinamiği olgusudur. Literatürde yer alan çok sayıda çalışma, tabaka kavitasyonun temel özelliklerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Amromin vd., bu olguyu kavitasyon boşluğunun kendisi tarafından tetiklenen, akış hızı ve karakteristik gövde boyutlarından etkilenen viskoz bir akış ayrılması süreci olarak tanımlamıştır (Kaya,

2020; Amromin, 2007). Coutier-Delgosha vd., ise boşluk oranlarının %50 seviyelerine ulaşabildiğini ve kavitasyon boşluğunun salınım frekanslarının yaklaşık 0.25 mertebesinde değiştiğini rapor etmiştir (Coutier-Delgosha, 2006). Pham vd., tarafından yapılan çalışmada, tabaka kavitasyondaki kararsızlıkların temel olarak iki ana mekanizmadan kaynaklandığı; bunların geri akış jetleri ve fazlar arası ara yüzey dalgaları olduğu belirtilmiştir (Pham vd.,1999).

- **Bulut Kavitasyonu:** Bulut kavitasyonu, çok sayıda kavitasyon kabarcığından oluşan büyük boşluk kümelerinin periyodik olarak oluşup çökmesi sonucunda akış alanında belirgin zamansal kararsızlıkların ortaya çıktığı; artan kavitasyon gürültüsü ve olası malzeme hasarı ile ilişkilendirilen bir kavitasyon türüdür (Kaya, 2020; Brennen, 2007). Bulut kavitasyonu, çoğunlukla tabaka veya girdap kavitasyonunun kararsızlaşarak parçalanması sonucu ortaya çıkmakta olup, kavitasyonu koşullar altında gözlenen gürültü seviyelerinin artışı ve erozyon kaynaklı hasarların önemli bir bölümünden sorumlu olduğu değerlendirilmektedir (Reisman vd., 1994). Bulut kavitasyonunun oluşum mekanizması, tabaka kavitasyonunun kararsızlaşarak parçalanmasına dayanmakta olup, bu süreçte geri akış jetinin kabarcık kümelerinin tetiklenmesinde belirleyici bir rol oynadığı bildirilmektedir (Kawanami vd., 1997). Oluşan bu kabarcık bulutlarının çökmesi sırasında meydana gelen basınç dalgalarının, tekil kabarcık çöküşleriyle kıyaslandığında yüzlerce kat daha yüksek genliklere ulaşabildiği gösterilmiştir (Shimada vd., 1999). Bulut kavitasyonu, denizcilik mühendisliği, medikal ultrason uygulamaları ve genel akışkanlar mekaniği gibi birçok alanda kritik öneme sahiptir. Özellikle litotripsi gibi terapötik uygulamalarda, böbrek taşlarının parçalanması amacıyla yüksek basınçlı şok dalgaları üretmek için bulut kavitasyonunun kontrollü biçimde uyarılabildiği bilinmektedir (Ikeda vd., 2006). Bununla birlikte, bulut kavitasyonu çoğu durumda belirgin gürültü artışı ve ciddi yüzey hasarı potansiyeli ile ortaya çıkmakta olup, akış içeren mühendislik sistemleri açısından önemli bir risk unsuru olarak değerlendirilmektedir (Brennen, 2007).
- **Girdap Kavitasyonu:** Kavitasyon sayısının azalması durumunda girdap çekirdeği bütünüyle buhar fazı ile dolabilmekte ve bu mekanizma sonucu meydana gelen kavitasyon türü literatürde girdap kavitasyonu olarak tanımlanmaktadır (Kaya, 2020). Santrifüj pompalarda girdap kavitasyonu, belirli bir kritik kavitasyon sayısı ile

ilişkili olup; başlangıç, hafif ve şiddetli kavitasyon evreleri boyunca kademeli olarak gelişmektedir. Bu evrim sürecinde, kavitasyon bölgesinin arka kısmında vortikal yapılar oluşmakta; girdap gerilmesi, girdap genişmesi ve baroklinik tork gibi mekanizmalar kavitasyonun gelişimi ve kararsızlaşmasında belirleyici rol oynamaktadır (Meng vd., 2023). Bu yapısal dönüşümün doğal bir sonucu olarak, girdap kavitasyonu sırasında güçlü girdap kabarcıkları arasındaki etkileşimler zayıf vortikal yapıların parçalanmasına neden olmakta; basınç gradyeninin yönlendirdiği kinetik enerji dönüşümleriyle birlikte kavitasyonun başlaması esnasında radyal kuvvetlerde belirgin değişimler ortaya çıkmaktadır (Wang vd., 2025).



Şekil 4. Tamamen gelişmiş kavitasyon (süper kavitasyon) görünümü (Capone vd., 2024)

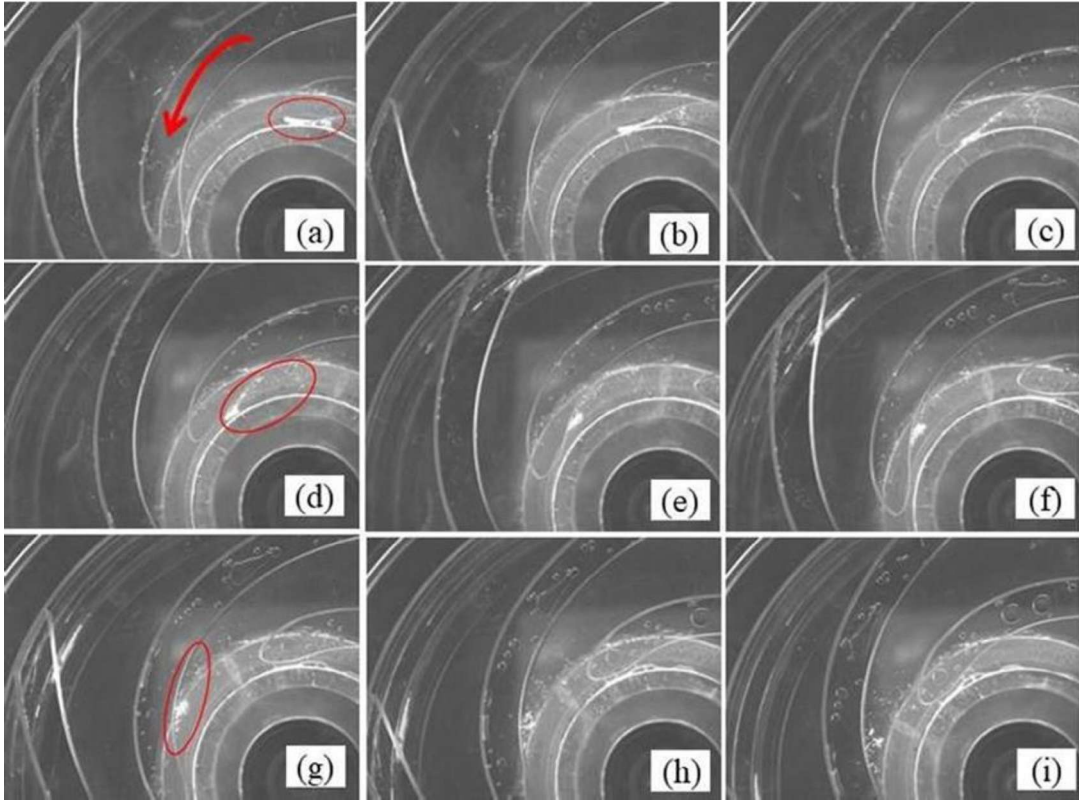
- **Süper Kavitasyon:** Basıncın son derece düşük seviyelere ulaştığı akış koşullarında süper kavitasyon rejimi ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, Şekil 4'te görüldüğü üzere kavitasyonlu yapı yüzeye bağlı kalmaktan çıkarak, cismi tamamen veya büyük ölçüde çevreleyen, sıvı içerisinde kapanan geniş ve görece kararlı bir buhar boşluğu hâlini almaktadır. Süper kavitasyon, tabaka, kısmi veya bulut kavitasyon türlerinden farklı olarak, zamansal kararsızlıkların ve periyodik kopmaların sınırlı olduğu bir yapı sergilemekte; buna bağlı olarak basınç dalgalanmaları

ve akış kaynaklı titreşimlerin genellikle daha düşük seviyelerde seyrettiği rapor edilmektedir (Ravelet vd., 2020; Šarc vd., 2018; Kosel vd., 2020). Ancak bu kararlılık, yalnızca çok düşük basınç rejimlerinde sürdürülebilmekte olup, akış koşullarındaki küçük değişimler kavitasyon yapısının yeniden kararsızlaşmasına yol açabilmektedir.

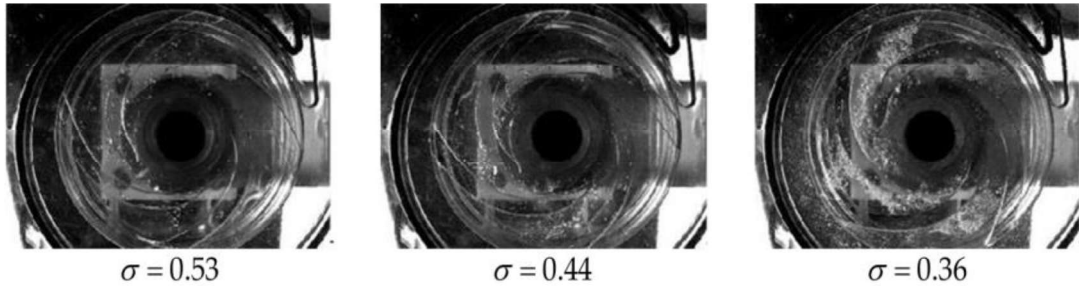
KAVİTASYONA YÖNELİK SAYISAL VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kavitasyon olgusu; çok fazlı akış yapısı, güçlü basınç dalgalanmaları ve zamansal olarak değişken karakteri nedeniyle hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmesi gereken karmaşık bir akış problemidir. Deneysel çalışmalar, kavitasyonun görsel karakterizasyonu, basınç ve titreşim ölçümleri ile akustik sinyallerin elde edilmesi açısından temel bir referans sağlarken; sayısal çalışmalar, akış alanı içerisindeki hız, basınç, buhar hacim oranı ve vortikal yapılar gibi fiziksel büyüklüklerin ayrıntılı ve zamana bağlı olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması, kavitasyon başlangıcının doğru biçimde belirlenmesi, farklı kavitasyon türlerinin evrim süreçlerinin anlaşılması ve kavitasyonun pompa performansı üzerindeki etkilerinin güvenilir biçimde değerlendirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Bu kapsamda literatürde, santrifüj pompalarda kavitasyonun deneysel gözlemlerle doğrulandığı ve sayısal modellerle desteklendiği çok sayıda çalışma rapor edilmiştir.

Kavitasyon kabarcıklarının oluşum ve gelişim süreçlerinin doğrudan gözlemlenebilmesi amacıyla, farklı kavitasyon sayıları altında gerçekleştirilen deneysel görselleştirme çalışmaları literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Cui vd., santrifüj pompalarda kavitasyon olgusu kapsamında, kavitasyon kabarcıklarının davranışsal özelliklerini ortaya koymak amacıyla kabarcık oluşumları deneysel analizler yoluyla gözlemlemiştir. Şekil 5'te kavitasyon kabarcıklarının gelişim süreçleri görselleştirilmiştir. Kavitasyon sürecinin ilk evresinde, akışkanın düşük basınçlı bölgeden geçişi sırasında basınç seviyesi doymuş buhar basıncının altına düşmekte ve bu koşullarda küçük, dağınık kavitasyon kabarcıkları oluştuğu ifade edilmektedir. Akışın ilerlemesiyle birlikte basınç seviyesinin daha da azalması, kabarcıkların büyümesine ve etkileşerek birleşmesine yol açmakta; böylece daha büyük kavitasyon yapıları meydana geldiği belirtilmiştir (Cui vd., 2023).



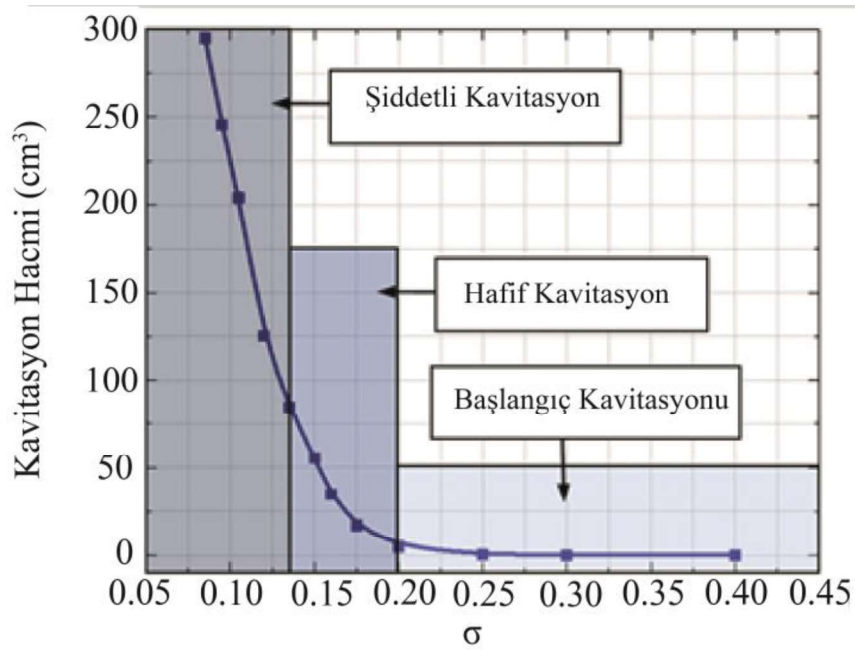
Şekil 5. Kaviteasyon kabarcıklarının gelişimi a) $t=0$ ms, b) $t=2$ ms, c) $t=4$ ms, d) $t=6$ ms, e) $t=8$ ms, f) $t=10$ ms, g) $t=12$ ms, h) $t=14$ ms, i) $t=16$ ms (Cui vd., 2023)



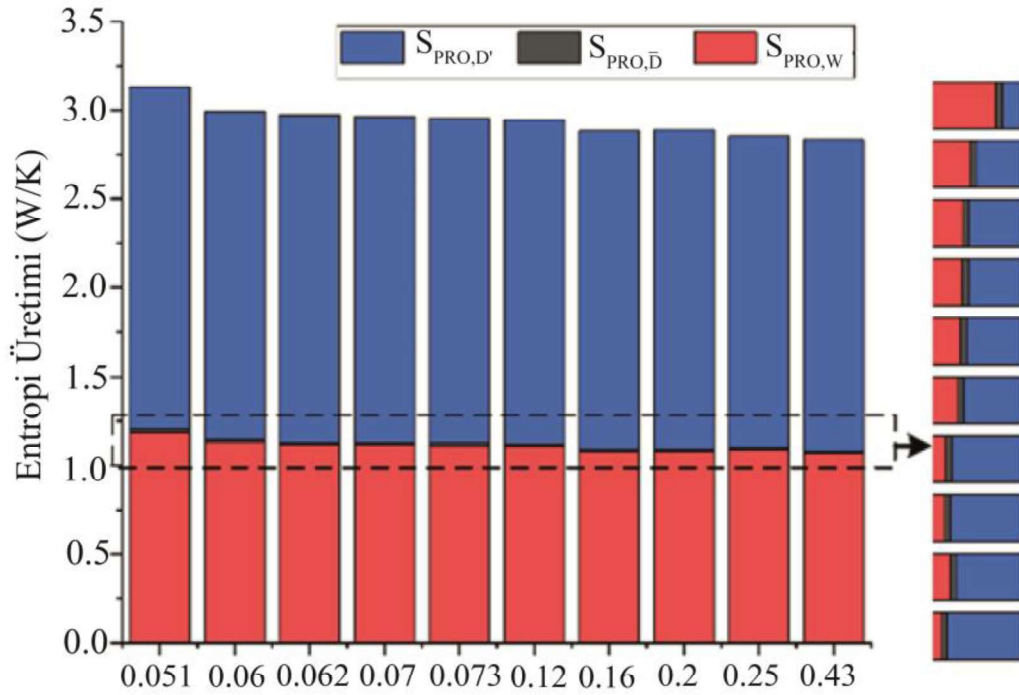
Şekil 6. Farklı kaviteasyon sayılarında kaviteasyon rejimlerinin dağılımı (Cui vd., 2023)

Kaviteasyon sayısındaki değişim, kaviteasyon kabarcıklarının oluşum yoğunluğu, büyüme hızı ve mekânsal yayılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olup, kaviteasyonun gelişim karakterini doğrudan şekillendirmektedir. Şekil 6’da farklı kaviteasyon sayısında kaviteasyon morfolojisi sunulmuştur. Deneysel çalışmada kaviteasyon sayısının artışı ile kabarcık hacminin azaldığı görülmüştür (Cui vd., 2023). Tan vd., aksenal su jeti pompasında kaviteasyonun parçalanma sürecine ilişkin temel mekanizmaların ortaya konulabilmesi amacıyla, yüksek hızlı görüntüleme tekniklerinden elde edilen bulgular basınç ve pompa performansına ait ölçüm sonuçlarıyla birlikte değerlendirmiştir. Benzer şekilde kaviteasyon sayısının azalması ile kaviteasyon kabarcık hacminin artış gösterdiği

görülmüştür (Tan vd., 2015). Meng vd., santrifüj pompalarda kavitasyonlu girdap dinamiğinin incelenmesi amacıyla, kavitasyonlu akış modified k- ω SST türbülans modeli ile Zwart kavitasyon modeli birlikte kullanılarak analiz gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalarda Şekil 7 (a)'da görüldüğü üzere yüksek kavitasyon sayılarında (σ), çark içerisindeki kavitasyon hacminin sıfıra yakın olduğu ve bu koşullarda kavitasyonun ihmal edilebilir düzeyde kaldığı belirlenmiştir. σ değerinin 0.200'den 0.130'a düşmesiyle birlikte, çark bünyesinde oluşan kavitasyon hacminde kademeli bir artış meydana geldiği; ancak bu aralıkta kavitasyon şiddeti sınırlı kaldığı ve toplam kavitasyon hacmi görece yavaş bir artış sergilediği ifade edilmiştir. Buna karşılık, σ 'nın 0.130'dan 0.081'e kadar azalması durumunda, kavitasyon hacim oranının sürekli olarak yükseldiği ve kavitasyon şiddetinin belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir (Meng vd., 2023).



Şekil 7. Kavite rejim hacminin kavitasyon sayısı ile değişimi (Meng vd., 2023)



Şekil 8. Farklı kavitasyon sayılarında entropi üretimi (Si vd., 2023)

Si vd., santrifüj pompalarda zamana bağlı kavitasyonlu akış alanının incelenmesi için, dönme etkisini dikkate alan bir kavitasyon modeli ile birleştirilmiş DES tabanlı bir sayısal yöntem kullanılmıştır. Ayrıca, farklı debi ve kavitasyon koşullarında pompa performansı ile basınç dalgalanması özelliklerinin elde edilmesi amacıyla kapalı devre bir pompa test düzeneği oluşturulmuş; deneysel veriler sayısal hesaplamalar için sınır koşullarının tanımlanması ve sonuçların doğrulanması amacıyla değerlendirilmiştir. Denklem 2’de verilen ifade de β sabit bir katsayı olup 0.09’a eşittir. “ ω ” türbülanslı girdap viskozitesi frekansı, “ k ” türbülans kinetik enerji ve “ ρ ” ise yoğunluktur. Denklem 3 ve 4’de yer alan bağıntılarda “ $\vec{\tau}$ ” duvar kayma gerilmesi ve “ $\vec{v}$ ” ise çözüm ağı hücre merkezindeki akışkan hız vektörüdür. “ $S_{PRO,D'}$ ” türbülanslı dissipasyon kaynaklı entropi üretim hızını, “ $S_{PRO,W}$ ” duvar entropi üretim oranı ve “ $\Delta S_{PRO,W}$ ” duvar entropisini ifade etmektedir. Şekil 8’de görüldüğü üzere, kavitasyon sayısının azalmasıyla birlikte toplam entropi üretiminde artış eğilimi gözlenmiştir. Kavitasyonun gelişimine bağlı olarak çark içerisindeki kabarcık sayısı ve hacminin artması, akış kayıplarını artırmaktadır. Ancak $\sigma = 0.43$ ile $\sigma = 0.051$ aralığında toplam entropi üretimindeki artışın yaklaşık 0.5 W/K ile sınırlı kaldığı görülmekte olup, bu durum kavitasyonun pompa verimi üzerindeki etkisinin görece düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tüm kavitasyon sayılarında türbülanslı

dissipasyon kaynaklı entropi üretiminin, duvar kaynaklı entropi üretimine kıyasla baskın olduğu anlaşılmaktadır (Si vd., 2023).

$$S_{\text{PRO,D}} = \beta \frac{\rho \omega k}{T} \quad (2)$$

$$S_{\text{PRO,W}} = \frac{\vec{\tau} \vec{v} dA}{T} \quad (3)$$

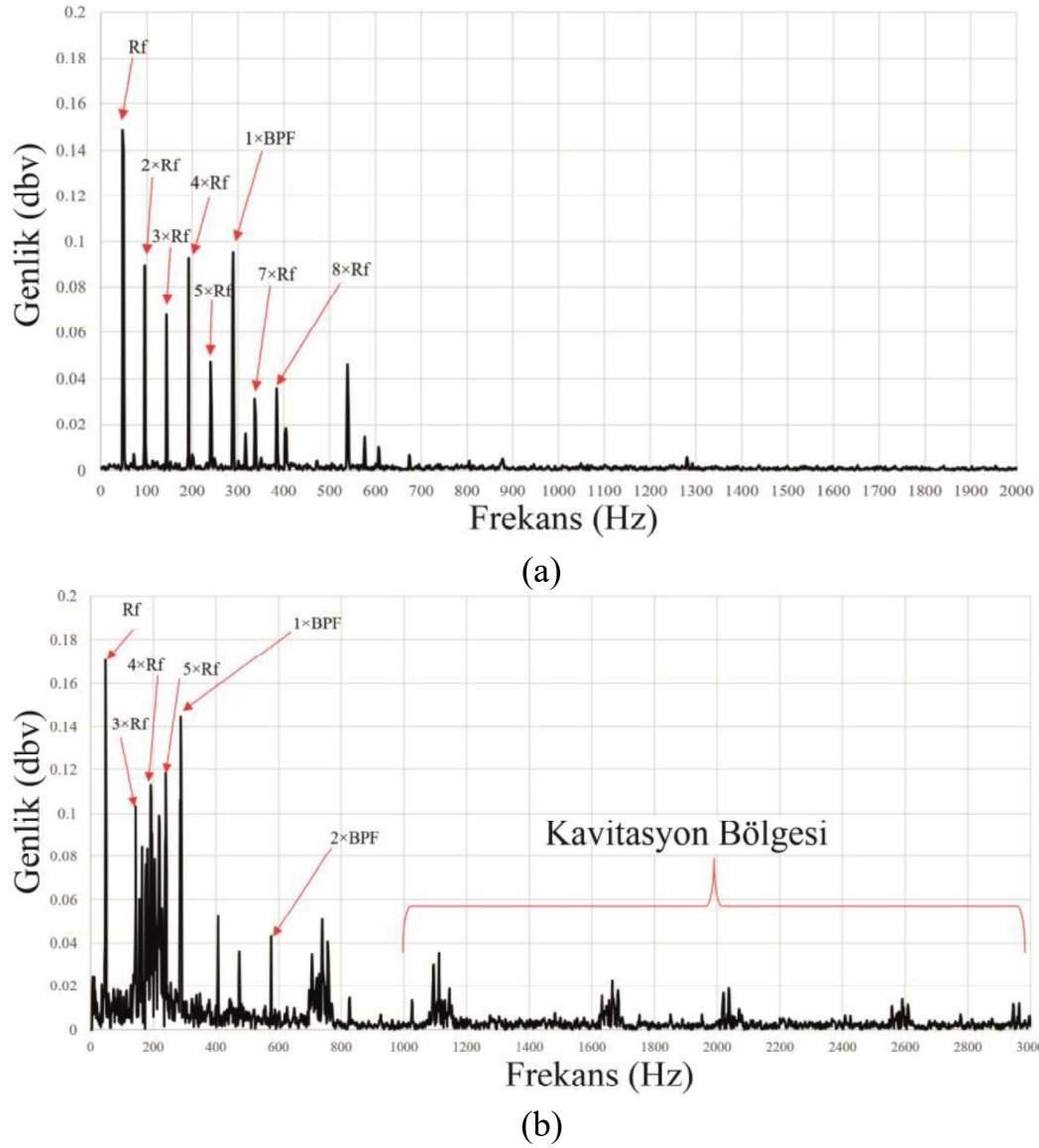
$$\Delta S_{\text{PRO,W}} = \int_A \frac{\vec{\tau} \vec{v} dA}{T} \quad (4)$$

KAVİTASYON HASARINA YÖNELİK SAYISAL ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kavitasyonun pompa bileşenleri üzerinde oluşturduğu hasar mekanizmalarının anlaşılmasına yönelik çalışmalarda, titreşim temelli analizler önemli bir yer tutmaktadır. Kavitasyon kabarcıklarının oluşumu, büyümesi ve özellikle çökmesi sırasında ortaya çıkan ani basınç darbeleri, pompa çarkı ve gövdesinde karakteristik titreşim imzalarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu titreşim sinyalleri, kavitasyonun erken evrelerinin tespit edilmesi, hasar şiddetinin değerlendirilmesi ve pompa çalışma koşullarının izlenmesi açısından hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu kapsamda literatürde, farklı kavitasyon sayıları ve işletme koşulları altında elde edilen titreşim verilerinin, kavitasyon kaynaklı hasarın nicel olarak değerlendirilmesi ve arıza tanılama yaklaşımlarının geliştirilmesi amacıyla incelendiği çok sayıda çalışma rapor edilmiştir.

Cui vd., santrifüj pompa çarkı duvarında kavitasyon kabarcıklarının çökmesi sonucu oluşan hasar mekanizmaları incelenmiş ve dönen akış alanı içerisinde kabarcık dinamiği ile kavitasyon çukurları arasındaki ilişki görsel deneysel yöntemler kullanılarak değerlendirmişlerdir. Kayma kuvvetleri ve homojen olmayan basınç dağılımı nedeniyle kavitasyon kabarcıklarının ideal küresel yapıdan saparak düzensiz elipsoidal formlar aldığını gösterdiği tespit edilmiştir. Bu kabarcıkların yüksek basınç bölgelerine girdiklerinde ani şekilde çöktüğü ve çark yüzeyine yönelen yüksek hızlı mikro-jetler oluşturarak lokal malzeme hasarına neden olduğu belirlenmiştir. Farklı dönme hızları (800, 1200 ve 1600 dev/dk) ile giriş basınçları (0.02–0.06 MPa) altında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, kavitasyon şiddetini belirleyen temel parametrenin dönme hızı olduğu,

basınç farkının ise bu süreci ikincil düzeyde etkilediği ortaya konmuştur (Cui vd., 2025).



Şekil 9. Santrifüj pompanın a) uygun ve b) kavitasyonlu çalışma koşullarında frekans spectrumu (Garousi vd., 2024)

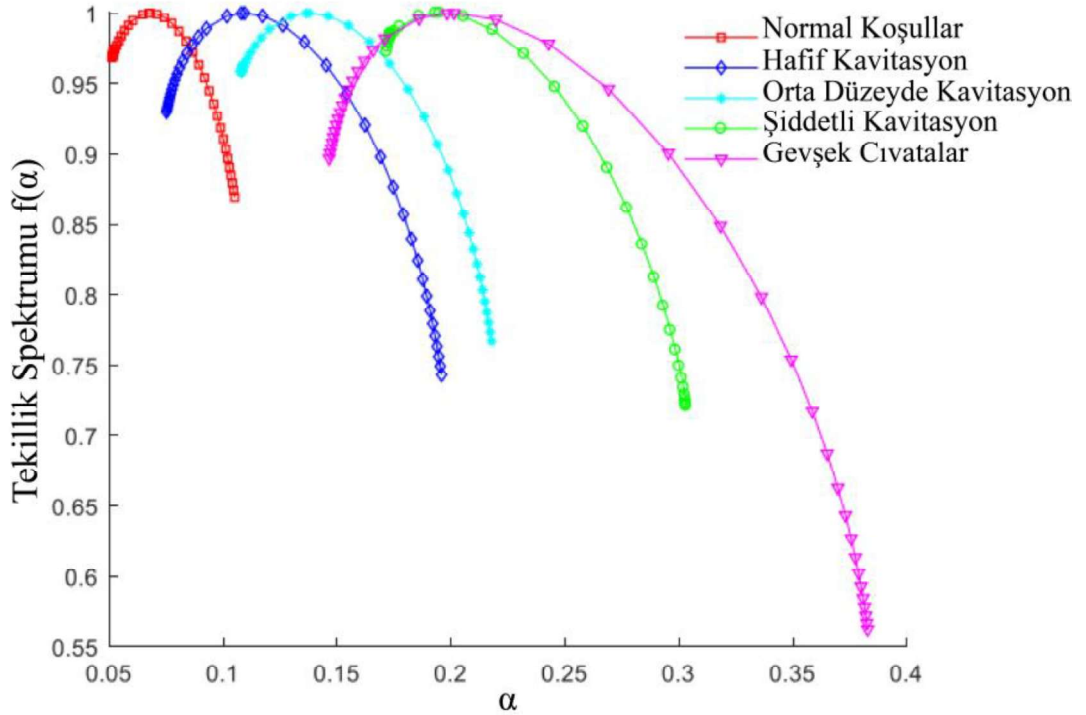
Ebada vd., kavitasyonun erken aşamada tespiti ve kontrol altına alınmasına yönelik deneysel bir yaklaşım sunmakta olup, titreşim sinyallerinin analizi ile akış parametrelerinin birlikte değerlendirilmesini esas alan bir yöntem sunmuşlardır. Deneysel çalışmada kavitasyonun başladığı kritik emme vanası açısı ve işletme koşullarını; görsel gözlemler, titreşim sinyalleri, zarf (ing. envelope) analizi ve teorik değerlendirmelerin birlikte kullanılmasıyla belirlenmiştir. Sistemde kavitasyona neden olabilecek bir tıkanıklık senaryosu, üç farklı deneysel aşama üzerinden hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Birinci aşamada (3002

dev/dk, 0° vana açısı), 19.8 L/dk debi ve 0.2098 m/s² titreşim tepe değeri ile kararlı bir çalışma durumu elde edilmiş ve kavitasyon belirtisi gözlenmediği ifade edilmiştir. İkinci aşamada (3003 dev/dk, 22.5° vana açısı), debinin 14.8 L/dk'ya düşmesiyle birlikte kavitasyonun başlangıç evresine işaret eden yüksek frekanslı titreşim bileşenleri ortaya çıkmış; 1445.3 Hz frekansında 0.4264 m/s² ve 1806.0 Hz frekansında 0.2106 m/s² genlik değerleri ölçülmüş, zarf analizinde ise hasar indeksi 2.5 olarak hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada (2196 dev/dk, 22.5° vana açısı), debinin 10.75 L/dk'ya düşürülmesiyle kavitasyonun başarılı şekilde bastırıldığı, yüksek frekanslı titreşimlerin ortadan kalktığı ve hasar indeksinin 0.2'nin altına indiği tespit edilmiştir (Ebada vd., 2025). Bilindiği üzere santrifüj pompa hatalı bir çalışma durumunda işletildiğinde, piezoelektrik sensörler aracılığıyla ölçülebilen titreşimler üretmektedir. Bu kapsamda Garousi vd., pompalarda yaygın olarak gözlenen iki temel sorun olan çark hasarları ve kavitasyonu incelenmiştir. Şekil 9'da 2880 rpm devir sayısı için pompanın uygun çalışma koşullarında ve kavitasyon altında çalışma durumunda genlik değerleri verilmiştir. Spektrumda baskın frekans bileşenlerinin mil dönme frekansı (Rf), kanat geçiş frekansı (BPF) ve bunların harmonikleri ile ilişkili olduğu görülmektedir. Bu bileşenler, çark–akış ve çark–sabit eleman etkileşimlerinden kaynaklanmakta olup, kavitasyonun titreşim karakteristiklerini belirgin biçimde etkilemektedir. İlk dönme frekansı 48 Hz'de gözlenmekte olup genliği 0.17 dBV seviyesindedir. Sağlam durumla karşılaştırıldığında, harmonik bileşenlerin genliklerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Özellikle birinci ve ikinci kanat geçiş frekansına (BPF) karşılık gelen genliklerin belirgin şekilde yükseldiği tespit edilmiştir. Kavitasyonun ilerlemesiyle birlikte pompa içerisinde kabarcık oluşumu ve çökmesi yoğunlaşmakta, bu durum titreşim seviyelerini artırarak genlik dalgalanmalarının büyümesine neden olmaktadır. Ayrıca, kavitasyonun başlangıcıyla birlikte yüksek frekans bölgesindeki spektral tepe değerlerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir (Garousi vd., 2024).

Sun vd., kavitasyonun uyarım kaynaklarını incelemeye yönelik olarak yük spektrumu tanımlamasına dayalı özgün bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu kapsamda, ilk aşamada hem görselleştirilebilir bir model pompa hem de bir santrifüj pompa üzerinde kavitasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı kavitasyon koşulları altında elde edilen titreşim sinyallerinden uyarım kuvveti spektrumlarının belirlenmesi amacıyla ters frekans yanıt fonksiyonu (İfrf) yöntemi uygulanmıştır. Kaviteasyona duyarlı frekans

bantları, monotonluk ve ayırt edilebilirlik kriterlerini içeren bileşik bir ölçüt yardımıyla desteklenen üçte bir oktav bant analizi kullanılarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak kavitasyon şiddetinin artmasıyla birlikte belirli frekans bantlarındaki enerji seviyelerinin yükseldiğini ve bu bantların debiye bağlı olarak yer değiştirdiğini göstermektedir. Üçte bir oktav bant analizleri, kavitasyonlu model pompada düşük frekans bölgelerinde enerji artışı olduğunu, buna karşın santrifüj pompada daha geniş bir frekans aralığında enerji yoğunlaşmasının meydana geldiğini ortaya koymuştur. Buna göre, model pompa için kavitasyona duyarlı frekans bantları düşük debi koşullarında 25–315 Hz aralığında belirlenmiş; 5 m³/h debide 125–250 Hz, 6 m³/h debide ise 25–315 Hz olarak tespit edilmiştir. Santrifüj pompa için ise kavitasyona hassas bantların düşük debide 1000–5000 Hz, nominal debi koşullarında ise 50–5000 Hz aralığında yer aldığı görülmüştür (Sun vd., 2026). Wang vd., santrifüj pompalarda kavitasyon olgusu akustik açıdan incelenmiş; farklı debi koşullarında pompa giriş ve çıkış bölgelerinden hidrofonlar yardımıyla elde edilen veriler analiz edilmiştir. Sonuçlar, hem kavitasyonsuz hem de hafif kavitasyon durumlarında debinin gürültü seviyeleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve debi arttıkça gürültünün yükseldiğini göstermektedir. Kavitasyon paydasının (NPSHa) azalmasıyla birlikte giriş ve çıkış gürültü eğilimlerinin ayrıştığı; girişte gürültünün keskin biçimde azaldığı, çıkışta ise önce artıp ardından hızla düştüğü tespit edilmiştir. Her iki noktada da ani değişimlerin gözlemlendiği bir geçiş bölgesi bulunmakta olup, bu bölgede NPSHa değerlerinin kavitasyon başlangıcını geleneksel yöntemlere kıyasla daha erken işaret ettiği görülmüştür. Akustik spektrumlar, enerjinin ağırlıklı olarak mil dönme frekansı (24 Hz), kanat geçiş frekansı (144 Hz) ve bunların harmonikleri etrafında yoğunlaştığını ortaya koymakta; NPSHa azaldıkça bu frekans bileşenlerinin girişte zayıfladığı, çıkışta ise güçlendiği belirlenmektedir. Bu spektral değişimlerin izlenmesi, kavitasyonun erken teşhisi için etkili bir tamamlayıcı yöntem sunmaktadır (Wang vd., 2025). Hang vd., santrifüj pompalarda kavitasyon kaynaklı enerji kayıpları, su–buhar faz etkileşimlerini dikkate alan geliştirilmiş entropi üretim yöntemi (EPMI) ve CFD yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, özellikle şiddetli kavitasyon koşullarında EPMI yönteminin enerji kayıplarını daha doğru biçimde öngördüğünü göstermektedir. Kavitasyonun, doğrudan, dalgalanma ve etkileşim kaynaklı kayıplar üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu; duvar kaynaklı kayıpların ise sınırlı düzeyde kaldığı

belirlenmiştir. Doğrudan ve dalgalanma kayıplarının çark üzerindeki akış ayrılmaları nedeniyle toplam kayıpların %55'inden fazlasını oluşturduğu, kütle transferi ve yüzey gerilimi etkilerini içeren etkileşim kayıplarının ise şiddetli kavitasyon durumlarında %26'ya kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dalgalanma ve duvar kayıplarının baskın frekanslarının boşluk hacmi evrimiyle, doğrudan ve etkileşim kayıplarının ise hem çark dönmesi hem de kavitasyon dinamikleriyle ilişkili olduğu ortaya konmuştur (Hang vd., 2025).



Şekil 10. Santrifüj pompan titreşim sinyallerinin çoklu-fraktal spectrum dağılımları (Liang vd., 2022)

Liang vd., deneysel çalışmalarında titreşim sinyallerinden eğilim bileşenlerinin ayrıştırılması için ampirik kip ayrıştırma (EMD) yöntemi uygulanmış, elde edilen eğilim sinyalleri en küçük kareler (LS) yaklaşımı ile yeniden uyarlanmıştır. Elde edilen EMD–LS yöntemi, çoklu-fraktal kuram ile birleştirilerek yeni bir sinyal tanımlama yaklaşımı (EMD–LS–MF DFA) geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra santrifüj pompa deney düzeneğinde farklı kavitasyon şiddetleri ve ayak cıvatalarının gevşek olduğu ayrı çalışma koşulları altında gövde arızalarına ait titreşim sinyalleri toplanmıştır. Şekil 10'da santrifüj pompanın titreşim sinyali çoklu-fraktal spectrumları verilmiştir. Santrifüj pompanın beş farklı çalışma durumuna ait titreşim sinyallerinin çoklu-fraktal spektrumlarını

sunmaktadır. Spektrumların şekil, konum ve değer aralıkları bakımından belirgin farklılıklar gösterdiği ve bu durumun pompanın farklı işletme koşullarındaki dinamik davranışını yansıttığı görülmektedir. Tekillik indisi α 'nın geniş bir aralıkta değiştiği, buna karşılık çoklu-fraktal spektrum $f(\alpha)$ 'nın α 'ya bağlı olarak değişen tek tepeli bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Bu bulgular, titreşim sinyallerinin belirgin çoklu-fraktal özellikler taşıdığını ortaya koymakta; özellikle ayak cıvatalarının gevşek olduğu durumda sinyallerin en yüksek dalgalanma karakterini sergilediğine işaret etmektedir (Liang vd., 2022).

SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, santrifüj pompalarda kavitasyon olgusu; oluşum mekanizmaları, farklı kavitasyon türleri, sayısal ve deneysel yaklaşımlar ile kavitasyon kaynaklı hasar ve titreşim davranışları bağlamında kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Literatürde yer alan deneysel gözlemler ve sayısal analizler birlikte değerlendirilerek, kavitasyonun pompa performansı, akış karakteristiği ve yapısal bütünlük üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

İncelenen çalışmalar, kavitasyonun temel olarak yerel basıncın doymuş buhar basıncının altına düşmesiyle tetiklendiğini ve bu sürecin; başlangıç, tabaka, bulut, girdap ve süper kavitasyon gibi farklı rejimler altında geliştiğini göstermektedir. Kavitasyon sayısındaki azalma ile birlikte kavitasyon hacminin ve boşluk yoğunluğunun arttığı; bunun da akış alanında belirgin zamansal ve uzaysal kararsızlıklara yol açtığı rapor edilmiştir. Özellikle tabaka kavitasyonunun kararsızlaşarak bulut kavitasyonuna dönüşmesi hem basınç dalgalanmalarının hem de gürültü ve titreşim seviyelerinin artmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.

Sayısal çalışmalar, uygun türbülans ve kavitasyon modelleri kullanıldığında, kavitasyonlu akış yapılarının ve bu yapılara bağlı enerji kayıplarının detaylı biçimde analiz edilebildiğini göstermektedir. Entropi üretimi temelli değerlendirmeler, kavitasyon şiddetinin artmasıyla birlikte toplam enerji kayıplarında bir artış eğilimi olduğunu ortaya koymakla birlikte, belirli kavitasyon sayısı aralıklarında bu artışın sınırlı kalabildiğine işaret etmektedir. Bu durum, hafif ve orta şiddette kavitasyon rejimlerinde pompa verimi üzerindeki etkinin görece sınırlı olabileceğini, ancak şiddetli kavitasyon koşullarında kayıpların belirgin hâle geldiğini düşündürmektedir.

Deneysel titreşim ve akustik analizler, kavitasyonun erken teşhisi açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Mil dönme frekansı, kanat geçiş frekansı ve bunların harmoniklerinde gözlenen genlik artışları; kavitasyon başlangıcı ve ilerlemesiyle ilişkilendirilmektedir. Özellikle yüksek frekans bantlarında ortaya çıkan spektral değişimlerin, kavitasyonun erken evrelerinin tespitinde tamamlayıcı bir gösterge olabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, kavitasyon ile çark kusurları gibi diğer mekanik arızaların birlikte bulunması durumunda, titreşim spektrumunun karmaşık bir yapıya büründüğü ve frekans bileşenlerinin genliklerinin tüm bantlarda arttığı görülmektedir.

Çoklu-fraktal analiz yaklaşımlarının kullanıldığı çalışmalar, santrifüj pompa titreşim sinyallerinin doğrusal olmayan ve çok ölçekli bir karakter sergilediğini ortaya koymaktadır. Farklı çalışma koşullarında elde edilen çoklu-fraktal spektrumların şekil ve yayılım bakımından farklılık göstermesi, bu yöntemin kavitasyon ve yapısal gevşeklik gibi arızaların ayırt edilmesinde potansiyel bir tanılama aracı olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle gevşek ayak cıvataları gibi yapısal problemlerin, titreşim sinyallerinde daha güçlü dalgalanma karakteristikleri oluşturduğu belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kavitasyonun santrifüj pompalarda yalnızca hidrolik performans kaybına değil; aynı zamanda titreşim, gürültü ve uzun vadede malzeme hasarına yol açan çok boyutlu bir problem olduğu anlaşılmaktadır. Sayısal ve deneysel yöntemlerin birlikte kullanılması, kavitasyonun hem akış alanındaki evrimini hem de yapısal etkilerini daha güvenilir biçimde ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, özellikle erken kavitasyon evrelerinin tanınmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi ve farklı arıza türlerinin birbirinden ayrıştırılmasına odaklanan ileri seviye sinyal işleme tekniklerinin gelecekteki çalışmalarda önemli katkılar sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Amromin, E. (2007). Determination of Cavity Detachment for Sheet Cavitation. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme*, 129(9), 1105-1111. DOI: 10.1115/1.2754312
- Al-Obaidi, A.R. (2018). Experimental and Numerical Investigations on the Cavitation Phenomenon in a Centrifugal Pump. Doktora Tezi. Huddersfield: University of Huddersfield
- Babayigit, O. Ozgoren, M. Aksoy, M.H. ve Kocaaslan, O. (2017). Experimental and CFD investigation of a multistage centrifugal pump including leakages and balance holes, *Desalination and Water Treatment*, 67, 28-40, <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20153>
- Baran, R., & Neşeli, S. (2024). Tamburlu kumlama makinasında bilya püskürtme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi [Conference presentation]. 3rd International Conference on Scientific and Innovative Studies, Konya, Türkiye.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Al7075 T6 alüminyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenebilirliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmesi [Conference presentation]. 4th International Conference on Contemporary Academic Research.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde değişken kesme hızının kesme kuvveti ve takım ucu sıcaklığına etkisi [Conference presentation]. 7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS 2025).
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Effect of machinability parameters on cutting force in the turning of 25CrMo4 steel [Conference presentation]. 3rd International Conference on Modern and Advanced Research (ICMAR 2025).
- Brennen, C.E. (2005). *Fundamentals of multiphase flow*. İngiltere: Cambridge University Press
- Brennen, C.E. Bubbly cloud dynamics and cavitation, Salt Lake City: Haziran 2007
- Brennen, C.E. (2011). An Introduction to Cavitation Fundamentals, Cavitation: Turbo-machinery & Medical Applications WIMRC FORUM 2011, 4-6 Temmuz 2011, University of Warwick, İngiltere
- Capone, A. Alves Pereira, F. ve Di Felice, F. (2024). Flow and Cavity Measurements in a Supercavitating Propeller. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 243. <https://doi.org/10.3390/jmse12020243>
- Chitale, S. Jadhav, P. Dhoble, S. ve Deshmukh, S. (2021). Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump-A Review. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 49-58. 10.32628/IJSRST218573.
- Chu, N. Wang, L. Yu, L. He, C. Cao, L. Huang, B. ve Wu, D. (2020). An Adaptive Autogram Approach Based on a CFAR Detector for Incipient Cavitation Detection. *Sensors*, 20(8), 2303. <https://doi.org/10.3390/s20082303>
- Coutier-Delgosha, O. Devillers, J.F. Pichon, T. Vabre, A. Woo, R. ve Legoupil, S. (2006). Internal structure and dynamics of sheet cavitation. *Physics of Fluids*, 18, 017103, <https://doi.org/10.1063/1.2149882>
- Cui, Y. Cheng, B. Ding, Q. Li, X. ve Zhao, M. (2023). Study on Cavitation Bubble Characteristics in Centrifugal Pump Based on Image Recognition. *Processes*, 11(12), 3314. <https://doi.org/10.3390/pr11123314>
- Cui, Y. Guo, F. Ding, Q. ve Cheng, B. (2025). Investigation of cavitation damage patterns in centrifugal pump blades under rotating flow fields, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 100288, <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100288>.
- Dina, M. (2003). Detection of cavitation phenomena in a centrifugal pump using audible sound. *Mech. Syst. Signal Process*, 17(6), 1335–1347. <https://doi.org/10.1006/mssp.2002.1514>
- Ebada, Y. Elshennawy, A. Elbrashy, A. ve Rashad, M. (2025). Performance optimization of centrifugal pumps: Experimental analysis of flow enhancement and cavitation mitigation under variable operating conditions, *Flow Measurement and Instrumentation*, 106, 103043, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2025.103043>

- Garousi, M. H. Karimi, M. Casoli, P. Rundo, M. ve Fallahzadeh, R. (2024). Vibration Analysis of a Centrifugal Pump with Healthy and Defective Impellers and Fault Detection Using Multi-Layer Perceptron. *Eng*, 5(4), 2511-2530. <https://doi.org/10.3390/eng5040131>
- Franc, J.P. ve Michel, J.M. (2006). *Fundamentals of Cavitation*; Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science & Business Media
- Hang, X. Xingqi, L. Jianjun, F. Sina, Y. Guojun, Z. ve Like, W. (2025). Analysis of energy losses in a centrifugal pump for cavitation flow considering the effect of interphase interaction. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 167, 109212, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109212>
- Ikeda, T. Yoshizawa, S. Tosaki, M. Allen, J.S. Takagi, S. Ohta, N. Kitamura, T. ve Matsumoto, Y. (2006). Cloud cavitation control for lithotripsy using high intensity focused ultrasound. *Ultrasound in medicine & biology*, 32(9), 1383-1397, <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2006.05.010>
- Kawanami, Y. Kato, H. Yamaguchi, H. Tanimura, M. Tagaya, Y. (1997). Mechanism and Control of Cloud Cavitation. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme*, 119(4), 788-794, <https://doi.org/10.1115/1.2819499>
- Kaya M., 2020, Radyal Pompaların Kavitasyon Performansının Hesaplanması ve İyileştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kosel, J. Šuštaršič, M. Petkovšek, M. Zupanc, M. Sežun, M. ve Dular, M. (2020). Application of (super)cavitation for the recycling of process waters in paper producing industry. *Ultrason. Sonochem*, 64, 105002, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105002>
- Kocaaslan, O. Ozgoren, M. Aksoy, M. H. ve Babayigit, O. (2016). Experimental and Numerical Investigation of Coating Effect on Pump Impeller and Volute. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(5), 2475-2487. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.236.25094
- Liang, X. Luo, Y. Deng, F. ve Li, Y. (2022). Investigation on Vibration Signal Characteristics in a Centrifugal Pump Using EMD-LS-MFDFA. *Processes*, 10(6), 1169. <https://doi.org/10.3390/pr10061169>
- Liu, X. Wu, Z. Li, B. Zhao, J. He, J. Li, W. Zhang, C. Ve Xie, F. (2020). Influence of inlet pressure on cavitation characteristics in regulating valve. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14:1, 299-310, DOI: 10.1080/19942060.2020.1711811
- Lu, Y. Tan, L. Zhao, X. Ma, C. (2024). Experiment on cavitation-vibration correlation of a centrifugal pump under steady state and start-up conditions in energy storage station, *J. Energy Storage*, 110763, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110763>
- Meng, Q. Shen, X. Zhao, X. Yang, G. ve Zhang, D. (2023). Numerical Investigation on Cavitation Vortex Dynamics of a Centrifugal Pump Based on Vorticity Transport Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1424. <https://doi.org/10.3390/jmse11071424>
- Narsimha, R. ve Narayana, B.V. (2016). Design and Performance Analysis of Centrifugal Pump. *International Journal of Research*, 3, 1796-1801.
- Nataraj, M. ve Singh, R. (2014). Analyzing pump impeller for performance valuation using RSM and CFD, *Desal. Wat. Treat.*, 52, 6822-6831, <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.818924>
- Pham, T. M. Larrarte, F. ve Fruman, D. H. (1999). Investigation of Unsteady Sheet Cavitation and Cloud Cavitation Mechanisms. *Journal of Fluids Engineering*, 121(2), 289-296. <https://doi.org/10.1115/1.2822206>
- Perez, J. Chiva, S. Segala, W. Morales, R. Negrao, C. Julia, E. ve Hernandez, L. Performance Analysis of Flow in a ImpellerDiffuser Centrifugal Pumps Using CFD: Simulation and Experimental Data Comparisons, *ECCOMAS CFD 2010*, Lisbon:2010
- Ravelet, F., Danlos, A., Bakir, F., Croci, K., Khelladi, S., & Sarraf, C. (2020). Development of Attached Cavitation at Very Low Reynolds Numbers from Partial to Super-Cavitation. *Applied Sciences*, 10(20), 7350. <https://doi.org/10.3390/app10207350>

- Rakibuzzaman, M. Suh, S.-H. Kim, H.-H. Islam, M.D. Zhou, L. El-Emam, M.A. (2025). Cavitation and erosion effects on hydraulic performances of a submersible drainage pump, *Alex. Eng. J.*, 113 (2025), 431–450, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.11.060>
- Reisman, G.E. McKinney, E.A. ve Brennen, C.E. Cloud Cavitation on An Oscillating Hydrofoil. Santa Barbara: 21-26 Ağustos 1994
- Reul, H. (1991). Hydromechanical principles of axial pumps. In: Flameng, W. (eds) Temporary Cardiac Assist with an Axial Pump System. Steinkopff, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10284-8_1
- Šarc, A. Kosel, J. Stopar, D. Oder, M. ve Dular, M. (2018). Removal of bacteria *Legionella pneumophila*, *Escherichia coli*, and *Bacillus subtilis* by (super)cavitation. *Ultrason. Sonochem*, 42, 228–236, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.004>
- Shcherba, V. (2022). Comparative Analysis of Methods for Calculating the Discharge Process in a Positive-Displacement Pump. *Chemical and Petroleum Engineering*, 57, 952 – 962, <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01030-2>
- Shimada, M. Kobayashi, T. ve Matsumoto, Y. (1999). Dynamics of cloud cavitation and cavitation erosion. In Proceedings of the 1999 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM'99, San Francisco: 18-23 July 1999
- Si, Q., Deng, F., Lu, Y., Liao, M., & Yuan, S. (2023). Unsteady Cavitation Analysis of the Centrifugal Pump Based on Entropy Production and Pressure Fluctuation. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 8(4), 46. <https://doi.org/10.3390/ijtp8040046>
- Sun, W. ve Tan, L. (2020). Cavitation-Vortex-Pressure Fluctuation Interaction in a Centrifugal Pump Using Bubble Rotation Modified Cavitation Model Under Partial Load. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme*, 142(5), 051206, <https://doi.org/10.1115/1.4045615>
- Sun, Y. Wu, K. Ai, Y. Tan, X. Tong, W. Sun, B. Wu, P. ve Wu, D. (2026). Experimental investigation of cavitation excitation characteristics of centrifugal pump based on load spectrum identification. *Measurement*, 260, 119771, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119771>
- Tan, D., Li, Y., Wilkes, I., Vagnoni, E., Miorini, R. L., & Katz, J. (2015). Experimental Investigation of the Role of Large Scale Cavitating Vortical Structures in Performance Breakdown of an Axial Waterjet Pump. *Journal of Fluids Engineering*, 137(11), 111301. <https://doi.org/10.1115/1.4030614>
- Toet, G. Johnson, J. Montague, J.P. Torres, K. ve Garcia-Bravo, J.M. (2019). The Determination of the Theoretical Stroke Volume of Hydrostatic Positive Displacement Pumps and Motors from Volumetric Measurements. *Energies*, 12(3), 415, <https://doi.org/10.3390/en12030415>
- Turton, R.K.(1993). An introductory guide to pumps and pumping systems. Wiley–Blackwell
- Wang, D. Ma, W. Zhao, W. Cao, R. ve Yang, Y. (2025). Experimental Acoustic Analysis of Cavitation in a Centrifugal Pump. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 21(4), 877–890. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.055220>
- Wang, T. Chen, D. Li, J. Deng, B. ve Huang, W. (2025). Vortex energy conversion and dynamic variation of excitation force under cavitation conditions in a centrifugal pump. *Physics of Fluids*, 37, 065149, <https://doi.org/10.1063/5.0271536>
- Yalçın, K. (1998). Hacimsel ve Santrifüj Pompalar. İstanbul: Çağlayan Yayınevi.
- Zhang, Z. Yang, S. Zhang, B. Fang, X. Xue, R. Chen, S. ve Hou, Y. (2025). Experimental study on hydraulic performance and cavitation characteristics of a R134a refrigerant self-lubricating centrifugal pump, *International Journal of Refrigeration*, 169, 204-213, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.10.027>

Zhu, Y. Zhou, L. Lv, S. Shi, W. Ni, H. Li, X. Tao, C. ve Hou, Z. (2024). Research Progress on Identification and Suppression Methods for Monitoring the Cavitation State of Centrifugal Pumps. *Water*, 16(1), 52. <https://doi.org/10.3390/w16010052>

BÖLÜM 3

SAVUNMA SANAYİ İÇİN KONVEYÖR ENTEĞRELİ ROBOT KOLU TASARIMI VE KİNEMATİK ANALİZİ

Zeynep Cesur^{**}, Gökhan Yalçın^{***}

GİRİŞ

Gelişen üretim yöntemleri ve teknolojinin hızlı değişimiyle birlikte kullanımı her geçen gün artan robotik kollar ve endüstriyel robot otomasyonu neredeyse tüm endüstri alanında hızla benimsenmektedir. Dolayısıyla robotik kollar, otomatik olarak kodlanabilen ve seri olarak çalışabilen sistemler için vazgeçilmez hale gelmektedir (Siciliano vd., 2019; Craig, 2018).

Makine mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, bilgisayar mühendisliği ve mekatronik mühendisliğinin ortaklaşa çalışmaları sonucu ortaya çıkan robotların daha hızlı hareket ve daha esnek çalışmaları gibi kabiliyetlerinin artması, maliyetlerinin azalması, çalışanların yapması

^{**} Ön Lisans Öğrencisi, Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri, Konya, Türkiye, zeynep.cesur.195@gmail.com, ORCID: orcid.org/0009-0000-7318-4398

^{***} Öğr. Gör., Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri, Konya, Türkiye, gyalcin@ktun.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-5929-917X

gereken tehlikeli, çok zor veya imkânsız olabilecek çalışmaları yapabiliyor olmaları onların tercih edilme nedenleri arasındadır (Villani vd., 2018; Spong vd., 2020). İhtiyaçların karşılanması yanı sıra savunma sanayii gibi standartların üst düzeyde olduğu sektörlerde kaliteli ürünü ucuza imal edebilmek, iş yükünü hafifletmek, zamandan tasarruf etmek ve hatayı minimize etmek robotlara olan ihtiyacı artırmıştır (Siciliano vd., 2019). Tüm bu nedenlerden dolayı robotlar otomasyon sistemlerinde yapılan uygulamalarda çok fazla kullanım alanı bulmaktadırlar.

Robotik sistemlerin performansı, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği büyük ölçüde tasarım sürecinde tercih edilen malzeme yapısı ile doğrudan ilişkilidir (Budynas & Nisbett, 2019). Özellikle prototip bir robot kolu tasarımında, mekanik dayanım, ağırlık, maliyet, üretilebilirlik ve çevresel koşullara karşı direnç gibi kriterler, malzeme seçiminde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda malzeme yapısı, yalnızca taşıyıcı elemanların mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda hareketli parçaların hassasiyetini, enerji verimliliğini ve sistemin uzun vadeli kullanım ömrünü de etkilemektedir.

Elektro-pnömatik sistemler, elektriksel kontrol ile pnömatik güç aktarımını birleştirerek endüstriyel otomasyon uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır (Yalçın, Neşeli & Ağacayak, 2020).

Prototip aşamasında geliştirilen robot kollarında genellikle modüler, yeniden üretilebilir ve düşük maliyetli çözümler ön planda tutulmaktadır (Çakar, 2020; Hamida El Naser, 2018). Bu nedenle metal alaşımlar, mühendislik plastikleri ve kompozit malzemeler gibi farklı malzeme grupları rijitlik, esneklik ve ağırlık optimizasyonu açısından değerlendirilmekte ve tasarım hedeflerine göre karşılaştırılmaktadır (Sun vd., 2021; Kagitci & Tarakcioglu, 2016). Malzeme yapısının belirlenmesinde, robot kolunun taşıyacağı yük kapasitesi, eklem sayısı, hareket açıklığı ve kullanılacak tahrik sistemleri gibi yapısal parametreler de dikkate alınmaktadır.

Fırçasız doğru akım (BLDC) motorlar, yüksek verimlilikleri ve hassas hız kontrolü özellikleri nedeniyle robotik sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir (Şahin, Cobuloğlu & Ağacayak, 2022). Endüksiyon motorlarında elektriksel ve mekanik yüklerin birlikte değerlendirilmesi, sistem performansının doğru biçimde analiz edilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Terzioğlu & Ağacayak, 2024).

Yapılan bu çalışmada, savunma sanayisinde kullanılmak üzere prototip tasarımı gerçekleştirilen robot kolu üzerinde yürütülen yapısal ve fonksiyonel analizler kapsamında, kullanılacak malzeme yapısına ilişkin temel mühendislik ilkeleri ele alınmakta, seçilen malzemelerin elastik modül, akma dayanımı, yoğunluk ve üretim yöntemleri gibi mekanik ve fiziksel özelliklerinin sistem davranışı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenerek, statik ve dinamik yükleme koşulları altında elde edilen analiz sonuçlarına dayalı olarak robot kolunun taşıma kapasitesi, rijitliği ve çalışma performansını doğrudan etkileyen malzeme tercihleri sistematik biçimde değerlendirilmektedir. Savunma sanayii bileşenlerinin üretiminde kullanılan AISI 1040 gibi çelik malzemelerin kuru tornalanması süreçlerinde, kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkileri operasyonel hassasiyet açısından kritik önem taşımaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2024). Robotik sistemlerin hafiflik ve dayanım dengesini sağlamak adına tercih edilen 6082 alüminyum alaşımlarının işlenebilirliği, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri üzerinden analiz edilerek tasarımın imalat aşamasına veri sağlamaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2025). Ayrıca, AA 6082 alaşımı gibi malzemelerin işlenmesinde takım radyüsü ve işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ile yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin doğru belirlenmesi, robot bileşenlerinin boyutsal tamlığı için gereklidir (Yamaner & Sayın Kul, 2025). Özellikle sürdürülebilir üretim teknikleri kapsamında değerlendirilen kuru ve MQL (Minimum Miktarla Yağlama) yöntemlerinin AISI 5115 çeliği üzerindeki karşılaştırmalı performansları, imalat süreçlerinin optimizasyonunda belirleyici olmaktadır (Sayın Kul & Yamaner, 2025). Endüstriyel otomasyon uygulamalarına yönelik olarak konveyör bant sistemi ile entegre edilmiş çok eksenli bir robot kolunun tasarımı, kinematik analizi, yapısal dayanım değerlendirmesi ve kontrol altyapısı sunulmaktadır. Günümüz üretim sistemlerinde, esnek, düşük maliyetli ve yeniden yapılandırılabilir robotik çözümlere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen sistem, hafif yük taşıma ve tekrarlanabilir malzeme transferi operasyonları için etkin bir çözüm sağlamayı amaçlamaktadır. Robot kolunun mekanik tasarımı Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design, CAD) yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tüm bileşenler SolidWorks ortamında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Tasarlanan parçaların eklemeli imalat yöntemiyle ABS-PC esaslı filamentler kullanılarak üretilmesi planlanmıştır. Robot kolunun hareket kabiliyeti, servo motorlar ile tahrik edilen eklemler

aracılığıyla sağlanmış ve sistem çok serbestlik derecesine sahip olacak şekilde yapılandırılmıştır. Robot kolunun ileri, geri ve ters kinematik analizleri SolidWorks programında konumlandırma doğruluğu ile sağlanmıştır.

Sistemin yapısal güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, kritik bileşenler üzerinde statik gerilme analizleri gerçekleştirilmiş ve analizlerde taşıma yükü ile birlikte uygun emniyet katsayıları dikkate alınmıştır. Tasarlanan sistemde hareketi sağlayacak olan servo motorların senkron çalıştırılması ve robot kolu ile konveyör bant arasındaki koordinasyonun sağlanması, Arduino tabanlı bir mikrodenetleyici kullanılarak geliştirilebilir. Elde edilen bulgular, geliştirilen robot kolu ve konveyör bant sisteminin eğitim amaçlı robotik platformlarda ve laboratuvar otomasyonunda kullanılabileceği gibi düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda da etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca modüler yapısı sayesinde sistemin görüntü işleme destekli nesne tanıma, gelişmiş kontrol algoritmaları ve Endüstri 4.0 uyumlu akıllı üretim sistemleri ile entegrasyon açısından geliştirilmeye açık olduğu değerlendirilmektedir.

Robotların Tarihçesi

İlk araştırmalarda, MÖ 300 civarında Yunan matematikçi Archytas'ın buharla çalışan bir güvercin yaptığı öne sürülse de, robotik konusunda bilinen en eski yazılı kayıtlar İslam bilgini Cezeri'ye dayanmaktadır (Ceccarelli, 2022). Cezeri, tarihteki ilk önemli robotik çalışmalarına imza atan isim olarak, otomatik saatler, abdest alma makineleri ve ikram hizmetinde kullanılan cihazlar gibi yenilikçi icatlar geliştirmiştir. Bu otomatlar enerji kaynağı olarak yer çekimi kuvvetinden faydalanmıştır. Bu enerji ise düşürülen ağırlıklar, boşalan kaptaki şamandıralar veya batan cisimler aracılığıyla elde edilmiştir.

Robot kavramı ise modern literatüre Karel Capek adlı Çekoslovak yazarın 1921 yılında kaleme aldığı Rossum's Universal Robots (RUR) adlı tiyatro oyunuyla girmiştir (Craig, 2018). Bu yapımda ilk kez kullanılan "Robot" teriminin kökeni Çekoslovakça'daki "Robota" kelimesi olup zorla çalıştırılan işçi anlamına gelmektedir.

İlk gerçek robot projelerine, 1930'lu yıllarda uçak tasarımcılarının uçaklara yönelik otomatik kontrol mekanizmalı robot pilot geliştirmesiyle

adım atılmıştır. Ardından 1940'larda Westinghouse firması yatay düzlemde bağımsız hareket edebilen robot konsepti üzerinde çalışmıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte 20. yüzyılın sonlarına doğru Sony evcil robot hayvan Aibo'yu piyasaya sunarken, Honda Asimo adlı insansı robotunu üretmiştir.

Jacofsky ve Allen 2016 yılında robotik destekli ortopedik cerrahiyi geliştirerek, total eklem protezleri için yeni teknolojiler üzerinde çalışmışlardır. Robotik sistemler, özellikle bileşenlerin konumlandırılması ve hizalanmasına odaklanarak değişkenlikleri azaltmış ve cerrahi hassasiyeti artırmıştır. Aynı yıl Cheng ve Ji, düşük maliyetli ve iki tekerli, iki kollu insansı robot platformunun tasarımını ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarımın bir parçası olan eldiven sistemi, robot programlama teknolojisinde yeni bir yöntem keşfetmek amacıyla geliştirilmiştir. Ortaya çıkan insansı robot sistemi düşük maliyetli olmanın yanı sıra tam işlevsel özelliklere sahiptir.

2016 yılındaki bir diğer çalışmada Chaidir ve ekibi insan eli hareketlerini taklit eden bir robot kolu tasarlamışlardır. Geliştirilen robot kolu tehlikeli veya erişilemeyen bölgeleri keşfedebilmekte ve yüksek riskli görevleri yerine getirebilmektedir. Operatörün el hareketleri kamera aracılığıyla kaydedilerek ve video işleme teknolojisi kullanılarak algılanıp işlenmiştir. Bu projede %85 oranında başarı elde edilmiştir. Günümüzde ise donanım ve yazılım bileşenleri birleştirilerek Arduino, programlanabilir lojik kontrolör (Programmable Logic Controller, PLC) gibi denetleyicilerle servo motorların kontrolü sağlanmakta ve kablosuz bağlantı üzerinden uzaktan yönetim mümkün hale gelmektedir.

General Motors (GM) bu dönemde rakiplerini şaşkına çevirerek otomobilleri çok kısa sürede üretebilme kabiliyetine ulaşmıştır. Bu başarı sayesinde GM, Avrupa'da robot kollarının yaygınlaşmasını tetiklemiş ve kısa bir süre sonra Mercedes, BMW, Volvo, Fiat gibi otomotiv devleri fabrikalarına Unimate robot kollarını entegre ederek ağır ve tehlikeli işlerin insanlar yerine bu sistemlerle yapılmasını sağlamışlardır. Böylelikle sanayide robotların kullanımına dair ilk ciddi adımlar atılmıştır.

Bu gelişmelerin ardından, endüstrideki robotik cihazların ve bileşenlerin önemini kavrayan üretici firmalar kendi ülkelerine özgü robot kollarını geliştirerek dünya pazarında yer edinmeye çalışmıştır. Bu girişimlerin sonucunda KUKA (Almanya), ABB (İsveç) ve KAWASAKI

(Japonya) gibi markalar robotik alanında öncü isimler haline gelmiştir (Siciliano vd., 2019).

Toyota'nın 2017 yılında tanıtımını gerçekleştirdiği insansı robot T-HR3, insan-robot iş birliğinin geliştirilmesine odaklanmış olup ergonomi ve hareket kabiliyeti konularını ön planda tutan bir tasarıma sahiptir. Hyundai ise 2021 yılında ürün tanıtım, teşhir alanları ve servisler gibi müşterilerle etkileşim gerektiren alanlarda deneyimi iyileştirmek amacıyla kullanılan kompakt insansı robot modeli DAL-e'yi tanıtmıştır. Aynı yıl, Elon Musk tarafından duyurulan ve 2022 yılında ilk prototipi sergilenen Tesla Bot (Optimus), otomotiv sektörü için tekrarlayan görevlerin yerine getirilmesi amacıyla geliştirilmiştir.

Artık günümüzde robotlar çok farklı sektörlerde ve fabrikada üretime yardımcı ve uygulamacı olarak faaliyet göstermektedir. Endüstriyel robotlar savunma sanayi, otomotiv, beyaz eşya, kimya, cam, mobilya, gıda, elektronik, metal, seramik, kâğıt gibi birçok endüstriyel sektörün üretim hatlarında taşıma, kaynak, boyama, montaj, kontrol, lojistik ve depolama gibi birçok nedenle kullanılmaktadırlar.

ROBOTLARIN SINIFLANDIRILMASI

Robot; üzerine eklenen sensörler ile çevresini algılayan, algıladıklarını yorumlayan, bunun sonucunda karar alabilen ve kararın sonucuna göre hareket edebilen, hareket çıktısı olarak hareket organlarını çalıştıran veya durduran bir aygıttır. Bu işlemi ya da işlemleri yapabilmesi için kendi içerisinde farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar ayrı başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

Robot Kollar-Eklemlı Robotlar

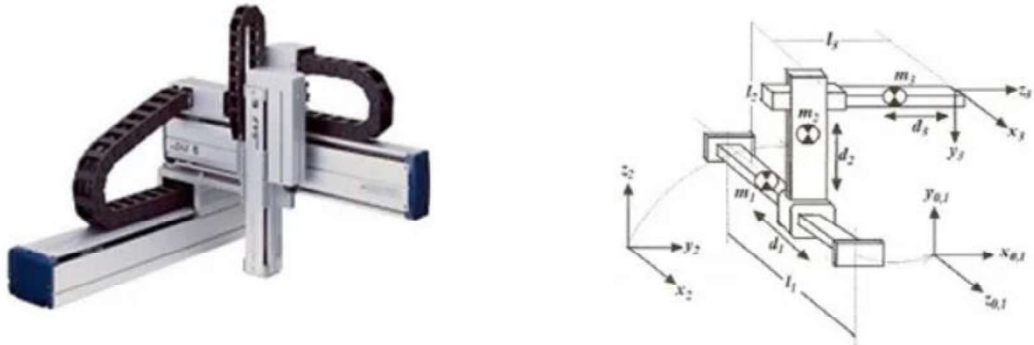
Bu robotlar, eklemleri dönel hareket eden robotlar olup ayaklı robotlar ya da endüstriyel robotlar bu sınıfa örnek olarak verilebilir. Eklemlı robotlar basit iki eklemlı yapılı sistemler halinde olabildiğı gibi oldukça karmaşık 10 eklemlı sistemler halinde de bulunabilirler. Eklemler elektrik motorları da dâhil olmak üzere pek çok çeşitli yöntemle hareket ettirilebilirler. Eklemlı robota ait bir görsel Şekil 1'de görölmektedir.



Şekil 1. Eklemlili Robot

Kartezyen Robotlar

Lineer robot da denilen kartezyen robotlar, üç eksenli lineer olarak kontrol edilen ve birbirlerine dik açılarla yerleştirilmiş olan endüstriyel robotlardır. Hareket eden üç eklemleri, dirseği ileri-geri, yukarı-aşağı ve içeri-dışarı götürmek suretiyle çalışmaktadırlar. Mekanik düzenleme ile robot kol kontrolünü oldukça basitleştirmesi de diğer avantajıdır. Kartezyen robota ait görsel ve hareket eksenleri Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Kartezyen Robot (<https://blog.tekyaz.com>)

Yatay elemanı iki uçta da desteklenmiş kartezyen robotlar bazen kizak robotlar olarak da adlandırılmaktadır. Bu robotların boyutları genellikle oldukça büyüktür. Bu tip robotlar bilgisayarlı nümerik kontrol (Computer Numerical Control – CNC) makinelerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. En basit uygulama alanları olan freze ve çizim makinelerinde kalem ya da freze kesici ucu x-y eksenlerinde hareket ederken aynı zamanda yukarı aşağı kontrolleri de sağlanabilmektedir.

Silindirik Robotlar

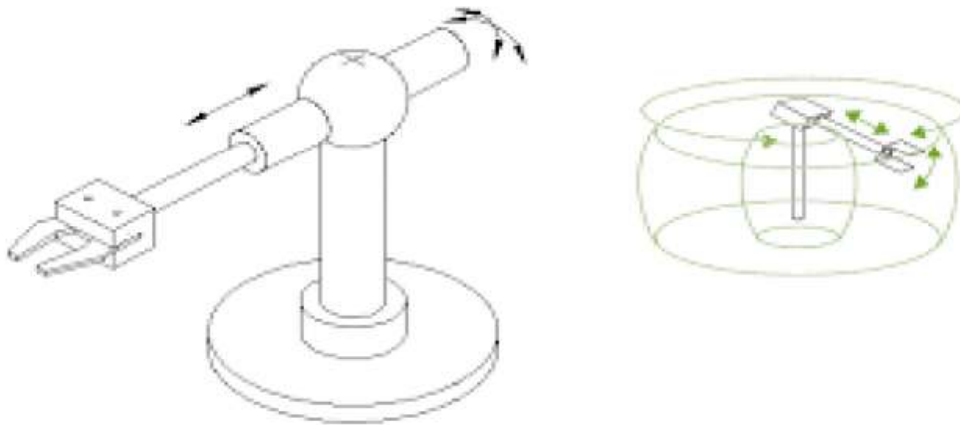
Temel kolun hareketi aşağı ve yukarı yöndedir. Robot bu hareketini kola yerleştirilmiş bir silindiri uzatarak yapmaktadır. Silindirik robotlar, aşağı yukarı hareketini bir pnömatik silindir yardımıyla gerçekleştirmektedir. Dönme hareketi genellikle motor ve dişliler sayesinde yapılmaktadır. Şekil 3'te silindirik robot ve hareket eksenleri görülmektedir.



Şekil 3. Silindirik Robot (<https://www.muhendisbeyinler.net>)

Küresel Robotlar

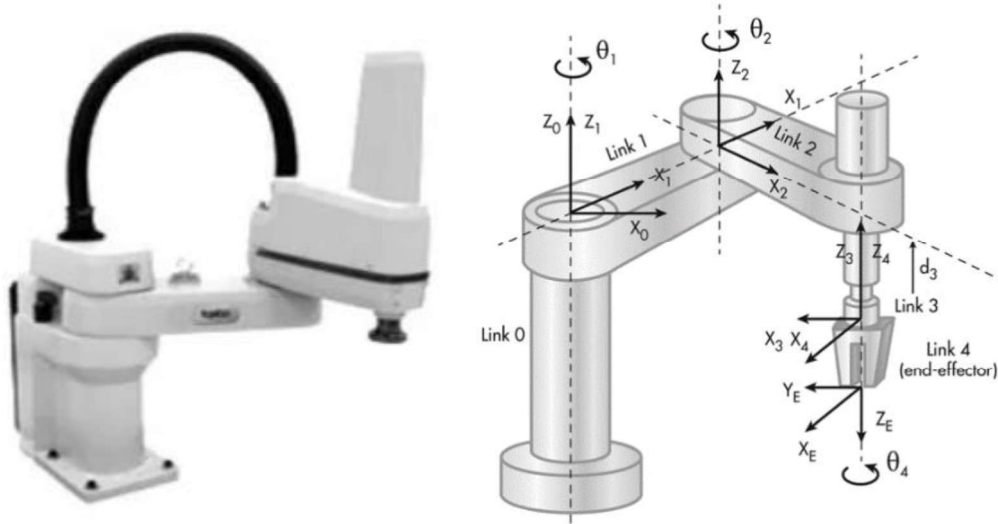
Küresel robotlar, bir prizmatik ve iki dönel hareket eklemleri bulunan robotlardır. Yani iki dönel ve bir lineer eksenleri vardır. Küresel robotların küresel koordinat sistemini oluşturan bir kolları bulunur. Küresel robot ve hareket eksenleri Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Küresel Robot (<https://www.robotpark.com.tr/>)

SCARA Robotlar

Açılımı Selective Compliance Assembly Robotic Arm yani seçilenlere uyan montaj robotu kolu anlamına gelir. SCARA tipi robotlar, çok yüksek hıza ve en iyi tekraralama kabiliyetine sahip olan bir robot çeşididir. Üç genel özelliği bulunmakta olup bunlar doğruluk, yüksek hız ve kolay montaj edilebilmeleridir. SCARA robot ve hareket eksenleri Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. SCARA Robot Fotoğrafı Ve Hareket Yön Şeması (<https://blog.tekyaz.com>)

Paralel Robotlar

Paralel manipülatör tek bir platformu ya da son aleti desteklemek için bilgisayar kontrollü farklı seri zincirler kullanan bir mekanik sistemdir. Paralel robota ait bir görsel Şekil 6'da görülmektedir.

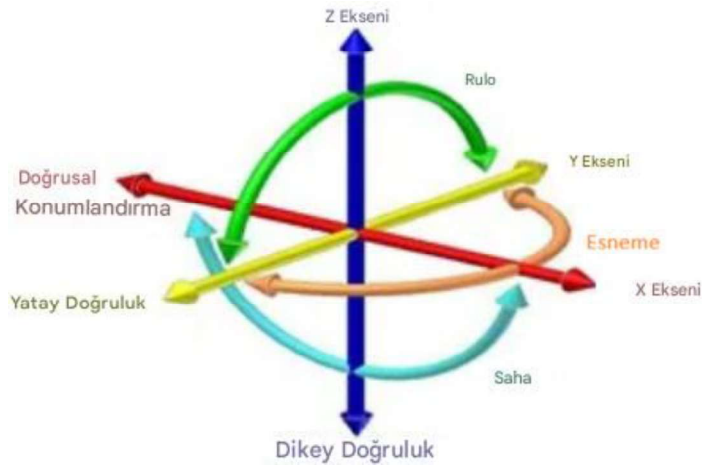


Şekil 6. Paralel Robot (<https://blog.tekyaz.com>)

En iyi bilinen paralel manipölatör, uçuş simölätörü gibi hareket edebilen bir temeli altı lineer eyleyici ile destekleyen sistemlerdir. Aynı zamanda paralel robotlar olarak da bilinen bu sistemler, temeldeki robotun veya bir ya da daha fazla manipölatörün hareket etmesi için benzer mekanizmalar kullanan eklemlı robotlardır. İsimdeki paralel kelimesi seri manipölatörlerin tersine son aracın birden fazla bağlantı ile desteklenmesinden kaynaklanmakta olup geometrik anlamda kullanılmamıştır. Yani bağlantı doğrularının birbirlerine paralel olmasını değil, bağlantıların beraber hareket etmesini ifade etmektedir. Mekanik sistemlerdeki verimlilik ve performans analizleri, hareketli parçaların tasarımı açısından kritik önem taşımaktadır (Aksoy vd., 2013; Babayigit vd., 2013). Sistem elemanlarındaki yük dengelenmesi ve performans üzerindeki etkileri, literatürdeki benzer mekanik analiz yaklaşımlarıyla paralellik göstermektedir (Babayigit vd., 2018).

ROBOT KİNAMATİĞİ

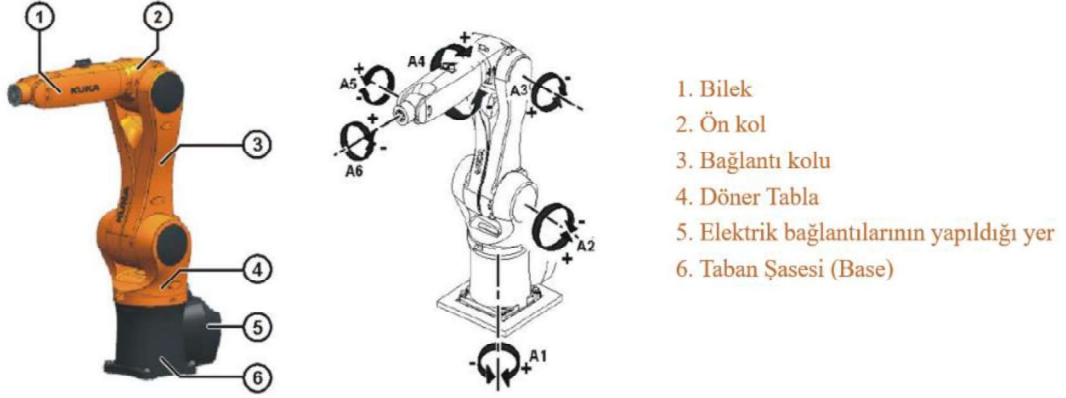
Serbestlik derecesi, mekanik bir sistemin yapılandırmasını tanımlayan bağımsız parametrelerin sayısıdır (Spong vd., 2020). Robotlarda eklemler kastedilerek eksen şeklinde de kullanılmaktadır. Uzayda üç boyutlu X, Y ve Z koordinatlarına bağılı olarak üç dönme ve üç öteleme serbestliği bulunmaktadır. Bundan dolayı altı serbestlik derecesi içinde bulunan uzayda yeterli şekilde hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Robotun işlevi belirlendikten sonra robotun hangi pozisyona ve hangi yönelim ile geleceğı bilgisi robot kinematığından anlaşılır. Şekil 7’de serbestlik dereceleri şeması (Degrees of Freedom-DOF) görölmektedir.



Şekil 7. Serbestlik Dereceleri Şeması (DOF)

İleri Kinematik

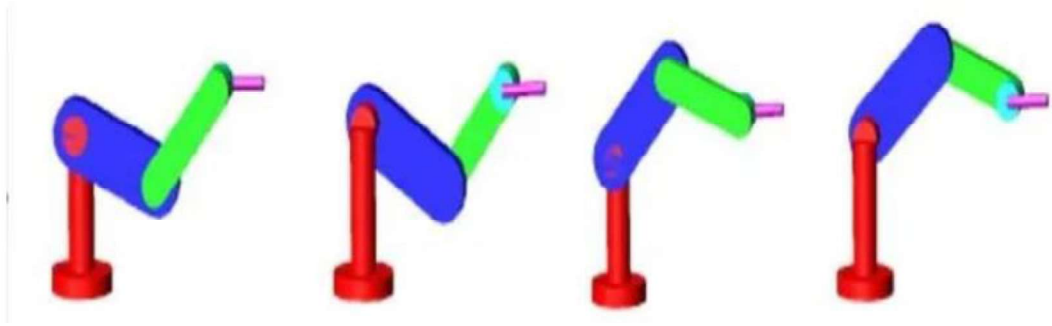
İleri kinematik, bilinen eklem açıları ve açısal hızlar göz önüne alındığında, uç efektörün konumunu ve hızını elde etme sürecini ifade eder (Craig, 2018). İleri kinematik konusu robotun ilgili uzvun pozisyonuna göre uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini göstermektedir. Robot uzuvları ve eksen koordinat takımlarına ait bir görsel Şekil 8’de paylaşılmıştır.



Şekil 8. Robot Uzuvları ve Eksen Koordinat Takımları (www.metaluzmani.com)

Ters Kinematik

Ters kinematik, robotun uç işlevcisinin ana çerçeveye göre konumu ve yönelimi verildiğinde manipülatörün bu konuma ve yönelime gelebilmesi için gerekli eklem değişkenlerinin bulunmasıdır. Robotun bir konuma birden fazla şekilde ulaşabilme durumu Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Robot Bir Konuma Birden Fazla Şekilde Ulaşabilir Durumu
(https://blog.tekyaz.com)

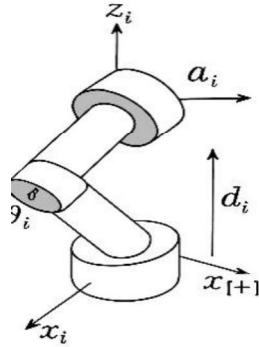
Ters kinematik, eklemlerin yapısına bağlıdır. Eğer robot prizmatik eklemlerden oluşuyorsa ters kinematik problemin çözümü kolaylaşırken, robottaki döner eklem sayısı arttıkça problemin çözümü de o derece zorlaşmaktadır.

Aynı uç işlevci düzenleşimi için birden fazla çözüm olabilir. Ters kinematik çözüm sayısı robotun serbestlik derecesinin yanında aynı zamanda eklem değişkenlerine de bağlıdır. Her bir eklemden uzuv uzunluğu ve eklem kaçıklığının olması çözüm sayısının artmasına neden olur.

Denavit – Hartenberg (D-H) Yöntemi

Denavit–Hartenberg yöntemi, robot kolların kinematik analizini sistematik hale getiren bir yöntemdir (Denavit & Hartenberg, 1955; Siciliano vd., 2019). Her ekleme bir koordinat sistemi atanır ve bu koordinatlar üzerinden dönüşüm matrisleri oluşturularak uç efektörün konumu ve yönelimi hesaplanır. Süreç şu adımlarla ilerler:

1. Koordinat sistemlerinin atanması: Her eklem için bir z eksen tanımlanır. Bu eksen, eklem hareket yönünü gösterir (döner eklemden dönme eksen, prizmatik eklemden kayma yönü).
2. Dört temel parametrenin belirlenmesi: Şekil 10'daki şemada görülmekte olan ve Denavit–Hartenberg (D&H) yönteminin dört temel parametresi olan bağ uzunluğu, bağ açısı, eklem uzaklığı ve eklem açısı belirlenir.



Bağ Uzunluğu (a_i): İki eksen arasındaki mesafe (x eksen boyuncaya)

Bağ Açısı (α_i): İki eksen arasındaki açı (x eksen etrafında)

Eklem Uzaklığı (d_i): Z eksen boyuncaya mesafe (prizmatik eklem için değişken)

Eklem Açısı (θ_i): Z eksen etrafındaki açı (döner eklem için değişken)

Şekil 10. D&H yönteminin dört temel parametre şeması

3. Homojen dönüşüm matrisi oluşturulması: Her eklem için bu parametrelerle 4x4'lük dönüşüm matrisi yazılır. Matris, bir eklemden diğerine geçişi tanımlar.

4. Matrislerin ardışık olarak çarpılması: Tüm eklemlerin matrisleri sırayla çarpılarak uç efektörün uzaydaki konumu ve yönelimi elde edilir.
5. Kinematik analizin yapılması: Düz ve ters kinematik olmak üzere iki şekilde yapılır.
 - Düz kinematik: Eklem değerlerinden uç efektörün pozisyonu hesaplanır.
 - Ters kinematik: İstenen pozisyona ulaşmak için gerekli eklem değerleri çözülür.

D&H yöntemi, robot kolların hareketini matematiksel olarak tanımlamak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Adım adım koordinat sistemleri atanır, parametreler belirlenir, dönüşüm matrisleri oluşturulur ve çarpılarak uç efektörün konumu bulunur. Bu yöntem sayesinde çok eksenli robotların karmaşık hareketleri düzenli ve anlaşılır biçimde modellenebilir.

MEKANİK TASARIM VE ANALİZLERİ

Yapılan tasarım hem savunma sanayisinde konveyör bantlar üzerinde hassas bir şekilde zamandan tasarruf etmek hem de insan gücünden daha az faydalanarak taşınacak olan ürünlerin zarar görmeden istenilen konuma aktarılmasını sağlayacak şekilde planlanmış hareket eden çok eksenli bir robot kolu olup tasarımı SolidWorks programında yapılmıştır. Özellikle bir konveyör banttan gelen ürünlerin diğer konveyör banta iletilmesini sağlayabilmesi için kendi eksenini etrafında 360 derece dönebilecek ve ürünü ya da ürünleri kripper yardımıyla kaldırıp diğer tarafa bırakabilecektir. Kaldırılacak olan ürünün kütlesi azami 2 kg'dır ve sistem ürünü 350 mm yüksekliğe kadar kaldırabilecektir. Projenin mekanik kısmına ait çizimlerden alt tabla, döner tabla ve uç kolun resimleri sırasıyla Şekil 11, 12 ve 13'te verilmiştir. Hafiflik ve mukavemet dengesi nedeniyle tercih edilen Al7075 T6 alaşımlarının işlenebilirlik karakteristikleri tasarım sürecinde dikkate alınmıştır (Baran & Neşeli, 2025a) Sistemdeki bağlantı elemanları veya kritik mekanik parçalar için kullanılan 25CrMo4 çeliğinin tornalama parametreleri, imalat hassasiyetini doğrudan etkilemektedir (Baran & Neşeli, 2025b).

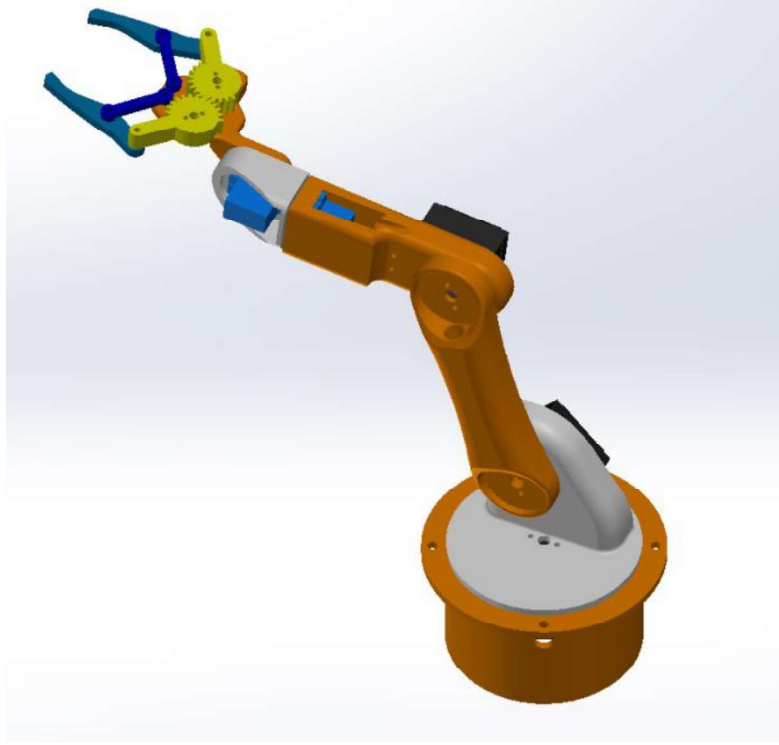
Çalışmada yapılan analizlerde, Denavit–Hartenberg (D–H) yöntemi kullanılarak ileri ve ters kinematik analizler gerçekleştirilmiş ve robot kolu

[illegible]

70

Mekanik Kısımın Montajı

Tasarlanan parçaların montajı ve sistemin kinematik hareketlerinin tamamı SolidWorks programında yapılarak sistemin istenilen çalışma doğrulukları test edilmiştir. Mekanik tasarımın montaj resmi ve tasarlanan sistemin render görüntüsü sırasıyla Şekil 14 ve 15'te görülmektedir.



Şekil 14. Mekanik Tasarımın Montaj Resmi



Şekil 15. Tasarlanan Sistemin Render Görüntüsü

Gerilme Analizleri

Tasarımı yapılan robot kolunun, ölçülendirilen, kullanılacak malzemesi seçilen, taşıyacağı yük ve bu yüklerin uzuvlara uygulayacağı kuvvetlerin yerleri ve büyüklükleri belli olan projenin sahip olduğu dayanımı test etmek için gerilme analizleri SolidWorks programında yapılmıştır.

Analiz için 3D yazıcılarda kullanılan ABS-PC plastik malzeme seçilmiş olup SolidWorks programında analiz için kullanılan mukavemet değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. ABS-PC Plastik Malzeme Özellikleri

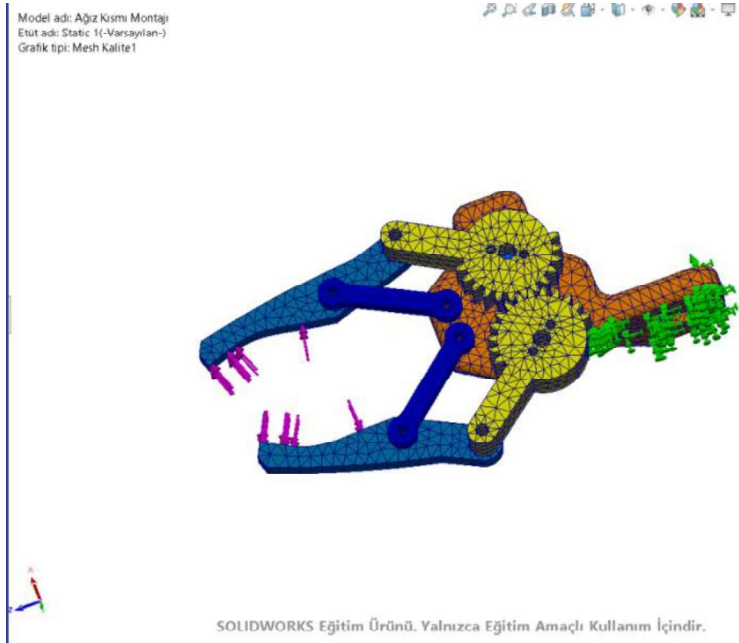
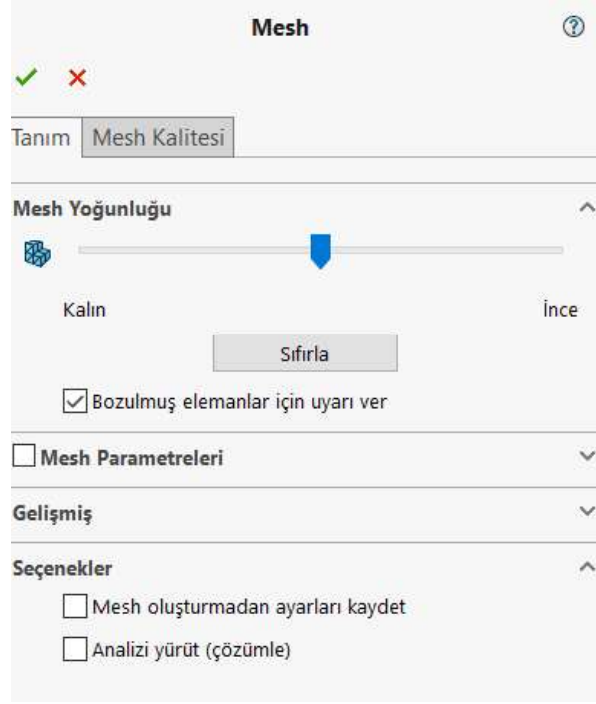
Özellik	Değer	Birimler
Elastikiyet Modülü	2410000000	N/m ²
Poisson Oranı	0.3897	Yok
Yırtılma Modülü	862200000	N/m ²
Kütle Yoğunluğu	1070	kg/m ³
Gerilme Mukavemeti	40000000	N/m ²
Sıkıştırma Mukavemeti	85000000	N/m ²
Akma mukavemeti	55000000	N/m ²
Termal Genişleme Katsayısı	0.0002	/K
Termal İletkenlik	0.2618	W/(m·K)
Özgül Isı	1900	J/(kg·K)
Malzeme Sönüm Oranı	0.03	Yok

Mesh Analizleri

SolidWorks programında mesh yoğunluğunu orta düzeyde seçmek, analiz süresini makul tutarken yeterli doğruluk sağlar ve çoğu mekanik parça için orta yoğunluk, gerilme dağılımı ve deformasyon hakkında güvenilir bir ilk fikir verir. Daha hassas sonuç gerektiğinde, kritik bölgelerde lokal mesh inceltme veya yüksek yoğunluk uygulanabilir. Yüksek yoğunluk yalnızca kritik bölgelerde veya nihai doğrulama için tercih edilir.

Yapılan analizlerde kullanılan mesh yoğunluğu orta şekilde olacak şekilde seçilmiştir ve Tablo 2’de verilmiştir. Kripper tutucunun mesh analizi Şekil 16’da görülmektedir.

Tablo 2. Kullanılan Mesh Yoğunluğu



Şekil 16. Kriper Tutucunun Mesh Analizi

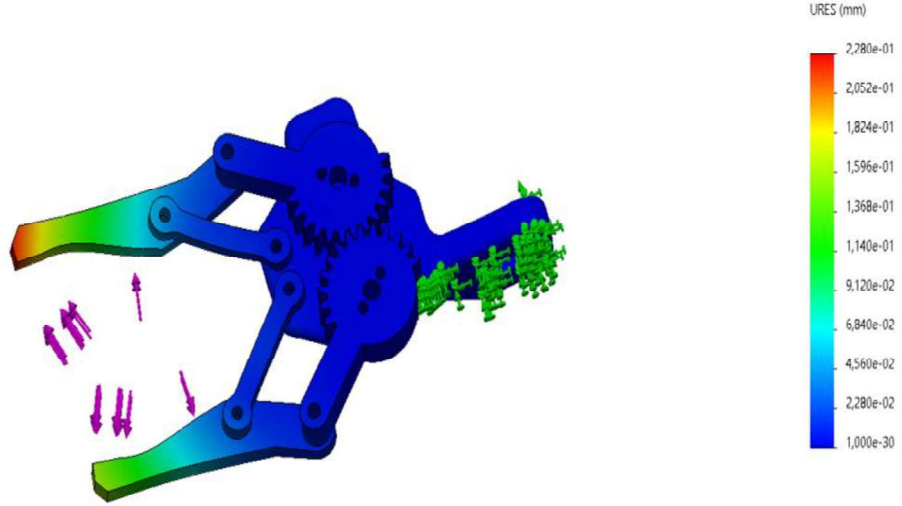
Kriper Yapısal ve Gerilme Analizleri

Kriper için yapılan statik yer değiştirme analizinin sonucu Şekil 17’de, stres analizi Şekil 18’de, gerinim analizi sonuçları ise Şekil 19’da verilmiştir. Ürünü kriper taşıyacağı için yükün kütlesi (M) 2 kg, emniyet

katsayısı (SF) ise 1,5 alınmıştır. Hesaplama denklem (1) kullanılarak yapılmıştır.

$$F = M \cdot G \cdot SF = 2 \cdot 9,81 \cdot 1,5 = 29,43 \text{ N} \quad (1)$$

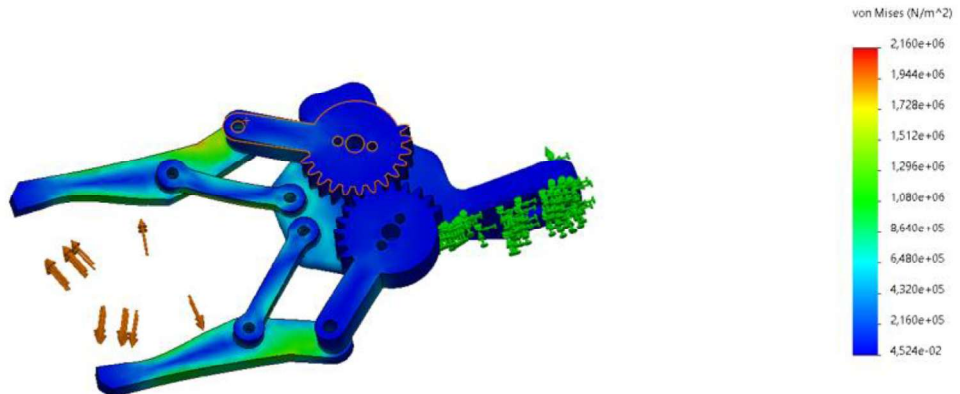
İsim: Ağız Kısmı Montajı
İçerik: Statik 1(-Varsayılan-)
Çözüm türü: Statik yer değiştirme Yer değiştirme 1
Çözüm ölçeği: 68,6871



SOLIDWORKS Eğitim Ürünü. Yalnızca Eğitim Amaçlı Kullanım İçindir.

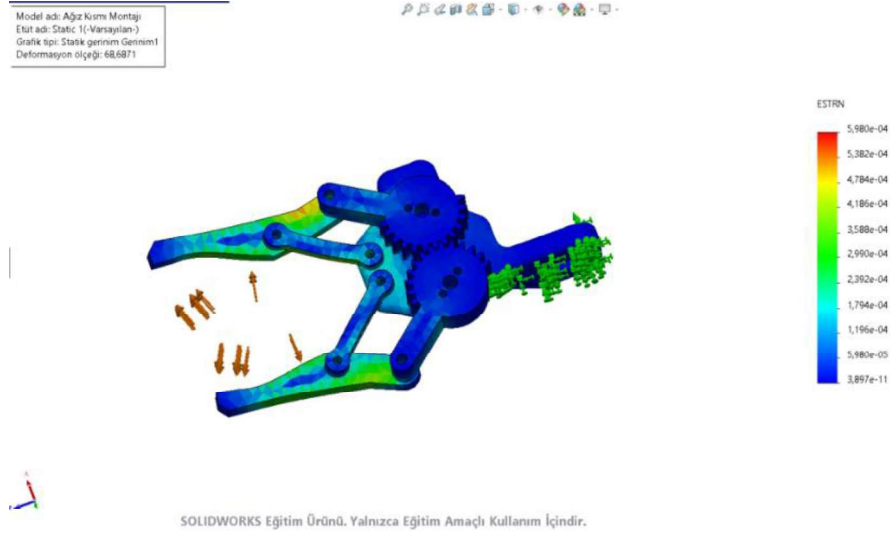
Şekil 17. Kripper İçin Yapılan Statik Yer Değiştirme Analizi

Kısmı Montajı
(-Varsayılan-)
Çözüm türü: Statik yer değiştirme Yer değiştirme 1
Çözüm ölçeği: 68,6871



SOLIDWORKS Eğitim Ürünü. Yalnızca Eğitim Amaçlı Kullanım İçindir.

Şekil 18. Kripper İçin Yapılan Stress Analizi

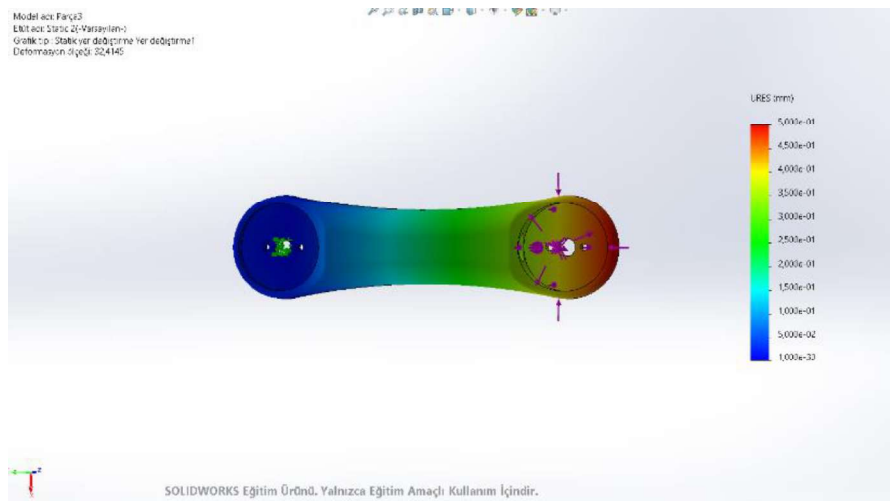


Şekil 19. Kripper İçin Yapılan Gerinim Analizi

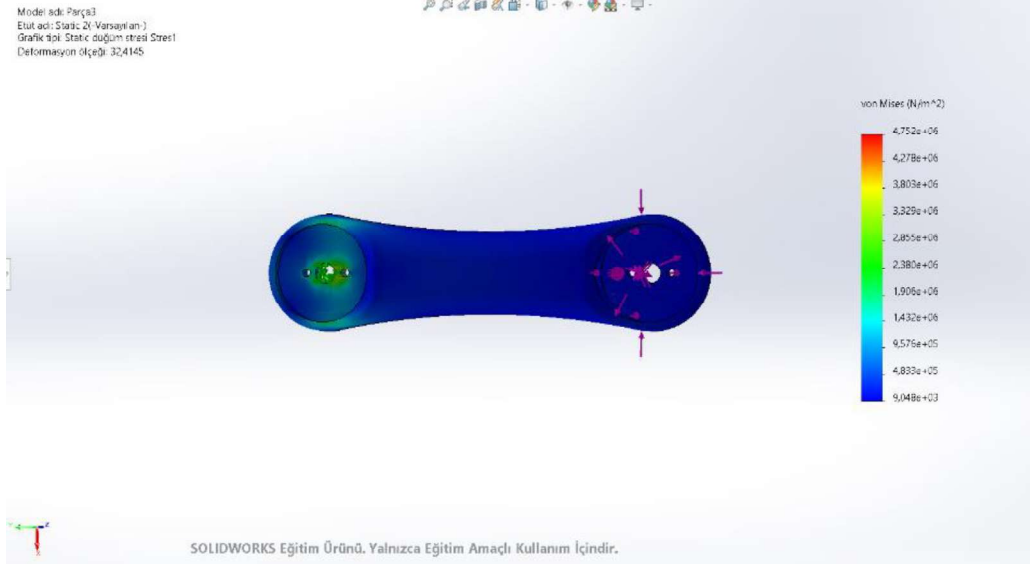
Yapılan analizler sonucunda tasarlanan kripperin ölçülendirmesinin uygun olduğu, seçilen malzemenin yeterli olduğu ve taşıyacağı yüklerin uzuvlara uyguladığı kuvvetlerin konum ve büyüklüklerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı belirlenmiştir. Taşınması istenen yük için yapılan analizler, kripperin bu yükü güvenle taşıyabildiğini ve tasarımın doğru olduğunu göstermiştir (Sun vd., 2021).

Ana Kol Analizleri

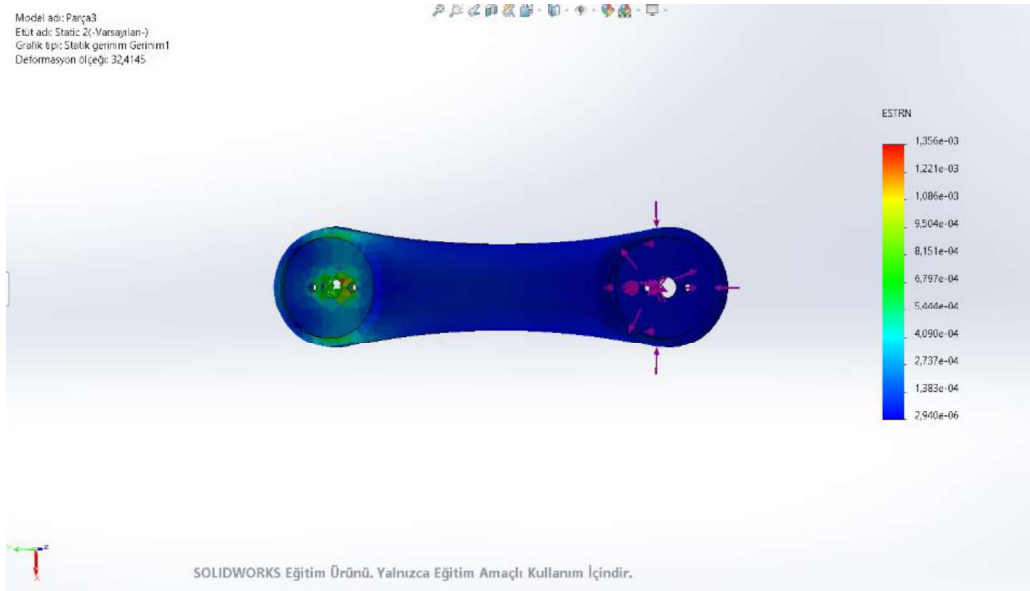
Uç kol, kripper, ara kolun ve sistemin taşıyacağı toplam yük için yapılan analiz sonucunda ana kol'un istenilen yüke dayandığı ve tasarımın doğru olduğu gözlemlenmiştir. Ana kol için yapılan statik yer değiştirme analizi Şekil 20'de, ana kol için stres analizi Şekil 21'de, ana kolun gerinim analizi ise Şekil 22'de görülmektedir.



Şekil 20. Ana Kol İçin Yapılan Statik Yer Değiştirme Analizi



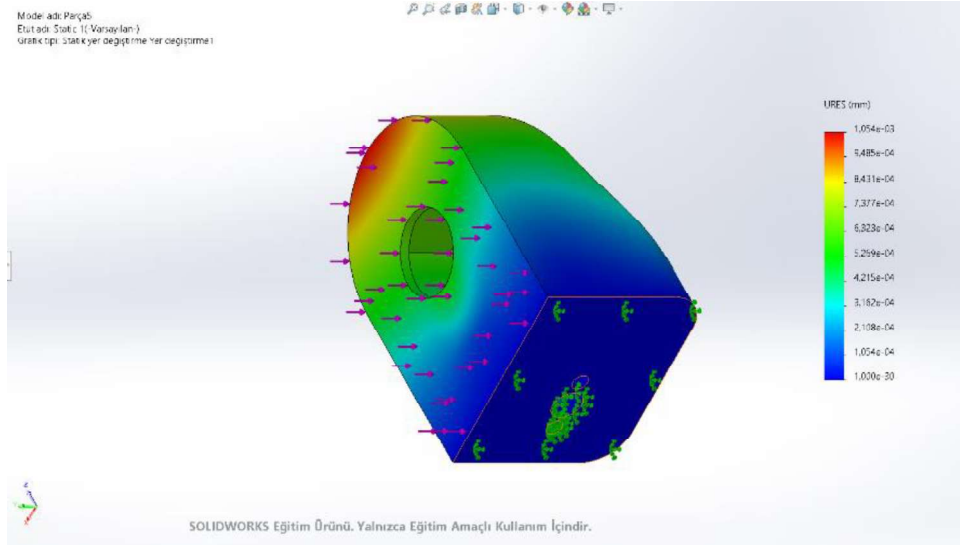
Şekil 21. Ana Kol İçin Yapılan Stres Analizi



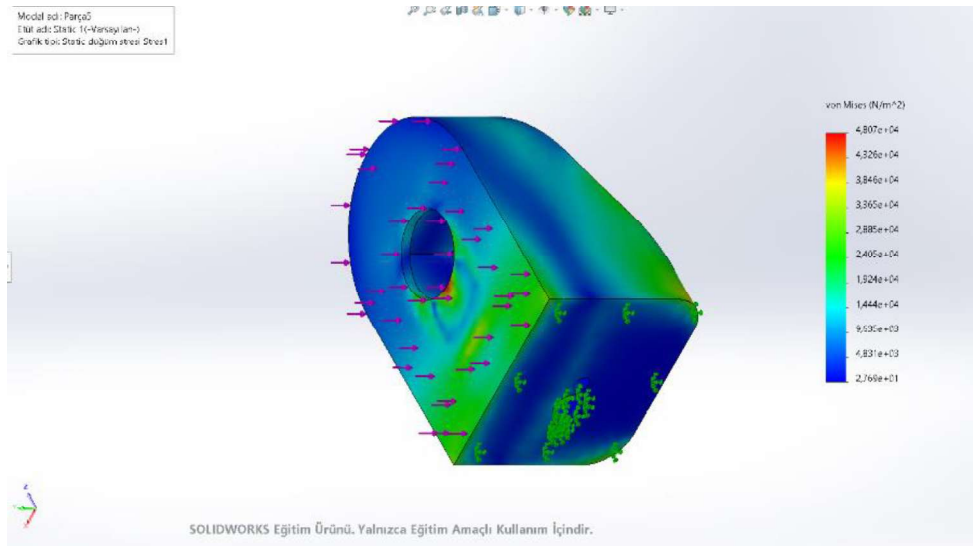
Şekil 22. Ana kol için yapılan gerinim analizi

Uç Kol Analizleri

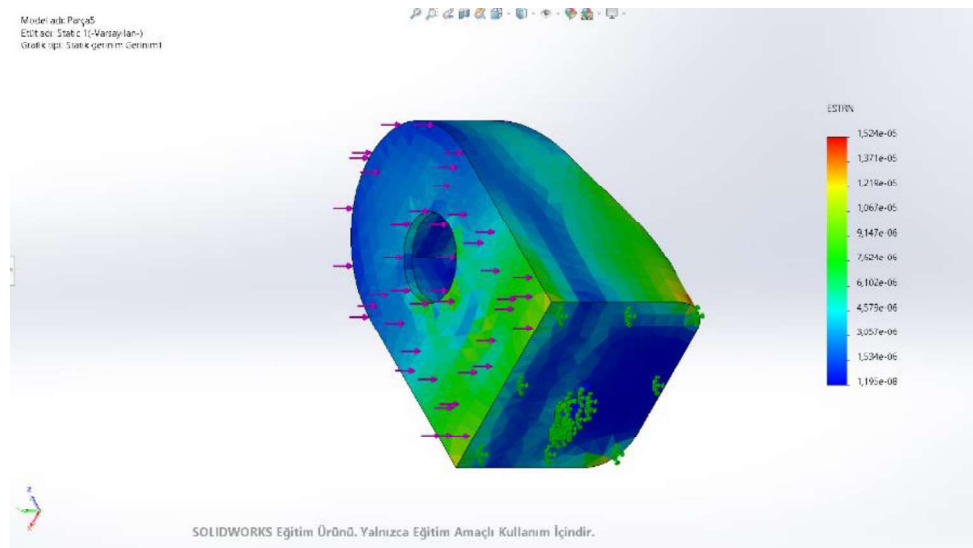
Kripper ve yaklaşık olarak hesaplanan taşınacak olan yükler için yapılan analiz sonucunda uç kolun istenen yükü güvenle taşıyabildiği ve tasarımın doğru olduğu gözlemlenmiştir. Uç kol için yapılan statik yer değiştirme analizi Şekil 23’de, uç kol için stres analizi Şekil 24’de, uç kolun gerinim analizi ise Şekil 25’te görülmektedir.



Şekil 23. Uç Kol İçin Yapılan Statik Yer Değiştirme Analizi



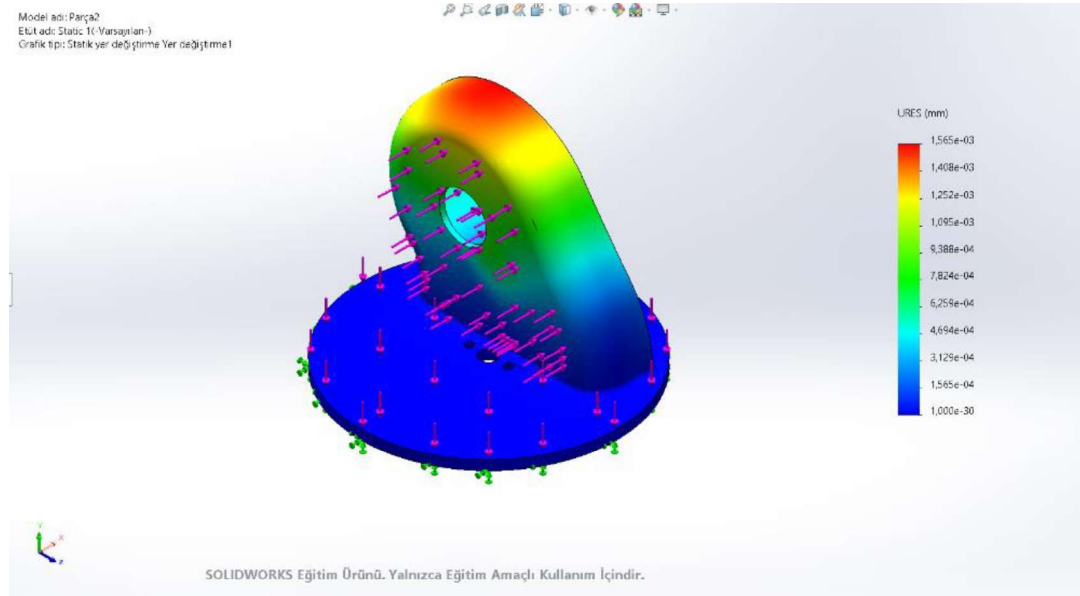
Şekil 24. Uç Kol İçin Yapılan Stres Analizi



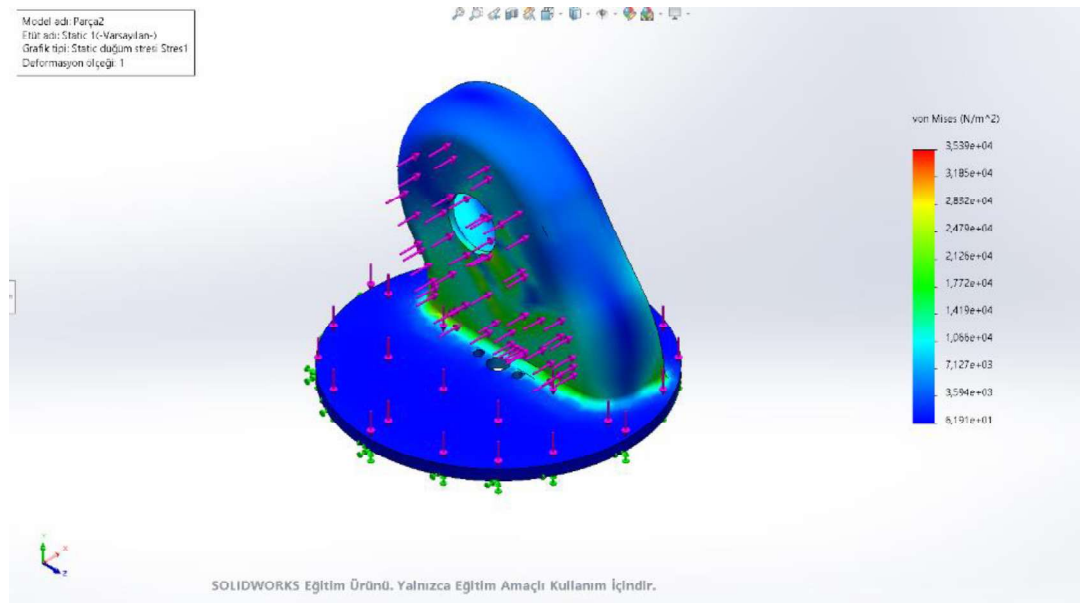
Şekil 25. Uç Kol İçin Yapılan Gerilim Analizi

Döner Tabla Analizleri

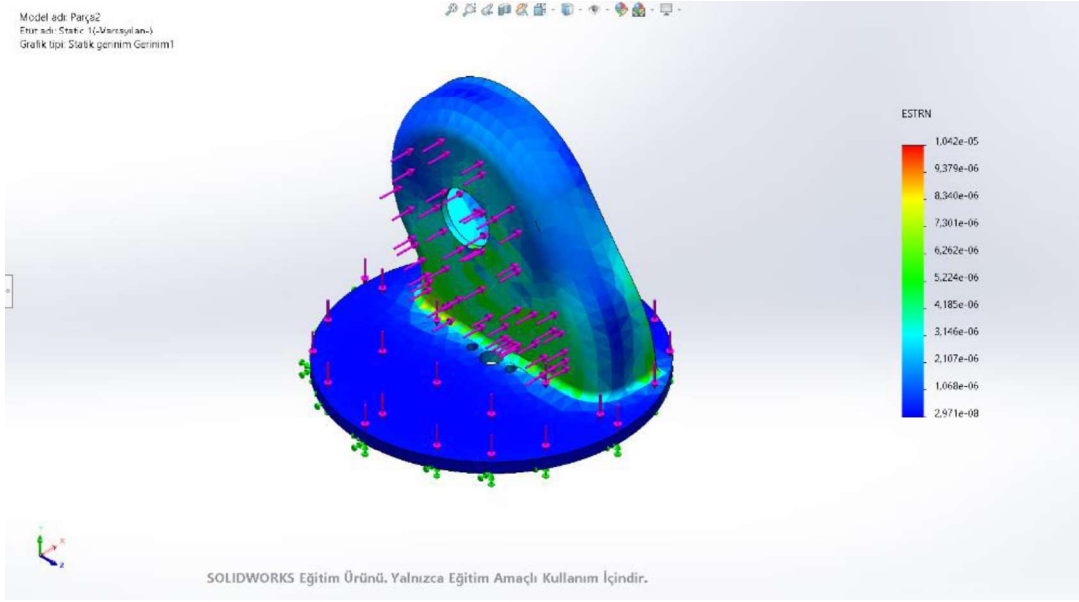
Ana kol, kripper ve hesaplanan yaklaşık taşınacak yüklere göre yapılan analiz sonucunda döner tablanın istenilen yüke dayandığı ve tasarımın doğru olduğu gözlemlenmiştir. döner tabla için yapılan statik yer değiştirme analizi Şekil 26’da, döner tabla için stres analizi Şekil 27’de, döner tabla gerinim analizi Şekil 28’de görülmektedir.



Şekil 26. Döner Tabla İçin Yapılan Statik Yer Değiştirme Analizi



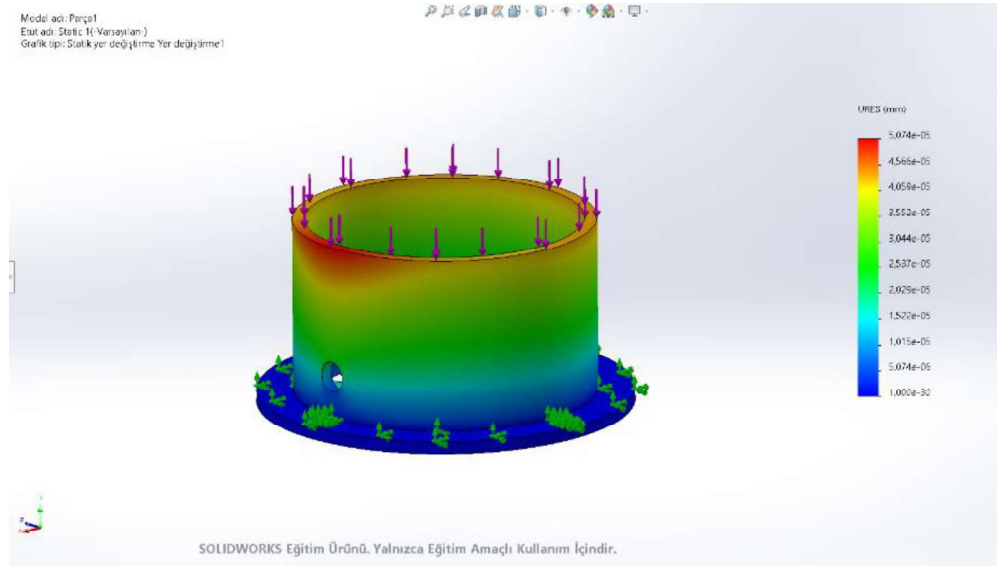
Şekil 27. Döner Tabla İçin Yapılan Stres Analizi



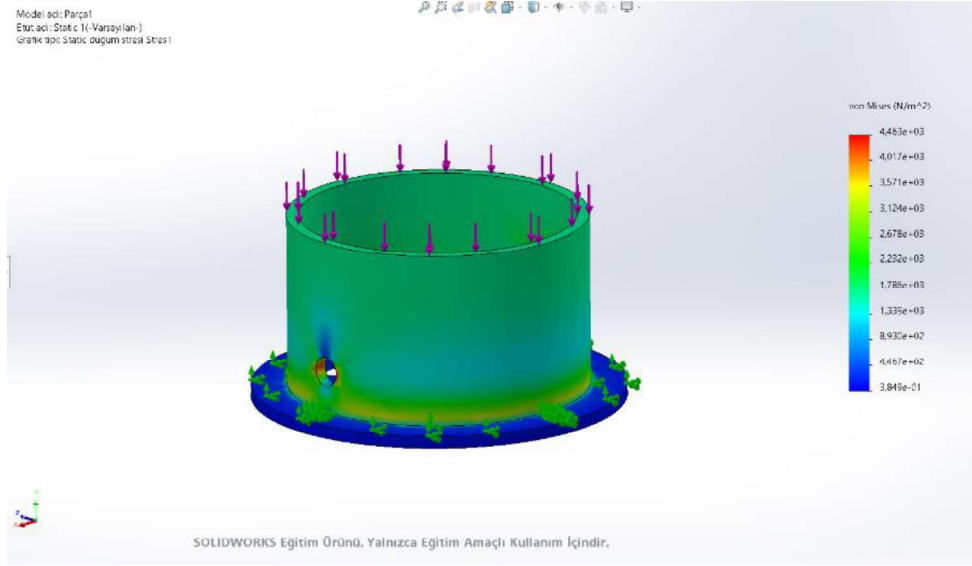
Şekil 28. Döner Tabla İçin Yapılan Gerinim Analizi

Alt Tabla Analizleri

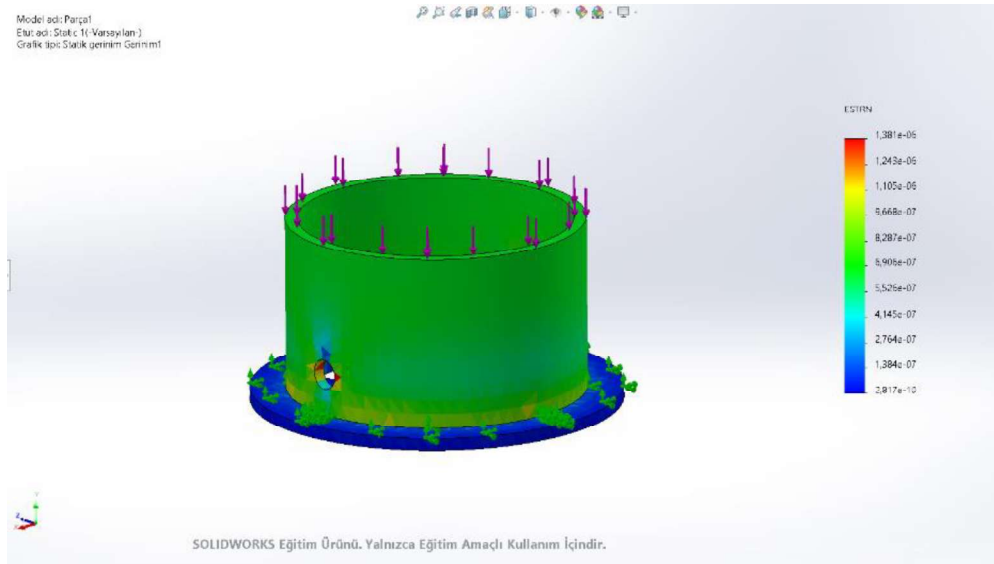
Robot'un kendi ve taşıyacağı yükler dikkate alınarak yapılan analiz sonucunda alt tablanın istenilen yüke dayandığı ve tasarımın doğru olduğu gözlemlenmiştir. Alt tabla için yapılan statik yer değiştirme analizi Şekil 29'da, alt tabla için stres analizi Şekil 30'da ve alt tabla gerinim analizi Şekil 31'de görülmektedir.



Şekil 29. Alt Tabla İçin Yapılan Yer Değiştirme Analizi



Şekil 30. Alt Tabla İçin Yapılan Stres Analizi



Şekil 31. Alt Tabla İçin Yapılan Gerinim Analizi

SONUÇ VE ÖNERİLER

Robot kollar, farklı alanlarda geniş ölçekte geliştirilebilir ve uygulanabilir bir yapı taşımaktadır. Bu robotik yapıların kullanımıyla, çeşitli iş süreçlerini gerçekleştirmek daha kolay hale gelmiş ve olası hata oranları en düşük seviyelere çekilmiştir. Bu sebepten ötürü hemen hemen tüm sektörlerde robot kolu kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Savunma sanayinde montajı uzun, zor olan ve insan gücünün çok istenildiği ve saha operasyonlarında oluşabilecek olumsuz durumlara karşıda yapılan çalışmalarda kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bazı eczanelerde kullanılan geliştirilmiş bir robot kolunun, doğru ve hatasız ilaç verebilmesi, robot kolların hareket kabiliyetinin artırılması, parmak

kısmına kamera yerleştirilerek hassasiyetlerinin yükseltilmesi gibi yeniliklerle cerrahi müdahaleler sırasında enfeksiyon riskinin önemli ölçüde azalması ve insan kaynaklı hataların en aza indirilmesi mümkün kılmakta ve bu sistemler, tıp alanından otomasyon teknolojilerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde etkili bir şekilde kullanılabilir hale gelebilmektedir. Otomotiv sektörünün üretim hatlarında ve montaj fabrikalarında daha hızlı, daha verimli ve daha güvenli süreçlere yol açarak tüm alanlarında aktif olarak çalışmaktadırlar. Bu sektördeki robotlar, kaynak, boyama, montaj, taşıma ve kontrol gibi çeşitli görevlerde kullanılarak üretim süreçlerini optimize etmekte, ürün kalitesini artırmakta ve maliyetleri düşürmektedir. Anlatıldığı üzere artık tüm sektörlerde robot kolu kullanımı hızla yaygınlaşmakta ve kullanılmaktadır (Siciliano vd., 2019; Villani vd., 2018).

Yapılan çalışma kapsamında dört eksenli, 2 kg taşıma kapasiteli tasarlanan robot kolu yalnızca bir tasarım olmasına karşın daha ileri düzeyde ve kapsamlı robotik sistemlerin geliştirilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada:

- Tasarlanan manipülatörün hareket kabiliyeti ve yük taşıma performansı hedeflenen düzeyde gerçekleştirilmiştir.
- İleri kinematik ve Denavit–Hartenberg parametreleri kullanılarak sistemin matematiksel uygunluğu sağlanmıştır.
- Yapılan yörünge analizleri sonucunda robot kolun hassas ve titreşimsiz çalıştığı gözlemlenmiştir.
- Bluetooth modül ve android uygulama ile kontrol sağlanarak sistemin kullanılabilirliği artırılabilir.

Prototip düzeyinde geliştirilen bu robot kolun, endüstriyel otomasyon ve benzeri robotik uygulamalarda geliştirilmeye açık bir altyapı sunduğu ve endüstriyel uygulamalar için geliştirilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, insan–makine etkileşiminin analiz edilmesi ve sistemlerin çevresel koşullara uyarlanabilirliğinin artırılması açısından mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Dündar & Ağacayak, 2023). Yapılacak olan ileriki çalışmalarda, sistemin kontrolünün üstüne karar verme kabiliyetleri de sağlanabilmesi için yapay zekâ ile eşleştirilerek karar verme, pozisyon alma, hız azaltıp yavaşlama, ürüne göre tutma yeri, uzaktan kontrol (cep telefonu yazılımı), birden fazla robot kolu ile on-line

alışabilme özellikleri gibi birçok yapıyı üzerinde bulundurabilen sistemler tasarlanabilir. Ayrıca, sürekli gelişim göstermeye açık olan robotik kol sektörü, gelecekteki önemini koruyacak ve daha geniş bir etki alanında yaygınlaşacaktır.

KAYNAKÇA

- Aksoy, M. H., Babayiğit, O., Kocaaslan, O., & Özgören, M. (2013). Effect of blade wrap angle to centrifugal pump impeller efficiency. *Experimental Fluid Mechanics*, 10.
- Aydoğan, B. (2016). *Arduino ile robot kol kontrolü* (Bitirme tezi). Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Karabük.
- Babayiğit, O., Kocaaslan, O., Aksoy, M. H., & Özgören, M. (2013). Experimental and CFD performance analysis of a centrifugal pump. *Experimental Fluid Mechanics* 2013, 10.
- Babayiğit, O., Özgören, M., Aksoy, M. H., & Kocaaslan, O. (2018). The effect of balance holes to centrifugal pump performance. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.4992157>
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Al7075 T6 alüminyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenebilirliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmesi [Conference presentation]. *4th International Conference on Contemporary Academic Research*.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025). Effect of machinability parameters on cutting force in the turning of 25CrMo4 steel [Conference presentation]. *3rd International Conference on Modern and Advanced Research (ICMAR 2025)*.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2019). *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
- Ceccarelli, M. (2022). *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90848-5>
- Chen, Y., Li, Z., & Sun, J. (2019). Servo motor control strategies for robotic manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 24(3), 1325–1336.
- Craig, J. J. (2018). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (4th ed.). Pearson Education.
- Çakar, O. (2020). *Endüstriyel tabanlı yeni bir robot kol tasarımı* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Denavit, J., & Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22, 215–221.
- Ding, H., Yang, Y., & Liu, S. (2019). Kinematic modeling and motion control of robotic manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 137, 1–15.
- Dündar, K., & Ağacayak, A. C. (2023). Yapay zeka ve makine öğrenmesi ile insan ilişkileri analizi. In S. Neşeli & H. Terzioğlu (Eds.), *Mühendislikte yenilikçi yaklaşımlar-2* (Bölüm 7). Eğitim Yayınevi.
- Günaştı, D. N., Özbek, M., & Küçük, B. (2021). *Raflara ürün yerleştiren robot tasarımı ve imalatı* (Bitirme projesi). Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği.
- Güntürkün R., Hız O., and Şahin H., “Design and Application of Plc Controlled Robotic Arm Choosing Objects According to Their Color,” *Electronic Letters on Science & Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 52–62, Dec. 2020.
- Hamida El Naser, Y. (2018). *Endüstriyel amaçlı robot kol tasarımı ve üretimi* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kagıtcı, Y. C., & Neşeli, S. (2025). Determination of temperature effects on cortical bone milling using Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1–17.
- Kagıtcı, Y. C., & Tarakcioglu, N. (2016). The effect of weld line on tensile strength in a polymer composite part. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1125–1135. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8007-0>
- Kağıtcı, Y. Ç., & Neşeli, S. (2024). The effect of cutting forces on bone related operational processes: A literature review. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(3), 801–821.

- Kağıtçı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2015, Ağustos 25-28). Weld line problem related to flow on a reinforced of glass fibre polymer composite part [Bildiri sunumu]. The International Conference on Science, Ecology and Technology I (ICONSETE'2015), Viyana, Avusturya.
- Kağıtçı, Y. Ç., & Tarakçıoğlu, N. (2016, Ekim 14-16). The investigation of weld line on polyamide based fiber reinforced composites [Bildiri sunumu]. 2nd International Conference on Science, Ecology and Technology (ICONSETE'2016), Barselona, İspanya.
- Kim, S., Park, J., & Lee, D. (2022). Integration of robotic manipulators with conveyor belt systems for automated manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 72, 460–472.
- Kocaaslan, O. (2013). An experimental investigation of surface roughness influence on centrifugal pump characteristics. *Experimental Fluid Mechanics*, 10.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Aksoy, M. H., & Babayiğit, O. (2015). Numerical investigation of splitter blade effects on centrifugal pump performances [Konferans sunumu]. International Conference on Science, Ecology and Technology 1.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Aksoy, M. H., & Babayiğit, O. (2016). Numerical study for a designed and modified impeller of a multistage centrifugal pump [Konferans sunumu]. 8th Ege Energy Symposium and Exhibition.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Babayiğit, O., & Aksoy, M. H. (2016). Numerical investigation of the surface roughness effect on the hydraulic efficiency head and shaft power for a single stage centrifugal pump [Konferans sunumu]. 8th Ege Energy Symposium and Exhibition.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2020). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 318–333.
- Matthew, T. M. (2001). *Mechanics of robotic manipulation*. MIT Press.
- Nguyen, T. T., Pham, D. T., & Ji, C. (2020). Low-cost robotic arm design and control for educational and industrial applications. *Applied Sciences*, 10(15).
- Park, J., Kim, H., & Lee, S. (2024). Robotic manipulation systems for Industry 4.0-oriented smart factories. *Advanced Engineering Informatics*, 58, 101955.
- Rossi, A., Dalle Mura, M., & Tosatti, L. M. (2023). Modular robotic arms for flexible manufacturing systems. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), 950–957.
- Sahin, D. C., Cobuloglu, M. Z., & Ağacayak, A. C. (2022). Fırçasız doğru akım (BLDC) sürücü tasarımı. In G. Yalçın & A. C. Ağacayak (Eds.), *Mühendislikte yeni araştırmalar* (Bölüm 2). Tablet Kitapevi.
- Sayın Kul, B., & Yamaner, A. S. (2025). A Comparative Evaluation Of Dry-Mql Turning Applications For Aıısı 5115 Steel. *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 6(1), 23–32.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2019). *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020). *Robot modeling and control*. Wiley.
- Sun, Q., Zhang, J., & Wang, L. (2021). Additive manufacturing of robotic arm components: Design and performance evaluation. *Additive Manufacturing*, 47, 102321.
- Terzioğlu, H., & Ağacayak, A. C. (2024). Electrical and mechanical load design for induction motors. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies (ICSIS 2024)* (pp. 597–603).
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial environments. *Mechatronics*, 55, 248–266.
- Wang, L., Wang, X. V., & Váncza, J. (2021). Digital twin-enabled robotic manufacturing systems. *CIRP Annals*, 70(1), 389–392.
- Yalçın, G., Neşeli, S., & Ağacayak, A. C. (2020). Elektro-pnömatik sistemlere giriş. In H. Terzioğlu & G. Yalçın (Eds.), *Elektrikli araçlara genel bakış-2* (Bölüm 4). İKSAD Yayınevi.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2024). Aıısı 1040 Çeliğinin Kuru Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti Ve Kesme Sıcaklığı İncelemeleri. Presented At The 4th International Conference On Scientific And Academic Research (Icsar 2024), Konya.

- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Machinability Of 6082 Aluminum Alloy With Respect To Cutting Force And Surface Roughness. Presented At The 2nd International Conference On Recent And Innovative Results In Engineering And Technology Icriret 2025, Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Tool Radius And Machining Parameters On Cutting Forces And Surface Roughness For Aa 6082 Aluminum Alloy. *European Mechanical Science*, 9(2), 125–138.
- Zhang, Y., Wang, L., & Chen, X. (2020). Design and control of multi-axis robotic arms for industrial automation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 64, 101924.
- Zhou, X., Li, H., & Wang, Y. (2021). Structural optimization and finite element analysis of robotic arm components. *Engineering Structures*, 234, 111730.
- <https://www.fanuc.eu/tr/tr/robotlar/robot-%C3%BCr%C3%BCn-serisi-sayfas%C4%B1>
- <http://rlcotomasyon.com/kartezyen-robotlar/>
- <https://www.muhendisbeyinler.net/robotik-nedir/>
- <https://bahusus.com/yapay-zekaya-sahip-robotlar/>
- <http://www.robotpark.com.tr/blog/tum-robot-tipleri/sabit-robotlar/kure-robotlar/>
- <https://epson.eu/>
- <http://yapbenzet.kocaeli.edu.tr/seri-paralel-robotlar/>
- <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/661990>
- https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/155240/mod_resource/content/0/2.%20Robot%20T%C3%BCrleri%20ve%20E%C4%9Fitilme%20Ama%C3%A7%C4%B1%20Robotlar.pdf
- <https://blog.universal-robots.com/tr/robot-nedir>
- <https://maker.robotistan.com/rc-servo-motor-nedir/>
- <https://blog.tekyaz.com/robot-2-robot-mekanigi/>
- <https://www.metaluzmani.com/kaynak-robotunun-kisimleri/>

BÖLÜM 4

İMALATTA KESME MEKANİĞİ: FREZELEME KUVVET TEORİSİ VE ÖLÇÜM ESASLARI

Yusuf Çağlar Kağıtıcı*, Süleyman Neşeli**

GİRİŞ

Endüstriyel gelişimin temel unsurlarından biri olan üretim teknolojisi, malzemelerin döküm, plastik şekil verme, talaşlı imalat, toz metalurjisi ve birleştirme gibi farklı üretim süreçleri kullanılarak tasarım gereksinimlerine uygun geometride işlenmesini, işlevsel özelliklere sahip bir hale getirilmesini kapsayan alanı oluşturmaktadır (Groover, 2016). Bu süreçler aracılığıyla, hammaddeler belirlenen geometrik doğruluk, boyutsal toleranslar, yüzey bütünlüğü ve mekanik performans kriterlerini sağlayacak şekilde nihai ürüne dönüştürülmektedir. Üretim süreçlerinin doğru seçimi ve etkin biçimde kontrolü, ürün kalitesinin artırılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve sürdürülebilir imalat hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Kalpakjian ve ark.

* Öğr. Gör. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler M.Y.O., Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Konya, yckagitci@ktun.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6544-5284>

** Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, sneseli@selcuk.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1553-581X>

2014). İmalat süreçlerinde kesme kuvvetlerinin hem teorik modeller hem de deneysel yöntemlerle belirlenmesi, talaşlı imalatın optimizasyonu ve sürdürülebilir üretim hedefleri için temel bir gerekliliktir. Bu bağlamda, AISI 1040 çeliği gibi malzemelerin kuru tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, teorik modellerin doğrulanması açısından kritik veri sağlamaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2024). Kesme kuvveti analizlerinde deneysel ölçümler, teorik yaklaşımların karmaşık imalat koşullarındaki sınırlamalarını tamamlayan vazgeçilmez bir unsurdur. Örneğin, AISI 5115 çeliği üzerinde gerçekleştirilen kuru ve MQL uygulamalarının karşılaştırmalı değerlendirmesi, bu deneysel verilerin imalat teknolojisindeki dönüşüme nasıl katkı sağladığını göstermektedir (Sayın Kul & Yamaner, 2025).

Bu bağlamda, işleme ve kesme süreçleri hem geleneksel hem de ileri üretim yöntemleri arasında merkezi bir konumda bulunmaktadır. Kesme süreçleri sırasında meydana gelen fiziksel olayların doğru biçimde analiz edilerek anlaşılması, üretim süreçlerinin verimliliği, elde edilen ürünlerin kalite düzeyleri ve imalat sistemlerinin güvenilirliği üzerinde etkinliğe sahip belirleyici bir rol oynamaktadır.

Kesme işlemi, iş parçası malzemesinin bir kesici takım aracılığıyla gerinim, gerinim ve sıcaklık koşulları altında plastik deformasyona zorlanması ve bu deformasyonun sonucunda malzemenin talaş formunda uzaklaştırılması esasına dayanan bir imalat sürecidir (Stephenson ve ark. 2016). Bu süreç sırasında oluşan kesme kuvvetleri, talaş kaldırma mekanizmasının gerçekleşmesini sağlayan temel mekanik etkileşim olmanın ötesinde; kesici takım, iş parçası ve tezgâh sisteminden oluşan imalat bütünü üzerinde çok boyutlu etkiler oluşturmaktadır. Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü, yönü ve zamana bağlı değişim karakteristikleri; takım, talaş, iş parçası arayüzündeki temas koşulları, sürtünme mekanizmaları ve ısı etkileriyle yakından ilişkilidir. Bu kuvvetler, takım aşınma ve kırılma mekanizmalarının gelişimi, işlenmiş yüzeyin pürüzlülük ve yüzey bütünlüğü özellikleri, boyutsal ve geometrik doğruluk, sistemin dinamik kararlılığı ve titreşim davranışı ile özgül enerji tüketimi gibi pek çok kritik üretim parametresini belirleyici biçimde etkilemektedir. Bu nedenle, kesme kuvvetlerinin hem teorik modeller aracılığıyla doğru şekilde tanımlanması hem de deneysel ölçüm ve sayısal analiz yöntemleriyle güvenilir biçimde belirlenmesi, talaşlı imalat süreçlerinin

optimize edilmesi ve sürdürülebilir üretim hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Kesme kuvvetleri, talaş kaldırma mekaniğinin temel bileşenlerinden biri olarak literatürde hem teorik anlamda hem de deneysel açıdan incelenmektedir (Merchant, 1945). İlk aşama yaklaşımlarla kesme süreci, idealize edilmiş geometrik ve mekanik yaklaşımlar altında incelenmiştir. Zaman içerisinde malzeme bilimi, ölçüm teknolojileri ve sayısal analiz yöntemlerindeki gelişmeler, kesme kuvveti çalışmalarının kapsamını önemli ölçüde genişletmiştir. Buna rağmen, mevcut teorik modellerin büyük bölümü, gerçek imalat koşullarında ortaya çıkan karmaşık etkileri sınırlı ölçüde temsil edebilmektedir.

Bu bağlamda deneysel yapıya bağlı ölçümler, kesme kuvveti analizlerinin vazgeçilmez bir tamamlayıcısı olarak ortaya çıkmaktadır (Kagıtcı ve Neşeli 2024). Teknolojik gelişimler doğrultusunda gelişmiş sensörler, dinamometreler ve veri toplama sistemleri sayesinde kesme kuvvetlerinin hem statik hem de dinamik bileşenleri yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir. Deneysel veriler, teorik modellerin doğrulanması, sınırlarının belirlenmesi ve gerektiğinde yeniden yapılandırılması için temel bir dayanak oluşturmaktadır. Dolayısıyla kesme kuvveti konusu, teori ve deneyin birlikte ele alınmasını zorunlu kılan disiplinler arası bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Kagıtcı ve Neşeli 2025).

Günümüzde imalat teknolojisindeki gelişim, veri temelli üretim yaklaşımları ve otomasyonun etkisiyle önemli bir dönüşüm süreci içerisinde. Tezgâhlar, sensör tabanlı izleme sistemleri ve adaptif kontrol yaklaşımları, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, kesme kuvveti bilgisinin yalnızca tasarım ve planlama aşamalarında değil, aynı zamanda üretim esnasında da etkin biçimde kullanılmasını gerektirmektedir. Kesme kuvvetine dayalı izleme ve kontrol yöntemleri, hataların erken tespiti ve proses optimizasyonu açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Burada amaç, imalat kesme mekaniği bağlamında kesme kuvveti teorisi ve ölçüm esaslarını bütüncül bir çerçeve içerisinde sunmaktır. Bölümde, talaş oluşum mekanizması ve kesme mekaniğinin temel ilkeleri ele alınmakta; kesme kuvvetlerinin teorik ve deneysel olarak nasıl ölçüldüğü incelenmektedir. Böylece, kesme kuvvetlerinin hem kavramsal temellerini hem de uygulamaya dönük yönlerini kapsayan dengeli bir bakış açısı kazandırılması hedeflenmektedir.

Kesme Mekanığı ve Talaş Oluşumu

Kesme mekanığı, talaşlı imalat süreçlerinde işlenen malzemenin nasıl ayrıldığını, bu ayrılma esnasında meydana gelen fiziksel olayları ve bu olayların kuvvet oluşumuna olan etkilerini inceleyen temel bir bilimsel bir inceleme alanıdır. Kesme işlemi, yüzeysel olarak yalnızca bir malzeme uzaklaştırma işlemi gibi değerlendirilebilse de gerçekte yüksek gerilme dereceleri, geniş ölçekli plastik deformasyonlar ve yoğun termal etkilerin eşzamanlı olarak ortaya çıktığı son derece karmaşık bir olaylar bütünüdür (Stephenson ve ark. 2016). Malzemelerin işlenebilirlik karakteristiği, talaş kaldırma sırasında oluşan mekanik ve termal etkilerle doğrudan ilişkilidir. Özellikle 6082 alüminyum alaşımının kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi, hafif alaşımların endüstriyel kullanımındaki işlenebilirlik sınırlarını belirlemektedir (Yamaner & Sayın Kul, 2025). Talaşlı imalatla yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğu etkileyen faktörler arasında kesici takım geometrisi ve işleme parametreleri öncelikli yer tutar. AA 6082 alaşımı üzerine yapılan çalışmalar, takım radyüsünün ve işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ile yüzey bütünlüğü üzerindeki belirleyici rolünü kanıtlamaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2025).

Kesici takım, iş parçası yüzeyine belirli bir ilerleme ve kesme hızıyla nüfuz ettiğinde, temas alanında oldukça yüksek basınçlar meydana gelir. Bu basınçlar, iş parçasının malzeme özellikleri üzerindeki elastik sınırı aşarak plastik bir deformasyona yol açar. Plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölge, literatürde genellikle birincil kesme bölgesi ya da kayma bölgesi olarak tanımlanır. Bu alanda malzeme, belirli bir kayma düzlemi boyunca hareket ederek talaş şeklinde ayrışır.

Kayma düzleminin konum ve eğimi, kesme mekanığının temel parametrelerinden biri olarak büyük önem taşımaktadır. Kayma açısı olarak tanımlanan bu parametre, talaş oluşumunun karakteristik özelliklerini, kesme kuvvetlerinin büyüklüğünü ve enerji tüketimini doğrudan etkileme kapasitesine sahiptir. Kayma açısının artışı, çoğunlukla daha düşük kesme kuvvetleri ile daha kararlı bir talaş oluşumu süreci ile ilişkilendirilse de bu etkileşim takım geometrisi, iş parçası malzemesinin yapısal özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

Talaş oluşumu süreci, yalnızca kayma düzleminin işlevselliği ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda talaşın kesici takım yüzeyi boyunca gösterdiği hareketin de önemli bir rol oynadığı karmaşık bir mekanizmayı içermektedir. Talaş ve kesici takım arasındaki ara yüzeyde gerçekleşen sürtünme, ikincil deformasyon bölgesinin meydana gelmesine sebebiyet verir. Bu bölgede, talaşın kesici takım yüzeyiyle teması sonucunda ek bir plastik deformasyon süreci yaşanır ve ciddi miktarda ısı enerjisi açığa çıkar. Elde edilen bu ısının büyük bir kısmı talaş tarafından dışarı taşınırken, bir kısmı ise kesici takım ve iş parçasına iletilerek aşınma süreçlerini hızlandırabilir ve yüzey kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

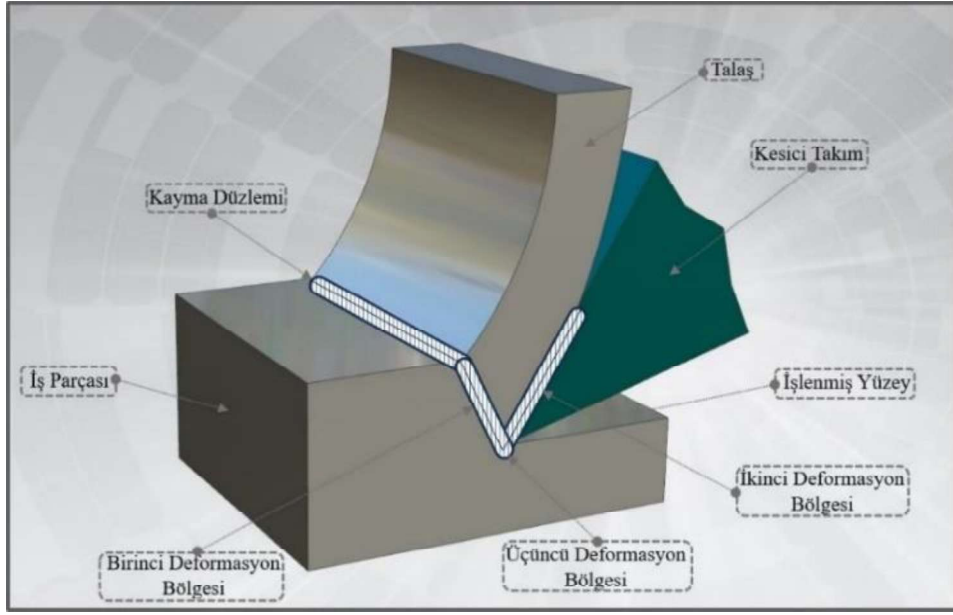
Talaş oluşum mekanizması, büyük ölçüde iş parçası malzemesinin mekanik özellikleri ve davranışlarına bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Sünek yapıya sahip malzemeler genellikle sürekli ve düzgün bir talaş yapısı oluştururken, gevrek malzemelerde talaş daha kırılgan ve süreksiz bir formda meydana gelir. Süreksiz yapıdaki talaş oluşumu, kesme kuvvetlerinde ani dalgalanmalara yol açarak titreşimlere sebep olabilir. Bu tür düzensizlikler, özellikle yüzey kalitesi ve takım dayanıklılığı açısından olumsuz etkiler doğurabilir.

Kesme mekaniğinin derinlemesine anlaşılması, kesme kuvveti analizinin temelini oluşturan bir ön koşul niteliğindedir. Talaş oluşumunun durağan olduğu çalışma koşullarında kesme kuvvetleri, daha istikrarlı ve tahmin edilebilir bir yapı sergiler. Dolayısıyla, kesme mekaniği yalnızca bir teorik çalışma alanı olmaktan öteye geçerek, uygulamalı üretim süreçlerinde proses parametrelerinin seçimi ve optimizasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir.

Talaşlı imalat, kesici takım ile buna bağlı güç kullanarak, iş parçasının oluşumunda gerekli şekil, boyut ve yüzey kalitesi göz önünde bulundurularak, parça yüzeyinden tabaka şeklinde malzeme uzaklaştırma işlemine verilen addır (Sagapuram ve ark. 2020). Bu işlemde iş parçası yüzeyinden uzaklaştırılan tabaka talaş olarak ifade edilmektedir. Burada talaşın iş parçasından ayrılması bir mekanik kopmadır. Bu kopma kesme şeklinde gerçekleşmektedir. Bu işlem, elastik ve plastik şekil değiştirmeye dayanan, sürtünme ve buna bağlı ısı oluşumu, talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parça yüzeyinde sertleşme, takım ucunun aşınması gibi durumların meydana gelmesinden oluşan karmaşık bir fiziksel olaydır. Bir parçanın üzerinden belirlenen malzeme tabakası kaldırılması için, kesici

takımın o malzemeye nüfus etmesi gerekmektedir. Buda ancak kesici takıma uygulanan kuvvetlerin yeterli düzeyde ve takım malzemesinin parça malzemesinden daha sert olması halinde gerçekleşir. Bu bağlamda talaşlı imalatta en fazla kesme operasyonları tornalama, frezeleme ve delme işlemlerinde gerçekleştirilmektedir (Akkurt, 1998).

Malzemelerin işlenebilirliği, talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetleri, ısı üretimi, takım aşınması ve talaş oluşumu tarafından belirlenir. Bu faktörler aynı zamanda işlenen yüzeyin kalitesini ve iş parçasının boyutlarını da doğrudan etkiler. Gerçekte, talaşların oluştuğu yer dar bir bölgedir. Plastik deformasyon, talaş oluşumu sürecinde kilit bir faktördür (Stephenson ve ark. 2016). İlk deformasyon bölgesi, iş parçasının kesici takımın önünde nispeten küçük bir alanda ve kayma düzleminde gerçekleşen lokalize deformasyondur. Kesici takım ile iş parçasının bağlı hareketi nedeniyle iş parçasında oluşan gerilim sonucunda, ilk deformasyon bölgesinde plastik olarak deforme olur ve talaş oluşumu gerçekleşir. Bu bölgedeki malzeme yoğun bir kesme işlemi ile deforme olmuştur. Birinci deformasyon düzleminde oluşan talaş, kesici takımın talaş yüzeyinden geçerken kayma ve yapışma sonucu ikinci deformasyon gerçekleşir ve böylece talaş, kesici takımın talaş yüzeyi üzerinden hareket ederek atılır. Şekil 1’de kesme bölgesinde oluşan deformasyon ve ısı oluşumunu göstermektedir (Akgün, 2021). Üçüncü deformasyon bölgesi, kesici takımın boşluk yüzeyi yeni işlenmiş yüzeye sürtündüğünde bu bölgede deformasyon meydana gelebilir. Talaşın oluşu, kesilen malzeme ve kesme koşullarına bağlıdır (Groover, 2016). Burada sıcaklık artışının ısı üretiminden kaynaklı olması, takım aşınmasını, takım ömrünü ve malzemenin yüzey bütünlüğünü etkiler. Üretilen ısı ve sıcaklık, termal iletkenlik, proses parametrelerinin, iş parçası ve kesici takım malzemelerinin termo fiziksel özelliklerinin kullanımı ile bağlantılıdır (Grzesik ve Nieslony, 2004; Özdemir, 2020).



Şekil 1. Kesme Bölgesinde Oluşan Deformasyon ve Isı Oluşumu (Kagitci, 2025)

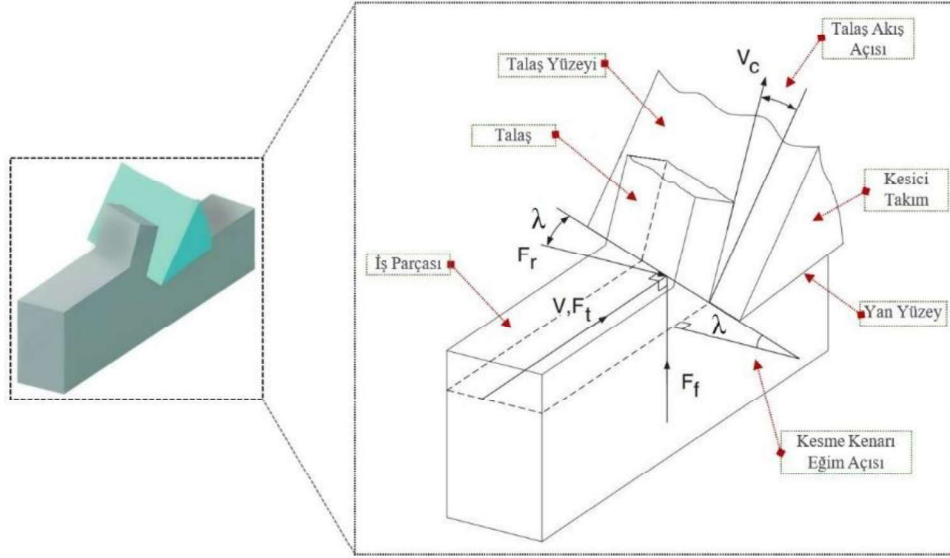
Kesme mekaniği ve çeşitli işleme operasyonları ve takım geometrileri göz önüne alındığında, tüm metal kesme işlemleri aynı mekanik ilkeleri paylaşır, ancak geometrileri ve kinematikleri birbirinden farklı olabilir (Altıntaş, 2012). Metal kesme mekaniğinde takım ve iş parçası arasında 2 tip kesme modeli geliştirilmiştir. Bunlar:

- Eğik (oblique) kesme modeli
- Dik (orthogonal) kesme modeli

Eğik Kesme Modeli

Eğik (oblique) kesmede, esas kesme kenar Şekil 2'de gösterildiği gibi bir eğim açısı ile kesme hızı yönüne eğimlidir. Eğik kesme, teğetsel kuvvet (F_t), ilerleme kuvveti (F_f), radyal kuvvet (F_r) olmak üzere üç kuvveti içermektedir. Dik kesmeyle karşılaştırıldığında eğik kesmenin üç boyutlu bir kuvvet süreci olarak matematik ve sayısal analiz edilmesi zor ve karmaşıktır. Talaş akış yönünün kuvvet sisteminin herhangi bir eksenine ile çakışmaması sorunu daha da ağırlaştırmaktadır (Mehta, 2015). Eğik kesme olayında talaş oluşumu her zaman helisel bir form şeklinde olmakta ve takımın kesme yüzeyi üzerinde kaymaz. Kesme anında birden fazla kesici kenar talaşla temas halinde olabilir. Kesme işlemlerinde kesme hızının (V) bir eğim açısı (λ) bulunmaktadır. Elde edilen sarmal talaş belirli bir talaş akış hızıyla (V_c) uzun bir kıvrımla yana doğru ve kesme bölgesinden uzağa doğru hareket etmektedir. Bu kesme türünde talaş açısı ve eğim açısı artarsa talaş ince olabilir veya uzayabilir. Teorik hesaplamalarda şekil

değiştirmemiş talaş kalınlığı ve genişliği esas alınır. Parçadan ayrılan talaş ile teorik talaş boyutları birbirinden farklıdır. Parçadan ayrılan talaş daha kalın ve daha kısadır (Özay, 2009).



Şekil 2. Oblique kesme modeli (Kagitci, 2025)

Talaşlı imalat alanında kesme kuvvetlerine ait ilk çalışmalar ve matematiksel ifadeleri 1940 tarihinde Merchant tarafından geliştirilmiştir. Fiziksel açıdan talaş kaldırma olayını incelemiş ve talaşın nasıl meydana geldiğini açıklamaya çalışmıştır. Çalışmalarından elde ettiği sonuca göre, dik bir modeli ortaya atmış ve takımın etkisi altında kaldırılacak malzemenin önce elastik ve sonra plastik bir şekil-değiştirme göstererek; takımın kesme yönü ile belirli bir açı yapan bir düzlemde talaş olarak ana malzemeden ayrıldığını varsaymıştır (Demirayak, 2006). Eğik kesmede kesme işleminin teorik çalışması için, kesme kenarı eğikliğinin etkisini ortadan kaldırırsak, talaş akışı kesme kenarına dik olarak gerçekleşir. Kesme işleminin teorik çalışması için, üç boyutlu kuvvet sistemini kesme kenarına dik düzlemde iki boyutlu bir kuvvet sistemine indirgersek, kesme işlemi basitleştirilebilir (Mehta, 2015).

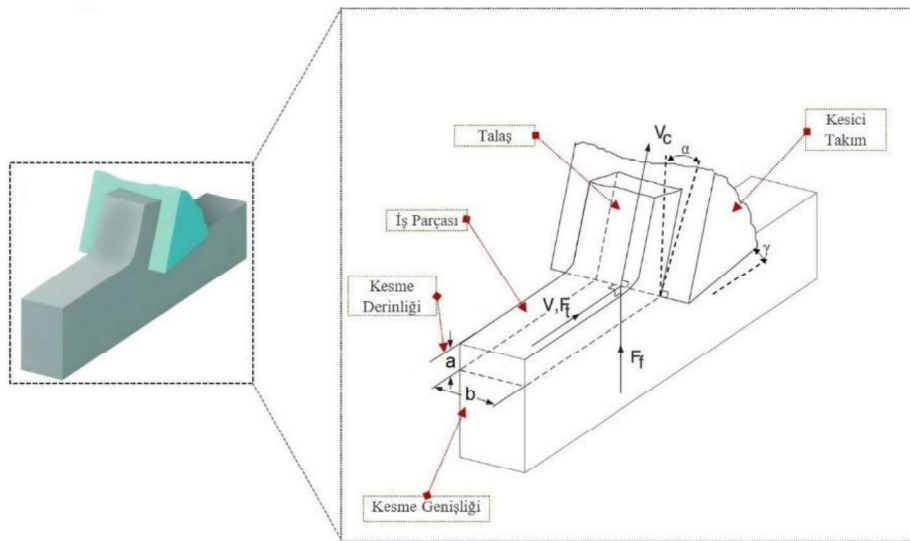
Ortogonal Kesme Modeli

Orthogonal kesme teorisi, sürekli talaş oluşumu varsayımına dayanmaktadır. Kesici takımın iş parçası malzemesiyle nasıl etkileşime girerek talaş oluşumuna ve kesme kuvvetlerinin oluşumuna yol açtığını açıklamaya yardımcı olur. İşlemede temel bir kavram olarak hizmet eder. Mühendislerin çeşitli malzemeler, takım geometrileri ve işleme koşulları için kesme işlemlerini optimize etmesine yardımcı olur. Ayrıca karmaşık

kesici takım geometrilerini ve ideal olmayan işleme koşullarını dikkate alan daha gelişmiş kesme teorilerinin temelini oluşturur. En yaygın kesme işlemleri üç boyutlu ve geometrik olarak karmaşık olsada, talaş kaldırma işleminin genel mekaniğini açıklamak için iki boyutlu ortogonal kesmenin basit durumu kullanılır. Karmaşık üç boyutlu eğik kesme işlemlerinin mekaniği genellikle ortogonal kesme işlemine uygulanan geometrik ve kinematik dönüşüm modelleri ile değerlendirilir (Altıntaş, 2012).

Ortogonal kesme, kesme kenarının kesme hızı (V) yönüne dik olduğu kama şeklinde düz bir takım kullanır. Kesme olayında malzeme, göreceli takım iş parçası hareket yönüne dik olan bir kesme kenarı tarafından kaldırılır. Takım malzemenin içine doğru zorlandıkça, kesme düzlemi adı verilen ve iş yüzeyiyle talaş açısı yapan kayma düzlemi boyunca kesme deformasyonu ile talaş oluşur (Groover, 2016). Sadece takımın keskin kesme kenarında malzemede bozulma meydana gelir ve bu da kesme genişliği (b) ve kesme derinliği (a) olan metal talaşın ana malzemeden ayrılmasıyla sonuçlanır. Mekanik enerjinin büyük kısmının tüketildiği kesme düzlemi boyunca işleme sırasında malzeme plastik olarak deforme olur.

Ortogonal kesmede, kesmenin kesme kenarı boyunca düzgün olduğu varsayılır. Bu nedenle, malzemenin yan yayılması olmadan iki boyutlu bir düzlem gerilme deformasyon sürecidir. Bu nedenle, kesme kuvvetleri yalnızca teğetsel (F_t) ve ilerleme kuvvetleri (F_f) olarak adlandırılan hız ve kesilmemiş talaş kalınlığı yönlerinde uygulanır (Altıntaş, 2012). Ortogonal kesme işlemlerinin şematik gösterimi Şekil 3'te gösterilmektedir.



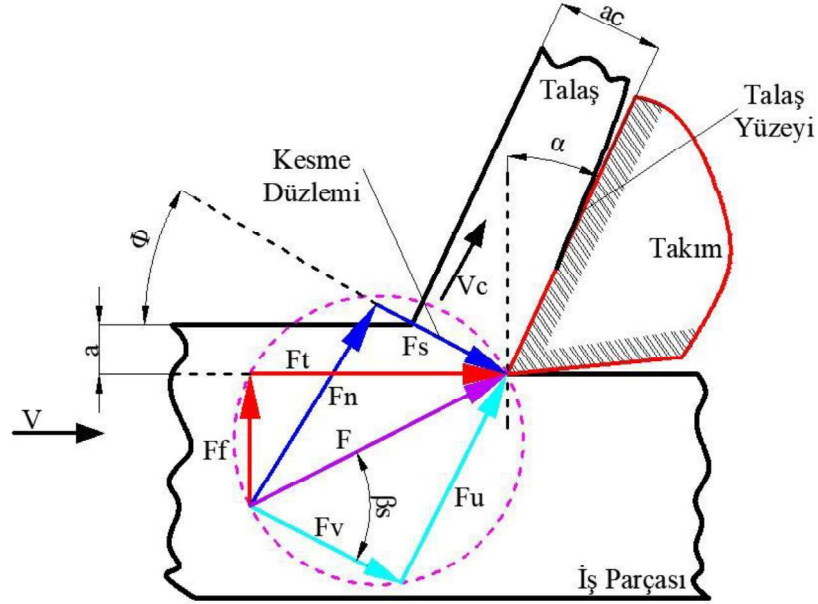
Şekil 3. Ortogonal Kesme Modeli (Kagitci, 2025)

Kesme Kuvveti Teorisi

Frezelemede kesme kuvveti, frezeleme işleminin performansını ve sonucunu etkileyen, aynı zamanda kesme parametrelerini optimize etmenin önemli bir koşulunu sağlayan kritik bir faktördür. İş parçası ile etkileşime girdiğinde kesici takıma uygulanan bu kuvvetler, doğrudan takım aşınmasını, yüzey kalitesini, güç tüketimini ve frezeleme işleminin genel kararlılığını etkiler. Freze işleminde verimlilik, kesme gücünün hesaplanması ile iş mili ve iş bağlama aparatındaki gerekli boyutlandırılmanın yapılması ile elde edilir. Dolayısıyla kesme kuvveti kapsamlı olarak analiz edilmelidir (Sağlam, 2000). Talaşlı imalat süreçlerinde kesme kuvvetlerinin analizi, işlenebilirliğin değerlendirilmesinde temel bir kriterdir; nitekim farklı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar değişken kesme hızlarının kuvvet ve sıcaklık üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır (Baran ve Neşeli, 2025c, 2025d). Operasyonel işleme süreci boyunca talaş kalınlığının değişimi ile kesme kuvvetlerinin ve temas şartlarının oluşmasını sağlar. Kesme işlemi ile oluşan talaş bazı durumlarda kesici takımın üzerine yapışması ile bir sonraki kesme operasyonuna taşınması suretiyle kesme kenarında talaş yığılmasına sebep olmaktadır. Bu durum kesme kuvvetinde artışa sebebiyet vermektedir. İşlenilecek kesme kuvvetini, işlenilecek parçanın malzemesi, ilerleme hızı, kesme derinliği, kesme hızı, kesici takım geometrisi ve malzemesi, soğutma gibi parametreler etkilemektedir. İşleme süreciyle oluşan kesme kuvvetleri, sıcaklık, titreşim, talaş oluşum mekaniği ve kesici takımın durumu hakkında bilgi sağlamaktadır. Kesme kuvvetleri işleme sürecinde meydana gelen birden fazla kusurun değerlendirilmesinde başvurulacak öncelikli ölçümdür (Akkurt, 1998).

Frezeleme işlemleri sırasında iş parçasından kalkan talaşı üretmek için döner kesici takımın kenarının belirli bir kesme değerine sahip olması gerekir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan kesici takım geometrilerinde birden fazla kesici kenar bulunur ve tüm kesici kenarlar tek bir takım devrinde iş parçasına kuvvet uygular. Kesici takımda bulunan kesme kenarları, iş parçasına ve gereken kuvvete bağlı olarak değişir. Kuvvet ayarları, kesici takımın iş parçasından ne kadar iyi talaş kaldıracabileceğini belirler. Tüm işleme operasyonları göz önüne alındığında, ortogonal işleme hem endüstriyel uygulamalarda hem de sağlık alanındaki cerrahi uygulamalarda kesici takımın geometrisi ve etkileşime girdiği parçaya göre konumu nedeniyle boyutludur. Kesme mekaniği çalışmalarında, kesme kuvvetleri malzeme özellikleri, talaş morfolojisi ve yüzey

bütünlüğü açısından önemlidir. Bu nedenle, ortogonal işlemede kesme kuvvetleri son derece önemlidir ve üzerinde durulması gerekir (Kagitci ve Neşeli, 2024). Şekil 4'te ortogonal kesme işlemi ve kesme kuvvetleri gösterilmektedir.



Şekil 4. Ortogonal kesimde takım-talaş üzerindeki etkili kesme kuvvetleri (Stephenson ve ark, 2016; Kagitci, 2025)

Kesme işleminde, kesme hızında (V) takımın kesici kenarına yaklaşan iş parçası, takımın talaş yüzeyinde sıkıştırılır ve kesme düzlemi boyunca plastik kesme ile deformasyona (şekil değişikliği) neden olur. Uygun koşullar altında, kayma düzlemi boyunca sürekli ve sabit bir deformasyon miktarı meydana gelir ve deforme olmuş malzeme (talaş), sürekli bir talaş şeklinde düzgün bir hızda (V_c -talaş hızı) takımın talaş yüzeyinden aşağı kayar. Deformasyondan önceki talaş kalınlığı a , deformasyon sırasında talaş kalınlığı a_c 'ye yükselir. Bu harekette, talaş açısının (α) etkisi altında belirli bir düzlem boyunca kayma meydana gelir, kaymanın konumu kayma açısı (ϕ) tarafından verilir. Dikey kesme, üç boyutlu bir problemten ziyade iki boyutlu bir problem gibi davrandığından, kesme mekaniğini yöneten denklemleri türetmek için deneysel ve teorik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Burada Kuvvet bileşenlerinden sürtünme kuvveti (F_u), takım talaş yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_v), kesme düzlemine etki eden normal kuvvet (F_n), kesme sırasında kayma düzleminde meydana gelen kayma kuvveti (F_s) uygulandığı yönler, kesici takım geometrisi ve kesme koşullarındaki

farklılık sebebiyle talaş kaldırma işleminde doğrudan ölçülemez. Kesici takıma etki eden kuvveti dinamometre ile ölçmek mümkün olmaktadır. Böylece takıma etki eden iki ek kuvvetten kesme yönünde olan ve kesme hızı (V) ile aynı doğrultudaki kesme kuvveti (F_t), diğeri ise kesme kuvvetine dik doğrultuda ve kesme öncesi talaş kalınlığı (a) ile ilişkili olan itme kuvveti (F_f) doğrudan ölçülebilir. Diğer kuvvet bileşenleri, ölçülebilir iki kuvvetten elde edilen trigonometrik ilişki aşağıda verilmiştir (Groover, 2011; Shaw, 2005; Mehta, 2015). Verilen eşitlikte α kesici takımın talaş açısıdır. Sürtünme açısı olarak adlandırılan β_s ise bileşke kuvvet (F) ile sürtünme kuvveti normalinin arasındaki açıdır. Bu bağıntılardan β_s sürtünme açısı ve sürtünme katsayısı hesaplanabilir.

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} \quad (1)$$

$$F_u = F_t \cdot \sin \alpha + F_f \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

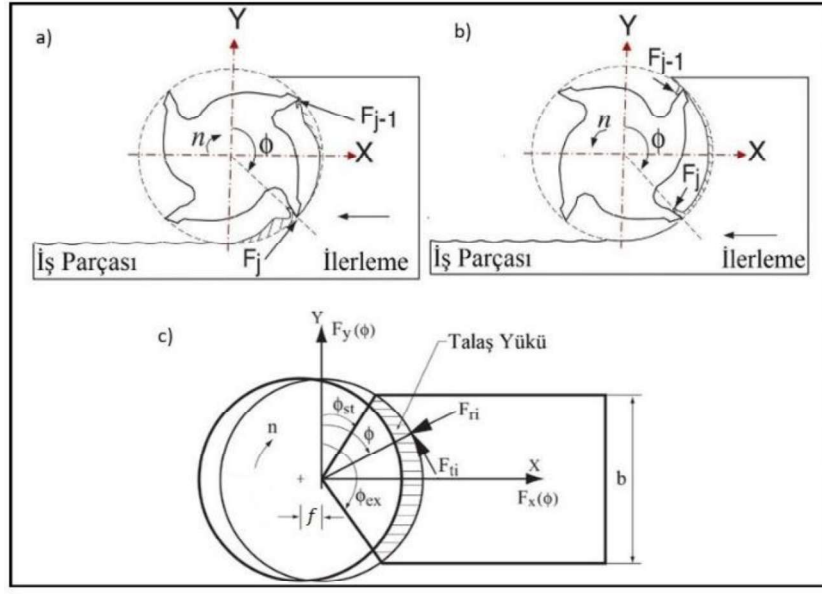
$$F_v = F_t \cdot \cos \alpha - F_f \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$F_s = F_t \cdot \cos \Phi - F_f \cdot \sin \Phi \quad (4)$$

$$F_n = F_t \cdot \sin \Phi + F_f \cdot \cos \Phi \quad (5)$$

$$\tan \beta_s = F / F_n \quad (6)$$

Frezeleme, çoklu diş hareketi ile aralıklı kesme ile karakterize edilir. Konfigürasyon, boyut, şekil, geometri ve hatta bazı durumlarda talaş oluşum mekanizması ve mekaniğine bağlı olarak farklı freze tipleri vardır (Chattopadhyay, 2017). Freze tiplerinde farklılık olsada frezelemede alın frezeleme ve çevresel frezeleme olarak iki operasyonda işlem gerçekleştirilir. Frezelemede talaş oluşum geometrisi şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Frezeleme işleminin geometrisi ve temel kuvvetler a) Aynı yönlü frezeleme, b) Zıt yönlü frezeleme, c) Temel kuvvetler (Altıntaş, 2012)

Frezelemede aynı anda birden fazla kesici kesmeye iştirak ettiğinden, ölçülen kesme kuvveti, o an kesme yapan diş sayısının meydana getirdiği kuvvet olacaktır (Sağlam, 2000). Alın frezelemede, kesici takımın eksenel doğrultusu iş parçası üzerinde işlenen yüzeye diktir. Çevresel frezeleme işleminde ise, işlenen yüzey kesici takım eksenine paraleldir. Frezelemede kesici kenara teması ile oluşan kesme kuvvetleri, ilerleme kuvveti (F_x), radyal kuvvet (F_y) ve eksenel kuvvet (F_z) olarak üç temel kuvvetten oluşur. Bu kuvvetlerin bileşenleri ile bileşke kesme kuvveti (F) hesaplanır. Ayrıca, talaş kalınlığı ve kesme kuvvetleri periyodik olarak değişkendir. Frezeleme işleminde anlık talaş kalınlığı (h) zamanla değişen daldırma işleminin bir fonksiyonu olarak periyodik olarak değişir. Talaş kalınlığı değişimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$h(\theta) = f \sin \theta \quad (7)$$

Burada f ilerleme hızı (mm/dk), θ kesici takımın anlık dalma dönüş açısıdır. θ_{st} ve θ_{ex} sırasıyla kesici giriş ve çıkış açılarıdır. Kesme kuvvetlerinin hesabında helis açısının sıfır olduğu kabul edilir, bu durum kesici uçlu yüzey frezeleme işlemlerinde geçerlidir. Teğetsel, eksenel ve radyal kesme kuvvetleri için aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} F_t(\theta) &= K_{tc}ah(\theta) + K_{te}a \\ F_r(\theta) &= K_{rc}ah(\theta) + K_{re}a \end{aligned} \quad (8)$$

$$F_a(\theta) = K_{ac}ah(\theta) + K_{ae}a$$

Yukarıda ifade edilen formülde, K_{tc} teğetsel, K_{rc} radyal, K_{ac} eksenel yöndeki kesme kuvveti katsayılarını ve K_{te} , K_{re} , K_{ae} kesici kenar katsayıları olarak ifade edilmektedir. Kesilmemiş talaş alanını $ah(\theta)$, kenar temas uzunluğu a oluşturmaktadır. Kesme kuvveti katsayılarının bir takım iş malzemesi çifti için sabit olduğu varsayılır ve bunlar frezeleme testlerinden mekanik olarak veya eğik kesme dönüşüm fonksiyonlarının birer parametresidir. Kesici üzerine etki eden kesme kuvvetlerinin yatay (ilerleme), normal ve eksenel bileşenleri Şekil 5'te gösterilen denge diyagramından aşağıdaki gibi oluşturulabilir (Altıntaş, 2012):

$$F_x(\theta) = -F_t \cos(\theta) - F_r \sin(\theta)$$

$$F_y(\theta) = +F_t \sin(\theta) - F_r \cos(\theta) \quad (9)$$

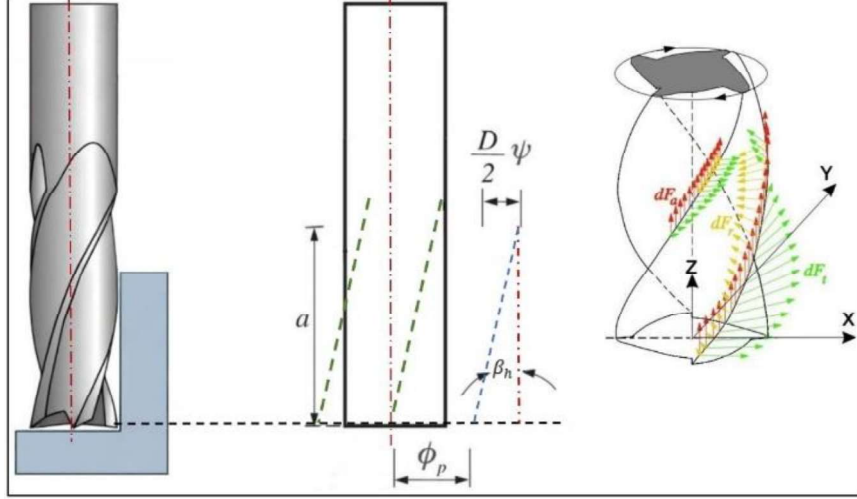
$$F_z(\theta) = +F_a$$

Frezelemede aynı anda birden fazla kesici kesmeye iştirak ettiğinden, ölçülen kesme kuvveti, o an kesme yapan diş sayısının meydana getirdiği kuvvet olacaktır (Sağlam, 2000). Her bir dişin kesme kuvvetlerine katkısını temsili düşünüldüğünde, kesici (veya iş parçası) üzerindeki anlık sonuç kesme kuvveti şu şekilde verilir (Altıntaş, 2012):

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (10)$$

Kısaltılmış takım ömrü, periyodik yüklemenin neden olduğu döngüsel mekanik ve termal gerilimlerin bir sonucudur. Helisel parmak frezeler, dönerek kesme yoluyla çeşitli malzemelerin işlenmesine imkân sunan aynı zamanda bir iş parçasından malzeme çıkarmak için frezeleme uygulamalarında kullanılan, özellikle hassasiyet ve karmaşık geometrilerin gerekli olduğu işleme operasyonlarında çok yönlü ve yaygın olarak tercih edilen kesici takımlardır. Helisel parmak frezeler, havacılık, savunma, medikal gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Büyük bir kesme derinliği ancak kısa bir kesme genişliği olduğunda, frezeleme kuvvetlerinin salınım bileşenlerindeki ani değişiklikleri azaltmak için helisel parmak frezeler kullanılır (Altıntaş, 2012). Helisel kanallara sahip parmak freze Şekil 6'te gösterilmiştir. Talaş kaldırma işleminde tercih edilen parmak frezeler iş parçası üzerindeki yüzeylerden yüksek eksenel ve düşük radyal derinliğe bağlı olarak çevresel frezelemelerde tercih edilmektedir. Parmak frezedeki

helis durumu, kesme operasyonunda oluşabilecek darbeyi sönümlemek ve işlemeye yardımcı olmak için oluşturulur. Bir parmak freze sisteminde helisel kanal üzerine etki eden temel teğetsel (dF_t), radyal (dF_r) ve eksenel (dF_a) kesme kuvvetleri Şekil 6'te gösterilmiştir.



Şekil 6. Helisel parmak freze geometrisi ve kuvvetler (Altıntaş, 2012)

Frezenin helisel kanalları boyunca kesicinin helisi tarafından sürekli artan bir talaş yükü sağlamaktadır (Kline ve ark, 1980: Altıntaş, 2012). Kesici kenarın eksenine üzerindeki bir nokta, kesici takımın β_h helis açısına sahip olmasından dolayı takımın uç noktasının gerisinde kalacaktır. ϕ_p parmak frezenin adım açısı ve α eksenel diferansiyel elemanlara bölünmüş toplam talaş derinliğidir. Burada gecikme açısı (ψ), aynı kanalın ucundaki ve eksenel derinlik z_h yüksekliğindeki açısal konum farkını temsil eder, D kesici takım çapıdır ve aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\psi = \frac{2z \tan \beta}{D} \quad (11)$$

Parmak freze adım açısını hesaplamak için aşağıdaki fonksiyon kullanılabilir:

$$\phi_p = \frac{2\pi}{z} \quad (12)$$

Burada z kesici uç sayısıdır. Parmak frezenin referans kanalının alt noktası daldırma açısında olduğunda, eksenel olarak z_h yukarıda olan bir kesme kenarı noktası $(\phi - \psi)$ daldırma açısına sahip olacaktır. Açıkçası, kanal eksenine boyunca çıkarılan talaş kalınlığı da ilerleme ve dönme açısı

göz önünde bulundurulduğunda her noktada farklı olacaktır (Altıntaş, 2012).

Parmak frezeleme sırasında talaş yükü ile diferansiyel teğetsel ve radyal kuvvet bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklayan ve deneysel verilerden yararlanılan mekanistik kuvvet tahmin modelleri geliştirilmiştir (Wan ve ark, 2010; Aydın ve ark, 2018). Helis açılı parmak frezenin kesme kuvvetlerini belirlemek için deneysel olarak elde edilen kuvvet katsayıları kullanılır. Talaşın içerisindeki kesici kenar boyunca kesilen talaş kalınlığı, gecikme açısı nedeniyle eksenel doğrultuda her noktada farklılık göstermesi, kesici kenara etki eden kesme kuvvetlerinin her noktada farklı olmasına yol açar. Bu nedenle, kesici takım, z eksenini boyunca dz yüksekliğinde diferansiyel elemanlara ayrılır. Gecikme açısı nedeniyle, her bir elemana kesme yapan kenarların açısal pozisyonu farklıdır. Açısal konumları farklı olan kesici kenarların talaş yükü de değişiklik göstermesi, her bir elemana etki eden kesme kuvvetleri de farklılık gösterecektir. Kesme işlemi sırasında anlık talaş kalınlığı, dönme açısı ve ilerlemeye bağlı olarak zamanla periyodik olarak değişir. Teğetsel (F_t) ve radyal (F_r) kuvvetlerin doğrultusu, sırasıyla kesme yönüne ters ve takım merkezi yönünde olması da dikkate alındığında kuvvetler trigonometrik fonksiyon olarak elde edilir. Sonuç olarak kesici takımın bir periyodundaki ortalama kuvvet ($\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z$) denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\bar{F}_x &= -\frac{za}{4}K_{rc}f - \frac{za}{\pi}K_{re} \\ \bar{F}_y &= \frac{za}{4}K_{tc}f + \frac{za}{\pi}K_{te} \\ \bar{F}_z &= \frac{za}{\pi}K_{ac}f + \frac{za}{2}K_{ae}\end{aligned}\tag{13}$$

Mekanistik yöntemle frezelemede kesme kuvveti katsayılarının belirlenmesindeki temel hedef, anlık kesme kuvvet değerlerinin, anlık talaş hacmi ile ilişkilendirilmesine dayalıdır. Burada, K_{tc} , K_{rc} ve K_{ac} katsayılar sırasıyla, teğetsel, radyal ve eksenel kesme katsayıları olarak, denklemde yer alan K_{te} , K_{re} ve K_{ae} katsayıları ise sırasıyla teğetsel, radyal ve eksenel olmak üzere sürtünmeden kaynaklanan kenar kuvveti katsayıları olarak adlandırılır. Ayrıca, z, a, f değerleri sırasıyla diş sayısı, talaş derinliği ve ilerlemedir (Bayram ve ark, 2022).

Kesme kuvvetlerinin belirlenmesi amacı doğrultusunda aşağıda verilen etkenleri kolaylaştırmak için işleme operasyonları ve belirlenmiş koşullar

altında kesme kuvvetlerinin büyüklüğünü ve diğer yönlerini bilmek veya belirlemek çok önemlidir. Bunlar:

1. Takım tezgâhı tasarımında kesme gücü tüketiminin değerlendirilmesi ve güç kaynaklarının (motorlar, vb.) seçilmesi,
2. Birçok uygulama alanına destekleyici, makine-fikstür-takım sisteminin yapısal tasarımı,
3. Farklı işleme parametrelerindeki (kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, takım malzemesi ve geometrisi, kesme sıvısı tipi, uygulama yöntemi, vb.) değişimin kesme kuvveti üzerindeki rolünün değerlendirilmesi,
4. Verilen işleme koşulları altında herhangi bir iş malzemesinin davranışının ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi,
5. Kesici takımların durumunun izlenmesi olarak sıralanabilir.

Herhangi bir işleme işi için kesme kuvvetleri iki yolla belirlenebilir:

1. Analitik Tahmin (Daha kolay, yaklaşık bir tahmin verir.)
2. Deneysel Ölçüm (Çok doğru ve daha güvenilir bir yöntem, ancak zahmetli ve pahalı bir uygulamadır (Chattopadhyay, 2017).

Kesme Kuvvetlerinin Deneysel İncelenmesi

Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak incelenmesi, kesme mekaniği alanında geliştirilen teorik modellerin gerçek üretim koşullarındaki geçerliliğini değerlendirmek için temel bir araştırma yöntemi olarak öne çıkar. Teorik yaklaşımlar genellikle ideal varsayımlara, homojen malzeme özelliklerine ve sabit kesme koşullarına dayanır. Ancak, endüstriyel üretim ortamlarında takım aşınması, sıcaklık değişimleri, bağlama sisteminin rijitliği, titreşimler ve malzeme iç yapısındaki düzensizlikler gibi birçok faktör aynı anda etkisini gösterir. Bu çeşitlilik göz önünde bulundurulduğunda, deneysel çalışmalar kesme kuvvetlerinin gerçek davranışını anlamak ve doğru analiz etmek için vazgeçilmez bir bilgi kaynağı haline gelir. Tablo 1’de frezeleme üzerine yapılan bazı çalışmalar gösterilmektedir (Kagitci ve Neseli 2024).

Tablo 1. Frezeleme işleminde ve kuvvet ölçümü üzerine yapılan bazı çalışmalar

Yazarlar	İşleme	Kuvvet Ölçüm Metodu
----------	--------	---------------------

Kecik ve ark. (2025)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Ni ve ark. (2025)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Kouguchi ve ark. (2024)	NC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Konya ve ark. (2024)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Rabiee ve ark. (2023)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Tahmasbi ve ark. (2022)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Qasemi ve ark. (2022)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Zheng ve ark. (2022)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre
Ying ve ark. (2022)	CNC Freze Makinesi	Piezoelektrik Dinamometre

İmalat yöntemlerinin ve işlem parametrelerinin yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisi, nihai ürünün mekanik performansını doğrudan belirlemektedir (Baran ve Neşeli, 2024; Kocaaslan, 2013). Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak incelenmesinde kullanılan deney düzenekleri; takım ve iş parçası sistemi, tezgâh yapısı, ölçüm elemanları ile veri toplama birimlerinden oluşmaktadır. Bu tür deneylerde genellikle kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi temel değişkenler üzerinde durulur. Söz konusu parametrelerin sistematik olarak değiştirilmesi, kesme kuvvetlerinin hem bireysel hem de kombinasyonel etkilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine imkân sağlar. Deney parametreleri belirlenirken tezgâhın çalışma kapasitesi ile ölçüm sisteminin hassasiyetinin göz önünde bulundurulması büyük önem taşır (Kagıtcı ve Neseli 2024; Neseli ve ark. 2018; Yalçın ve ark. 2007). Özellikle Al7075 T6 gibi havacılık ve savunma sanayiinde yaygın kullanılan alaşımların işlenmesinde, yüzey pürüzlülüğü ile kesme kuvveti arasındaki korelasyonun optimize edilmesi gerekmektedir (Baran ve Neşeli, 2025b).

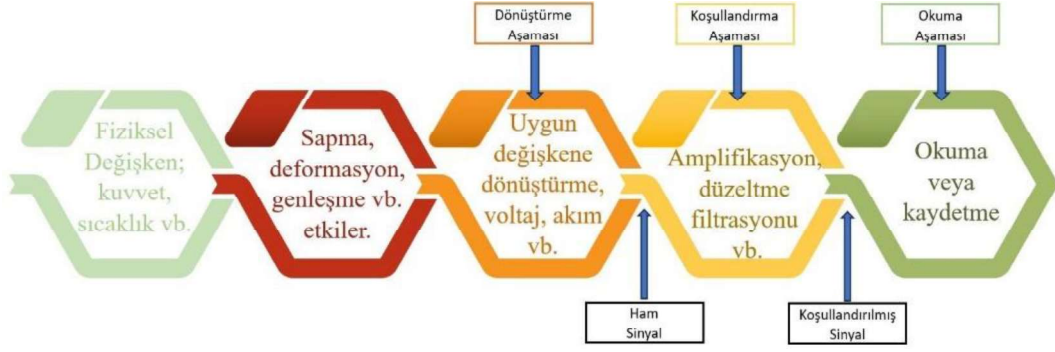
Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen veriler, kesme kuvvetlerinin ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesme hızı gibi temel kesme parametreleriyle olan ilişkisini anlamak amacıyla sistematik bir şekilde analiz edilmektedir. Bu analizler, her bir parametrenin kuvvet bileşenleri üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerini nicel olarak değerlendirme fırsatı sunmaktadır. Genellikle deneysel bulgular, ilerleme

miktarı ve talaş derinliğindeki artışın kesme kuvvetlerinde belirgin bir artışa neden olduğunu göstermekte, bu ilişkinin bazı durumlarda doğrusal bir yapıya, bazen de doğrusal olmayan özelliklere sahip olabileceğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, kesme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi daha karmaşık bir yapı sergilemekte olup, bu durum takım ve iş parçası arasındaki etkileşim, malzemenin gerinim hızına duyarlılığı ile kesme bölgesinde oluşan ısı etkilerinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Deneysel sonuçlar, kuvvet ile parametreler arasındaki ilişkilerin net bir şekilde incelenebilmesi ve eğilimlerin karşılaştırmalı bir şekilde ele alınabilmesi için genellikle grafikler ve tablolar halinde sunulmaktadır. Bu görselleştirme yöntemleri, parametre değişimlerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerinin daha kolay analiz edilmesini sağlamakta ve elde edilen verilerden anlamlı sonuçların çıkarılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Kesme Kuvveti Ölçüm Esasları

Kesme kuvveti ölçümünün temel prensipleri, deneysel kesme mekaniği çalışmalarının bilimsel açıdan güvenilirliğini doğrudan belirleyen kritik unsurlar arasındadır. Ölçüm sistemlerinin hatalı seçimi veya uygun şekilde uygulanmaması durumunda, elde edilen veriler teorik modellerle kıyaslanabilirlikten uzaklaşarak yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkarabilir. Bu sebeple, kesme kuvvetinin ölçülmesi yalnızca bir veri toplama süreci olarak görülmemeli; aksine, mekanik, elektronik ve deneysel yöntemlerin bir arada ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektiren disiplinler arası bir süreç olarak değerlendirilmelidir.

Kuvvet, sıcaklık ve diğer fiziksel değişkenler doğrudan algılanamaz veya ölçülemez ancak bunun yerine, varlıklarını ve seviyelerini belirlemek, etkilerinin analizi ile mümkündür. Daha açık bir ifadeyle bir kuvvet, etkisi dikkate alınmadığı sürece kavramsallaştırılamaz ve görülemez bir olgudur. Ancak, söz konusu kuvvet, etkisi veya etkileri ve bu etkilerin (belirli bir nesne üzerindeki) elastik sapma, deformasyon, basınç, gerinim vb. gibi gücü doğrultusunda tespit edilebilir ve ölçülebilir. Sinyal olarak da bilinen bu etkilerin kolay, hassas ve tutarlı bir şekilde tespit edilip ölçülebilmesi için doğru koşullandırma gerekebilir. Şekil 7 herhangi bir transdüser veya dinamometre ile ölçümün temel prensibini şematize etmektedir.



Şekil 7. Transdüser ile kuvvet, sıcaklık vb. ölçümünün temel prensibi (Kagitci, 2025)

Kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, titreşim ve diğer fiziksel faktörler işleme ile ilgilidir ve ölçülmesi gerekir. Bu şekilde ölçülemeyen değişkenler, uygun bir sensör veya dönüştürücü yardımıyla direnç, kapasitans, endüktans vb. değişimler yoluyla çoğunlukla voltaj olan ham sinyal olarak adlandırılan başka bir uygun fiziksel değişkene dönüştürülür. Ölçüm kolaylığı, doğruluğu ve güvenilirliği sağlamak amacıyla dönüştürücünün ham sinyali için amplifikasyon, düzeltme, filtreleme, stabilizasyon ve diğer işlemler gereklidir. Son olarak, koşullandırılmış sinyal okunur, görselleştirilir veya osiloskop, grafik kaydedici, bilgisayar gibi okuma ünitesinde saklanır.

Sensörler, kesme kuvvetlerinin ölçümüne yönelik uygulamalarda, mekanik yüklerin elektriksel sinyallere dönüştürülmesi prensibine dayalı olarak çalışmaktadır (Altıntaş, 2012; Jemielniak, 1999).

Talaşlı imalat süreçlerinde en yaygın biçimde kullanılan sensör türleri arasında piezoelektrik sensörler ve gerinimölçer tabanlı sensörler yer almaktadır (Audy ve ark. 2006; Zhao ve ark. 2016; Perez-Alfaro ve ark. 2020). Bu iki sensör tipi, çalışma mekanizmaları ve performans parametreleri açısından birbirinden belirgin şekilde ayrılmaktadır. Piezoelektrik sensörler, belirli kristal yapıdaki malzemelerin uygulanan mekanik yük altında elektrik yükü üretmesi esasına dayalı olarak işlev görmektedir. Yüksek frekans tepkisi ve geniş ölçüm bant genişliği sayesinde, dinamik kesme kuvveti ölçümlerinde bu sensörler sıklıkla tercih edilmektedir (Zhao ve ark. 2016). Özellikle frezeleme gibi kesintili kesme işlemleri veya yüksek kesme hızlarının sebep olduğu ani kuvvet değişikliklerini doğru bir şekilde algılayabilme kabiliyeti, piezoelektrik sensörlerin temel avantajları arasında yer almaktadır. Ancak statik veya

çok düşük frekansa sahip kuvvet ölçümlerinde performanslarının sınırlı olduğu bilinmektedir.

Gerinim ölçer tabanlı sensörler ise, elastik bir eleman üzerindeki mekanik kuvvetin neden olduğu şekil değişimlerinin elektriksel direnç değişimine dönüştürülmesi prensibiyle çalışmaktadır (Moayyedian ve ark. 2019). Bu sensörler, özellikle statik ve yarı statik kuvvetleri ölçmede yüksek hassasiyet ve kararlılık özellikleri sunmaktadır. Bu doğruluk düzeyleri nedeniyle, torna gibi sürekli kesme işlemleri sırasında ortalama kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin nispeten sınırlı frekans tepkisi nedeniyle dinamik analizlerde dikkatli bir değerlendirme gerektirdiği vurgulanmalıdır.

Sensör seçimi sürecinde, ölçümün hedeflediği kuvvet büyüklüğü, frekans aralığı, kesme işleminin türü ve deneysel çalışmanın amacı bir arada değerlendirilmelidir. İdeal sensör seçimi yalnızca ölçüm doğruluğunu değil, aynı zamanda uzun dönemli ölçüm sisteminin kararlılığını da doğrudan etkileyebilmektedir.

Kesme kuvvetlerini doğru ve hassas bir şekilde ölçmek için (hem statik hem de dinamik özellikler), şu anda tercih edilen dinamometreler gerinim ölçer tipi veya piezoelektrik kristal tipidir. Piezoelektrik tip dinamometreler kuvvetleri daha doğru ve hassas ölçmenin yanı sıra daha güvenilir ve tutarlı bir şekilde ölçer ancak bu tür dinamometreler yüksek malzeme maliyeti ve sıkı yapı nedeniyle çok pahalıdır. Öte yandan, gerinim ölçer tipi dinamometreler çok iyi performans göstermeyebilir ancak tasarım ve yapım açısından çok basittir ve oldukça ucuzdur. Bu nedenle, gerinim ölçerler hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Chattopadhyay, 2017). Yük hücrelerinin yaygın olarak kullanıldığı alanlar arasında otomotiv, havacılık, tıp, imalat ve tarım gibi geniş bir yelpaze bulunmaktadır (Moayyedian ve ark. 2019).

Dinamometre Sistemleri ve Çalışma Prensipleri

Kesme kuvvetlerinin çok eksenli ölçülmesini sağlayan dinamometre sistemleri, deneysel talaşlı üretim araştırmalarının temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu sistemler, kesme sırasında takım veya iş parçası üzerinde oluşan kuvvetleri belirli yönlerde hassas bir şekilde ölçebilen ileri düzeyde teknolojik cihazlardır.

Üç eksenli dinamometreler, genellikle ana kesme kuvvetini, ilerleme kuvvetini ve pasif kuvveti eş zamanlı olarak ölçebilme kapasitesine sahiptir. Bu sistemlerin temel çalışma mekanizması, uygulanan mekanik kuvvetlerin elastik bir yapı üzerinden sensörlere iletilmesi ve bu kuvvetlerin sensörler aracılığıyla elektrik sinyallerine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Dinamometrenin tasarımında kullanılan elastik yapıların rijitliği ve doğal frekans özellikleri, ölçüm işlemlerinin kesinliği ve doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir (Rizal ve ark. 2026).

Dinamometre sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, kesme kuvvetlerinin zaman içerisindeki değişimlerini yüksek çözünürlükte izleyebilme yeteneğidir. Bu özellik, kesme işleminin kararlılık değerlendirmesi ve titreşim kaynaklı olası sorunların tespit edilmesi açısından oldukça faydalıdır. Ancak, dinamometrelerin tezgâh sistemine entegre edilmesi sırasında ortaya çıkabilecek mekanik etkileşimler dikkatle ele alınmalıdır. Bu tür etkileşimler, takım–iş parçası sisteminin dinamik davranışını değiştirebilir ve dolayısıyla ölçülen kuvvetlerin gerçek değerlerle uyumlu olmamasına yol açabilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, imalat süreçlerinin kesme mekaniği bağlamında kesme kuvveti teorisi ve ölçüm prensiplerini kapsamlı ve bütüncül bir perspektifle incelemektedir. Araştırmada, talaş oluşumu mekanizmasından hareketle, kesme kuvvetlerinin teorik temelleri, deneysel analiz ve ölçüm yöntemleri sistematik bir yapı içerisinde sunulmuş, bu unsurların birbirleriyle ilişkisinin açık bir biçimde ortaya konulması hedeflenmiştir. Kesme sürecine ilişkin matematiksel modellerin yanı sıra deneysel verilerin önemini vurgulayarak teorik ile pratik bilgiyi bütünleştirmektedir.

Araştırma sürecinde elde edilen teorik ve deneysel bulguların varlığı, kesme kuvvetlerinin imalat süreçlerinin performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biri olduğu sonucunu desteklemektedir. Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü ve yönü, kesici takım üzerindeki mekanik ve termal yükleri doğrudan belirleyerek takım aşınması ve kırılma riskini artırıcı bir etki yaratabilir. Ayrıca, iş parçası yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılımı ve titreşim davranışı, yüzey kalitesi ile boyutsal doğruluk üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle kesme kuvvetlerinin doğru şekilde tahmin edilmesi, izlenmesi ve yönetimi; yüksek kaliteli,

güvenilir ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Kesme kuvveti teorisi, mühendislik hesaplamaları ve proses planlama aşamalarında yapısal bir rehber işlevi görmektedir. Ancak teoriye dayalı yaklaşımların genellikle ideal varsayımlardan hareketle oluşturulduğu ve gerçek üretim koşullarını sınırlı bir biçimde temsil edebildiği unutulmamalıdır. Bu bağlamda, deneysel ölçümler, teorinin sınırlarını ortaya koymakta ve uygulama odaklı güvenilir veri sağlamada tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Teorik bilgi ile deneysel bulgular arasındaki bu karşılıklı etkileşim, kesme mekaniği alanındaki bilimsel bilgi birikiminin genişlemesine ve derinleşmesine olanak tanımaktadır.

Kesme kuvveti ölçüm prensiplerine yönelik çabalar, günümüz imalat teknolojilerinde giderek artan bir ilgi görmektedir. Gelişmiş sensör sistemleri ve dijital veri toplama teknolojileri sayesinde kesme kuvvetlerinin gerçek zamanlı izlenmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu dönüşüm, adaptif kontrol sistemleri ve akıllı imalat uygulamalarında yenilikçi fırsatlara olanak tanıyan önemli bir gelişim olarak öne çıkmaktadır. Kesme kuvvetine dayalı izleme sistemleri, takım aşınmasının erken tespit edilmesinden proses kararlılığının değerlendirilmesine ve üretim hatalarının önlenmesine kadar çeşitli alanlarda verimli bir şekilde kullanılabilmektedir.

Sonuç olarak, kesme mekaniği, kesme kuvveti teorisi ve ölçüm esaslarının bütünleşmiş bir şekilde ele alınması, imalat süreçlerinin daha bilimsel temelli, kontrollü ve yüksek verimlilik düzeyinde yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmanın ortaya koyduğu kapsamlı yaklaşım, kuramsal bilgi ile pratiğin uyumlu bir şekilde bütünleştirilmesine olan katkısını açıkça göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Akgün, M. (2021). *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Inconel 625 nikel esaslı süper alaşımın işlenebilirliğine etkisinin deneysel nümerik ve istatistiksel araştırılması* [Doktora tezi, Karabük Üniversitesi]. Ulusal Tez Merkezi.
- Akkurt, M. (1998). *Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgâhları* (4. baskı). Birsan Yayınevi.
- Altıntaş, Y. (2012). *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design* (2. baskı). Cambridge University Press.
- Audy, J. (2006). An appraisal of techniques and equipment for cutting force measurement. *Journal of Zhejiang University - Science A*, 7(11), 1781–1789. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1781>
- Aydın, M., & Köklü, U. (2018). A study of ball-end milling forces by finite element model with Lagrangian boundary of orthogonal cutting operation. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 517–527.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2024, Mayıs). *Tamburlu kumlama makinasında bilya püskürtme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi* [Konferans sunumu]. 3rd International Conference on Scientific and Innovative Studies, Konya, Türkiye.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025b). *Al7075 T6 alüminyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenebilirliğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne göre değerlendirilmesi* [Konferans sunumu]. 4th International Conference on Contemporary Academic Research.
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025c). *Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde değişken kesme hızının kesme kuvveti ve takım ucu sıcaklığına etkisi* [Konferans sunumu]. 7th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS 2025).
- Baran, R., & Neşeli, S. (2025d). *Effect of machinability parameters on cutting force in the turning of 25CrMo4 steel* [Konferans sunumu]. 3rd International Conference on Modern and Advanced Research (ICMAR 2025).
- Bayram, B. S., & Korkut, İ. (2022). Parmak frezelerde kesme kuvvetlerinin modellenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(4), 964–977.
- Chattopadhyay, A. B. (2017). *Machining and machine tools* (2. baskı). Wiley India.
- Demirayak, İ. (2006). *Kesme parametreleri ve kaplama tabakasının talaş kaldırma işlemine etkileri* [Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi].
- Groover, M. P. (2011). *Principles of modern manufacturing*. John Wiley & Sons.
- Groover, M. P. (2016). *Principles of modern manufacturing: Modern imalatın prensipleri* (M. Yurdakul & T. Y. İç, Çev.). Nobel Akademik Yayıncılık. (Orijinal çalışma basım tarihi 2011).
- Grzesik, W., & Nieslony, P. (2004). Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface. *Wear*, 256(1-2), 108–117.
- Jemielniak, K. (1999). Commercial tool condition monitoring systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(10), 711–721. <https://doi.org/10.1007/s001700050123>
- Kagıtcı, Y. C. (2025). *Kortikal kemiğin ortogonal kesiminde kesme parametrelerinin kuvvetler üzerindeki etkisinin incelenmesi* [Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi].
- Kagıtcı, Y. C., & Neseli, S. (2024). The effect of cutting forces on bone related operational processes: A literature review. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(3), 801–821. <https://doi.org/10.36306/konjes.1430115>
- Kagıtcı, Y. C., & Neseli, S. (2025). Determination of temperature effects on cortical bone milling using Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Erken görünüm. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10115-y>
- Kalpajian, S., & Schmid, S. (2014). *Manufacturing engineering and technology*. Pearson.
- Kecik, K., & Cieciela, K. (2025). The effect of cutting parameters on defect detection based on recurrence analysis of cutting force signals obtained from GFRP composite milling. *Measurement*, 239, 115406.
- Kocaaslan, O. (2013). An experimental investigation of surface roughness influence on centrifugal pump characteristics. *Experimental Fluid Mechanics*, 10.

- Kocaaslan, O., Özgören, M., Aksoy, M. H., & Babayiğit, O. (2015). *Numerical investigation of splitter blade effects on centrifugal pump performances* [Konferans sunumu]. International Conference on Science, Ecology and Technology 1.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Aksoy, M. H., & Babayiğit, O. (2016). *Numerical study for a designed and modified impeller of a multistage centrifugal pump* [Konferans sunumu]. 8th Ege Energy Symposium and Exhibition.
- Kocaaslan, O., Özgören, M., Babayiğit, O., & Aksoy, M. H. (2016). *Numerical investigation of the surface roughness effect on the hydraulic efficiency head and shaft power for a single stage centrifugal pump* [Konferans sunumu]. 8th Ege Energy Symposium and Exhibition.
- Kónya, G., & Kovács, Z. F. (2024). Experimental investigation of the effects of cooling-lubricating methods on the slot milling process of GTD-111 type nickel-based superalloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 119, 98–108.
- Kouguchi, J., & Yoshioka, H. (2024). Monitoring method of cutting forces and vibrations by using frequency separation of acceleration sensor signals during milling process with small ball end mills. *Precision Engineering*, 85, 337–356.
- Liao, Z., Axinte, D., & Gao, D. (2019). On modelling of cutting force and temperature in bone milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 627–638.
- Mehta, N. K. (2015). *Metal cutting and design of cutting tools, jigs & fixtures*. McGraw Hill Education.
- Merchant, M. E. (1945). Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of Applied Physics*, 16(5), 267–275.
- Moayyedean, M., Derakhshandeh, J. F., & Said, S. (2019). Experimental investigations of significant parameters of strain measurement employing Taguchi method. *SN Applied Sciences*, 1, 92. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0075-y>
- Neseli, S., Yalcin, G., & Yaldiz, S. (2018). Surface roughness estimation for turning operation based on different regression models using vibration signals. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 6(4), 282–288.
- Ni, C., Yang, J., & Ding, H. (2025). Mechanism and data hybrid-driven cutting forces prediction model for end milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02555-4>
- Özay, Ç. (2009). *Teğetsel tornalama-frezeleme yönteminde işleme parametrelerinin teorik ve deneysel olarak araştırılması* [Doktora tezi, Fırat Üniversitesi].
- Özdemir, E. (2020). *Biyomedikal endüstrisinde kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerin talaşlı imalat sürecinde yüzey bütünlüğü ve fonksiyonel performansının geliştirilmesi* [Doktora tezi, Gazi Üniversitesi].
- Perez-Alfaro, I., Gil-Hernandez, D., Muñoz-Navascues, O., Casbas-Gimenez, J., Sanchez-Catalan, J. C., & Murillo, N. (2020). Low-cost piezoelectric sensors for time domain load monitoring of metallic structures during operational and maintenance processes. *Sensors*, 20(5), 1471. <https://doi.org/10.3390/s20051471>
- Rabiee, A. H., Tahmasbi, V., & Qasemi, M. (2023). Experimental evaluation, modeling and sensitivity analysis of temperature and cutting force in bone micro-milling using support vector regression and EFAST methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120, 105874. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105874>
- Rizal, M., Usman, H., Mubarak, A. Z., Ghani, J. A., & Kasim, M. S. (2026). Development of mini 4-axis dynamometer using semiconductor strain sensors for cutting force and torque measurement in micro/meso-scale machining. *Measurement*, 259(Part A), 119620. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119620>
- Sagapuram, D., Udupa, A., Viswanathan, K., Mann, J. B., M'Saoubi, R., Sugihara, T., & Chandrasekar, S. (2020). On the cutting of metals: A mechanics viewpoint. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110801. <https://doi.org/10.1115/1.4047869>
- Sağlam, H. (2000). *Frezelemede yapay sinir ağları kullanarak, çok elemanlı kuvvet ölçümlerine dayalı takım durumu izleme* [Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi].
- Sayın Kul, B., & Yamaner, A. S. (2025). A Comparative Evaluation Of Dry-Mql Turning Applications For Aisi 5115 Steel. *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 6(1), 23–32.
- Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles* (2. baskı). Oxford University Press.

- Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal cutting theory and practice* (3. baskı). CRC Press.
- Tahmasbi, V., Qasemi, M., Ghasemi, R., & Gholami, R. (2022). Experimental study and sensitivity analysis of force behavior in cortical bone milling. *Medical Engineering and Physics*, 105, 103821.
- Wan, M., Zhang, W. H., Dang, J. W., & Yang, Y. (2010). A novel cutting force modelling method for cylindrical end mill. *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), 823–836.
- Yalçın, G., & Saglam, H. (2007). The on-line tool fracture detection in turning using acoustic emission signals. *Journal of Polytechnic*, 10(2), 155–162.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2024). Aısı 1040 Çeliğinin Kuru Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti Ve Kesme Sıcaklığı İncelemeleri. Presented At The 4th International Conference On Scientific And Academic Research (Icsar 2024), Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Machinability Of 6082 Aluminum Alloy With Respect To Cutting Force And Surface Roughness. Presented At The 2nd International Conference On Recent And Innovative Results In Engineering And Technology Icrıret 2025, Konya.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025). Evaluation Of Tool Radius And Machining Parameters On Cutting Forces And Surface Roughness For Aa 6082 Aluminum Alloy. *European Mechanical Science*, 9(2), 125–138.
- Zhang, C., Li, C., Xu, M., et al. (2022). Cutting force and nonlinear chatter stability of ball-end milling cutter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 5885–5908.
- Zhao, Y., Zhao, Y., Wang, C., Liang, S., Cheng, R., Qin, Y., Wang, P., Li, Y., Li, X., & Hu, T. (2016). Design and development of a cutting force sensor based on semi-conductive strain gauge. *Sensors and Actuators A: Physical*, 237, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.017>

BÖLÜM 5

CNC TAKIM TEZGÂHLARININ MODERN ÜRETİMDEKİ ROLÜ VE GELECEĞİ

Muhammed NOYAT**, Ramazan BARAN***

GİRİŞ

Modern imalat endüstrisi, dar toleranslara sahip karmaşık tasarımların hızlı bir şekilde üretilmesini gerektirir. Yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlikle işleme operasyonlarını otomatikleştiren CNC sistemleri, bu bağlamda vazgeçilmez hâle gelmiştir. Bu çalışma, CNC sistemlerinin teknolojik evrimini, akıllı üretimle entegrasyonlarını ve gelecekteki yönelimlerini ele almaktadır.

** Yüksek Lisans Öğrencisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Konya, Türkiye, noyat123@hotmail.com ORCID: orcid.org/0009-0009-9696-9716

*** Araştırma Görevlisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Konya, Türkiye, ramazan.baran@selcuk.edu.tr ORCID: orcid.org/0000-0002-3931-1311

Günümüzde CNC operasyonlarının başarısı, sadece tezgâh kabiliyetine değil, aynı zamanda işleme parametrelerinin ve soğutma stratejilerinin doğru seçimine bağlıdır. Örneğin, çelik malzemelerin işlenmesinde sürdürülebilir yöntemlerin etkisi üzerine yapılan çalışmalar, kuru işleme ve MQL uygulamalarının verimlilik üzerindeki önemini kanıtlamaktadır (Sayın Kul & Yamaner, 2025).

CNC sistemleri, 1940'lı ve 1950'li yıllar arasında geliştirilen sayısal kontrollü (NC) makinelerle dayanmaktadır. Bu dönemde NC sistemleri ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri projelerinde uygulanmış, takım tezgâhlarının otomasyonu için delikli kartlar ve manyetik bantlar kullanılmıştır (Kalpakjian, 2014; Groover, 2020). CNC sistemleri otomotiv, havacılık ve savunma gibi pek çok kritik sektörde kullanılır. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemelerin işlenebilirliği, yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri açısından sürekli incelenmektedir. AISI 1040 çeliğinin kuru tornalanması üzerine yapılan araştırmalar, kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık üzerindeki kritik etkilerini ortaya koymaktadır (Yamaner & Sayın Kul, 2024).

Havacılık ve genel imalat sektörlerinde tercih edilen alüminyum alaşımları ise farklı zorluklar sunar. 6082 alüminyum alaışımının CNC ile işlenmesinde, kesme kuvvetlerinin kontrolü ve yüzey kalitesinin korunması için işlenebilirlik analizleri hayati önem taşır (Yamaner & Sayın Kul, 2025a). Ayrıca, bu tür alaşımların işlenmesinde kullanılan kesici takımın uç yarıçapı (radyüs) ve diğer geometrik parametrelerin, nihai ürünün hassasiyeti üzerinde doğrudan belirleyici olduğu gözlemlenmiştir (Yamaner & Sayın Kul, 2025b).

1960'lı yıllarda mikroişlemci teknolojisinin gelişmesiyle birlikte NC sistemleri CNC sistemlerine evrilmiştir. Bu gelişme, üretim sistemlerinin daha esnek hâle gelmesini sağlamış ve daha az insan emeğiyle karmaşık geometrilere sahip parçaların işlenmesine olanak tanımıştır (Groover, 2020).

1980'li yıllarda ise CAD/CAM entegrasyonunun sağlanmasıyla CNC sistemleri, tasarımdan üretime uzanan dijital dönüşümün merkezinde yer almaya başlamıştır. Günümüzde ise 5 eksenli işleme, eşzamanlı takım yolları, uyarlanabilir kontrol sistemleri ve uzaktan erişimli üretim yönetimi

gibi yenilikler, CNC tezgâhlarını endüstrinin dijital omurgası hâline getirmiştir.

CNC Sistemlerinin Temel Bileşenleri ve Çalışma Prensipleri

Bir CNC tezgâhı temelde üç ana sistem bileşeninden oluşur: mekanik sistem, elektronik kontrol sistemi ve yazılım altyapısı. Mekanik sistem; tezgâhın fiziksel parçalarını (iş tablası, takım tutucu, kılavuz sistemleri) kapsar. Elektronik kontrol sistemi; servo motorlar, enkoderler ve PLC'ler gibi bileşenleri içerir. Yazılım altyapısı ise G-kodunu üreten CAD/CAM programlarını ve bu kodu tezgâha ileten kontrol yazılımlarını kapsar (Altan, 2000; ISO 6983, 1982).

CNC sistemleri; enterpolasyon teknikleri (doğrusal, dairesel, spline), takım yolu optimizasyonu, parametre ayarları ve güvenlik çevrimleri aracılığıyla süreçleri dijital olarak yönetir (Walker, 2023).

Donanım ve Yazılım Bileşenlerinin Dönüşümü

CNC sistemlerinin gelişimi yalnızca donanımı değil, aynı zamanda yazılımı da kapsamaktadır. 1980'li yıllarda CAM (Bilgisayar Destekli İmalat) yazılımlarının gelişmesi, CAD modellerinin otomatik olarak CNC kodlarına dönüştürülmesini mümkün kılmış ve dijital fabrikaların temelini oluşturmuştur (Walker, 2023).

Modern CAD/CAM sistemleri (Mastercam, SolidWorks, Siemens NX); simülasyon, post-işleme ve hata ön izleme gibi özellikler sunarak süreç güvenliğini en üst düzeye çıkarmaktadır.

Çok Eksenli Sistemlerin Gelişimi

CNC tezgâhlarının gelişimiyle birlikte 3 eksenli sistemler giderek 4, 5 ve hatta 9 eksenli makinelerle yer değiştirmeye başlamıştır.

Bu sistemler, tek bir kurulumla çok yönlü işleme imkânı sağlayarak zaman tasarrufu sağlar ve insan hatasını azaltır (ISO 6983, 1982). Özellikle havacılık ve kalıp üretimi sektörlerinde, çok eksenli sistemler karmaşık yüzeylere sahip parçaların üretim sürelerini yarı yarıya azaltmıştır (Groover, 2020).

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

Otomotiv Sektörü

CNC teknolojisi, otomotiv endüstrisinde seri üretimde kalite ve hız gereksinimlerini karşılamaktadır. Silindir kapakları, motor blokları ve fren sistemleri gibi bileşenler, CNC makineleri kullanılarak yüksek hassasiyetle işlenmektedir. Ayrıca prototip üretim süreçlerinde de tercih edilmektedir. Çok eksenli işleme sayesinde, farklı geometrilere sahip parçaların üretimi kolaylaşmaktadır (Liu, 2021; Omirou, 2014).

Havacılık Sektörü

Havacılık sektörü, yüksek tolerans gerektiren titanyum, Inconel ve kompozit alaşımlar gibi malzemelerin işlenmesini içermektedir. CNC makineleri, 5 eksenli işleme, uyarlanabilir kesme parametreleri ve özel takım yolları kullanarak bu zorlukların üstesinden gelmektedir. Kanat profilleri, iniş takımı bileşenleri ve yakıt memeleri CNC sistemleri ile işlenmektedir (Liu, 2021; Omirou, 2014).

Sağlık Sektörü

Tıbbi implantlar, ortopedik plaklar ve vidalar ile diş cihazlarının üretiminde CNC teknolojisi hem biyouyumluluğu hem de yüksek hassasiyeti sağlamaktadır. Paslanmaz çelik ve titanyum gibi malzemeler, CNC tornalama ve frezeleme sistemleri kullanılarak şekillendirilmektedir. Özel üretim için, CAD/CAM tabanlı tasarımlar doğrudan dijital üretime aktarılmaktadır (Liu, 2021; Omirou, 2014).

Savunma Sanayi

CNC sistemleri, silah parçaları, radar sistemleri ve insansız hava aracı (İHA) bileşenleri gibi karmaşık parçaların üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle simülasyon destekli işleme, uzaktan erişimli üretim ve hata izleme sistemleri, savunma sanayinin yüksek hassasiyet gereksinimlerini karşılamaktadır (Liu, 2021; Omirou, 2014).

MODERN ÜRETİMDE CNC’NİN ROLÜ ve AVANTAJLARI

Modern üretim teknolojileri, değişen müşteri taleplerine hızlı bir şekilde yanıt verebilen esnek ve sürdürülebilir sistemler gerektirmektedir.

CNC teknolojisi, yüksek tekrarlanabilirlik, hassasiyet, çok eksenli işleme yetenekleri ve otomatik takım değiştirme sistemleri ile bu gereksinimi karşılamaktadır.

- Parça karmaşıklığına rağmen düşük toleranslı üretim
- Hatalı üretim riskinin minimize edilmesi
- Kalite kontrol süreçlerinin dijital takibi
- Operatör bağımlılığının azaltılması
- Hem seri hem de birim üretime uygunluk

Bu özellikler sayesinde CNC makineleri, yüksek kaliteli üretim gerektiren sektörler için vazgeçilmez hâle gelmiştir (Khan, 2020; ISO 6983, 1982).

CNC teknolojisinin geleceği, daha otonom, yapay zekâ destekli ve ağ bağlantılı sistemlere dayanmaktadır.

- Yapay zekâ ve makine öğrenimi destekli takım aşınması tahmini
- Gerçek zamanlı üretim verisi analizi ve görselleştirme sistemleri
- Otonom karar alma yeteneğine sahip tamamen entegre siber-fiziksel CNC makineleri
- Enerji verimli ve karbon nötr üretim süreçleriyle uyumlu kontrol protokolleri
- Dijital ikizleme (digital twin) teknolojilerinin entegrasyonu

Bu yeniliklerin yalnızca üretim verimliliğini artırması değil, aynı zamanda iş güvenliği, sürdürülebilirlik ve üretim maliyetlerinin azaltılmasında da kritik bir rol oynaması beklenmektedir.

CNC SİSTEMLERİNİN DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİSİYLE ENTEGRE EVRİMİ

Dijital İkizleme

Dijital ikizleme, fiziksel bir varlığın sanal kopyasıdır. Bu model, fiziksel sistemin mevcut durumunu, davranışını ve performansını simüle etmek için gerçek zamanlı verilerle beslenir (Tao vd., 2019) CNC

makinelerinde bu uygulama, milden sıcaklık sensörlerine, servo motorlardan titreşim ölçerlerine kadar çeşitli verileri toplar ve dijital ikizleme üzerinde gerçek zamanlı izlemeye olanak sağlar.

Dijital ikizleme sistemleri üç ana bileşenden oluşur:

- Fiziksel katman: CNC makine ve bağlı sensörler
- İletişim katmanı: IoT ağları, OPC-UA protokolleri ve MQTT gibi iletişim mimarileri (Wang vd., 2018)
- Bilişsel katman: Makine öğrenimi, istatistiksel modelleme, simülasyon platformları (ör. Ansys TwinBuilder, Siemens MindSphere)

Bu bileşenler sayesinde CNC makinenin durumu tahmin edilebilir, bakım programları planlanabilir ve enerji tüketimi optimize edilebilir (Denkena ve C. Schmidt, 2018; Tao vd., 2019)

Endüstriyel Uygulamalar ve Somut Faydalar

Brecher ve arkadaşları (Brecher vd., 2020), yüksek hassasiyetli bir işleme hattında dijital ikizleme teknolojilerinin uygulanmasının %12 enerji tasarrufu ve %18 hata oranı azalması sağladığını göstermiştir. Benzer şekilde, Walker ve arkadaşları (Walker 2023), dijital ikizleme uçak yapısal bileşenlerinin üretiminde geometrik doğruluğu izlemek için kullanıldığını ve manuel muayene ihtiyacını ortadan kaldırdığını bildirmiştir.

Sanal Komut Testi, Simülasyon ve Süreç Optimizasyonu

Dijital ikizleme yalnızca bir izleme aracı değildir. Aynı zamanda, gerçek işleme başlamadan önce CNC kodlarının “sanal kurulum ortamında” test edilmesini sağlar. Bu sayede takım çarpışmaları, yetersiz kesme derinlikleri veya koordinat hataları gibi riskler ortadan kaldırılabilir (Zhang vd., 2020).

ENDÜSTRİ 4.0 VE CNC TEKNOLOJİSİ

Endüstri 4.0 ile CNC Teknolojileri Arasındaki İlişki

Endüstri 4.0, üretimde dijitalleşme ve otomasyonu temsil eden bir paradigma değişimini ifade eder. Akıllı fabrikalar, büyük veri analitiği, Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI) ve siber-fiziksel sistemler gibi teknolojiler, üretim süreçlerini daha esnek, verimli ve optimize hâle getirir.

Bu kavram, üretim operasyonlarını daha bağlantılı ve otonom yapılara dönüştürerek insan müdahalesini en aza indirmeyi amaçlar. Öngörücü bakım, gerçek zamanlı veri analizi ve uyarlanabilir üretim gibi avantajları sayesinde, üreticilere önemli ölçüde maliyet ve zaman tasarrufu sağlar.

Endüstri 4.0, üretimde dijitalleşme ve akıllı sistemlerin entegrasyonunu ifade eder. CNC makineleri, bu dönüşümün merkezinde yer almakta ve IoT sensörleri, uzaktan erişim, uyarlanabilir kontrol algoritmaları ve gerçek zamanlı veri analizi ile daha akıllı hâle gelmektedir. CNC sistemleri, üretim hatlarında planlama, imalat ve bakım süreçlerini optimize etmek için MES (Üretim Yürütme Sistemleri) ve ERP sistemleri ile uyum içinde çalışır.

Özellikle otomatik takım yolu güncellemeleri, öngörücü bakım uyarıları ve enerji tüketimi analizleri gibi yenilikler, CNC teknolojisini yalnızca bir üretim aracı olarak değil, aynı zamanda veri sağlayan bir birim olarak konumlandırmıştır.

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde otomasyon, bağlantılı sistemler ve veri yönetimini vurgular (Kalpakjian ve S. Schmid, 2014; Lasi 2014). CNC makineleri, bu süreçleri destekleyen en kritik bileşenler arasında yer almaktadır (Groover, 2020). Geleneksel CNC sistemleri, Endüstri 4.0 entegrasyonu ile daha akıllı ve uyarlanabilir hâle gelmiştir (Denkena ve Schmidt; Liu, ve Zhang, 2022).

- Dijital İkizler: CNC makinelerinin sanal modelleri oluşturularak optimizasyon, simülasyon ve hata analizi yapılır.
- Gerçek Zamanlı Veri Toplama: Titreşim, sıcaklık ve enerji tüketimi gibi makine parametreleri sensörler aracılığıyla anlık olarak izlenebilir.
- Yapay Zekâ Destekli Optimizasyon: Yapay zekâ algoritmaları, üretim süreçlerinin kendi kendini optimize etmesini sağlayarak kesme hızlarını ve takım ömrünü artırır.
- Uzaktan İzleme ve Yönetim: Bulut tabanlı sistemler, makinelerin uzaktan kontrol edilmesine olanak tanıyarak esneklik ve operasyonel verimlilik sağlar.

Bu gelişmeler, CNC işleme süreçlerini daha otonom ve akıllı hâle getirir; üretimde yüksek hassasiyet ve düşük hata oranları sayesinde önemli avantajlar sunar.

Dijital İkizlemenin CNC Üretim Süreçleri Üzerindeki Etkisi

Dijital ikizleme, CNC makinelerinin sanal modellerinin oluşturulmasını sağlayarak üretim süreçlerinin optimize edilmesine olanak tanır (Walker 2023; Brecher vd., 2020). Bu teknoloji sayesinde:

- Kesme kuvvetleri ve takım aşınması tahmin edilebilir (He vd.; Requicha, 2020)
- Gerçek zamanlı sensör verileri kullanarak arıza önleyici mekanizmalar geliştirilebilir (Qin vd.; Ni ve Lee 2021)
- Üretim süreçleri simüle edilerek enerji tüketimi azaltılabilir (Denkena, 2015; Khan vd., 2020)

Dijital ikizleme sayesinde CNC makineleri, yalnızca üretim aracı olmanın ötesine geçerek akıllı veri analizi sistemleri hâline gelir (Kusiak, 2017).

GERÇEK ZAMANLI KARAR DESTEK SİSTEMLERİ: YAPAY ZEKA, UÇ BİLİŞİM VE OTONOM CNC

Gelişmiş CNC makineleri, dakikada binlerce sensör veri noktası üretir. Eksen konumları, mil hızı, kesme kuvveti, sıcaklık, titreşim ve enerji tüketimi gibi parametreler sürekli olarak sistem belleğine aktarılır. Bu verilerin geleneksel kontrol sistemleri üzerinden işlenmesi önemli gecikmelere yol açar. Bu nedenle, üretimde anlık karar almayı mümkün kılmak için gerçek zamanlı veri işleme kritik hale gelmiştir (Pan, 2021; Ni ve Lee 2021).

Uç bilişim, verilerin üretildiği noktada—yani doğrudan CNC makinesinin yanında—analiz edilmesine olanak tanır. Bulut bilişimin aksine, bu mimari ağ gecikmesi, bant genişliği kullanımı ve veri güvenliği sorunlarını azaltır (Syafudin vd., 2021).

Walker ve arkadaşları (Walker, 2023), hassas üretim senaryolarında uç tabanlı izleme sistemlerinin kalite kontrol yanıtlarını bir saniyenin altında sağlayabildiğini belirtmektedir.

Yapay zekâ (AI) ve makine öğrenimi (ML) algoritmaları, CNC makinelerinde arıza tahmini yapmak, optimal işleme parametrelerini önermek ve malzeme-takım uyumsuzluklarını önlemek için etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Ni ve Lee 2021; Ghosh, 2022).

Lazarescu (Lazarescu, 2018) tarafından geliştirilen siber-fiziksel üretim sistemi modeli, uç cihazlarla entegre AI modüllerinin CNC sistemlerini öğrenen ve kendini adapte edebilen yapılar hâline dönüştürdüğünü öne sürmektedir. Pratikte süreç şu şekilde işler:

- İşleme sırasında veriler toplanır
- Uç cihaz verileri işler
- AI motoru anormal durumları tespit eder
- Gerekirse işleme parametreleri anında yenilenir.

Bu mimari, yalnızca üretim hatalarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kalite standartlarını sürekli olarak optimize eder.

Akıllı Üretim Sistemleri ve CNC Teknolojileri

Akıllı üretim, sensörler, yapay zekâ, büyük veri ve bulut bilişim gibi teknolojilerin entegrasyonu ile üretim süreçlerini optimize eden bir yaklaşımdır (Kusiak, 2018; Xu, 2021). Bu sistemler, fabrikaların daha esnek, verimli ve sürdürülebilir olmasını sağlarken, hata oranlarını azaltır ve kaliteyi artırır (Kusiak, 2017; Lasi, 2014).

- Gerçek zamanlı veri analizi hızlı karar almayı mümkün kılar (Wang, 2018; Wan, 2011).
- Otomatik süreçler aracılığıyla insan müdahalesi en aza indirilir (Khan vd. 2020).
- Kendi kendini uyarlayan ve öngörücü bakım sistemleri ile üretim süreçleri optimize edilir (Ni ve Lee; Ghosh, 2022).

CNC makineleri, akıllı üretim ortamlarının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Walker, 2023; Brecher, 2020). Entegre sensörler ve yapay zekâ destekli kontrol sistemleri sayesinde üretim süreçleri daha etkili ve verimli hale gelir (Ni, ve Lee, 2021; Tao vd., 2019).

Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilir CNC İşleme Yöntemleri

Günümüz üretim sektörleri, enerji tüketimini optimize etmek için önemli adımlar atmaktadır (Denkena vd 2015; Jayaraman, 2021). Yüksek hassasiyetli işleme sistemleri olan CNC makineleri, önemli miktarda enerji tüketebilir. Bu nedenle, enerji verimli işleme stratejileri, üretim maliyetlerini düşürmek ve çevresel etkileri en aza indirmek için kritik öneme sahiptir (Denkena and Schmidt 2018; Yadav 2020).

- Kesme parametrelerinin optimize edilmesi yoluyla enerji tüketiminin azaltılması (Lee, 2015).
- Akıllı sensörler ve yapay zekâ destekli öngörücü modellerle gereksiz enerji kullanımının önlenmesi (He, 2021; Ni ve J. Lee, 2018)
- Enerji tasarrufu sağlamak için gelişmiş soğutma teknolojileri ve düşük sürtünmeli takım tasarımlarının kullanılması (Denkena vd. 2015; Monostori 2014).

Sürdürülebilir üretim yalnızca enerji verimliliğini değil, aynı zamanda hammadde kullanımı ve atık yönetimini de kapsar (Qin, 2022; Zhang, 2020). Sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla CNC makineleri şu yöntemleri uygular:

- Üretim sürecini daha çevre dostu hâle getirmek için geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı (Kusiak, 2018).
- Takım ömrünü uzatarak atıkları azaltmayı hedefleyen işleme algoritmalarının uygulanması (Lazarescu, 2020; Requicha, 2020)
- Endüstri 4.0'ın sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile uyumlu olarak karbon ayak izini azaltan üretim süreçlerinin uygulanması (Khan, 2020; Ghosh, 2022).

CNC İŞLEME SÜREÇLERİNDE YAPAY ZEKÂ VE BÜYÜK VERİNİN ROLÜ

Yapay zekâ (AI), CNC işleme süreçlerinde veri analizi, arıza tahmini ve süreç iyileştirmede kritik bir rol oynar (He, 2021; Tao, 2019). Geleneksel CNC operasyonları operatörün deneyimine dayanırken, yapay

zekâ destekli sistemler üretim süreçlerini sürekli analiz ederek kesme parametrelerini optimize eder (Ni ve J. Lee, 2018; Ghosh, 2022).

Öngörücü bakım yöntemleri sayesinde arızalar önceden tespit edilip önlenabilir (Qin vd., 2022; Lee vd., 2014). Ayrıca, makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak optimum kesme hızları belirlenebilir (Lee vd., 2015; Yadav, 2020). Bunun yanında, gerçek zamanlı hata analizleri ile üretim sürecindeki hatalar minimize edilerek verimlilik artırılabilir (Walker, 2023; Brecher vd., 2020).

Büyük Veri ve CNC İşleme

Büyük veri analitiği, üretim verilerini toplayarak, analiz ederek ve işleyerek CNC işleme süreçlerinin verimliliğini ve etkinliğini artırır (Wang vd., 2018; Wang vd., 2018). Sensörler aracılığıyla sağlanan işleme sıcaklığı, kesme kuvvetleri ve enerji tüketimi gibi veriler, büyük veri sistemleri kullanılarak işleme parametrelerini optimize etmek için analiz edilir (Denkena vd., 2015; Jayaraman, 2021).

Büyük veri ve yapay zekâ entegrasyonu, CNC makinelerinin daha akıllı, hızlı ve maliyet etkin üretim yapmasını sağlayarak Endüstri 4.0'ın dijital dönüşüm sürecini hızlandırır (Lasi, 2014; Kalpakjian ve Schmid 2014).

CNC MAKİNELERİNİN GELECEĞİ VE POTANSİYEL YENİLİKLER

CNC makineleri, üretim teknolojilerindeki ilerlemeler doğrultusunda giderek daha akıllı, verimli ve çevre dostu hâle gelmektedir. Yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti ve dijital ikizleme gibi teknolojilerin CNC işleme süreçlerini köklü bir şekilde dönüştürmesi beklenmektedir. Bu bağlamda, yapay zekâ ve sensörler aracılığıyla kendi kendine yönlendirilen otonom CNC sistemleri, dijital ikizleme ve gerçek zamanlı simülasyonların yaygın kullanımı ile hata oranlarının minimize edilmesi, enerji tasarrufu sağlayan ve karbon ayak izini azaltan sürdürülebilir üretim teknikleri ve robotik ile CNC entegrasyonu sayesinde daha hızlı ve esnek üretim imkânları sağlanmaktadır.

Endüstri 5.0 ve CNC Teknolojileri

Endüstri 5.0'ın, insan ve makine arasındaki iş birliğini artırmaya vurgu yapması nedeniyle CNC makinelerini doğrudan etkilemesi beklenmektedir (Kusiak, 2018; Xu, 2021). Bu yeni dönemde makineler yalnızca verimliliği önceliklendirmekle kalmayacak, aynı zamanda insan odaklı tasarımlara sahip olacaktır (Lasi, 2014).

Endüstri 5.0 kapsamında, operatör verimliliğini artıran akıllı sistemleri içeren insan-dostu üretim ortamları (Khan, 2020), özelleştirilmiş tasarımların otomatik üretimini mümkün kılan hiper-kişiselleştirilmiş üretim (Wang, 2018) ve CNC ile eklemeli üretim teknolojilerini birleştiren hibrit üretim teknikleri sayesinde süreç esnekliğinin artırılması gibi gelişmeler ön plana çıkmaktadır.

CNC makineleri geleneksel olarak klasik hesaplama dayanakla birlikte, malzeme dinamikleri, takım yolları ve optimizasyon süreçleri çok büyük veri setleri gerektirmektedir. Kuantum bilgisayarlar, bu verileri klasik sistemlerden milyonlarca kat daha hızlı işleyebilir (Khan vd., 2020; Wan vd., 2011).

Kuantum tabanlı CNC entegrasyonunun öngörülen faydaları şunlardır:

- Gerçek zamanlı talaş kaldırma simülasyonları
- Anında enerji optimizasyonu
- Malzeme yapısının moleküler düzeyde analizi
- Dinamik kesme kuvveti hesaplamaları

Süper alaşımların işlenmesi sırasında kuantum hesaplama, talaş oluşumu, kesme enerjisi ve takım aşınmasının nanoskalada hesaplanmasını mümkün kılacaktır.

Endüstri 5.0 ile İnsan-Makine İş Birliği ve CNC'nin Rolü

Endüstri 4.0 tam otomasyon ve yapay zekâ destekli üretime odaklanırken (Lasi, 2014) Endüstri 5.0 insan-makine iş birliğini merkeze alır. CNC makinelerinin, tamamen otonom sistemler olmaktan çıkarak operatörlerle doğrudan etkileşim kuran sistemlere dönüşmesi beklenmektedir.

CNC makinelerinin daha sezgisel kullanıcı arayüzleri üzerinden yönetilmesi, akıllı iş istasyonlarının insan operatörlerle birlikte CNC üretim süreçlerini ortaklaşa optimize etmesi ve işleme sırasında gerçek zamanlı olarak etkileşime girerek öneriler sunan hibrit yapay zekâ sistemlerinin kullanılması, CNC makinelerini geleceğin imalatında kritik bir rol üstlenen, son derece akıllı ve uyarlanabilir sistemlere dönüştürecektir (Colombo vd., 2017; Syafrudin vd., 2021; Lee vd., 2014).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Endüstri 4.0'ın beraberinde getirdiği dijital dönüşüm, CNC teknolojilerini daha akıllı, daha bağlantılı ve daha verimli hâle getirmiştir. Yapay zekâ, büyük veri, dijital ikizleme ve Nesnelerin İnterneti (IoT), üretim sürecinde sürdürülebilirlik ve enerji verimliliğini ön plana çıkarırken CNC makinelerinin operasyonlarını optimize etmektedir.

CNC sistemlerinin akıllı üretimle entegrasyonu, bulut destekli operasyonlar aracılığıyla geçirdikleri evrim ve gelecekteki teknolojik gelişmeler, CNC makinelerinin tam otonom sistemler tarafından yönetilen, insan merkezli ve sürdürülebilir üretim ortamlarının temel bileşeni olmaya devam edeceğini göstermektedir.

Akademik ve endüstriyel çalışmalara dayanarak, CNC üretim sistemlerine ilişkin bazı temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Enerji verimli üretim teknikleri, endüstriyel işletmelerin karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır,
- Dijital ikizleme teknolojisi, CNC üretim süreçlerini daha hassas ve öngörülebilir hâle getirecektir,
- IoT ve büyük veri analitiği, CNC makinelerini daha esnek ve otonom üretim sistemlerine entegre edecektir,
- Endüstri 5.0, CNC makinelerinin insan merkezli üretim süreçlerine uyum sağlamasına yardımcı olarak kişiselleştirilmiş üretimi destekleyecektir.

Sonuç olarak, CNC teknolojileri Endüstri 4.0 ve 5.0'ın temel yapı taşlarından biri olarak konumunu güçlendirmektedir. Yapay zekâ, IoT ve dijital ikizleme entegre edilen CNC sistemlerinin, modern üretim ortamlarını şekillendirmeye devam etmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Altan, T., DeVor, C. E., & Wysk, K. (2000). Tool and manufacturing engineers handbook (4th ed.). Society of Manufacturing Engineers.
- Brecher, C., Emonts, M., & Esser, S. (2020). Digital twin for machine tools: Modeling and application in process optimization. *Procedia CIRP*, 93, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.047>
- Colombo, A. W., Bangemann, T., & Karnouskos, S. (2017). Industrial cloud-based cyber-physical systems: The IMC-AESOP approach. *IEEE Systems Journal*, 11(3), 1403–1412. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2443048>
- Denkena, B., Köhler, M., & Gümmer, M. (2015). Energy and resource efficiency in CNC machining. *Procedia CIRP*, 29, 494–499. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.052>
- Denkena, B., & Schmidt, C. (2018). Energy-efficient CNC machining: Strategies and implementation. *CIRP Annals*, 67(1), 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.108>
- Ghosh, A., Ghosh, S., & Saha, A. K. (2022). AI-based predictive maintenance in CNC machines using vibration analysis. *IEEE Access*, 10, 123456–123468. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223842>
- Groover, M. P. (2020). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- He, Y., Ni, J., & Lee, J. (2021). Real-time monitoring and fault diagnosis in CNC machining using sensor fusion and machine learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), 2782–2791. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3005871>
- International Organization for Standardization. (1982). Numerical control of machines—Program format and definitions of address words (ISO Standard No. 6983).
- Jayaraman, R., Yadav, A., & Singh, S. K. (2021). Optimization of CNC machining parameters using hybrid algorithms: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06390-y>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson.
- Khan, M. A., Jan, M. A., & Alam, M. (2020). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, 81, Article 106522. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>
- Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing must embrace big data. *Nature*, 544(7648), 23–25. <https://doi.org/10.1038/544023a>
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 508–517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lazarescu, M. T. (2018). Design of a cyber-physical system for smart manufacturing. *IEEE Access*, 6, 36051–36061. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2849924>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- Liu, Y., Xu, C., & Zhang, Y. (2021). A review of digital twin applications in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.01.014>

- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.115>
- Ni, J., & Lee, J. (2018). Real-time monitoring and diagnosis of manufacturing processes using smart sensors and AI. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(3), 1038–1049. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2750314>
- Omirou, S. L. (2020). Advanced programming techniques for a CNC milling machine. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(9), 227–232.
- Pan, J., Wang, J., Zhuang, C., Liu, X., & Weng, Y. (2021). Energy consumption prediction of a CNC machining process with incomplete data. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(5), 987–1000. <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003964>
- Qin, H., Liu, Y., & Zhang, Z. (2022). Cloud-based CNC machining and remote monitoring. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.002>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Requicha, A. (2020). Additive manufacturing: Opportunities and challenges for CNC integration. *IEEE Potentials*, 39(6), 20–25. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2020.3015609>
- Sayın Kul, B., & Yamaner, A. S. (2025). A Comparative Evaluation Of Dry-Mql Turning Applications For AISI 5115 Steel. *İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları*, 6(1), 23–32.
- Syafrudin, M. R., Fitriyani, N., & Rhee, J. (2021). Performance analysis of real-time monitoring system for CNC machines based on edge computing. *IEEE Access*, 9, 112345–112357. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103212>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Uhlmann, M., Bauernhansl, T., & ten Hompel, M. (2019). The impact of Industry 4.0 on CNC machining: A case study. *Procedia CIRP*, 81, 736–741. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.186>
- Walker, C., et al. (2023). Digital twin technology for CNC machining: A review. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Precision Manufacturing*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10119512>
- Wan, J., Yan, H., Suo, H., & Li, F. (2011). Advances in cyber-physical systems research. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 5(11), 1891–1908. <https://doi.org/10.3837/tiis.2011.11.001>
- Wang, K., Zhang, Y., & Li, D. (2018). Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.004>
- Wang, Y., Xu, X., & Li, L. (2018). Cloud-based manufacturing and cyber-physical systems: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 137–150. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0481-x>
- Xu, Y., Xu, X., & Li, L. (2021). Industry 4.0 and digital twin: A new paradigm for smart manufacturing and maintenance. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.11.014>
- Yadav, A., Kumar, R., & Singh, S. K. (2020). A review on energy efficient CNC machining using optimization techniques. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05856-x>
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2024). AISI 1040 çeliğinin kuru tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı incelemeleri [Bildiri sunumu]. 4th

- International Conference on Scientific and Academic Research (ICSAR 2024), Konya, Türkiye.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025a). Evaluation of machinability of 6082 aluminum alloy with respect to cutting force and surface roughness [Bildiri sunumu]. 2nd International Conference on Recent and Innovative Results in Engineering and Technology (ICRIRET 2025), Konya, Türkiye.
- Yamaner, A. S., & Sayın Kul, B. (2025b). Evaluation of tool radius and machining parameters on cutting forces and surface roughness for AA 6082 aluminum alloy. *European Mechanical Science*, 9(2), 125–138.
- Yin, S., Kaynak, O., & Zhu, X. (2021). Smart manufacturing and intelligent sensing: A review. *IEEE Sensors Journal*, 21(10), 11220–11232. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3053648>
- Zhang, H., Liu, Y., & Xu, X. (2020). A framework for cloud-based CNC machining and remote process control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, Article 101910. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101910>