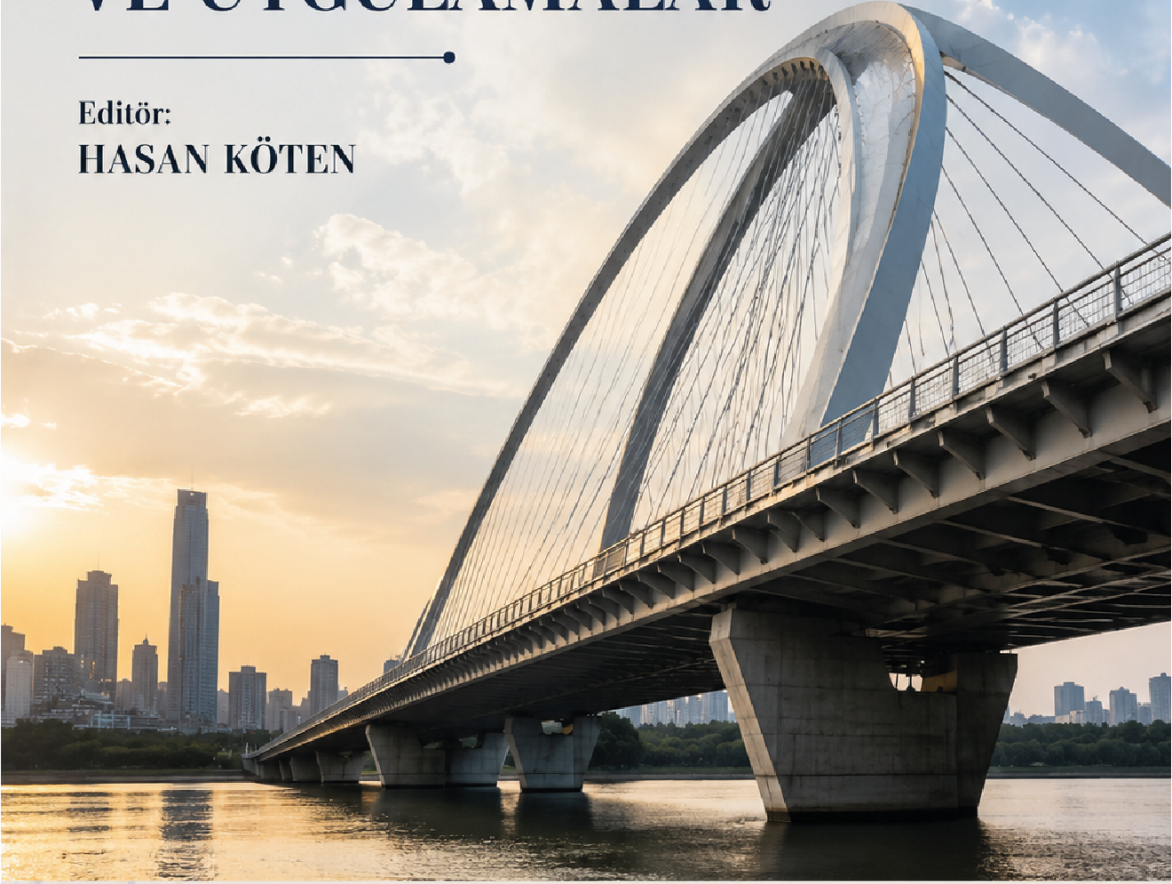


MÜHENDİSLİKTE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE UYGULAMALAR

Editör:
HASAN KÖTEN



BİDGE Yayınları

Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar ve Uygulamalar

Editör: HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-8821-05-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-06-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

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

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



İÇİNDEKİLER

BORİK ASİT KATKILI POLİPROPİLEN KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ETKİSİ	1
<i>RAHMİ KESKİNOĞLU, MEHMET ÇAĞRI TÜZEMEN, CEMAL ÇARBOĞA</i>	
OBJECTIVE PREDICTION OF DRIVER ANNOYANCE USING MULTI-DOMAIN VEHICLE PERFORMANCE INDICATORS	19
<i>KÜRŞAT ÇOBAN</i>	
UYDU SİSTEMLERİNDE SICAKLIK YÖNETİMİ	33
<i>KEMAL FURKAN SOKMEN, YUSUF TALHA ERASLAN</i>	
FREZELEMEDE ÇEKİÇ TESTİ	63
<i>ABDULMECİT GÜLDAŞ, ELVAN ATEŞ, HAKAN ZAFER KIZILKAYA</i>	

BÖLÜM 1

BORİK ASİT KATKILI POLİPROPİLEN KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ETKİSİ

RAHMİ KESKİNOĞLU¹
MEHMET ÇAĞRI TÜZEMEN²
CEMAL ÇARBOĞA³

Giriş

Polimer esaslı malzemeler, son kırk yılda geleneksel mühendislik malzemeleri olan metaller ve seramiklerle rekabet edebilen, hatta birçok uygulamada onları ikame eden bir konuma gelmiştir. Özellikle termoplastik polimerler; düşük yoğunlukları, kolay işlenebilirlikleri, kimyasal dirençleri ve maliyet açısından avantajlı olmaları nedeniyle otomotiv, beyaz eşya, ambalaj, elektrik-elektronik, tıbbi cihazlar ve inşaat sektöründe yoğun biçimde kullanılmaktadır (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004).

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0006-6883-3510

² Doç. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1746-2864

³ Prof. Dr., Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6781-4955

Polipropilen PP, rafine petrokimya ürünlerinden elde edilen propilen monomerinin polimerizasyonu ile üretilen yarı kristal bir polimerdir.

Üretim teknolojisinde özellikle Ziegler–Natta ve metallocen kataliz sistemlerinin gelişimi, PP'nin taktisitesinin (izotaktik, sindiyotaktik, ataktik) kontrol edilebilmesine ve böylece farklı özellik kombinasyonlarına sahip PP türlerinin üretilmesine imkân tanımıştır (Weidenfeller ve ark., 2004).

Termoplastikler içinde (PP), polietilenden sonra dünyada en çok üretilen ikinci polimerdir. PP; düşük yoğunluğu ($\sim 0,90 \text{ g/cm}^3$), iyi mekanik özellikleri, kimyasal ve elektriksel dayanımı ile çok amaçlı bir mühendislik plastikleri sınıfı oluşturmakta ve farklı katkılarla modifiye edilerek çok geniş performans aralıklarına taşınabilmektedir (Weidenfeller ve ark., 2004). PP'nin yüksek üretim hacmi, onu hem akademik çalışmalar için cazip bir model malzeme hem de endüstri için kritik bir ürün haline getirmektedir.

BA (H_3BO_3); Bor elementinin üç oksijen atomuyla birleştirilmesiyle meydana gelen, toksik etkisi olmayan, antimikrobiyal özelliği kanıtlanmış iyi bir antiseptik ajandır. Endüstride cam, seramik, tekstil, deterjan ve kozmetikte sıkça kullanılır. Ayrıca, cam üretiminde stabilizatör ve yangına dayanıklılığı artırıcı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Eti Maden, 2019; Kabu & Akosman, 2013; Nielsen, 2014). Polimer kompozit bağlamında borik asit ve diğer bor bileşikleri; Alev geciktirici katkı olarak, termal stabilite artırıcı olarak, bazı sistemlerde bariyer özelliklerini iyileştiren katkı olarak, çeşitli korozyon ve biyolojik etkiler üzerinde düzenleyici ajan olarak değerlendirilmiştir (Dibek vd., 2020; Dogane vd., 2022; Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; Kabu & Akosman, 2013; Nazarenko vd., 2016; Nielsen, 2014; Pehlivanlı, 2016, 2021; Svishcheva vd., 2021; Tian vd., 2022; Ünal vd., 2023). Bu bulgular,

BA'nın PP kompozitlerinde hem yapısal hem de fonksiyonel bir katkı olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Malzeme ve Yöntem

Çalışmanın amacı doğrultusunda tüm süreç; tekrarlanabilir, izlenebilir ve literatürle karşılaştırılabilir bir deneysel altyapı üzerine kurulmuştur. Kompozit malzemelerin hazırlanması, üretimi, plaka basımı ile uygulanan, reolojik ve fiziksel deneysel yöntemleri PETKİM polimer laboratuvarlarında yapılmıştır.

Kullanılan malzemeler

Polipropilen (PP); Matris malzeme olarak tercih edilen polipropilen (PP) nin içerisine; inorganik fonksiyonel dolgu borik asit (BA) eklenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan PP türü ticari MH418 sınıfıdır; tüm kompozisyonlar MH418 PP matrisi üzerinde tasarlanmış ve referans olarak Tablo 1. de mekanik, fiziksel ve reolojik özellikleri belirtilen katkısız MH418 PP dikkate alınmıştır. Çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan PP, ticari bir izotaktik homopolimeridir.

Tablo 1. Polipropilen PETOPLen MH418 özellikleri

ÜRETİCİ	PETKİM	TİCARİ KOD	MH418	FORM	GRANÜL
ÖZELLİKLER		TİPİK DEĞER	BİRİM	TEST METODU	
Erime Akış Hızı (230°C/2.16 kg)		4,9	g/10 min	ASTM D1238	
Yoğunluk		0,905	g/cm ³	ISO 1183-1	
Ergime Noktası (DSC, 2.ısıtma)		163	°C	ASTM D3418	
Akmada Gerilme Dayanımı		34	MPa	ASTM D638	
Bükülme Modülüsü, 23°C		1450	MPa	TS EN ISO 178	
Izod Darbe Dayanımı, 23°C (çentikli)		30	J/m	ASTM D256	
Rockwell Sertliği		94	R-scale	ASTM D785	
Deformasyon Sıcaklığı, 0.45 MPa		94	°C	ISO 75	

Bu çalışmada Şekil 1. de görüldüğü gibi granül halinde bulunan PP MH418, BA için taşıyıcı faz görevi görmekte ve kompozit sistemin ana sürekliliğini sağlamaktadır.

Şekil 1. Polipropilen (PP MH418)



Borik Asit (BA); Şekil 2. de görseli bulunan Tablo 2. de temel özellikleri belirtilen BA, çalışmada inorganik dolgu olarak kullanılmıştır (Svishcheva vd., 2021; Tian vd., 2022)

Şekil 2. Borik Asit (H_3BO_3)



Tablo 2. Kullanılan Borik Asit'in (H_3BO_3) Temel özellikleri

Kimyasal adı	Borik asit
Kimyasal formül	H_3BO_3
CAS Numarası	10043-35-3
Üretici	Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü
Safılık	\geq %99 (kütlesel)
Yoğunluk	\approx 1,435 g/cm ³
Ergime noktası	\sim 170–175 °C (su kaybı ile bozunma)
Partikül boyutu	$d_{50} \approx$ 10–50 μ m (elek analizi / üretici verisi)
Form	İnce kristal/pudra

Borik asit, ısıtıldığında kademeli su kaybı ile B_2O_3 benzeri cam fazına dönüşebilmekte, bu faz polimer yüzeyinde bariyer oluşumu sağlayarak alev geciktirici etki ortaya çıkarabilmektedir (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2019; Nazarenko vd., 2016; Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023). Aynı zamanda, parçacık yapısı ve yoğunluğu nedeniyle PP kompozitlerde sertliği artıran sert bir dolgu fazı olarak görev yapar (Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023).

Kompozit formülasyonlarının tasarımı

Referans malzeme (RM) olarak seçilen saf PP ve kompozit formülasyonlarının dolgu oranları Tablo 3. te ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada A1 formülasyonunda %1, B1 formülasyonunda %3 ve C1 formülasyonunda %5 oranlarında BA kullanılmıştır.

Tablo 3. Kompozit Formülasyonlarının dolgu oranları

NUMUNE KODU	PP	BA
RM	%100	-
A-1	%99	%1
B-1	%97	%3
C-1	%95	%5

Numune hazırlama

Numune hazırlama, hammaddelerin kurutulması, parçacık boyutlarının ayarlanması, ön karıştırma, ekstrüzyon ile ergitme-karıştırma, granülasyon ve pres yoluyla numune üretim adımlarını içermektedir. Tüm proses adımları, literatürde PP kompozitleri için önerilen sıcaklık ve süre aralıklarına uygun olarak belirlenmiştir (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004; Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023).

BA ve PP nispeten düşük nem alma özelliğine sahip olması, kurutma işleminin prosesin ilk adımı olarak tercih edilmesine neden olmuştur. Ekstrüzyon ve presleme sırasında nemin; gözenek oluşumu, yüzey hataları, fiziksel zayıflık yaratmasını engellemek için malzemeler; literatürde biyobazlı dolgu içeren PP kompozitleri için önerilen kurutma stratejileri ile uyumlu (Fu ve ark., 2008; Honarvar vd., 2017; Keyiş, 2020). olarak, kompozit kuru karışımları (PP /BA) ekstrüzyona girmeden önce 80 °C’de azot sirkülasyonlu etüvde, 2 saat kurutma ve nem almalarını engelleme amacı ile kapalı kaplarda bekletme işlemleri yapılmıştır.

Matris malzeme olan PP nin içerisine dolgu malzemesi olarak tercih edilen malzemelerin; BA toz halinde, PP’nin granül halinde olması kompozit karışımının homojenlik problemini ortaya çıkarmaktadır. Homojen bir karışım elde etme amacı doğrultusunda granül halinde bulunan Polipropilen mekanik doğrayıcı içinde

parçacık boyutu küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Granül halinde bulunan PP'nin parçacık boyutunu ortalama 200-250 mikron boyutuna dönüştürene kadar Süper Mikser marka devirmeli öğütücü makinası içinde 11000 d/d ve 20 Saniye / 4 tekrar şartlarında parçalanmıştır. Polimer parçacıklarının yapısal bozulmaya uğramaması için her 20 saniyelik mekanik parçalama işleme sonrasında 5 dakika 20 °C de soğutmaya tabi tutulmuştur.

Her bir kompozit türü için bileşenler, % ağırlık oranları dikkate alınarak analitik terazide $\pm 0,01$ g hassasiyetle tartılmıştır. Tartım sırasında; Aynı seri numunelerin bileşenleri ardışık olarak tartılarak hata olasılığı azaltılmış, tartılan malzemeler, numune kodu ile etiketlenmiş, kilitli plastik poşetler içerisine azot konularak karıştırma işlemi gerçekleştirilene kadar saklanmıştır. Tartım sonrası kompozitler için hazırlanan malzemeler, belirtilen formülasyon oranlarında fiziksel olarak karıştırılmıştır. Malzeme bileşenlerinin ekstrüderde daha hızlı ve homojen dağılımlarını sağlamak, özellikle BA aglomerasyonunu minimuma indirmek amacı ile 20 devir/dakika hızla çalışan Sinoped marka üç boyutlu mikser içerisinde 12 dakika süre boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma süresi, devri ve karışım sonucu gözle kontrol edilmiştir.

Malzeme üretimi

Hazırlanan kuru karışımlar, Petkim ARGE merkezinde bulunan laboratuvar tipi Brabender marka çift vidalı ko-rotasyonlu ekstrüderde 150 °C ile 185 °C sıcaklığında 50 devir/dakika vida hızında karıştırılarak eritilmiştir. Bu tür ekstrüderler, karıştırma etkinliği ve dolgu dağılımını iyileştirmede tek vidalı sistemlere göre üstün kabul edilmektedir (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004).

Ekstrüder parametreleri: Vida çapı: 20–25 mm, L/D oranı: 24–32, Vida tipi: Ko-rotasyonlu, karıştırma ve taşıma elemanları

kombinasyonlu, Vida devri: 50–80 rpm, Sıcaklık profili (zon bazında): 1. Bölge (besleme): 150 °C, 2. Bölge: 170 °C, 3. Bölge: 185 °C, Kalıp: 185–190 °C

Besleme hızı, eriyik basıncını kontrol altında tutacak şekilde ayarlanmış; malzemenin yanma veya sararma gibi oksidatif bozunma belirtileri göstermemesi için eriyik sıcaklığı ve motor yükü gözlemlenmiştir.

Ekstrüderden çıkan eriyik şerit, oda sıcaklığını çok fazla düşürmeden su banyosunda kontrollü şekilde soğutulmuş, ardından granül kesme ünitesinden geçirilerek silindirik granüller hâline getirilmiştir. Granülasyon sonrası: Granüller filtrelenerek yabancı partiküllerden arındırılmış, kodlanmış paketlere alınarak azot ortamında etüv içinde 80 °C’de 2 saat kurutulmuş, numune üretimine kadar kuru ortamda saklanmıştır.

Granül haline getirilen malzemelere uygulanacak testler nedeniyle hazırlanacak olan test numuneleri, laboratuvar koşullarına bağlı olarak, daha esnek kesme ve numune geometrisi imkanı sağladığı için sıcak - soğuk pres yöntemi ile üretimi tercih edilmiştir. Malzeme üretiminde tercih edilen sıcak–soğuk presleme ile yapılan işlemler; üst ve alt plaka sıcaklığı 230 °C getirildikten sonra hazırlanan malzemeler; 4 dakikalık ön ısıtma işleminin takibinde (basınç uygulanmadan, malzeme eriyip akışkan hâle gelene kadar) 5–8 dakikalık süre boyunca 60 bar basınca tabi tutularak sıcak presleme yapılmıştır. Sıcak kalıplama sonrasında plaka sıcaklığı 20–25 °C’ye düşene kadar kalıp içinde soğuk su sirkülasyonlu preste 150 bar basınç altında soğutma işlemi yapılmıştır. Presleme sonrası elde edilen plakların kalınlıkları, hedef test standardındaki numune kalınlığına uygun olacak şekilde seçilmiştir. Tüm test numuneleri, deney öncesinde: 23 ± 2 °C sıcaklık ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem koşullarında en az 24 saat bekletilerek kondisyonlama işlemine tabi tutulmuştur.

Uygulanan Test Yöntemleri

Yoğunluk ölçümleri

Numunelerin yoğunluğu, ISO 1183-1 standardına uygun olarak arşimet prensibine dayalı daldırma yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntemde numunenin, havadaki kütlesi (m_1) ve distile su içindeki kütlesi (m_2) ölçülür. Yoğunluk (ρ), aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\rho = \rho_{su} \cdot \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

Burada ρ_{su} , test sıcaklığındaki su yoğunluğudur (yaklaşık 0,997 g/cm³, 23 °C).

Bu test, dolgu oranı ve türü değişikçe kompozit yoğunluğunun nasıl değiştiğini görmek için temel girdi sağlamıştır (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004).

Shore-D sertlik testi

Sertlik ölçümleri, ASTM D2240 standardına göre ZWICK/ROEL marka Shore-D durometre ile gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan prosedür; Numune kalınlığı en az 6 mm (daha ince plakalar iki veya daha fazla katman halinde üst üste preslenerek hedef kalınlığa getirilmiştir) olan her numunenin (homojen yüzeylerden) en az 5 farklı noktasından iğne temasından itibaren 15 saniye sonra değer okunarak ölçüm yapılmıştır.

Her seri için, farklı numunelerden alınan ölçümler birleştirilerek ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Bu test, BA katkısının sertlik üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır (Dogahe vd., 2022; Fu vd., 2008; Pehlivanlı, 2016, 2021; Ünal vd., 2023).

Erime akış indeksi (MFI)

Erime akış indeksi (MFI), polimer eriyiğinin belirli sıcaklık ve yük altında birim zamanda akan kütlesini ifade eder. Test, ASTM D1238 standardına göre INSTRON CEAST MF20 Marka MFI cihazında gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan numuneler; 230 °C test sıcaklığında, 2,16 kg yük altında, 6 dakikalık ön ısıtma süresi sonrasında 10 dakika boyunca belirli zaman aralıklarında alınan eriyik parçaları tartılmış, g/10 dk cinsinden MFI hesaplanmıştır.

Her formülasyon için en az 5 tekrar yapılmış ve ortalama MFI değeri raporlanmıştır. MFI testleri, dolgu katkısının, PP eriyiğinin akış davranışına ve dolaylı olarak üretim prosesine (enjeksiyon/ekstrüzyon) etkisini değerlendirmek için kritik bir parametre sağlamaktadır (Fu vd., 2008; Pehlivanlı, 2016,2021; Weidenfeller vd., 2004).

Bulgular

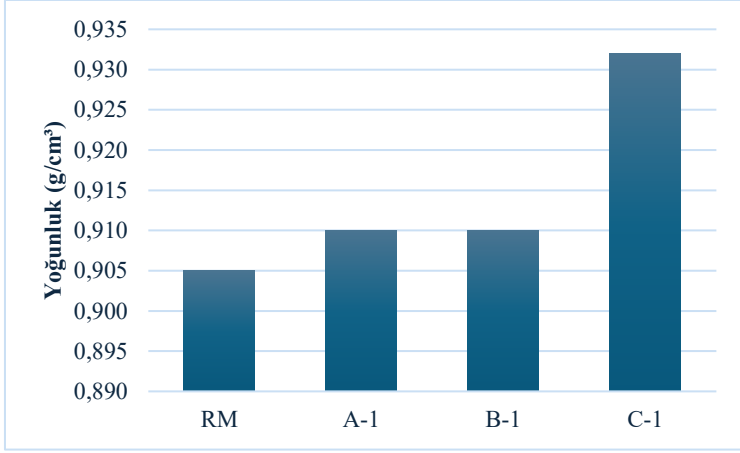
Bu bölümde, polipropilen (PP) matrisine borik asit (BA) eklenmesiyle elde edilen kompozitlerin yoğunluk, sertlik ve erime akış hızına ait deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Yoğunluk, Shore-D sertlik ve MFI testleri gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, dolgu oranının PP matris üzerindeki temel etkilerini göstermesi açısından önem taşımaktadır (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004).

Yoğunluk sonuçları

Kompozitlere ait yoğunluk sonuçları, Şekil 3'te özetlenmiş olarak gösterilmiştir. Sonuçlara göre saf PP en düşük yoğunluk değerine sahiptir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü PP'nin yoğunluğu 0,90–0,91 g/cm³ aralığındadır (Weidenfeller ve ark., 2004). BA katkılı numunelerde yoğunluğun saf PP'ye kıyasla belirgin şekilde

arttığı görülmüştür. BA'nın yoğunluğu PP'den daha yüksek olduğundan, dolgu oranı arttıkça yoğunlukta bir artış eğilimi gözlenmesi literatürle uyumludur (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023).

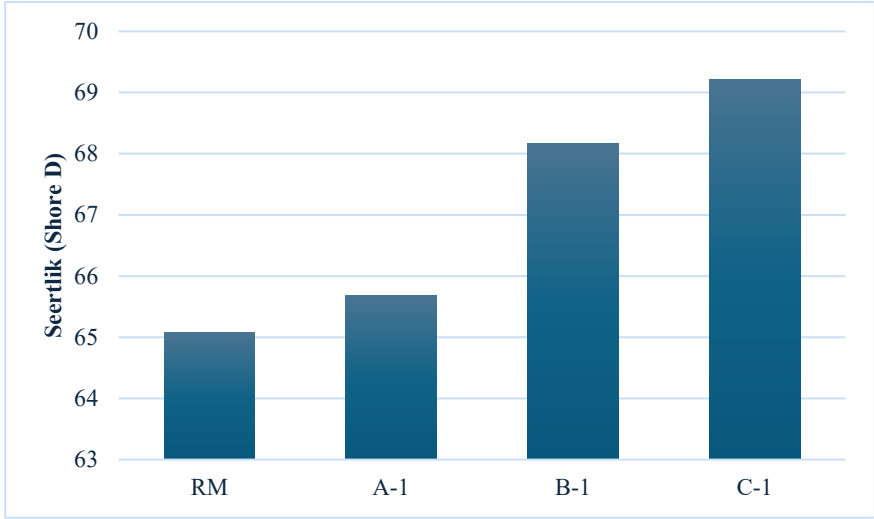
Şekil 3. Dolgu oranlarına göre yoğunluk değerlerinin değişimi



Shore-D sertlik sonuçları

Sertlik sonuçları, Şekil 4'te verilmektedir. Saf PP en düşük Shore-D sertlik değerini göstermiş, BA katkılı oranına paralel olarak sertlikte belirgin bir artış gözlenmiştir. BA, rijit inorganik bir faz olarak PP matrisin yüzeysel deformasyona direncini artırmıştır. BA'nın rijit inorganik faz olarak sertliği artırması literatürle uyumludur (Dogahe vd., 2022; Nazarenko vd., 2016; Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023).

Şekil 4. Dolgu oranlarına göre sertlik (Shore D) değerlerinin değişimi



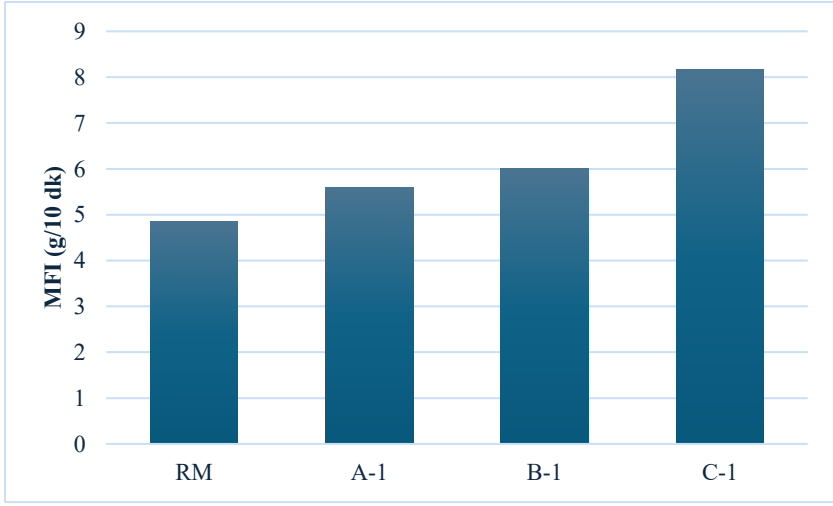
PP matrisi içindeki BA oranlarındaki değişimlerin, malzemenin sertlik yanıtını anlamlı ölçüde etkilediğini göstermektedir. PP/BA oranının ve bağlayıcı miktarının ayarlanmasıyla, sistemin hem daha yumuşak hem de daha sert çalışan kompozisyonlara doğru kaydırılabildiği gözlenmektedir. Elde edilen sertlik sonuçları, formülasyonlar arasındaki bileşim farklılıklarının sertlik üzerinde de belirgin rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Erime akış indeksi (MFI)

Erime akış indeksi (MFI) sonuçları, Şekil 5'te gösterilmiştir. Literatürde partikül dolgu ilavesi çoğu durumda viskoziteyi artırıp MFI'yi düşürme eğilimindedir (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004). Saf PP, en yüksek MFI değerine sahiptir; bu da en düşük eriyik viskozitesine karşılık gelmektedir (Weidenfeller ve ark., 2004). BA katkılı numunelerde, MFI değerinin saf PP'ye kıyasla azaldığı (eriyik viskozitesinin arttığı) görülmüştür. BA parçacıkları,

eriyik içinde hareket eden PP zincirlerini fiziksel olarak sınırlandırmakta ve dolgu yüklemesiyle akışa karşı direnç artmaktadır (Pehlivanlı, 2016,2021; Weidenfeller ve ark., 2004).

Şekil 5. Dolgu oranlarına göre erime akis hızı MFI (g /10 dk) değerlerinin değişimi



C-1 (5% BA) MFI'yi çok yükseltmiş, bu eriyik viskozitesinin düştüğünü ima eder. Bu durum literatürle çelişiyor gibi görünse de, PP'de proses sırasında zincir kırılması veya termooksidatif etkiler (BA'nın dehidrasyonu ile taşınan su, lokal sıcaklık artışları, kayma altında degradasyon) MFI'yi yükseltebilir. Yani burada BA sadece dolgu gibi değil, proses koşullarında PP'nin molekül ağırlığını düşüren bir etkiyi tetiklemiş olabilir. (Fu ve ark., 2008; Weidenfeller ve ark., 2004).

En yüksek MFR değeri ise %95 PP+%5 BA bileşimine sahip C-1 kodlu numunede 8.16 g/10 dk olarak ölçülmüştür. Bu durum, PP matrisi içindeki BA oranlarındaki değişimlerin eriyik akışkanlığı üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir. Genel olarak, BA miktarının artışı ile zincir hareketliliğinde ve eriyik viskozitesinde

meydana gelen değişimler, MFR değerlerinin artması ya da azalması seklinde kendini göstermektedir. Bu durum, formülasyon bileşiminin eriyik akışkanlığı açısından optimize edilebileceğini ve hedeflenen proses koşullarına (enjeksiyon, ekstrüzyon vb.) uygun MFR aralıklarının tasarım yoluyla seçilebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen erime akis hızı sonuçları, yoğunluk ve sertlik gibi diğer karakterizasyon verileri ile birlikte değerlendirildiğinde, PP/BA sistemlerinde morfoloji, zincir hareketliliği ve makro ölçekte proses edilebilirlik arasındaki ilişkinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Sonuç

Çalışma kapsamında; Polipropilen (PP) matris malzeme içerisine borik asit (BA) dolgusu kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiş; yoğunluk, Shore-D sertlik ve Erime akış hızı (MFI) sonuçları literatürde yer alan benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

PP matrisine BA katkıları, ekstrüzyon ve sıcak–soğuk presleme yöntemi ile başarılı bir şekilde dahil edilerek; homojen dağılıma sahip numuneler elde edilmiş, yoğunluk ölçümlerindeki düşük standart sapmalar ve sonuçların tekrarlanabilirliği, üretim prosesinin kararlı olduğunu göstermiştir (Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004).

Tüm formülasyonlarda saf PP'ye göre BA katkısı yoğunluk artışında daha baskın etki göstermiştir (Kabu & Akosman, 2013; Pehlivanlı, 2016,2021; Ünal vd., 2023; Weidenfeller vd., 2004). Shore-D sertlik değerleri; PP matrisi içindeki BA oranlarındaki değişimlerin, malzemenin sertlik yanıtını anlamlı ölçüde etkilediğini göstermektedir. PP/BA oran miktarının ayarlanmasıyla, sistemin hem daha yumuşak hem de daha sert çalışan kompozisyonlara doğru kaydırılabildiği gözlenmektedir. Elde edilen sertlik sonuçları,

formülasyonlar arasındaki bileşim farklılıklarının sertlik üzerinde de belirgin rol oynadığını ortaya koymaktadır.

BA ilavesi, saf PP'ye kıyasla MFI'yi düşürmüştür. Bu sonuç, dolgu miktarının eriyik viskozitesini değiştirdiğini, dolayısıyla işlenebilirlik üzerinde dikkatle yönetilmesi gereken bir etki oluşturduğunu göstermektedir (Fu vd., 2008; Pehlivanlı, 2016, 2021; Weidenfeller vd., 2004).

Kaynakça

Dibek, E., Babayeva, A., Sezer Kürkçü, M., Akgüç Çöl, N., & Çöl, B. (2020). Bor içeren bazı biyoaktif bileşikler. *Boron*, 5(1), 29–39.

Dogahe, K. S., Akbari, S., & Kish, M. H. (2022). Physico-mechanical properties of poly(vinyl alcohol), poly(vinyl alcohol)/boric acid and PVA nanocomposites with amino-functionalized/pristine halloysite nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(1), Article 51424.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2019). *Borik asit – Ürün teknik bilgi föyü* (EYS FRM-ETİ-00 17 / 23/9/2014-02; rev. 2023/01). Eti Maden.

Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961.

Honarvar, Z., Farhoodi, M., Khani, M. R., & Shojaee-Aliabadi, S. (2017). Antimicrobial chicken meat packaging based on carboxymethyl cellulose-coated polypropylene films containing *Zataria multiflora* essential oils. *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 11(8), 613–620.

Kabu, M., & Akosman, S. (2013). Biological effects of boron. In D. M. Whitacre (Ed.), *Reviews of environmental contamination and toxicology* (pp. 57–75). Springer.

Keyiş, D. (2020). *3,4-Dihidroksibenzaldehit ile modifiye edilmiş kitosanın hazırlanması ve sulu ortamlardan bor adsorpsiyon özelliklerinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Aksaray Üniversitesi]. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Nazarenko, O. B., Melnikova, T. V., & Visakh, P. M. (2016). Thermal and mechanical characteristics of polymer composites based on epoxy resin, aluminium nanopowders and boric acid. *Journal of Physics: Conference Series*, 671, Article 012040.

Nielsen, F. H. (2014). Update on human health effects of boron. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 28(4), 383–387.

Pehlivanlı, Z. O. (2016). H₃BO₃/PP kompozitlerinin ısı iletim katsayılarının incelenmesi. *GU Journal of Science Part C*, 4(3), 91–96.

Pehlivanlı, Z. O. (2021). Manufacturing and characterization of polypropylene/boric acid composite. *Polymer Bulletin*, 78(7), 4033–4046.

Svishcheva, N. B., Khaptakhanova, P. A., Kasatov, D. A., & Uspenskii, S. A. (2021). Preparation and study of properties of boron-containing polymer based on lactic and boric acids. *Russian Chemical Bulletin*, 70(9), 1725–1728.

Tian, X., Sun, Y., Xie, H., Shi, B., Zhong, J., Sheng, D., & Yang, Y. (2022). Preparation of graphene oxide/waterborne polyurethane via boric acid cross-linked dopamine: Enhanced barrier and mechanical properties. *Frontiers in Materials*, 9fx, Article 1046125.

Ünal, H., Yetgin, S. H., & Köse, S. (2023). Determination of mechanical performance of boric acid filled polypropylene based polymer composites. *Journal of Scientific Reports-A*, 55, 185–192.

Weidenfeller, B., Höfer, M., & Schilling, F. R. (2004). Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(4), 423–429.

Yılmaz, M. T. (2012). Minimum inhibitory and bactericidal concentrations of boron compounds against various bacterial strains. *Turkish Journal of Medical Sciences*, 42(Ek 2), 1423–1429.

BÖLÜM 2

OBJECTIVE PREDICTION OF DRIVER ANNOYANCE USING MULTI-DOMAIN VEHICLE PERFORMANCE INDICATORS

Kürşat ÇOBAN¹

Introduction

The history of the automobiles can be traced back to sketches drawn by Leonardo da Vinci in the 15th century (Chondros, 2021). However, it was not until the era of mass production began around 1913, with the evolving of the internal combustion engine and mass manufacturing, that the automobile became widely available (Understanding the Global Energy Crisis, 2014). Today, our vehicles are fully digitalized, drivable computers with integrated, complex electronics networks and on-board diagnostic ecosystems that watch everything from fuel timing advance to passenger seats' aerothermal comfort.

Simultaneously, the vehicle environment has become more digitalized day by day in 2010s. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) such as lane keeping assist, forward collision

¹ Yüksek Makine Mühendisi, Tofaş Otomobil Fab. A.Ş., Ar-Ge, Orcid: 0000-0001-7527-4688

warning, driver monitoring systems, intelligent speed assistance, and parking proximity alerts are now standard or mandated in many markets. Modern vehicles may generate multiple auditory, visual, and haptic warnings within a single driving hour (Liu et al., 2017).

This technological progression has introduced a unique paradox. While mechanical and acoustic refinements have reduced continuous discomfort, the proliferation of interruptive driver aid alerts has introduced a new form of cognitive and sensory annoyance. In contrast, event-based alerts are intermittent, attention-capturing, and often associated with urgency or perceived risk (Biondi et al., 2017). Psychological research suggests that interruptive warning may carry disproportionate perceptual weight compared to steady-state background exposure (Symons et al., 2023).

Despite extensive research in NVH metrics and separate human factors studies on ADAS warnings, current vehicle development processes lack a unified metric capable of quantifying total driving annoyance. ADAS systems are evaluated based on detection accuracy, false positive rate, and response timing. These domains are refined independently. However, no framework currently answers a fundamental experiential question:

“How annoying is the overall driving experience?”

This study addresses this gap by proposing a Dual-Domain Annoyance Index (DAI) integrating continuous NVH exposure and event-based ADAS alerts into a unified objective framework. The proposed index enables quantitative comparison between legacy and modern vehicle annoyance profiles and provides a structured evaluation approach applicable to OEM road testing and benchmarking.

To the authors' knowledge, this is the first structured attempt to quantitatively fuse mechanical NVH exposure and digital alert density into a unified objective annoyance framework applicable to vehicle development processes.

Literature Review

Psychoacoustic Annoyance Modelling in NVH

NVH performance of vehicles have been evaluated using both physical and psychoacoustic metrics. While overall sound pressure level (SPL) remains a primary engineering indicator, it does not fully stand for perceived annoyance. Psychoacoustic models have therefore been introduced to better correlate aim measurements with subjective discomfort (Miao et al., 2023).

Zwicker's loudness formulation established a perceptually weighted representation of acoustic intensity, forming the basis for standardized annoyance evaluation approaches such as DIN 45692.

Impact of ADAS Auditory Characteristics on Cognitive Load and Driver Behavioural Responses

Parallel to NVH development, substantial research has examined driver interaction with Advanced Driver Assistance Systems: Key topics include warning acceptance, trustiness level, false alarm effects, and cognitive workload (Bliss, 2003).

Studies indicate that frequent false positives reduce system trust and may lead to alert desensitization (Alyamani et al., 2024). ADAS research has primarily focused on safety performance, response time, and behavioural adaptation (Liu et al., 2017). Annoyance is typically evaluated qualitatively through questionnaires rather than quantified through objective exposure-based metrics. Furthermore, alert systems are rarely assessed in combination with baseline acoustic environment quality.

Identified Research Gap

Existing evaluation methodologies treat NVH refinement and ADAS performance as independent development areas (Xue et al., 2023). NVH engineers optimize cabin sound, while ADAS engineers optimize detection accuracy and compliance with regulatory protocols. No integrated framework currently quantifies the combined perceptual impact of continuous mechanical exposure and interruptive digital alerts (Xue et al., 2023).

As modern vehicles increasingly shift discomfort sources from mechanical to digital domains (Xue et al., 2023), the absence of a unified annoyance metric represents a methodological gap. A holistic framework is required to objectively estimate total driving annoyance under realistic operating conditions.

Methodology - Dual-Domain Annoyance Index (DAI)

The novelty of the proposed framework lies not in redefining individual NVH or ADAS metrics, but in integrating continuous psychoacoustic exposure and interruptive alert events into a unified perceptual model that reflects differential attentional salience.

Domain Definition

Traditional psychoacoustic parameters like loudness, sharpness, and roughness are often combined into higher-order indices of annoyance, and ADAS auditory alerts are associated with perceived urgency (Goswami, 2025).

Driving annoyance is modelled as the combination of two perceptual exposure domains:

- Continuous mechanical-acoustic exposure (NVH domain)
- Event-based digital alert exposure (ADAS domain)

Total annoyance is assumed to be additive but perceptually weighted to reflect differences in psychological salience.

$$DAI = A_{NVH}^* + k \cdot A_{ADAS}^*$$

where:

A_{NVH}^* = normalized continuous annoyance

A_{ADAS}^* = normalized event-based annoyance

k = interruptive salience coefficient

Based on startle-response and attentional capture literature, interruptive stimuli are assumed to carry greater perceptual weight. For demonstration purposes in this conceptual framework:

$$k = 1.8$$

The selected value $k = 1.8$ represents a literature-informed demonstrative parameter reflecting higher attentional capture of transient stimuli (Soh & Wessel, 2020). It does not claim universal validity. Sensitivity analysis is therefore performed to evaluate robustness across a range $1.0 \leq k \leq 2.2$.

Continuous NVH Annoyance Model

Continuous annoyance is modelled using a weighted psychoacoustic formulation:

$$A_{NVH} = w_L L_N + w_S S + w_R R$$

Where:

- L_N = Zwicker loudness (sone)
- S = sharpness (acum)
- R = roughness (asper)

Literature indicates loudness as dominant predictor of annoyance, with sharpness and roughness acting as secondary modifiers (Souaille et al., 2024). For demonstrative weighting:

$$w_L = 0.6, w_S = 0.25, w_R = 0.15$$

Thus:

$$A_{NVH} = 0.6L_N + 0.25S + 0.15R$$

To enable comparability with event-based exposure, normalization is applied:

$$A_{NVH}^* = \frac{A_{NVH}}{A_{NVH,max}}$$

where $A_{NVH,max}$ represents a reference worst-case exposure (e.g., 80 dB equivalent cabin condition). This reference value is derived from a 90th percentile peak loudness level observed during high-speed highway cruising on coarse road surfaces, providing a standardized ceiling for the steady-state acoustic domain (Goswami, 2025).

Event-Based ADAS Annoyance Model

Event-based annoyance is defined as cumulative weighted alert exposure:

$$A_{ADAS} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \alpha_i \cdot \beta_i$$

Where:

- f_i = frequency of alert type i (events/hour)
- α_i = severity factor
- β_i = false positive weighting

Severity factors are scaled between 0.5–1.5:

Table 1: Severity Factors of Alert Types

Alert Type	Example	α
Informative	Speed Reminder	0.6
Advisory	Lane Departure	1.0
Critical	Foward Collision Warning	1.4

False positive weighting accounts for trust erosion:

$$\beta_i = 1 + FP_i$$

where FP_i is the false positive ratio (0–1).

Normalization by exposure time T :

$$A_{ADAS}^* = \frac{A_{ADAS}}{A_{ADAS,max}}$$

For conceptual simulation, $A_{ADAS,max}$ is defined as 25 weighted events/hour.

Final Dual-Domain Annoyance Index

The final calculation of the DAI synthesizes the normalized steady-state acoustic discomfort and the discrete alert-driven disturbances into a singular scalar value, enabling engineers to assess whether cabin noise suppression or the refinement of ADAS alert strategies offers the most significant path toward improving the overall driver experience. The complete formulation becomes:

$$DAI = \frac{0.6L_N + 0.25S + 0.15R}{A_{NVH,max}} + 1.8 \cdot \frac{\sum(f_i \alpha_i \beta_i)}{A_{ADAS,max}}$$

This formulation enables:

- Cross-vehicle comparison

- Sensitivity analysis
- OEM benchmarking
- Scenario-based evaluation

Importantly, the framework preserves engineering measurability while incorporating human-factors weighting.

Comparative Scenario Modelling

To evaluate the sensitivity of the Dual-Domain Annoyance Index, three distinct driving profiles were simulated: a "Quiet Commute" with minimal ADAS triggers and low NVH levels typical of an electric vehicle cabin, a "Dense City Centre Navigation" scenario characterized by high alert frequency and moderate roughness, and a "High-Speed Highway Driving" involving significant wind noise and critical lane-keeping interventions.

Scenario A – Legacy Vehicle Profile

This profile represents a traditional internal combustion engine vehicle with a high baseline of mechanical-acoustic exposure, where a dominant Zwicker loudness is compounded by substantial exhaust-related roughness and low-frequency tire resonance. Representative characteristics:

- Cabin SPL: 76 dB(A)
- Loudness L_N : 18 sone
- Sharpness S : 1.8 acum
- Roughness R : 1.4 asper
- Alerts/hour: 2
- False positive rate: negligible (0.05)
- Alert type: advisory ($\alpha = 1.0$)

NVH Calculation

$$A_{NVH} = 0.6(18) + 0.25(1.8) + 0.15(1.4)$$

$$A_{NVH} = 10.8 + 0.45 + 0.21 = 11.46$$

Assume reference maximum $A_{NVH,max} = 15$

$$A_{NVH}^* = 11.46/15 = 0.764$$

ADAS Calculation

$$\beta = 1 + 0.05 = 1.05$$

$$A_{ADAS} = 2 \cdot 1.0 \cdot 1.05 = 2.1$$

Assume $A_{ADAS,max} = 25$

$$A_{ADAS}^* = 2.1/25 = 0.084$$

Total DAI

$$DAI = 0.764 + 1.8(0.084)$$

$$DAI = 0.764 + 0.151 = 0.915$$

Scenario B and C – Modern and Optimized Future Vehicles

Despite a 10 dB reduction in cabin SPL, the modern vehicle exhibits a DAI value more than 2.5 times higher than the legacy vehicle due to increased alert density and false positive weighting. This quantitatively illustrates the technology contrast.

Table 2: Table of results for Scenario A, B and C

	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Cabin SPL	76 dB(A)	66 dB(A)	66 dB(A)
Loudness L_N	18 sone	11 sone	11 sone
Sharpness S	1.4 acum	1.4 acum	1.4 acum
Roughness R	1.0 asper	1.0 asper	1.0 asper
Alerts/hour	2	18	6
False positive rate	0.05	0.25	0.05
Alert type ‘ α ’	1.0	1.2	1.0
Total NVH	0.764	0.473	0.473
Total ADAS	0.084	1.08	0.252
Total DAI	0.915	2.417	0.927

Sensitivity Analysis

This section focuses that how the Dual-Domain Annoyance Index fluctuates in response to isolated changes in driver assistance parameters and acoustic metrics, providing a quantitative basis for balancing vehicle sound quality with human factors engineering. The following numbers show how incremental increases in the number of auditory events per hour impact the total of index when calculated against a baseline of constant engine and road noise. Holding NVH constant at 5 alerts/hr DAI calculates as approx. 0.8 but when alerts jump to 20 alert/hr DAI rises to aprox. 2.3. This shows non-linear perceptual escalation due to salience factor k . This proves psychological weighting is a decisive system-level design parameter.

Discussion

The proposed Dual-Domain Annoyance Index (DAI) demonstrates that improvements in mechanical-acoustic refinement do not necessarily translate into reduced perceived annoyance. Scenario modelling shows that increased alert density and increased false positive rates may offset substantial reductions in cabin sound level.

It is important to emphasise that the presented values are illustrative, and they are intended to show model sensitivity rather than represent measured fleet averages. From an engineer perspective, the results suggest that digital system calibration should be evaluated not only in terms of safety performance metrics but also in terms of cumulative perceptual load. Excessive alert frequency may contribute to annoyance, desensitization, or reduced system acceptance, even when detection performance remains within regulatory targets.

The framework does not imply that ADAS deployment is harmful for driver experience. Rather, it highlights the necessity of

balanced system integration is needed. NVH refinement and digital alert management should be treated as coupled contributors to perceived vehicle maturity.

Importantly, the interruptive salience coefficient k plays a decisive role in total annoyance estimation. This suggests that further empirical calibration using controlled driver studies would strengthen predictive accuracy.

The present study proposes a structural predictive framework rather than a validated perceptual scale. Its purpose is to enable early-phase engineering trade-off analysis. Empirical validation through controlled driver studies constitutes essential future work.

Limitations

There are several limitations that must be acknowledged.

First, weighting coefficients were selected based on literature-informed assumptions rather than newly conducted subjective experiments. Second, only two domains were considered. Other contributors to discomfort, such as thermal variation, seat vibration transmissibility, and HMI visual distractions, were excluded. Third, cultural and regional differences in alert tolerances were not addressed.

Conclusion

This study introduced a Dual-Domain Annoyance Index (DAI) integrating continuous NVH exposure and event-based ADAS alerts into a unified objective metric. Scenario-based modelling demonstrated that increases in digital alert density can offset substantial acoustic improvements, illustrating a potential technology paradox in modern vehicle development.

The proposed framework enables quantitative comparison between legacy and modern vehicle profiles and offers a practical tool for OEM road-test evaluation and system calibration. By addressing annoyance as a multi-domain phenomenon, the DAI contributes toward more holistic vehicle refinement strategies.

Future work should focus on empirical coefficient calibration, expansion to additional comfort domains, and validation through controlled driver studies.

References

Alyamani, H., Yang, Y., Noyce, D., Chitturi, M., & Fawaz, K. (2024). Evaluating the impact of warning modalities and false alarms in pedestrian crossing alert system (Version 1). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.06388>

Biondi, F., Leo, M., Gastaldi, M., Rossi, R., & Mulatti, C. (2017). How to drive drivers nuts: Effect of auditory, vibrotactile, and multimodal warnings on perceived urgency, annoyance, and acceptability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2663(1), 34–39. <https://doi.org/10.3141/2663-05>

Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: How collision alarm reliability affects driving. *Applied Ergonomics*, 34(6), 499–509.

Chondros, T. G. (2021). The development of mechanics and engineering design and machine theory since the Renaissance. *FME Transactions*, 49(2), 291–307. <https://doi.org/10.5937/fme2102291c>

Goswami, M. (2025). Automotive sound quality for EVs: Psychoacoustic metrics with reproducible AI/ML baselines (Version 1). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.16901>

Liu, H., Wei, H., Zuo, T., Li, Z., & Yang, Y. J. (2017). Fine-tuning ADAS algorithm parameters for optimizing traffic safety and mobility in connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 76, 132–149. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.003>

Miao, Z., Huang, Y., Yan, L., & Jiang, W. (2023). The Zwicker's psychoacoustic annoyance models for noise-induced discomfort in the electric vehicle cabin. *INTER-NOISE and NOISE-*

CON Congress and Conference Proceedings, 268(4), 4033–4043.
https://doi.org/10.3397/in_2023_0574

Soh, C., & Wessel, J. R. (2020). Unexpected Sounds Nonselectively Inhibit Active Visual Stimulus Representations. *Cerebral Cortex*, 31(3), 1632–1646.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa315>

Souaille, A., Lostanlen, V., Lagrange, M., Misdariis, N., & Petiot, J.-F. (2024). Acoustical and behavioral heuristics for fast interactive sound design. *PLOS ONE*, 19(1), e0296347.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296347>

Symons, A., Dick, F., & Tierney, A. (2023). Salient sounds distort time perception and production. *Psychonomic Bulletin & Review*, 31(1), 137–147. <https://doi.org/10.3758/s13423-023-02305-2>

Xue, H., Previati, G., Gobbi, M., & Mastinu, G. (2023). Research and development on noise, vibration, and harshness of road vehicles using driving simulators—A review. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 7(4), 555–577.
<https://doi.org/10.4271/10-07-04-0035>

BÖLÜM 3

UYDU SİSTEMLERİNDE SICAKLIK YÖNETİMİ

KEMAL FURKAN SÖKMEN¹
YUSUF TALHA ERASLAN²

Giriş

Uzay araştırmaları ve uydu teknolojileri, 83.6 kg ağırlığındaki ilk yapay uydu olan Sputnik 1 uydusunun 1957 yılında uzaya gönderilmesiyle başlamış ve bu durum insanlık tarihini önemli ölçüde etkilemiştir. Dünya'yı gözleme, iletişim, doğal afet yönetimi ve navigasyona kadar birçok alanda günlük yaşamın bir parçası olmuştur. Uyduların gelişimi içinde özellikle 1999 yılında Stanford Üniversitesi'nden Prof. Bob Twiggs ve Kaliforniya Politeknik Eyalet Üniversitesi'nden Dr. Jordi Puig-Suari tarafından geliştirilen "CubeSat" (küp uydu) standardı, uydu teknolojisinde minyatürleşme devrimini başlatarak uzaya erişimi daha ulaşılabilir hale getirerek maliyetleri büyük ölçüde azaltmıştır. Ancak bu teknolojik gelişmeler ve uyduların giderek küçülen hacimleri, uzay mühendisliğinin en zorlu problemlerinden birisi olan sıcaklık yönetimi ile tasarımcıları karşı karşıya bırakmıştır.

¹ Doç. Dr., Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-8647-4861

² Öğrenci, Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0002-1045-1254

Bir uydunun görev başarısı çoğu zaman güç, yönetim, haberleşme ve faydalı yük kabiliyeti üzerinden tartışılrsa da bu alt sistemlerin tamamı sıcaklık limitleri korunabildiği sürece işlevseldir. Uydularda sıcaklık yönetiminin temel sebebi, uzayın barındırdığı son derece zorlu ve değişken çevresel koşullardır. Bir tarafta doğrudan güneş ışınımı, albedo ve gezegensel kızılötesi akı gibi önemli ısı girdileri vardır; diğer tarafta atmosfer bulunmadığı için ısının dış ortama taşınması esas olarak ışınım ile gerçekleşir. Bu durum, yerkürede yaygın olarak kullanılan taşınım tabanlı soğutma mantığını geçersiz kılar ve uydu termal yönetimi yalnızca iletim ve ışınım ile sağlanmak zorunda kalır. Doğrudan güneş ışığına maruz kalan yüzeylerde sıcaklıklar $+120^{\circ}\text{C}$ ile $+150^{\circ}\text{C}$ seviyelerine kadar çıkabilirken, uydunun gölgede kalan kısımları veya derin uzay koşullarında sıcaklıklar -173°C ile -270°C gibi kriyojenik seviyelere kadar düşmektedir (Zaidan et al., 2026; Fetuga et al., 2026). Buna ek olarak, iletişim ve veri işleme ihtiyaçlarının artmasıyla uyduların güç gereksinimleri tarihsel olarak her 5-6 yılda bir iki katına çıkmış, bu da elektronik bileşenlerin yarattığı iç ısı üretimini devasa boyutlara taşımıştır (Consolo Jr & Boetcher, 2023). Hem dış ısı yüklerinin fazlalığı hem de uydu içindeki yüksek ısı üretimi; uydulardaki hassas elektroniklerin, bataryaların ve optik sensörlerin bozulmasına, yapısal malzemelerde termal yorgunluğa ve hatta sistem arızalarına yol açabilmektedir. Dolayısıyla uydu termal mühendisliği, ısının yalnızca azaltılması değil; üretilmesi, yönlendirilmesi, depolanması ve kontrollü biçimde uydudan atılması problemi (NASA, 2025).

Bilim dünyası bu zorlukların üstesinden gelmek için uydu ısı kontrol sistemlerini aktif ve pasif yöntemler olarak iki temel kategoriye ayırarak büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Herhangi bir dış güç gerektirmeyen çok katmanlı yalıtımlar (MLI), termal kaplamalar ve faz değiştiren malzemeler (PCM) pasif sistemlerin temelini oluşturur. Isı boruları (LHP), mekanik pompalı sıvı döngüleri

(MPFL) ve elektrikli ısıtıcılar dinamik ve yüksek güçlü aktif sistemleri oluşturmaktadır. Güncel çalışmalar, vanadyum dioksit (VO_2) gibi ortam sıcaklığına göre emisyon değerini otonom olarak değiştirebilen akıllı malzemelere, mikro-elektromekanik sistemlere ve hatta ısı kontrolü otonom hale getiren yapay zekâ optimizasyonlarına yönelmiş durumdadır.

Bu bölümde önce uzay ısı ortamının temel belirleyicileri açıklanmakta, ardından pasif ve aktif termal kontrol teknolojileri güncel literatür eşliğinde tartışılmaktadır. Daha sonra, son yıllarda öne çıkan modelleme, test doğrulama, faz değişimli depolama, akıllı radyatör ve iki fazlı termal çevrim literatürü bütüncül biçimde sentezlenmektedir. Amaç, okuyucuya yalnızca bileşen listesi sunmak değil; hangi teknolojinin hangi görev sınıfında neden tercih edildiğini açıklayan eleştirel bir çerçeve kurmaktır.

Uzay Isıl Ortamı ve Enerji Dengesi

Yörüngedeki bir uydunun sıcaklık düzeyi, yüzey özellikleri ile iç ve dış ısı akılarının bileşimi tarafından belirlenir. NASA'nın özet enerji dengesi eşitliğine göre;

$$q_{güneş} + q_{albedo} + q_{gezegen} + Q_{üre} = Q_{dep} + Q_{çıkırad} \quad (1)$$

Güneş akısı, albedo, gezegen kızılötesi ışınımı ve uydunun içi ısı üretimi; depolanan ısı ve ışınım ile atılan ısı ile dengelenir. Bu denge sabit bir durum değil, yörüngenin aydınlık-karanlık geçişleri, beta açısı, yönelim ve görev moduna bağlı olarak sürekli değişen bir süreçtir. Özellikle alçak dünya yörüngesinde (LEO) görev alan bir uydunun tek bir yörüngede bile sıcaklık salınımı belirgin olabilir (NASA, 2025).

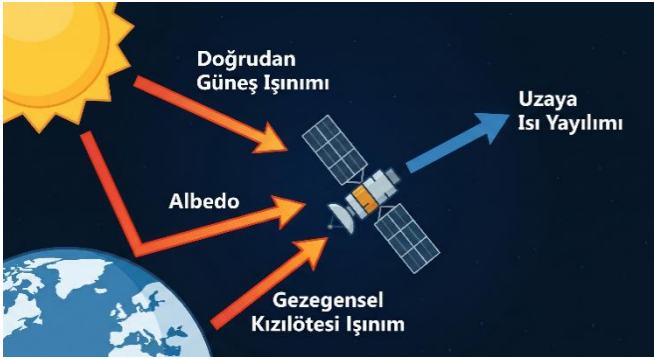
Termal tasarımda iki temel sınır bulunur: Sistemin nominal olarak çalıştığı çalışma sıcaklık aralığı ve hasar görmeden dayanabileceği dayanım sıcaklık aralığı. Haberleşme elektroniği, bataryalar, yıldız izleyiciler, itki bileşenleri ve kızılötesi dedektörler

bu sınırları en dar olan bileşenlerdir. Hassas yüklerde ortalama sıcaklığın korunması kadar, sıcaklık gradyanlarının ve zamana bağlı dalgalanmaların bastırılması da gereklidir. Wang ve arkadaşları (Wang et al., 2024), yerçekimsel dalga tespiti gibi yüksek hassasiyetli görevler için geliştirilen PCM tabanlı sandviç yapıda 0.1K mertebesinde sıcaklık kararlılığına ulaşılabildiğini göstermiştir.

Uzay Ortamının Sınır Koşulları

Bir uydunun yörüngesindeki ısıl sınır koşulları son derece değişken dış ısı akıları ile soğuk uzay boşluğunun eşzamanlı değerlendirilmesiyle şekillenir. Uzay ısıl ortamını oluşturan ve uydu tasarımcılarını zorlayan temel dış faktörler şunlardır:

Şekil 1 Uydunun Isıl Denge Şeması



Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

1. Doğrudan Güneş Işınımı

Uydular için en yoğun ve birincil ısı kaynağıdır. Dünyanın yörüngesindeki ortalama güneş akısı 1367 W/m^2 olarak kabul edilse de Güneş ile Dünya arasındaki mesafenin değişmesinden dolayı bu değer kış gündönümünde yaklaşık 1414 W/m^2 'ye çıkarken, yaz gündönümünde 1322 W/m^2 'ye düşmektedir (Bulut & Sözbir, 2021). Güneşe doğrudan bakan yüzeyler, bu devasa akı altında çok yüksek sıcaklıklara (örneğin $+120^\circ\text{C}$ ile $+150^\circ\text{C}$) ulaşabilir (Zaidan et al., 2026).

2. Albedo

Güneş'ten gelip gezegenin atmosferinden ve yüzeyinden yansiyarak uyduya çarpan ışıdır (Consolo Jr. 2021). Uydunun irtifasına göre değişmekle birlikte özellikle LEO'da çalışan uyduların aldığı ısıl yükün önemli bir bölümünü oluşturur (Atar & Aktaş, 2022).

3. Gezegenel Kızılötesi Işıım

Gezegenin kendi yüzey sıcaklığından kaynaklı uzaya yaydığı termal enerjidir. Dünya için bu ışım genellikle 250-300 K aralığında bir siyah cisim ışımı olarak modellenilebilir (Consolo Jr & Boetcher, 2023). Albedo'nun aksine Dünya'nın kızılötesi ışımı, uydunun hem güneşte olduğu hem de gölgede kaldığı anlarda sürekli olarak mevcuttur.

4. Derin Uzay Soęuęu ve Tutulma (Eclipse) Döngüleri

Uydular yörünge hareketleri sırasında Dünya'nın gölgesinde girdiklerinde üzerlerine etki eden doğrudan güneş ışımını ve albedo kaynaklı ısı akıları aniden ortadan kalkar. Bu durumda uydu, etkin sıcaklığı yaklaşık -173°C ila -270°C aralığında değişen ve bir nihai ısı yutağı (ultimate heat sink) olarak davranan derin uzay ortamına maruz kalır. Birkaç saat veya dakika içinde gerçekleşen 300°C 'yi aşan bu ani sıcaklık değişiklikleri, malzemelerde termal genleşmeye, yapısal yorgunluğa ve elektronik bileşen arızalarına yol açar. Uydunun bu ısıl şoklara maruz kalma süresi ve şiddeti, Güneş vektörü ile yörünge düzlemi arasındaki 'Beta açısı (β)' ile doğrudan ilişkilidir (Huang & Bu, 2024).

5. Malzeme Bozulmaları ve Diğer Çevresel Faktörler

Uydunun yüzeyindeki malzemeler zamanla yüksek enerjili parçacıklar, ultraviyole radyasyon (UV), mikro-meteoroid çarpmaları ve LEO'da yüksek oranda bulunan atomik oksijen (ATOX) erozyonuna maruz kalır. Bu tahribat, dış yüzey

kaplamalarının ısıyı yansıtma özelliklerini ciddi oranda bozarak yüzeylerin güneş enerjisi soğurganlığını zamanla artırır. Böylelikle görev ömrü ilerledikçe uydunun daha fazla ısınmasına neden olur (Fetuga et al., 2026). Ek olarak, Ay ve Mars görevlerinde, yüzeylere elektrostatik kuvvetler nedeniyle tutunan ince silikat esaslı toz partikülleri, radyatör yüzeylerinin optik ve termofiziksel özelliklerini değiştirerek ısı performansın yaklaşık %20–40 oranında azalmasına yol açan ilave ve özgün çevresel zorluklar ortaya çıkarmaktadır (Fetuga et al., 2026).

Termal tasarım mühendislerinin asıl görevi, uydunun soğurganlık, emisyon ve radyasyonla atılan ısı değişkenlerini manipüle edecek donanımları tasarlamaktır. Literatür, bu zorlukları aşmak için uyduların termal kontrol sistemlerini pasif ve aktif teknolojiler olmak üzere kategorize etmiştir.

Pasif Termal Kontrol Yaklaşımları

Pasif termal kontrol, uzay görevlerinde hala ilk tercih edilen stratejidir. Çünkü güç tüketmez, hareketli parça sayısını azaltır ve güvenilirliği artırır. Çok katmanlı yalıtım battaniyeleri (MLI), termal kaplamalar, optik güneş reflektörleri (OSR), termal strap'ler, arayüz malzemeleri, ısı boruları, termal anahtarlar ve faz değişimli ısı depolama birimleri bu grubun temel unsurlarıdır. NASA'ya göre pasif yöntemler, özellikle küçük uydularda kütle, hacim ve risk bakımından belirgin avantaj sağlar (NASA, 2025).

a. Yüzey mühendisliği: Radyatörler, OSR ve MLI

Uyduların sıcaklık yönetiminde temel prensip, herhangi bir elektriksel güç veya hareketli parça gerektirmeyen pasif ısı kontrol sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılmasıdır. Bu sistemlerin ana iskeletini uydunun çevresiyle olan ışınım tabanlı ısı alışverişini yöneten termal kaplamalar, optik güneş reflektörleri (OSR) ve çok katmanlı yalıtımlar (MLI) oluşturur.

- **Çok Katmanlı Yalıtımlar (MLI – Multi Layer Insulation):**

Uzay uygulamalarında en yaygın kullanılan pasif yalıtım bileşenidir. Temel amacı uydunun dış uzaydan alacağı aşırı ısı akışını engellemek veya uydunun içindeki ısının derin uzaya kaçışını minimuma indirmektir. Bir MLI battaniyesi tipik olarak 8 ila 15 katman arasında, çift taraflı alüminyum buharı biriktirilmiş polyester Mylar veya Kapton filmlerden oluşur. Katmanlar arasındaki iletim ısı transferini kesmek için aralarına Dacron veya ipek ağ gibi düşük ısıl iletkenliğe sahip ayırıcılar kullanılır (Zaidan et al., 2026; Jiang et al., 2022). Uydunun dışına bakan en dış katman genellikle UV ışınlarına, radyasyona ve aşırı ısıya dayanıklı kalın alüminyum kaplı poliimid filmlerden seçilir. MLI'ların performansı 'efektif emisyon' (ϵ^*) değeri ile ölçülür ve uzay vakumunda bu değer tipik olarak 0.015 ile 0.03 arasında son derece düşük seviyelerdedir (Selvadurai et al., 2022).

- **Optik Güneş Reflektörleri (OSR – Optical Solar Reflectors):**

Beyaz boyaların uzay şartlarında zamanla kararması ve bunun sonucunda soğurganlıklarının artması sorununu çözmek için geliştirilmiştir (Zaidan et al., 2026). OSR'ler genellikle gümüş veya alüminyum ile kaplanmış ince kuvars veya erimiş silika cam fayanslardan oluşur. Güneş ışınımını mükemmel şekilde yansıtırken ($\alpha \approx 0.07 - 0.11$) ısıl kızılötesi bölgede yüksek emisyon ($\epsilon \approx 0.80 - 0.84$) sahiptirler (Bulut et al., 2008). Beyaz boyalara kıyasla UV, atomik oksijen ve kozmik radyasyona karşı çok daha dirençlidirler ve uzun yıllar boyunca optik özelliklerini koruyabilirler.

Mikhailov ve arkadaşları (Mikhailov et al., 2023), geleneksel çinko oksit (ZnO) tabanlı beyaz yansıtıcı boyaların 15-20 yıllık uzun uzay görevlerinde etkinliğini yitirmesi problemine odaklanmışlardır. Lityum silikat bağlayıcılı ZnO kaplamalara kütlece çeşitli oranlarda

silisyum dioksit (SiO_2) nanoparçacıkları ekleyerek modifiye etmişlerdir. Sonuç olarak modifiye edilmiş kaplamaların, yüksek dünya yörüngesinde (GEO) maruz kalınan yüksek enerjili elektron radyasyonuna karşı direncini artırdığını ve 20 yıllık sanal yaşlandırma sonucunda dahi düşük güneş enerjisi soğurganlığını (α_s) başarıyla koruduğunu kanıtlamışlardır (Mikhailov et al., 2014).

Xie ve arkadaşları (2024) ise, geleneksel OSR sistemlerinin ötesine geçerek doğrudan güneş enerjisi soğurganlığını aşırı düşük seviyelere çekmeyi hedefleyen yeni nesil bir termal radyatör mimarisi tasarlamışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar, DBR (Distributed Bragg Reflector) adını verdikleri çok katmanlı bir güneş reflektörü geliştirmişlerdir. Reflektörün dielektrik katmanları için, uzaydaki atomik oksijen, UV radyasyonu ve yüksek enerjili elektron erozyonuna karşı mükemmel kimyasal ve fiziksel stabilite gösteren Çinko Selenür (ZnSe) ve Baryum Florür (BaF_2) filmlerini tercih etmişlerdir. Özenle tasarlanan bu dielektrik yığın sayesinde, geliştirilen yüzeyin normal açıda güneş soğurganlığını 0.121 gibi son derece düşük OSR kalibresinde bir değere indirmişlerdir. Çalışmada, bu tür gelişmiş yansıtıcı filmler kullanılarak bir GEO uydusunun net ısı atım kapasitesinin geleneksel OSR kullanan bir sisteme kıyasla muazzam derecede genişletebileceği rakamsal analizlerle ortaya konmuştur (Xie et al., 2024).

- **Radyatörler:**

Uzay boşluğunda taşınım ısı transferi mekanizması gerçekleşmediğinden uyduda oluşan atık ısıyı uzaklaştırmanın tek yolu kızılötesi ışınım yoluyla ısıyı derin uzaya atmaktır. Radyatörler, uydularda bu termal amaçla yani elektronik cihazların çalışması sonucu oluşan iç ısıyı ve Güneş'ten / Dünya'dan emilen çevresel ısıyı dışarı atmak için kullanılır. Stefan-Boltzmann yasası çevresinde çalışan radyatörler, uydunun maruz kaldığı devasa atık ısının sistemden uzaklaştırılmasını sağlayarak uydunun ve üzerindeki

hassas cihazların operasyonel sıcaklık sınırlarında çalışmasını sağlarlar.

Isı atımını en üst düzeye çıkarmak için radyatör malzemeleri yüksek ısıl iletkenliğe sahip olan alüminyum ve kapton gibi hafif, ekstrem sıcaklık toleransı yüksek malzemelerden üretilir (Zaidan et al., 2026). Radyatörlerin dış yüzeyleri, bir önceki bölümde bahsettiğimiz OSR'ler, gümüş veya alüminize teflon ya da beyaz boyalar gibi düşük soğurganlık ve yüksek yayıcılık kaplamalarla donatılmalıdır. Çünkü radyatörlerin asıl amacı ısı atan plakalar olarak görünse de aynı zamanda uzay ortamından gelen ısı akılarına karşı da dayanıklı olmalıdır.

Tablo 1 Radyatör Kaplamalarının Karşılaştırılması

Kaplama	α	ϵ	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım
OSR	0.05-0.10	0.80-0.90	En iyi α/ϵ oranı Yüksek ısı atımı Uzun ömür	Kırılgan Yüksek maliyeti	GEO Yüksek güçlü uydular Derin uzay görevleri
Teflon	0.08-0.15	0.75-0.85	Atomik oksijene dayanımlı Esnek yapı İyi α/ϵ oranı	Zamanla kirlenme ve optik özelliklerde kötüleşme	LEO CubeSat'lar, orta güçlü uydular
Beyaz Boya	0.15-0.25	0.80-0.90	Ucuz ve uygulaması kolay Yüksek ϵ	UV ile bozulma Zamanla α yükselebilir	Küçük/orta ölçekli uydular Kısa- orta ömür görevler

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Isının radyatör paneline uydunun içinden homojen ve hızlı bir biçimde yayılmasını sağlamak için panellerin içine veya petek yapılı (honeycomb) panellerin aralarına ısı boruları entegre edilir ya da radyatör paneli ultra yüksek ısıl iletkenliğe sahip pirolitik grafit levhalar kullanılarak üretilir (Huang & Bu, 2024; Zaidan et al., 2026).

Araştırmacılar, modern uydu elektroniklerinin artan güç yoğunluğu ile ortaya çıkan devasa ısıyı daha verimli atabilmek için radyatör mimarilerinde bazı inovasyonlar gerçekleştirmiştir.

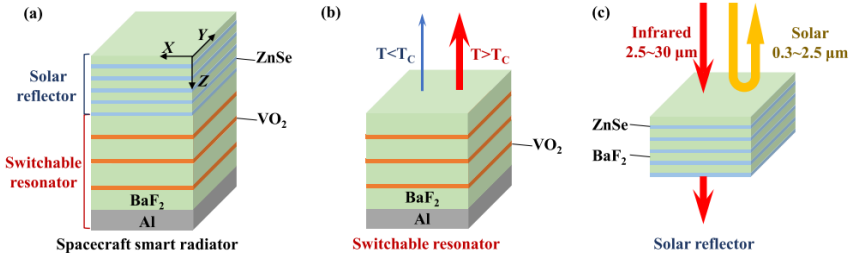
Chiranjeevi ve arkadaşları (Chiranjeevi et al., 2023), paralel ve seri radyatörlerin avantajlarını birleştiren hibrit uzay radyatörü tasarlamış ve eşlenik ısı transferi analizi ile performansını değerlendirerek optimize etmişlerdir. Çalışma sonucunda hibrit radyatörün MMOD (mikro meteorit ve uzay çöpleri) hasarına karşı dayanıklı olduğunu ve soğutucu akışkan sızıntısız durumunda dahi %95.4 ısı atımını koruyabildiğini ayrıca optimizasyon ile basınç kaybının 572 Pa'dan 10 Pa'a düşürüldüğünü ve radyatör kütlesinin 6.8 kg'dan 4.3 kg'a azaltıldığını göstermişlerdir.

Geleneksel radyatörler, uydunun maruz kaldığı tutulma (eclipse) ve sıcak gün (sunlight) döngülerinde alanlarını veya emisyonlarını değiştiremedikleri için ek aktif ısıtıcılara ihtiyaç duyarlar. Akıllı radyatör teknolojisi, uydunun dış sınır şartlarına ve iç atık ısı durumuna göre yansıtıcılık veya emisyon özelliklerini otonom bir şekilde şekilsel veya kristalografik olarak uyarlayan sistemlerdir.

Vanadyum dioksit (VO₂) akıllı kaplamalar, olağanüstü potansiyele sahip bir malzemedir. Yaklaşık 340 K (68°C) civarında geçirdiği faz değişimi ile düşük emisyonlu (0.07) bir yalıtıktan, yüksek emisyonlu (0.59) metalik bir yapıya geçiş yaparak ortam sıcaklığına göre otonom termal kontrol sağlar (Zaidan et al., 2026).

Xie ve arkadaşları (Xie et al., 2024), mevcut VO₂ filmlerin en büyük dezavantajı olan güneş enerjisi soğurganlığını (α_s) aşmak adına DBR ve Fabry-Perot rezonatörünün entegre edildiği yeni bir VO₂ tabanlı akıllı radyatör mimarisi geliştirmiştir. Bu radyatör BaF₂/ZnSe katmanları içeren DBR ile güneş ışınımını yansıtıran, uzay şartlarında metalik halde dahi 0.121 gibi olağanüstü düşük bir normal güneş soğurganlığına ve 0.825 gibi çok yüksek bir emisyon aralığına ulaşmıştır. GEO uydusu için yapılan testler, akıllı radyatörün kullanılmasının ısı atım dinamiklerini geleneksel OSR sistemlerine kıyasla çok daha geniş bir aralıkta (0-494.6 W/m²) kontrol edebileceğini ve uydu pillerine devasa bir enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir.

Şekil 2 VO₂ tabanlı akıllı uzay radyatörünün şematik gösterimi



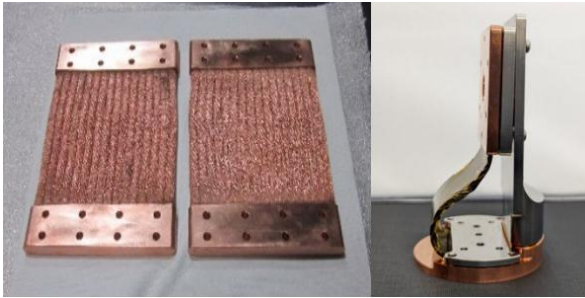
Kaynak: Xie et al., 2024

b. Termal kayışlar, iletim yolu ve temas direnci

Yörünge ortamında taşınımın yokluğu nedeniyle uydu içindeki ısı dağılımı büyük ölçüde iletim yolunun etkinliğine bağlıdır. Uzay vakumunda taşınım mekanizmasının ortadan kalkması, uydunun iç kısımlarında yer alan elektronik bileşenlerin ürettiği atık ısının dış radyatörlere aktarılmasında iletimi yegâne ısı transfer mekanizması haline getirir. Bu nedenle montaj geometrisi, cıvata düzeni, yüzey pürüzlülüğü ve termal arayüz malzemeleri yalnızca mekanik değil, aynı zamanda termal tasarım parametreleridir.

İki katı yüzey mekanik olarak birleştğinde, mikroskobik düzeyde pürüzlülükler nedeniyle temas yüzeyin tamamında değil, yalnızca sınırlı ve küçük noktalarda gerçekleşir (Shen et al., 2024). Isı sadece bu dar temas alanlarından geçebildiği için ortaya ‘ısıl temas direnci’ (thermal contact resistance) çıkar. Temas halindeki yüzeyler arasındaki sıcaklık farkını en aza indirmek ve etkin bir ısıl yönetim sağlamak için yüzeyin düzgünlüğü ve bileşenleri birbirine bastıran temas basıncı kritik öneme sahiptir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip bileşenlerdeki atık ısının verimli bir şekilde aktarılmasını sağlamak için ısıl temas iletkenliğinin yüksek olması gerekmektedir. Vakum ortamında birbirine temas eden iki yüzey arasındaki mikroskobik hava boşlukları yalıtkan görevi görür. Temas iletkenliğini arttırmak ve bu boşlukları doldurmak için ‘Termal Arayüz Malzemeleri’ (Thermal Interface Materials) kullanılır (Nasa, 2025). TIM’ler, uydunun ısı üreten elektronik kutuları ile bu ısıyı sönmüleyecek montaj yüzeyleri arasına yerleştirilen termal pedler, ince filmler, levhalar, macunlar veya gresler olabilir (Zaidaan & ark., 2026). Günümüzde ısıl teması iyileştirmek için dikey olarak hizalanmış karbon nanotüpler, esnek grafit filmler, bakır nanoyaylar ve yüksek iletkenli nanoyapılı kompozitler gibi çok gelişmiş TIM teknolojileri geliştirilmektedir (Zaidaan et al., 2026).

Şekil 3 Esnek Termal Kayışlar



Kaynak: NASA, 2025

Uydunun iç kısmında termal yönetimi sağlamak için ulaşılamayan, geometrik olarak karmaşık olan veya mekanik esneklik gerektiren noktalardaki ısıyı uzağa taşımak amacıyla kullanılan en etkili pasif yaklaşımlardan biri esnek termal kayışlardır (thermal straps). NASA raporunda termal kayışlar, titreşim ve entegrasyon kısıtlarını aşarak sıcak bölgeleri daha soğuk yapısal veya radyatif alanlara bağlayan yüksek iletken ve esnek bağlantılar olarak tanımlanmaktadır (NASA, 2025).

Tablo 2 Farklı tiplerde termal kayış malzemeleri

Malzeme	Termal İletkenlik, k , $W m^{-1} K^{-1}$
Grafen	~ 3500
Pirolitik grafen	~ 1500
Grafit fiber	~ 800
Bakır	~ 450
Alüminyum	~ 225

Kaynak: Zaidan et al., 2026

Geleneksel olarak termal kayışlar, mükemmel ısıl iletkenliğe sahip ince bakır veya alüminyum folyolardan ya da örgü kablolardan üretilirler (NASA, 2025). Uç kısımlarında kayışı ilgili yüzeylere tutturmak için genellikle alüminyum veya bakırdan yapılmış uç blokları bulunur. Ancak modern uzay mühendisliği, ağırlık tasarrufu ve daha yüksek verim arayışıyla bu kayışlarda karbon bazlı malzemelere yönelmiştir. Grafit fiberler, pirolitik grafit levhalar (PGS) ve tavllanmış pirolitik grafit (APG) çekirdekler kullanılarak tasarlanan yeni nesil termal kayışlar, standart bakır ve alüminyum kayışlara kıyasla hem çok daha üstün bir iletim verimliliği sunarlar hem de uydunun kütlelerini azaltırlar (Zaidan et al., 2026). Grafen tabanlı esnek kompozit kayışların kullanılması, eşdeğer ısıl iletkenliği korurken termal alt sistem kütlelerinde %40'a varan bir azalma sağlayabilmektedir (Shahil & Balandin, 2012).

c. Isı borusu

Uzay ortamındaki son derece değişken ısıl çevrede, uyduların termal kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilen en temel ve kritik donanımlardan bir tanesi de ısı borularıdır. Isı boruları, dışarıdan herhangi bir elektriksel güç veya hareketli parça gerektirmeksizin, termal enerjiyi çalışma akışkanının buharlaşma ve yoğunlaşma gizli ısısı prensibiyle taşıyan pasif iki fazlı ısı transfer cihazlarıdır. Fiziksel olarak evaporatör, adyabatik bölüm ve kondenser olmak üzere üç ana bölümden oluşurlar (Selvadurai et al., 2022). Uydulardaki temel kullanım amacı, elektronik bileşenlerin ürettiği yüksek atık ısıyı emerek, uydunun gölgede kalan daha soğuk bölgelerine veya doğrudan ısı atımının gerçekleştiği radyatör panellerine yüksek verimle taşımaktır. Uydulardaki bölgesel sıcaklık birikmelerinin önlenmesinde ve platform genelinde izotermal bir yüzey sıcaklığı elde edilmesinde önemli bir rol oynarlar.

Huang ve Bu (2024), ısı boruları üzerine yaptığı çalışmada yüksek güçlü haberleşme uydularının barındırdığı birden fazla çalışma modu, yoğun atık ısı ve karmaşık dış ısı akılarına karşı geliştirdikleri güncel ve yetkin bir ısı borusu uygulamasını literatüre sunmuşlardır. Çalışmada, uydunun yörüngede maruz kalacağı dış ısı akıları analiz edildikten sonra yapısal petek sandviç panellerin düşük ısıl iletkenliğini iyileştirmek amacıyla +Y, -Y, +Z ve +X panellerinin içerisine toplam 13 adet ısı borusu gömülmüştür. Güneş ışınımına aynı anda maruz kalmayan $\pm Y$ ve $\pm Z$ yüzeyleri de çevresel şokları dengelemek ve ısı atım verimliliğini artırmak için yine ısı borularıyla birbirine entegre edilmiştir. Bu çalışmadaki en büyük termal inovasyonlardan biri, uydudaki 448 W gibi çok yüksek ısı üreten katı hal güç amplifikatörünün (SSPA) soğutulması için gerçekleştirilmiştir. Geleneksel ısı borularının yapısal kısıtlılıklar nedeniyle doğrudan uygulanamadığı bu donanımın yarattığı atık ısı, özel olarak tasarlanmış ‘kafes ısı borusu’ mimarisi ile petek sandviç panellere ve ardından radyatör panellerine güvenle aktarılmıştır.

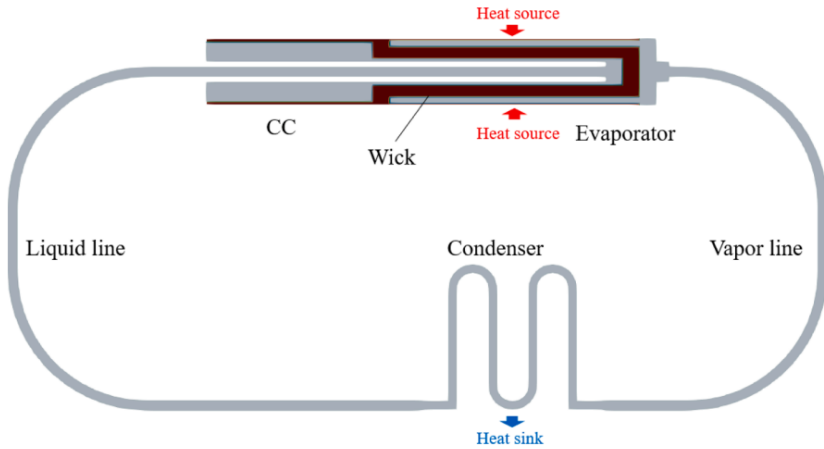
Sayısal analiz sonuçları, ısı borularının entegrasyonu ile uydunun +Y, -Y, ve +Z panellerindeki sıcaklık homojenliğinin sırasıyla 8 °C, 9.9 °C, ve 34.2 °C oranında olağanüstü bir şekilde iyileştiğini göstermiştir. Sistemdeki yüksek güçlü bileşenlerin maksimum sıcaklıklarında radikal düşüşler elde edilirken özellikle katı hal güç amplifikatörünün maksimum sıcaklığı 164 °C düşürülmüştür. Güç kontrolcüsünün sıcaklığı 32.5 °C ve ikincil güç kaynağının sıcaklığı 22 °C düşürülmüştür. Tasarımın fiziksel doğruluğu, ısıl vakum odasında gerçekleştirilen üç farklı ekstrem sıcak/soğuk ısıl denge testi ile kanıtlanmış ve cihazların belirlenen güvenli operasyonel sıcaklık sınırlarında kaldığı bilim dünyasına sunulmuştur (Huang & Bu, 2024).

Daha gelişmiş bir çözüm olan döngülü ısı borusu (Loop Heat Pipe – LHP) mimarileri, özellikle sıcaklık kararlılığı daha ön planda olan sistemlerde öne çıkmaktadır. Geleneksel ısı borularından yapısal olarak en belirgin farkı, buhar ve sıvı akış hatlarının fiziksel olarak birbirinden tamamen ayrılmış olmasıdır (Guerriero et al., 2026). Normal ısı borularında kılcal fitil (wick) yapısı tüm boru boyunca uzanırken, LHP sistemlerinde fitil yapısı yalnızca evaporatör ve sıvı haznesi içine lokalize edilmiştir. Döngünün geri kalanındaki buhar ve sıvı taşıma hatları pürüzsüz cidarlı boş borulardan oluşmaktadır (Zaidan & ark., 2026).

LHP teknolojisi ilk olarak 1994 yılında Ruslar tarafından geliştirilen Obzor uydusunda, optik ekipmanların ısı kontrolü için propilen ve amonyak akışkanları kullanılarak uygulanmıştır. Bunu 2004 yılında batarya elektroniklerini soğutmak amacıyla Amerikan Swift uydusu takip etmiştir (Jiang et al., 2022). Son yıllarda LHP'ler üzerine yapılan çalışmalarda Shao ve arkadaşları tarafından geliştirilen çalışma, LHP sistemlerindeki karmaşık buhar-sıvı dağılımını ve akışkan yoğunluğunun ısı performans üzerindeki kritik etkilerini hem sayısal hem de deneysel olarak ortaya koyan ufuk açıcı bir çalışmadır (Shao et al., 2023). Araştırmacılar bu

çalışmada, LHP tasarımlarını optimize etmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) metodolojisine dayanan, kılcal kuvveti ve faz değişimi modellerini barındıran iki boyutlu ve zamana bağlı bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Sayısal modeli doğrulamak adına, yoğuşturucu bölümüne yerleştirilmiş şeffaf kuvars bir cam pencere ve yüksek hızlı kamera yardımıyla R245fa akışkanının hareketlerini gerçek zamanlı izleyebildikleri görsel bir deney düzeneği kurmuşlardır. LHP'ye uygulanan ısı yükü 10 W seviyelerindeyken sistem değişken iletkenlik modunda çalışmış ve yoğuşturucunun yaklaşık %50'si sıvı ile dolu kalmıştır. Ancak ısı yükü 20 W'ın üzerine çıkıp 40 W'a kadar kademeli olarak arttırıldığında sistem otonom olarak sabit iletkenlik moduna geçiş yapmıştır. Araştırmacılar, LHP bu modda çalışırken artan ısı yüküyle birlikte yoğuşturucudaki buhar hacminin azaldığını, sıvı hacminin ise dramatik şekilde artarak buhar-sıvı arayüzünün yoğuşturucu girişine doğru gerilediğini tespit etmişlerdir. Isı yükü 45 W gibi ekstrem bir noktaya ulaştığında ise yoğuşturucu tamamen sıvı ile dolmuş, buharı yoğuşturacak bir alan kalmadığı için LHP sistemi aniden işlevini yitirmiş ve tamamen devre dışı kalmıştır.

Şekil 4 LHP geometrisi



Kaynak: Shao et al., 2023

Isı yükünün artması, sabit hacimli kapalı bir sistem LHP'nin ortalama doyma sıcaklığının yükselmesine sebep olmaktadır. Doyma sıcaklığı arttıkça, çalışma akışkanı R245fa'nın buhar yoğunluğu artarken sıvı yoğunluğu düşmektedir. LHP sabit hacimli bir sistem olduğundan ve içindeki toplam kütle değişmediğinden, yoğunluklardaki bu değişim sıvı fazın sistemin içinde kapladığı hacmi fiziksel olarak genişletmek zorundadır. Artan bu devasa sıvı hacmi, rezervuardan taşarak yoğunlaştırucuyu doldurmuş ve sistemin tıkanmasına yol açmıştır.

Çalışmanın vardığı en net bilimsel sonuç, özellikle küçük uydu mimarilerinde karşılaşılan yüksek ısı akılarında ve dar hacimlerde akışkan yoğunluğundaki bu değişimlerin asla ihmal edilemeyeceğidir. Araştırmacılar, LHP kapalı devre sistem simülasyonlarında akışkanın buhar ve sıvı fazlarını idealleştirmek yerine, sistemin termal rejimlerini doğru tahmin edebilmek için fiziksel özellikleri çok hassas hesaplayan Peng-Robinson denklemi gibi modellerin kullanılmasının zorunlu olduğunu literatüre sunmuştur (Shao et al., 2023).

d. Faz Değiştiren Malzemeler (PCM)

Faz değiştiren malzemeler (Phase Change Materials – PCM), belirli bir faz geçişi sıcaklığında çok büyük miktardaki termal enerjiyi, gizli ısı olarak hapseden ve sıcaklık düştüğünde bu ısıyı ortama geri vererek eski fazına dönen malzemelerdir. Uzun aralıklarda PCM'lerin temel kullanım amacı, elektronik cihazların aralıklı veya periyodik çalışmasından kaynaklanan ani ve yüksek atık ısı yüklerini sönmektir.

PCM'lerin çalışma mantığı, uydunun termal olarak hayatta kalması için bir tampon oluşturmaya dayanır (Khan & Singh, 2024). Bir aviyonik bileşen görev döngüsünde açık duruma geldiğinde ve yüksek ısı ürettiğinde, bu ısı doğrudan radyatöre iletilmek yerine önce PCM tarafından emilir. PCM bu ısıyı emerek faz değiştirir ve

sistemi neredeyse izotermal durumda tutar. Cihaz kapalı konuma geçtiğinde veya uydu gölgeye girdiğinde ise PCM içindeki ısıyı yavaşça dışarı atarak ilk durumdaki fazına geri döner ve bir sonraki çalışma için hazır hale gelir. Bu çalışma mantığı, devasa soğutma radyatörlerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırır. Khan ve Singh'in çalışmasında vurgulandığı üzere, PCM kullanımı sayesinde uydudaki radyatörler, cihazın ürettiği anlık maksimum tepe ısı yüküne göre değil, yörünge boyunca oluşan ortalama ısı yüküne göre boyutlandırılır ve bu da sistemin kütlesi ile hacminde devasa bir düşüş sağlar.

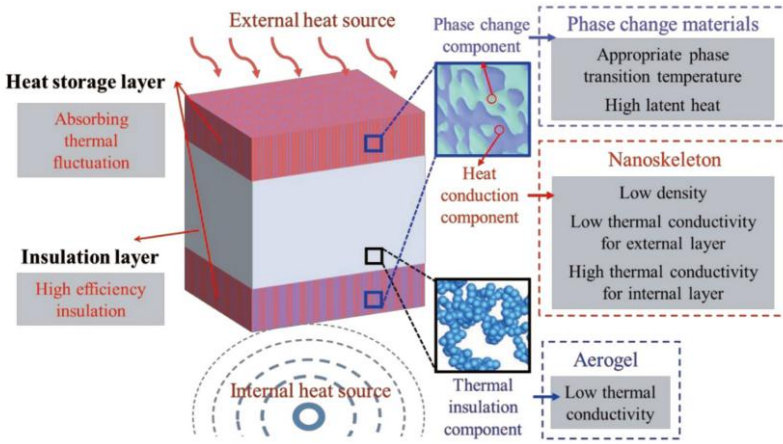
Aynı çalışmada, PCM kullanımının en büyük zorluğuna da dikkat çekilmiştir. Uydu platformlarında kullanılan PCM'lerin termofiziksel olarak en büyük dezavantajı düşük ısıl iletkenliktir. Elektronik cihazlardan gelen ani ısı dalgalanmalarına hızlı bir biçimde yanıt verilebilmesi için PCM'lerin saf halde kullanımı pratik değildir. Çünkü düşük iletkenlik, ısının PCM kütlesine nüfuz etmesini yavaşlatır. Bu sorunu aşmak için alüminyum ve bakır gibi metal köpükler, karbon fiberler veya petek matrisleri gibi yüksek iletken dolgu malzemeleri veya nanokompozit PCM'lerin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.

PCM'lerin bu nanokompozit yapıları ve uydulardaki karmaşık ısı transfer mekanizmaları üzerine literatürdeki en dikkat çekici modellemelerden biri, Wang ve arkadaşlarının (2024) çalışmasıdır. Bu çalışma, uzay tabanlı kütleçekimsel dalga tespiti yapan uydulardaki ölçüm cihazları gibi sıcaklık dalgalanmalarının mikrokelvin veya 0.1 K gibi çok dar ve ekstrem toleranslar içinde sınırlandırılması gereken sistemlerin termal yönetimi üzerine odaklanmıştır.

Wang ve arkadaşları, uydunun dış yüzeyinden kaynaklanan 20 K'lık sıcaklık dalgalanmaları ile uydu içindeki elektroniklerin ürettiği 20 W/m² ısıyı eşzamanlı olarak kontrol edebilmek için nanokompozit PCM'lerin (NPCM) ve aerogel yalıtımının bir araya

getirildiği yenilikçi bir ‘sandviç yalıtım mimarisi’ tasarlanmıştır. Bu tasarım, ortada çok düşük iletkenliğe sahip silika aerogel yalıtım katmanını barındırırken, dış çevreye bakan katmanda ısının içeri nüfuz etmesini yavaşlatan karbon köpük iskeletli düşük ısı iletkenliğe sahip NPCM1 (2.95 W/mK) ve içerideki elektroniklere bakan katmanda, atık ısıyı yüzeyde biriktirmeden hızla emip depolayabilen bakır gözenekli matrisle güçlendirilmiş yüksek iletkenliğe sahip NPCM2’den (12.53 W/mK) oluşmaktadır.

Şekil 5 NPCM'lere dayalı yalıtım şeması



Kaynak: Wang et al., 2024

Geliştirilen NPCM yapısı, 3.2 mHz'in üzerindeki yüksek frekanslı termal bozulmalara karşı olağanüstü bir sönümlenme kabiliyeti göstermiş ve hedef cihazın üzerindeki sıcaklık değişimini 12000 saniyelik uzun süreli termal döngülerde dahi 0.09 K gibi çok minimal bir aralıkta tutmayı başarmıştır. Araştırmacılar, PCM'lerin tek başına yalıtım malzemesi olmadan kullanılmasının hedef yüzeyde ısının yığılmasına yol açtığını; bu sandviç yapının ise sadece NPCM kullanılan tasarımlara kıyasla sıcaklık dalgalanmasını %61 oranında düşürdüğünü kanıtlamışlardır (Wang & et al., 2024).

Aktif Termal Kontrol Yaklaşımları

Pasif çözümler çoğu görevde uydu termal kontrolünün omurgasını oluştursa da yüksek güçlü elektronikler, dar çalışma sıcaklık aralığına sahip bataryalar, kriyojenik dedektörler ve yüksek ısı akıllı haberleşme yükleri, aktif termal kontrol gerektirebilir. Dışarıdan elektriksel güç veya mekanik bir itici güç gerektiren bu sistemler, uydudaki sıcaklık dalgalanmalarına dinamik olarak müdahale ederler. NASA'nın sınıflandırmasına göre küçük uzay araçlarında başlıca aktif yöntemler elektrikli ısıtıcılar, termoelektrik soğutucular (TEC), kriyosoğutucular ve akışkan çevrimlerdir (NASA, 2025).

a. Isıtıcılar, TEC ve kriyosoğutucular

Uzay araçlarındaki aktif termal kontrol cihazları arasında küçük uydulara ve CubeSat'lara en kolay entegre edilebilen, hacim ve kütle açısından en hafif donanımlar ısıtıcılardır. Uyduların yörüngede Dünya'nın gölgesine girdiği anlarda veya derin uzayın aşırı soğuk koşullarında ekipmanların donmasını engellemek, sistemleri minimum operasyonel sıcaklık sınırları içerisinde tutmak ve aktif olmayan bileşenleri çalıştırmadan önce ısıtmak amacıyla kullanılırlar (Zaidan & ark., 2026). En yaygın kullanım şekli kapton gibi esnek ve elektriksel olarak yalıtkan bir film tabakasının arasına yerleştirilmiş, kazınmış folyo direnç elemanlarından oluşan ince yama (patch) ısıtıcıdır (Zaidan & ark., 2026). Sistem elektrik enerjisini doğrudan ısı enerjisine çevirerek çalışır. Çalışma mekanizmaları genellikle kapalı döngü sıcaklık geri beslemesi sağlayan sensörler, mekanik termostatlar veya uçuş yazılımı tarafından kontrol edilen termistörler aracılığıyla otomatik olarak açılıp kapanacak şekilde kurgulanır (Bulut & ark., 2008).

Termoelektrik soğutucular, 'Peltier etkisi' prensibine dayanarak bölgesel soğutma sağlayan minyatür, katı hal mikro ısı pompalarıdır (NASA, 2025). Temel olarak, elektriksel olarak seri,

termal olarak paralel bağlanmış iki farklı yarı iletken malzemenin (P-tipi ve N-tipi) metal bağlantılar ile birleştirilip iki seramik alt tabaka arasına sıkıştırılmasından oluşurlar. Bu yarı iletken dizisinden elektrik akımı geçirildiğinde, cihazın bir yüzeyi ısıyı emerek soğurken, emilen bu ısı diğer yüzeye taşınarak dışarı atılır. Elektrik akımının yönü tersine çevrildiğinde ise cihazın işlevi tam tersine döner. Yani ısıtma amaçlı da kullanılabilir (Consolo Jr., 2021). Hareketli hiçbir parçası olmayan TEC'ler, son derece güvenilir, sessiz, titreşimsiz, hafif ve kompakt olmaları nedeniyle uzay araçlarında tercih edilirler (NASA, 2025). Uydularda genel bir soğutmadan ziyade, yıldız izleyiciler, kızılötesi sensörler, düşük gürültülü amplifikatörler gibi çalışırken bölgesel olarak dar sıcaklık toleranslarında tutulması gereken küçük, spesifik ekipmanların hedeflenmiş soğutması amacıyla kullanılırlar.

Kriyosoğutucular ise, 100 K (-173°C) ve altındaki aşırı düşük sıcaklıklara inmek için tasarlanmış kapalı döngü çalışan minyatür mekanik soğutma/refrigerasyon sistemleridir (NASA, 2025). Uzay teleskopları, kuantum deney modülleri, derin uzay araştırmaları veya Dünya gözlemi yapan uyduların üzerindeki orta ve uzun dalga kızılötesi dedektörler ve spektrometrelerin, optimum performans sergileyebilmek, dalga boyu kapsamını genişletmek ve algılayıcıların ısı gürültüsünü minimuma indirmek için mutlak sıfıra yakın ortamlarda çalışması zorunludur. Kriyosoğutucular, bu hassas enstrümanların ihtiyaç duyduğu kriyojenik şartları sağlamak amacıyla kullanılır. Darbe tüplü veya Stirling döngüsü gibi farklı termodinamik çevrimlerle çalışan bu donanımlar, yüksek soğutma performansı sunmalarına karşın uydunun güç bitçesine ciddi bir yük bindiren oldukça karmaşık sistemlerdir. Ayrıca mekanik olarak çalışmaları esnasında uyduya mikro titreşimler yaydıkları için, yüksek hassasiyetli optik aletlerin görüntü kalitesini bozabilirler. Bundan dolayı özel titreşim izolasyon sistemleriyle birlikte kullanılmaları gerekmektedir (Zaidan & ark., 2026).

Dezavantajlarına rağmen, hedef cihazlarda 50 K'in dahi altına inebilen derin soğutma ihtiyaçları için modern uzay misyonlarında alternatifsiz olarak görev yaparlar (NASA, 2025).

b. Mekanik pompalanan akışkan çevrimler

Mekanik pompalanan akışkan çevrimler (Mechanically Pumped Fluid Loops -MPFL), çalışma akışkanını kapalı bir boru hattı içerisinde dolaştırmak amacıyla sirkülasyon pompası kullanan aktif termal kontrol sistemleridir. Bu sistemlerde akışkan, elektronik bileşenler üzerine yerleştirilen soğuk plakalar veya evaporatörler gibi ısı kaynaklarından aldığı ısıyı radyatörlere taşıyarak uzaya aktarır. Bu sistemler, akışkanın tüm döngü boyunca sadece sıvı fazda kalarak duyulur ısı ile çalıştığı 'tek fazlı MPFL' ve ısı kaynağından geçerken kaynayarak gazla dönüştüğü ve radyatörde tekrar yoğunlaştığı 'iki fazlı MPFL' olmak üzere iki ana mimariye ayrılır. Özellikle iki fazlı MPFL sistemleri, tıpkı PCM'ler gibi faz değişiminin gizli ısını kullandıkları için tek fazlı sistemlere kıyasla çok daha küçük kütleli debilerle daha yüksek ısı transfer verimliliği, daha izotermal stabilite ve düşük güç tüketimi sağlarlar (Zaidan & ark., 2026). MPFL teknolojisi, geleneksel ısı borularının kılcal pompalama kuvvetinin yetersiz kalarak kuruma riski yarattığı yüksek güçlü ve karmaşık termal görevlerde kullanılması tavsiye edilen en etkili çözümdür.

MPFL'ler sirkülasyon pompaları ve vanalar içerdiklerinden güç tüketimi, ilave kütle ve titreşim dezavantajlarına sahiptir. Bu nedenle hacim ve güç bütçesinin kısıtlı olduğu küçük uydular ve CubeSat'larda tarihsel olarak tercih edilmemişlerdir. Ancak modern uzay misyonlarında mikro pompa teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte küçük uydulara yönelik minyatür MPFL tasarımları da hızla artmaktadır (Zaidan & ark., 2026).

Guerriero ve arkadaşlarının (2026) güncel çalışmalarında, küçük uyduların giderek artan kullanımına dikkat çekerek, bu

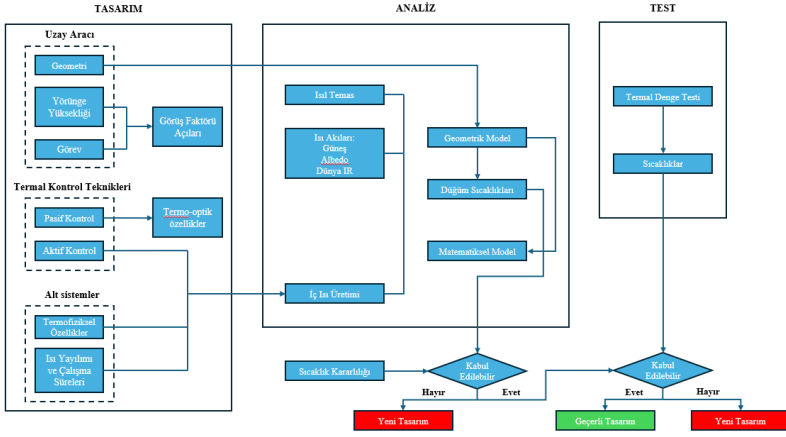
platformların karşılaştığı en kritik mühendislik probleminin sınırlı yüzey alanı ve son derece kompakt mimarilerin neden olduğu, mevcut termal kontrol çözümlerinin etkin şekilde uzaklaştırmakta yetersiz kaldığı yüksek ısı akıları olduğu belirtilmiştir. Isı boruları, PCM'ler ve MPFL sistemleri büyük uzay araçlarında yüksek verimle kullanılsa da küçük uydular için ölçeklendirme ve mikro yerçekimi etkilerinden kaynaklı bu teknolojilerin hâlâ büyük bir boşluk barındırdığı vurgulanmıştır (Guerriero & ark., 2026). Küçük uydu platformlarında elektroniklerin yaratacağı yerel ısı akılarının gelecekte 200 W/cm^2 seviyelerini aşmasının beklendiği, bu doğrultuda geleneksel ısı boruları veya tek fazlı soğutma sistemlerinin yetersiz kalacağı ifade edilmiştir. Sonuç olarak araştırmacılar, iki fazlı pompalanan sistemlerin bu ısı yüklerini yönetmek için en umut verici çözüm olduğunu, ancak yaygın ve güvenilir kullanımlarının sistemlerin başarılı bir şekilde minyatürleştirilmesine, yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesine, mikro yerçekimindeki iki fazlı taşıma fiziğinin temelden çözülmesine ve uzay şartlarında gerçekleştirilecek titiz deneysel doğrulamalara ciddi şekilde bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Guerriero & ark., 2026).

Tablo 3 Pasif ve aktif sistemlerin karşılaştırılması

Özellik	Pasif Kontrol	Aktif Kontrol
Güç Gereksinimi	Yok	Var
Hareketli Parça	Genellikle yok	Var
Güvenilirlik ve Risk	Parça sayısı az ve bağımsız enerji olduğu için güvenilirliği yüksektir.	Karmaşık yapıları nedeniyle arıza riskleri daha yüksektir.
Maliyet ve Kütle	Düşük maliyetli, hafif ve hacim açısından avantajlıdır.	Daha yüksek maliyetli, ağır ve sistem bütçesine ek yük katar.
Hassasiyet	Değişken koşullara otonom ancak sınırlı uyum sağlar.	Dar sıcaklık toleranslarında hassas kontrol sağlar.
Kullanım Alanı	Mikro-nano uydular ve CubeSat'lar.	Yüksek güçlü ve derin uzay görevi uydular.

Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.

Şekil 6 Küçük uyduların tasarım, analiz ve test çerçevesi



Kaynak: Blanchete & Bah, 2024

Güncel Literatürün Eleştirel Sentezi

Son beş yıllık literatür üç ana eksende yoğunlaşmaktadır. Birinci eksen, termal modelleme ve doğrulama iş akışının iyileştirilmesidir. Shen ve arkadaşları (2024), küçük uydu termal analizinde ağ modelleri, sayısal çözümler, matematiksel model yaklaşımı, hassasiyet analizi ve parametre korelasyonunun birlikte düşünülmesi gerektiğini savunmaktadır. Bu çalışma, termal modelin artık yalnızca sonlu eleman veya düğüm ağı çözümü olmadığını; tasarım optimizasyonu ve test korelasyonu için karar destek aracına dönüştüğünü göstermektedir.

İkinci eksen, pasif çözümlerin ‘akıllı’ ve ‘çok işlevli’ hâle gelmesidir. Xie ve arkadaşlarının (2024) VO₂ tabanlı akıllı radyatörü, sabit optikli OSR yaklaşımını aşan bir uyarlanabilirlik sunmaktadır. Normal güneş soğurumu 0.121 ve yayılım ayarlanabilirliği 0.825 olan tasarım, GEO uydusu örneğinde net ısı reddi aralığını klasik OSR kullanımındaki 146.5-463.9 W/m² aralığından 0-494.6 W/m² aralığına genişletmektedir. Bu sonuç, gelecekte termal alt sistemlerin yalnızca ‘ısıyı atan yüzeyler’ değil,

çevresel ve görevsel koşullara tepki veren fonksiyonel malzemeler üzerinden tasarlanacağını göstermektedir.

Üçüncü eksen, iki fazlı çözümlerin küçük uydu dünyasına taşınmasıdır. Literatür, ısı borusu ve PCM çözümlerinin artık olgunlaşmış olduğunu, fakat yüksek ısı akıllı yeni nesil küçük uydu yüklerinin buna ek olarak döngülü ısı borusu veya mekanik pompalanan çevrimleri zorunlu kıldığını göstermektedir. Bununla birlikte mikro yerçekiminde akış kararlılığı, güvenilir başlatma, kütle cezası, entegrasyon karmaşıklığı ve TRL sınırlamaları bu alanın önündeki temel engellerdir (Guerriero et al., 2026).

Doğrulama yönünden bakıldığında, Blanchete ve Bah'ın (2024) 3U CubeSat çerçevesi önemli bir örnek sunmaktadır. Çalışma, termal tasarım, modelleme ve test zincirinin sistematik olarak kurulduğunda simülasyon ile thermal balance test sonuçları arasında 5 °C'den küçük sapmalar elde edilebileceğini göstermektedir. Benzer biçimde Bulut'un (2021) TURKSAT-3USAT çalışması, pasif ve aktif yöntemlerin birlikte kullanıldığı 3U iletişim CubeSat'lerinde TVAC doğrulamasının kritik olduğunu ve batarya gibi dar sıcaklık aralığına sahip bileşenlerin çoğu zaman tasarımın belirleyici unsuru olduğunu ortaya koymaktadır.

Tasarım İlkeleri ve Mühendislik Çıkarımları

Literatür sentezi, uydu sıcaklık yönetiminde tekil bir 'en iyi teknoloji' bulunmadığını açık biçimde göstermektedir. Bunun yerine görev tipi, güç yoğunluğu, hassasiyet düzeyi, ömür beklentisi, entegrasyon hacmi ve doğrulama imkânları doğrultusunda katmanlı bir mimari kurulmalıdır. Bu bölümden çıkan başlıca tasarım ilkeleri şöyle özetlenebilir.

1. İlk ilke, termal tasarımın yörünge ve görev modundan bağımsız ele alınamayacağıdır. Yörünge, yönelim ve görev çevrimi termal yükleri doğrudan belirler.

2. İkinci ilke, küçük uydularda geometri ve paketleme kararlarının termal sonuç doğurduğudur. Yüzey alanı ve iç hacim sınırlamaları sonradan telafi edilemez.

3. Üçüncü ilke, batarya, optik sensör, güç elektroniği ve dedektör gibi kritik bileşenlerin sıcaklık limitlerinin tasarımı domine ettiğidir.

4. Dördüncü ilke, pasif çözümlerin öncelikli; aktif çözümlerin ise gerekçeli ve görev-temelli kullanılması gerektiğidir.

5. Beşinci ilke, termal model ile termal test arasında kapalı bir korelasyon döngüsü kurulmadan tasarımın tamamlanmış sayılmaması gerektiğidir.

Bu ilkeler çerçevesinde, modern uydu termal kontrol tasarımı bir bileşen seçimi probleminde çok, bir sistem mimarisi problemidir. Özellikle yüksek entegrasyonlu yeni nesil uydularda termal tasarım; güç elektroniği, yapı, yönelim stratejisi ve görev planlamasıyla birlikte yürütülmelidir.

Kaynakça

Atar, C., & Aktaş, M. (2022). Advances in thermal modeling and analysis of satellites. *Gazi University Journal of Science*, 35(1), 42–58. <https://doi.org/10.35378/guj.s.840191>

Blanchete, N., & Bah, A. (2024). Thermal design, analysis and test: Framework for CubeSat in low Earth orbit. *Results in Engineering*, 24, 103401. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103401>

Bulut, M., Sozbir, N., & Gulgonul, S. (2008, July 28–30). Thermal control design of TUSAT. In *6th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)* (AIAA 2008-5751). American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2008-5751>

Bulut, M., & Sözbir, N. (2021). Thermal design, analysis and test validation of TURKSAT-3USAT satellite. *Journal of Thermal Engineering*, 7(3), 468–482. <https://doi.org/10.18186/thermal.887316>

Chiranjeevi, P. B., Krishnaraj, K., Vinod, K. G., Srinivasan, K., & Sundararajan, T. (2023). Numerical simulations, experimental investigation and optimization of hybrid space thermal radiators. *Applied Thermal Engineering*, 234, 121275. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121275>

Consolo, R. C., Jr. (2021). *State-of-the-art of thermal control solutions to establish a modular, multi-orbit capable spacecraft thermal management system design methodology* [Master's thesis, Embry-Riddle Aeronautical University]. Scholarly Commons. <https://commons.erau.edu/edt/628>

Consolo, R. C., & Boetcher, S. K. S. (2023). Advances in spacecraft thermal control. In J. P. Abraham, J. M. Gorman, & W. J.

Minkowycz (Eds.), *Advances in heat transfer* (Vol. 56, pp. 1–50). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2023.04.001>

Fetuga, I., Adeleke, O., Ederhion, J., & Oluwadare, S. (2026, January 27). Spacecraft thermal control in extreme environments: Surviving lunar night and Martian dust. *Electronics Cooling*. <https://www.electronics-cooling.com/2026/01/spacecraft-thermal-control-in-extreme-environments-surviving-lunar-night-and-martian-dust/>

Guerriero, A., Cervone, A., & Falsetti, C. (2026). Review of two-phase thermal control systems for small satellites: Current advances and open challenges. *Applied Thermal Engineering*, 289, 129757. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129757>

Huang, H., & Bu, C. (2024). Design and verification of thermal control system of communication satellite. *Aerospace*, 11(10), 803. <https://doi.org/10.3390/aerospace11100803>

Jiang, F., Zhao, S., Wang, L., Yu, S., Guan, H., & Liu, J. (2022). Energy harvesting and thermal management system in aerospace. *Frontiers in Materials*, 9, 907858. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.907858>

Khan, J., & Singh, P. (2024). Review on phase change materials for spacecraft avionics thermal management. *Journal of Energy Storage*, 87, 111369. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111369>

Mikhailov, M. M., Yuryev, S. A., Lapin, A. N., & Goronchko, V. A. (2023). Reflective thermal control coating for spacecraft based on ZnO pigment and Li₂SiO₃ silicate modified by SiO₂ nanoparticles. *Ceramics International*, 49, 20817–20821. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.214>

National Aeronautics and Space Administration. (2025). Thermal control. In *State-of-the-art small spacecraft technology*

report (Chapter 7). National Aeronautics and Space Administration. <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/>

Selvadurai, S., Chandran, A., Valentini, D., & Lamprecht, B. (2022). Passive thermal control design methods, analysis, comparison, and evaluation for micro and nanosatellites carrying infrared imager. *Applied Sciences*, *12*(6), 2858. <https://doi.org/10.3390/app12062858>

Shahil, K. M. F., & Balandin, A. A. (2012). Graphene–multilayer graphene nanocomposites as highly efficient thermal interface materials. *Nano Letters*, *12*(2), 861–867. <https://doi.org/10.1021/nl203906r>

Shao, B., Jiang, Z., Xu, G., Liu, L., Li, N., & Dong, D. (2023). Numerical and experimental study on the vapor-liquid distribution of loop heat pipe with varying density of working fluid. *Applied Thermal Engineering*, *226*, 120278. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120278>

Shen, M., Zhang, L., Sun, Z., Kong, L., Liu, Y., & Xue, Z. (2024). Models, simulations, and applications of small satellite thermal analysis. *Advances in Space Research*, *74*, 836–860. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.04.026>

Wang, Z., He, C., Hu, Y., & Tang, G. (2024). High-stability temperature control and frequency-domain analysis of sandwich-like insulation design based on phase change materials for satellite thermal management. *Science China Technological Sciences*, *67*(8), 2387–2404. <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2597-y>

Xie, B., Zhang, W., Zhao, J., Zheng, C., & Liu, L. (2024). Design of VO₂-based spacecraft smart radiator with low solar absorptance. *Applied Thermal Engineering*, *236*, 121751. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121751>

Zaidan, S., Mulla, Z., Nakkar, R., Ullah, I., Haq, A. ul, & Qasem, N. A. A. (2026). Advances in satellite thermal management systems: Challenges, innovations, and future directions. *Acta Astronautica*, 244, 82–121.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2026.02.002>

BÖLÜM 4

FREZELEMEDE ÇEKİÇ TESTİ

ABDULMECİT GÜLDAŞ¹

ELVAN ATEŞ²

HAKAN ZAFER KIZILKAYA³

Giriş

Frezeleme işlemleri, talaşlı imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanılan ve üretim sektöründe kritik bir öneme sahip olan operasyonlardan biridir. Özellikle havacılık, otomotiv, kalıpcılık ve biyomedikal endüstrilerde, yüksek hassasiyet, yüzey kalitesi ve üretim verimliliği gereksinimleri frezeleme işlemlerine olan talebi artırmaktadır. Ancak bu avantajlarının yanı sıra, frezeleme operasyonlarının en önemli problemlerinden biri dinamik titreşimlerdir. Bu titreşimler, özellikle kendiliğinden titreşim (chatter) olarak adlandırılan olay, işleme kalitesini bozmakta, takım

¹ Prof. Dr., Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1865-2272

² Y. Mak. Müh., Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Bölümü, TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. NC Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-0565-9421

³ Y. Mak. Müh., Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-7842-241X

ömrünü azaltmakta ve hatta makine tezgâhlarına zarar verebilmektedir.

Titreşim oluşumunun önlenmesi için, kesici takım-tutucu-makine tezgâhı sisteminin dinamik karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada çekiç testi (tap testing), sistemin frekans cevabını (Frequency Response Function, FRF) elde etmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Çekiç testi yöntemi; hızlı uygulanabilirliği, tahribatsız oluşu ve yüksek doğruluk sağlaması nedeniyle akademik araştırmalarda ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Çekiç testi, temelde bir modal analiz yöntemidir. Takım veya iş mili ucuna uygulanan kısa süreli bir darbe ile sistem uyarılır ve bu uyarıya verilen dinamik tepki ivmeölçer yardımıyla ölçülür. Ölçülen sinyallerden sistemin doğal frekansları, sönüm oranları ve rijitlik değerleri hesaplanır. Elde edilen FRF eğrileri, stabilite lob diyagramlarının (SLD) çıkarılmasında ve güvenli kesme parametrelerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Bu sayede, belirli bir takım devrinde hangi kesme derinliklerinin titreşime yol açmadan kullanılabileceği öngörülebilmektedir.

Literatürde çekiç testi uygulamaları farklı bağlamlarda incelenmiştir. Örneğin, ince cidarlı parçaların frezelenmesi sırasında iş parçası rijitliğinin FRF üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Benzer şekilde, uzun takım uzantılarında rijitliğin azalması nedeniyle titreşim eğiliminin arttığı ve çekiç testi ile optimum kesme koşullarının belirlenebildiği rapor edilmiştir. Endüstride ise Siemens, DMG Mori gibi tezgâh üreticileri ve Sandvik Coromant gibi kesici takım firmaları, çekiç testi tabanlı sistemleri aktif olarak uygulamaktadır.

Bu bölümde amaç, frezeleme operasyonlarında çekiç testinin teorik temellerini, uygulama prosedürlerini ve pratik mühendislik problemlerindeki rolünü kapsamlı biçimde incelemektir. Öncelikle

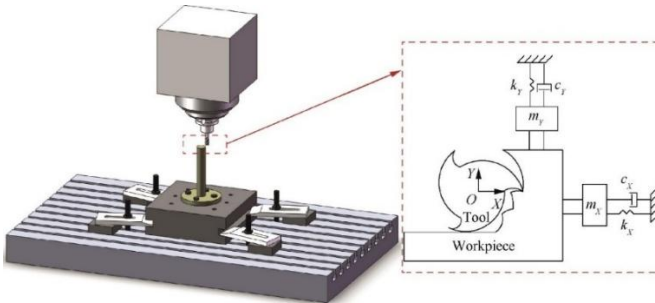
frezeleme sürecinin dinamik modeli ele alınacak, ardından çekiç testi prensipleri, FRF analiz yöntemleri ve stabilite lob diyagramları detaylı olarak açıklanacaktır. Sonrasında vaka analizleri üzerinden yöntem uygulamaları tartışılacak ve literatürdeki güncel gelişmeler ışığında çekiç testinin endüstriyel geleceğine yönelik çıkarımlar yapılacaktır.

1. Frezelemede Dinamik Sistem Modeli

Frezeleme sistemi, dinamik açıdan takım, tutucu, iş parçası ve makine gövdesi bileşenlerinden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Sistemin kesme kuvvetlerine karşı gösterdiği tepki, lineer bir kütle-yay-sönüm (mass-spring-damper) modeliyle yaklaşık olarak ifade edilebilir. Genel hareket denklemi;

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada; m sistemin efektif titreşim kütesini, c yapısal sönüm katsayısını, k rijitlik katsayısını, $F(t)$ zamana bağlı uyarı kuvvetini (kesme kuvveti veya çekiç darbesi) temsil eder. Şekil 1'de frezeleme sürecinde değerlendirilen, takım-iş parçası sisteminin dinamik stabilitesinin şeması gösterilmiştir. Bu yapı, genellikle tek serbestlik dereceli olarak ifade edilmektedir ve dinamik kesme kuvvetleri altında sistemin nasıl titreştiğini açıklamak için kullanılmaktadır.



Şekil 1 Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönümleyici sistem dinamik şeması [12].

Doğal frekans (ω_n) ve logaritmik sönüm oranı (ζ) aşağıdaki denklemler ile birlikte tanımlanmaktadır.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2.2)$$

Bu parametrelerin doğru belirlenmesi, frezeleme sırasında ortaya çıkan dinamik titreşimlerin öngörülmesi ve bastırılmasında kritik rol oynamaktadır.

1.1. Takım Titreşimi (Chatter) Problemi

Frezeleme işlemi sırasında kesici ağız, iş parçası üzerinde ardışık kesme izleri bırakır. Bu izlerin bir sonraki kesici ağız tarafından tekrar kesilmesi, rejeneratif etkiler yaratarak dinamik titreşimlerin büyümesine neden olur. Bu durum, sistemin doğal frekanslarıyla rezonansa girdiğinde chatter olarak adlandırılır.

Kritik kesme derinliği ($a_{p,kritik}$), titreşimin başlaması için gerekli minimum talaş derinliğini belirler. Bu derinlik, sistemin dinamik sertlik değerine ve kesme kuvveti katsayılarına bağlıdır.

$$a_{p,kritik} = \frac{-1}{2Re[H(j\omega_c) \cdot K_t]} \quad (2.1.1)$$

Burada $H(j\omega_c)$ kritik frekanstaki FRF değerini, K_t ise kesme kuvveti katsayısını temsil etmektedir.

2. Çekiç Testi Prensibi

Çekiç testi, bir yapının veya makine elemanının dinamik davranışını belirlemek için kullanılan deneysel bir analiz yöntemidir. Takım-tutucu-makine sistemine modal bir uyarı uygulayarak FRF çıkarılmasına dayanır. FRF, sistemin giriş (kuvvet) ve çıkış (yer değiştirme, hız veya ivme) arasındaki frekans tabanlı transfer fonksiyonudur. Amaç, sistemin doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını belirlemektir. CutPro Machining Chatter

Analysis gibi yazılımlar ile stabilite hesaplamaları yapılabilmektedir.

2.1. FRF Tanımı

FRF, genellikle şu denklem ifadesi ile matematiksel olarak tanımlanmaktadır.

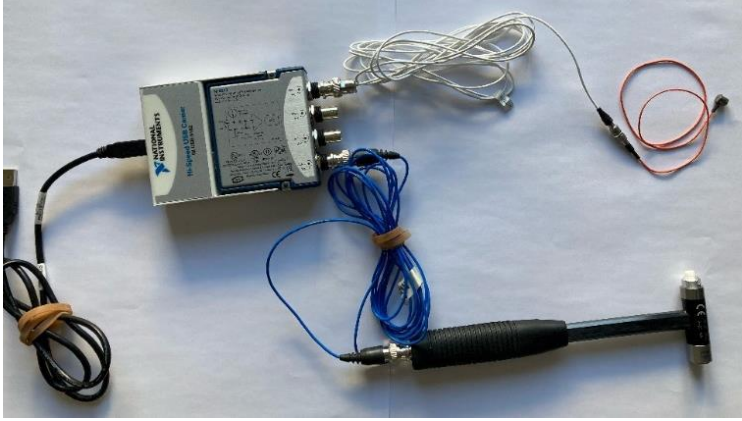
$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (3.1)$$

Burada; $X(f)$ frekans uzayında sistem tepkisi (ivme, hız veya yer değiştirme), $F(f)$ frekans uzayında uygulanan kuvvet, $H(f)$ frekans cevabı fonksiyonunu ifade etmektedir.

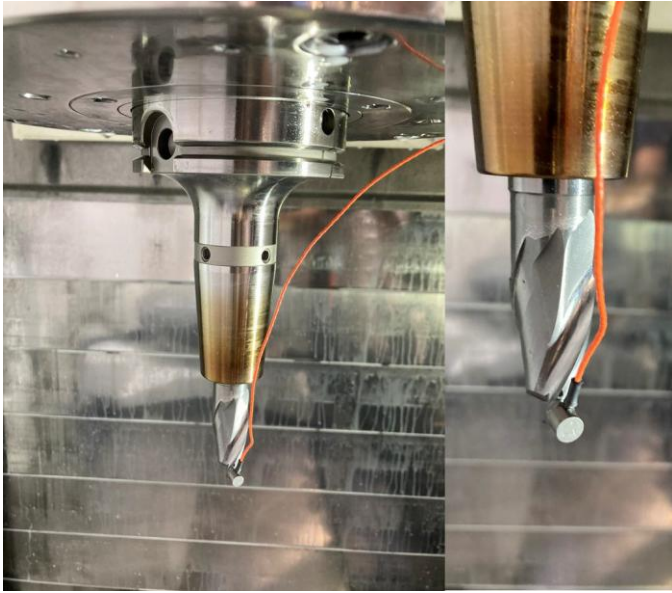
FRF grafiğinde, rezonans tepe noktaları sistemin doğal frekanslarını, tepe genişliği ise sönüm oranını verir.

2.2. Çekiç Testi Prosedürü

1. **Sensör Kurulumu:** Takım veya tutucu üzerine piezoelektrik ivmeölçer yerleştirilir.
2. **Modal Çekiç Darbesi:** Kuvvet sensörü entegre edilmiş modal çekiç ile takıma kısa bir darbe uygulanır.
3. **Sinyal Toplama:** Darbe kuvveti (girdi / input) ve ivme (çıkış / output) sinyalleri veri toplama kartı aracılığıyla kaydedilir.
4. **FFT Analizi:** Zaman tabanlı sinyaller frekans uzayına dönüştürülür ve FRF grafikleri elde edilir.
5. **Modal Parametre Çıkarımı:** Doğal frekans, modal sönüm ve dinamik sertlik belirlenir.



Şekil 2 Çekiç testi için kullanılan aparatlar (Soldan sağa USB kablo, sinyal dönüştürücü, aparat kabloları, ivmeölçer, çekiç) [12].



Şekil 3 İvmeölçer kesici takım bağlantısı [12].



Şekil 4 Test ekipmanlarının dik işleme merkezi ünitesine bağlantısı [12].

3. Endüstriyel Önemi

Çekiç testi, özellikle havacılık endüstrisi ve otomotiv kalıpcılığı gibi titreşim hassasiyetinin yüksek olduğu alanlarda kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, uzun takımlar ile 5 eksenli frezeleme yapılırken, çekiç testi olmadan belirlenen kesme parametreleri genellikle chatter oluşumuna yol açar. Çekiç testi ile elde edilen FRF verileri, SLD'nin doğru çizilmesini ve optimum devir-talaş derinliği kombinasyonlarının seçilmesini sağlar.

4. İlgili Çalışmalar ve Literatür

Takım-tezgâh sistemlerinde titreşimlerin modellenmesi ve kontrol edilmesi, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren havacılık, otomotiv ve kalıpcılık endüstrilerinde büyük önem taşımaktadır. Frezeleme işlemleri sırasında ortaya çıkan chatter titreşimleri, yüzey kalitesini bozmakta, takım ömrünü kısaltmakta ve iş parçasında kabul edilemez tolerans hatalarına yol açmaktadır. Bu nedenle, titreşimlerin kökenini ve sistemin dinamik karakteristiklerini ortaya

koyan modal analiz çalışmaları, literatürde önemli bir yer tutmaktadır [1, 2].

Bu alanda en çok kullanılan yöntemlerden biri olan çekiç testi (tap test), kesici takım veya iş parçasının bir ivmeölçer yardımıyla darbe çekiç kullanılarak uyarılması prensibine dayanmaktadır. Ölçülen ivme verilerinden elde edilen frekans cevabı fonksiyonları (FRF), takım-tutucu-mil sisteminin doğal frekanslarını, sönüm katsayılarını ve dinamik rijitliğini belirlemede kullanılmaktadır [3]. FRF ölçümleri, chatter stabilite diyagramlarının çıkarılmasında temel bir girdi sağlamakta ve böylelikle belirli bir devir hızında güvenli kesme derinliklerinin belirlenmesine imkân vermektedir [4].

Budak [4] tarafından ortaya konulan analitik chatter stabilite modeli, FRF verileriyle desteklendiğinde frezeleme operasyonları için güvenilir kestirimler sağlamaktadır. Schmitz ve Duncan [5], üç bileşenli kuvvet ölçümleri ile FRF tabanlı analizleri karşılaştırmış ve özellikle ince cidarlı parçaların işlenmesinde çekiç testi sonuçlarının chatter sınırlarının doğru belirlenmesinde kritik rol oynadığını rapor etmiştir. Ayrıca, Quintana ve Ciurana [6], kapsamlı bir derlemede, titreşim analizi tekniklerinin endüstriyel uygulamalarını karşılaştırmış ve çekiç testinin yaygın olarak tercih edilen, pratik bir yöntem olduğunu vurgulamıştır.

İleri malzemelerin, özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının (ör. AA2050 ve AA7050) işlenmesinde dinamik analizlerin önemi daha da artmaktadır. Bu alaşımlar havacılık yapılarında yüksek oranda kullanılmakta olup, işleme sonrası oluşabilecek boyutsal sapmalar ve çarpılmalar üretim kalitesi açısından kritik hale gelmektedir [7-9]. Arrazola vd. [10], bu tür malzemelerin işlenmesinde çekiç testi verilerinin, hem elastik deformasyonların modellenmesinde hem de optimizasyon algoritmalarında girdi olarak kullanıldığını göstermiştir. Benzer şekilde Ozturk ve Budak [11], ince cidarlı havacılık parçalarının

işlenmesinde çekiç testi destekli chatter analizlerinin, çarpılma risklerini azaltmada etkili olduğunu raporlamıştır.

Çekiç testi verilerinin yalnızca teorik modellere değil, aynı zamanda sayısal simülasyonlara da entegre edildiği görülmektedir. Campomanes ve Altintas [14], frezeleme operasyonları için zaman alanında simülasyonlar geliştirmiş ve bu simülasyonların güvenilirliğinin FRF ölçümleriyle güçlendirildiğini ortaya koymuştur. Güncel çalışmalar ise, yapay zekâ tabanlı kestirim modellerinde çekiç testinden elde edilen verilerin kullanıldığını göstermektedir [15]. Bu yaklaşım, endüstri 4.0 bağlamında adaptif işleme süreçlerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Son yıllarda geliştirilen aktif titreşim kontrol yöntemleri, çekiç testi tabanlı verilerle desteklenmektedir. Aggogeri vd. [16] tezgâhlarda aktif titreşim kontrol sistemlerinin uygulanabilirliğini göstermiş; Zatarain vd. [17] ise spindle speed variation (SSV) yönteminde çekiç testi sonuçlarının chatter bastırma kabiliyetini artırdığını rapor etmiştir. Bu tür yöntemler, klasik pasif sönümleme tekniklerine kıyasla daha esnek çözümler sunmakta ve üretim hattında dinamik optimizasyon imkânı sağlamaktadır.

Budak vd. [18] 5-eksen frezeleme operasyonlarının dinamik modellemesini yapmış ve açılı eksenlerin oluşturduğu belirsizliklerin matematik modele etkisini ortaya koyarak bir çözüm sunmuştur. Suzuki vd. [19] ise frezeleme operasyonlarında doğal frekansın dışında kesme esnasında oluşan titreşimleri incelemiş ve bunun operasyon kalitesi üzerindeki etkilerini matematiksel modellemiştir. Postel vd. [20] çalışmasında, yüksek hızlı takım uçlarının keyfi bir takım tutucu kombinasyonu ile oluşturduğu titreşimleri matematiksel modellemiş ve frekans cevap fonksiyonlarıyla bir kombinasyon örneği ortaya koymuştur. Paliwal ve Babu [21] ise operasyonel modal analizlerle yüksek hızlı frezeleme ortamında stabilite lobu tahminlemeye yarayan bir çözüm

geliştirmiş ve bunun matematiksel modele de uygunluğunu ortaya koymuştur.

Literatür genel olarak incelendiğinde, çekiç testinin akademik çalışmalarda teorik modellerin doğrulanması, endüstriyel uygulamalarda ise proses güvenliğinin artırılması amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanında, gelişen sayısal simülasyonlar ve yapay zekâ tabanlı yöntemler sayesinde tap test verilerinin daha kapsamlı optimizasyon algoritmalarına entegre edilmesi, gelecekte bu yöntemin önemini artıracaktır. Bu bağlamda, hem geleneksel modal analiz hem de dijital ikiz tabanlı üretim sistemlerinde çekiç testi uygulamalarının kritik bir rol oynaması beklenmektedir.

5. Stabilite Lob Diyagramları (SLD)

Geleneksel işleme yöntemlerinde, özellikle frezelemede kesici takım ve iş merkezi tezgahı arasındaki doğal ve doğal olmayan titreşimler; kesme işlemlerinde işleme dengesizliği, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına neden olabilmektedir. Bu titreşim, kesici takım geometrisi ve malzemesi, tezgah özellikleri, takım yolu ve kesme parametrelerine bağlı olarak değişken bir etki göstermektedir. Bu titreşimleri stabilize etmek, endüstride en kritik problemlerden birisi olmakla beraber gelişen teknoloji ile birlikte ilgili noktalarda çalışmalar hızla devam etmektedir. Rejeneratif titreşim teorisine dayanan bir stabilite lob diyagramı, titreşimi tahmin etmek ve kontrol etmek için etkili bir araçtır. Stabilite diyagramları, mevcut en yüksek iş mili hızında maksimum kesme derinliğini optimize etmek için işleme süreçlerinde uygulanabilir, böylece malzeme kaldırma hızı iyileştirilir ve üretim verimliliği arttırılmaktadır. Kararlılık lob diyagramı, bir dizi kesişen tarak şeklindeki kararlılık sınır çizgileriyle oluşturulur. Lobların kesişme noktaları, çeşitli iş mili hız aralıklarında en derin kararlı kesimleri

başlamaktadır. FCF eğrisindeki rezonans tepe noktaları, bu kararsız bölgelerin belirlenmesinde anahtar rol oynamaktadır. SLD, özellikle yüksek talaş kaldırma oranlarının güvenli şekilde uygulanabilmesi için seri üretim endüstrisinde kritik bir rehberdir.

5.2. Matematiksel Temel Denklemler

Makine titreşiminin temel denklemleri, genel titreşim denklemi ve rejeneratif titreşim denklemlerinden türetilebilir. Ortogonal kesimde, kesme kuvveti (F), kesme alanıyla (talaş genişliği veya kesme derinliği b ile kalınlık h 'nin çarpımı) orantılıdır.

$$F = k_s b h = k_s b [x(t - T) - x(t)] \quad (6.1)$$

burada k_s kesme sertliği veya özgül güç, x kesime dik kesici yer değiştirmesi, t zaman ve T önceki ve mevcut kesimler arasındaki zaman aralığıdır. Denklem 1 genel titreşim denkleminde yerine koyulursa;

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (6.2)$$

talaş genişliği formülü elde edilir.

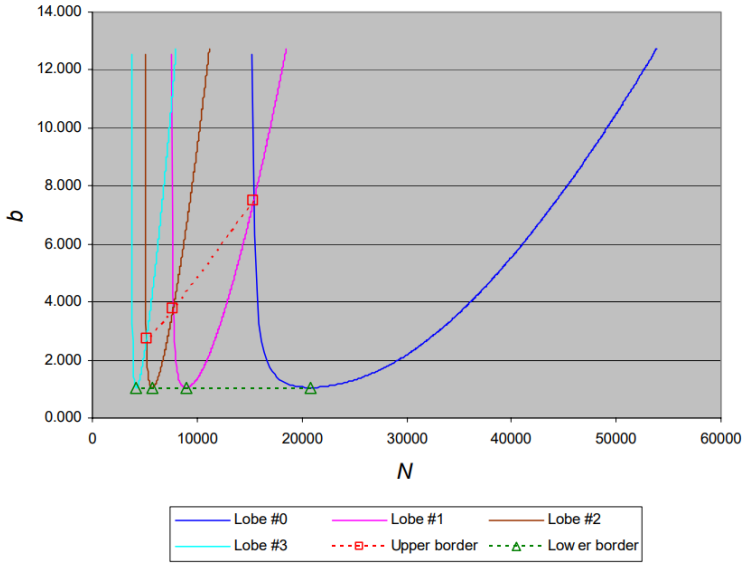
$$b = -1/2k_s G_R \quad (6.3)$$

burada G_R , denklem 2'nin standart çözümünde olduğu gibi frekans yanıt fonksiyonunun (FYF) G 'nin gerçek kısmıdır.

$$\frac{X}{F} = \frac{1-r^2}{k[(1-r^2)^2 + (2\cdot\zeta\cdot r)^2]} + i \frac{-2\cdot\zeta\cdot r}{k[(1-r^2)^2 + (2\cdot\zeta\cdot r)^2]} = G_R + iG_1 = G \quad (6.4)$$

Stabilite lob diyagramında, talaş genişliğini veya kesme derinliğini optimize etmek ve işleme süreçlerinde maksimum malzeme kaldırma hızını (MRR) elde etmek için kullanılabilir bazı ilginç özellikler bulunmaktadır. Bir kararlılık lob diyagramında, bir dizi tarak şeklindeki loblar birbirleriyle kesişir. Bu loblar,

titreşimin sınırlarını oluşturur. Yerel olarak, her lob için, lobun altında stabil, lobun üzerinde ise kararsızdır. Loblar kesiştiği için, bir lobun altında bulunan bir nokta, komşu lobun üzerinde olabilir. Bu nokta kararsız olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle, genel olarak, stabiliteyi belirlerken komşu loblar arasındaki ilişki dikkate alınmalıdır. Herhangi iki komşu lobun kesişme noktasının üzerindeki üst kısımları kesilmelidir. Kesişme noktaları tüm lobları “zincirleşmiş” titreşim çizgilerine bağlar. Titreşim çizgilerinin üzerindeki tüm noktalar kararsız, altındaki noktalar ise karardır. Devir sayısı arttıkça, loblar genişler, ardışık loblar arasındaki boşluklar büyür ve kesişme noktaları yükselir. Bu fenomen, hem daha yüksek hızda hem de daha derin kesimde aynı anda işleme için ve daha geniş bir hız aralığında istenen bir durum yaratır.



Şekil 6 Örnek bir stabilite lob diyagramı [22].

Lob serisinin iki tarafı bazı özel özelliklere sahiptir. Şemanın sağındaki ilk lob 0, lob 1 ile kesiştiği noktada maksimum kararlı talaş genişliğine sahiptir. Lob 0'ın sağ kolu diğer loblarla kesişmez, bu da son derece yüksek iş mili hızında sınırsız talaş genişliğine olanak

tanır. Kesici malzeme bileşimi ve mevcut motor gücünün sınırları nedeniyle, bu aralığa pratik olarak ulaşamayabiliriz. Ancak, teorik geçerliliğini doğrulamak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Diyagramın solundaki loblar hem yatay hem de dikey olarak sıkışık durumdadır. Loblar sola doğru birbirine yaklaşmakla kalmaz, kesişme noktaları da aşağı doğru, minimum talaş genişliğine (veya $rb = 1$) yaklaşır. Ancak, gerçek işleme süreçlerinde, titreme olmadan daha büyük talaş genişlikleri veya daha derin kesimler elde edilmiştir. Bu sorunu çözmek için Tobias ve Fishwick [2], daha büyük talaş genişliğine sahip bir titreme çizgisi üreten farklı bir denklem türetmiştir.

Stabilite lob diyagramının tüm aralığı, alt ve üst sınır çizgileri (Şekil 1 ve Şekil 2'deki kesikli çizgiler) ile üç stabilite bölgesine ayrılabilir: koşulsuz stabil, koşullu stabil ve koşulsuz kararsız. Lobların en alt noktaları, aynı değerlere sahip minimum talaş genişlikleridir ($rb=1$ 'de $b = b_{\min}$). Lobların en alçak noktalarını birleştirerek yatay bir sınır çizgisi oluşturulabilir veya basitçe $b = b_{\min}$ noktasında çizilebilir. Bu çizginin altındaki bölge, titreşim frekansı veya iş mili hızından bağımsız olarak koşulsuz olarak stabildir. Ayrıca, lobların tüm kesişme noktalarını birleştirerek başka bir sınır çizgisi oluşturabiliriz. Bu üst sınır çizgisinin üzerindeki bölge koşulsuz olarak kararsızdır ve bu bölgede her zaman titreşim meydana gelir. İki bölge arasındaki bölge koşullu olarak stabildir. Koşullu olarak stabil bölgede, noktalar lobların altında stabil, lobların üzerinde ise kararsızdır.

Devir sayısı sıfıra yaklaştığında, üst ve alt sınır çizgileri $rb=1$ 'de minimum talaş genişliği noktasında birleşir. İki sınır çizgisi ile üç kararlılık bölgesine bölünmesi, kararlı ve kararsız bölgeler arasında belirgin bir ayırım sağlar. Bu, koşullu kararlı bölgede optimum talaş genişliğini ince ayarlamak yerine, titreşimi önlemek için bir işleme süreci için izin verilen talaş genişliğinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesini ve seçilmesini sağlar. Talaş genişliğini

bmin'den daha küçük olacak şekilde sınırlayarak, tüm hız aralıklarında koşulsuz olarak kararlı bölgede kesimi her zaman güvenli bir şekilde kontrol edebiliriz. Bu, MRR için maksimum talaş genişliğini kullanmayabilir, ancak hızlı seçim ve kararlılığın garantisi, özellikle küçük makine atölyelerinde uygulamalarda hala değerlidir. Üst sınır çizgisi ayrıca kararsızlığı hızlı bir şekilde kontrol etmeyi sağlar, böylece talaş genişliğinin koşulsuz olarak kararsız bölgeye düştüğü kesimleri önleyebiliriz.

Tüm loblar, sağ tarafında diğer loblarla kesişme noktası olmayan lob 0 hariç, her iki tarafta diğer loblarla kesişir. Kesişme noktaları, lobların tepe noktalarıdır ve yakınındaki çeşitli hız aralıklarında en derin kesimleri sağlar. Bu nedenle, bu tepe noktaları tatlı noktalar olarak adlandırılır. Bu tatlı noktaları veya optimum kesme derinlikleri bulunabilirse, işleme sisteminin potansiyeli tam olarak kullanılabilir ve en verimli malzeme kaldırma oranı (MRR) elde edilebilir.

Burada, kesişme noktalarındaki yaklaşık tatlı noktaları analitik olarak belirlemek için bir yöntem tanıtılmaktadır. En tatlı nokta, en yüksek iş mili hızında en derin kesimi sağlayan 0 lobu ve 1 lobunun kesişme noktasıdır. Makine gücü ve iş mili hızının sınırları gibi birçok diğer faktör nedeniyle, belirli bir makineyi belirli iş parçası malzemelerini en tatlı noktada kesmek için çalıştırmak pratik olmayabilir.

5.3. Stabilite Lob Diyagramının Çizilme Prosedürü

Stabilite lob diyagramı, talaşlı imalat işlemlerinde (özellikle frezeleme) oluşabilecek kendiliğinden titreşim (chatter) bölgelerini ve kararlı kesme koşullarını gösteren kritik bir grafikdir. Çekiç testi ile takım-tezgah sisteminin dinamik davranışı ölçülerek, kesme parametrelerinin titreşim oluşumuna etkisi belirlenir. Bu sayede, kesme esnasında hem yüksek talaş kaldırma oranı hem de yüzey kalitesi korunabilir.

Stabilite lob diyagramının çizilebilmesi için çekiç testi ile takım–tezgah sisteminin dinamik özellikleri belirlenmelidir. Bu amaçla deney setinde şu ekipmanlar bulunmalıdır;

Modal Çekiç (Instrumented Impact Hammer): Uygulanan darbe kuvvetini ölçmek için üzerinde kuvvet sensörü (piezoelektrik) bulunan çekiçtir. Uygun sertlikte uç seçimi (çelik, plastik, kauçuk) yapılmalı; sert uç yüksek frekans cevabını, yumuşak uç düşük frekans cevabını ön plana çıkarır. İvmeölçer (Accelerometer) ise, akım veya iş mili üzerine bağlanarak titreşim cevabını ölçer. Hafif ve yüksek hassasiyetli modeller tercih edilmelidir. Veri Toplama Sistemi (DAQ) Yüksek örnekleme hızına sahip (≥ 20 kHz) olmalıdır. Analiz Yazılımı gereksinimi ise frekans cevabı fonksiyonunun (FRF) hesaplanması ve lob diyagramının çizimi için (örn. LMS Test. Lab, CutPro, ModalVIEW, MATLAB) gerekli olan mühendislik tabanlı bir yazılımdır. Freze tezgahı kurulumu ise tüm titreşim ölçümleri, işleme sırasında kullanılacak takım ve bağlama koşullarıyla yapılmalıdır. Takım ve takım tutucu, deneyde kullanılacak gerçek kesme takımı, iş mili üzerinde bağlanmış olmalıdır. Çekiç testi, takımın serbest ucundan yapılmalıdır.

6. Çekiç Testinin Uygulama Prosedürü

Lob diyagramı çıkarımı için kullanılacak olan deney setinin hazırlanması ve kurulumu için dikkat edilmesi gereken bir prosedür bulunmaktadır.

6.1. Takımın Tezgaha Bağlanması

İş mili rulman boşlukları ve takım tutucu sıklığı kontrol edilmelidir. Kesme sırasında kullanılacak uzunluk ve bağlama konfigürasyonu kullanılmalıdır. Kullanılacak olan kesici takımın çap/uzunluk oranı standart şekilde olmalıdır. Aksi halde, küçük çap uzun boy konfigürasyonunda elde edilecek olan titreşim iterasyonları sağlıklı bir sonuç vermeyecek ve verimli bir kesme işlemi için gerekli olan kesme parametreleri stabil olmayacaktır.

6.2. İvmeölçerin Montajı

Kullanılacak ivmeölçerin ağzı ve kabloları kontrol edilmelidir. İvmeölçerin ölçüm yapmayan ters yüzeyi bir yapışkan yardımı ile (genellikle vaks gibi titreşim ileten kolayca kuvvet ile kolayca çözülebilen yapışkanlar tercih edilmelidir) takımın serbest ucuna yakın bir bölgeye veya takım gövdesine, rijit şekilde bağlanmalıdır. Takım serbest bölgesi helis bölgesinin en ucu ve iş parçasına temas eden ilk noktası olmalıdır. Kablo yönü titreşim ölçümünü etkilemeyecek şekilde düzenlenmelidir. Kesici takımın uç radyusu büyüklüğü, titreşim yön vektörünü etkileyeceği için, vuruş yön vektörüne de dikkat edilmelidir.

6.3. Çekiç Darbesi

Takım ucuna, eksen yönlerinde (X, Y, Z) ayrı ayrı darbe uygulanır. Her yönde en az 3 tekrar yapılır ve ortalama FRF elde edilir. Genellikle Z yönü takım boyu yönünde olacağı için çekiç darbesi bu yönde ihmal edilebilir. Ancak, tezgah eksen seçimi ve kurulumuna istinaden bu seçim dikkatle yapılmalıdır.

6.4. Veri Kaydı

Çekiçten gelen kuvvet sinyali ve ivmeölçerden gelen ivme sinyali aynı zaman penceresinde, yazılım aracılığı ile kaydedilir. Her vuruş sonrası, kuvvet sinyali ve titreşim grafiği takip edilmelidir. Vuruşun çift ve daha fazla olması, titreşim yön vektörlerinin farklı davranışlarına yol açmaktadır.

6.5. Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF) Hesabı

FRF, ivme sinyalinin kuvvet sinyaline oranının Fourier dönüşümü ile elde edilir. FRF üzerinde rezonans frekansları, modal kütle, sönüm oranı ve rijitlik değerleri belirlenir.

6.6. Sonuçların Kullanımı

Elde edilen modal parametreler (doğal frekans, sönüm oranı, modal rijitlik) stabilite lob modelleme yazılımına girilir. Deneysel kesme testi veya literatürden alınan spesifik kesme kuvvet katsayıları kullanılır. Kesme yönü, takım boyu, malzeme özellikleri, ilerleme miktarı, talaş kalınlığı gibi parametreler spesifik şekilde numerik kontrol mühendisi tarafından deneysel olarak veya literatür araştırması ile her malzeme tipi ve takım yolu konfigürasyon farklılıkları ile elde edilmektedir.

Elde edilen FRF eğrisi, CutPro, Altınay TapTest veya benzeri analiz yazılımlarında kullanılarak, belirli bir takım-boy parametresi için optimum devir-talaş derinliği kombinasyonları hesaplanır.

Lob diyagramında yatay eksen genellikle iş mili devir sayısını, dikey eksen ise izin verilen maksimum talaş derinliğini ifade etmektedir. Diyagram üzerinde kararlı bölgeler (titreşimsiz) ve kararsız bölgeler (titreşimli) işaretlenir. Kararlı bölgeler, grafikte lobların tepe noktaları, yüksek talaş derinliğinde titreşimsiz çalışılabilecek iş mili devirlerini gösterir. Üretimde bu tepe noktalarına yakın devir–ap kombinasyonları tercih edilmelidir. Kararsız bölgeler ise loblar arasındaki çukurlarda, düşük talaş derinliğinde bile titreşim oluşabilir.

Örneğin, bir 20 mm karbür parmak freze için yapılan çekiç testi sonucu elde edilen FRF verisi, 12.500 rpm devirde 2.5 mm'lik güvenli kesme derinliği önerirken; 8.000 rpm'de bu değer 1.5 mm'ye düşebilir. Bu analiz, üretimde chatter-free yüksek verim sağlar.

7. Endüstriyel Uygulama Örnekleri

7.1. Havacılık Sektörü

Havacılık endüstrisinde kullanılan AA7050, AA2050, Ti6Al4V ve kompozit gibi yapısal malzemelerin frezelenmesi

sırasında vibrasyon, özellikle ince cidarlı yapıların işlenmesinde büyük sorun oluşturabilmektedir. Geometrilerin isterlere göre tasarlanması ve analiz sonuçları ile değiştirilememesi, ince taban ve ince cidarlı duvarların stabil şekilde işlenebilmesi oldukça zorlaştırmaktadır. Boeing ve Airbus gibi firmalar, çekiç testi tabanlı stabilite lob diyagramlarını üretim planlamasında standart hale getirmiştir.

7.2. Kalıp ve Die İşleme

Kalıpcılık sektöründe, büyük boyutlu çelik blokların işlenmesi sırasında uzun uzatmalar (200–300 mm) kullanıldığında chatter riski artar. Çekiç testi, bu uzun takımların dinamik sertlik haritalarını çıkararak uygun kesme parametrelerinin seçilmesini sağlamaktadır.

7.3. Otomotiv ve Savunma Sanayi

Motor blokları ve hassas savunma bileşenleri, yüzey kalitesi ve tolerans açısından yüksek gerekliliklere sahiptir. Çekiç testi, CNC tezgâhlarda HSM (High Speed Machining) stratejilerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar.

8. Avantajlar, Sınırlamalar ve Karşılaştırmalar

Çekiç testi veya endüstride yaygın bilinen adıyla çekiç testi, frezeleme ve diğer talaşlı imalat süreçlerinde işleme sisteminin dinamik karakteristiklerini belirlemek için kullanılan, pratik ve endüstriyel uyumluluğu yüksek bir deneysel yöntemdir. Bu yöntem, iş mili–takım–bağlama düzeneği–iş parçası (Machine Tool–Spindle–Holder–Workpiece Assembly) sisteminin titreşim modlarını ve doğal frekanslarını belirlemek amacıyla, sisteme belirli bir darbeye uyarım uygulanması ve ivmeölçer yardımıyla titreşim tepkisinin ölçülmesi esasına dayanır. Elde edilen frekans cevabı fonksiyonları (Frequency Response Function, FRF), stabilite lob diyagramlarının oluşturulması ve kesme parametrelerinin

titreşimden kaçınacak şekilde optimize edilmesi için kritik önem taşır.

Çekiç testi, farklı takım boyları, bağlama elemanları ve iş parçası konfigürasyonları için kısa sürede uygulanabilir. Ölçüm süresi genellikle dakikalar mertebesinde ve üretim süreçlerine kolayca entegre edilebilir. Esnek kullanım ile birlikte test ekipmanı (modal çekiç ve ivmeölçer) taşınabilir olduğundan, üretim hattında veya sahada kolayca ölçüm yapılabilir. Ölçülen FRF verileri, sistemin doğal frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri hakkında ayrıntılı bir dinamik karakterizasyon sağlar. Bu bilgiler, frezeleme işlemlerinde chatter (titreşimli kesme) riskini azaltacak kesme parametrelerinin seçilmesi için doğrudan kullanılabilir. Stabilitelob diyagramlarının oluşturulması ve çekiç testi ile elde edilen FRF verileri, kararlılık bölgelerinin hesaplanması ve optimum devir ve kesme derinliği kombinasyonlarının belirlenmesi için temel bir veri seti oluşturur. Daha karmaşık modal analiz yöntemlerine kıyasla düşük ekipman maliyetine sahiptir ve hızlı uygulanabilirliği sayesinde üretim duruş sürelerini azaltır. Ancak, bu testin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da göz ardı edilmemelidir.

Statik iş parçası koşulları sebebi ile Çekiç testi sırasında iş mili ve takım genellikle durağan konumdadır. Bu durum, kesme sırasında ortaya çıkan dinamik yükler ve takım–iş parçası etkileşimlerini tam olarak yansıtmayabilir. Ölçüm doğruluğu; çekiç darbesinin tekrarlanabilirliği, ivmeölçer yerleşimi ve bağlama sertliği gibi faktörlere yüksek derecede duyarlıdır. Yanlış ölçüm noktaları veya gevşek bağlantılar veri kalitesini olumsuz etkileyebilir. Çekiç testi ekipmanı, çok yüksek frekanslı modların doğru şekilde ölçülmesinde sınırlı kalabilir. Özellikle küçük çaplı takımlar ve yüksek frekanslı titreşim modları için daha hassas sensörlere ihtiyaç duyulabilir. Ölçüm kalitesi, çekiç darbesinin yönü, şiddeti ve tekrarlanabilirliği gibi faktörlerde operatör deneyimine bağlıdır. Bu da standardizasyonu zorlaştırabilir. Kesme

kuvvetlerinden kaynaklanan yapısal nonlineerlikler ve sıcaklık etkileri ölçülemez; bu nedenle çekiç testi sonuçları her zaman gerçek kesme koşullarını birebir temsil etmeyebilir.

Sonuç olarak, çekiç testi frezeleme süreçlerinde titreşim analizi ve kararlılık tahmini için pratik, düşük maliyetli ve yaygın kabul gören bir yöntemdir. Bununla birlikte, testin statik doğası ve ölçüm hassasiyetine olan bağımlılığı, yöntemin sonuçlarını yorumlarken deneyim ve ek analizlerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.

Çekiç testi, talaşlı imalat süreçlerinde sistemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, yapısal ve operasyonel koşulların tamamını temsil etmede çeşitli sınırlamalara sahiptir. Bu sınırlamalar, elde edilen frekans cevabı fonksiyonlarının (FRF) doğruluğunu ve endüstriyel uygulamalardaki etkinliğini doğrudan etkileyebilir. Çekiç testi yöntemi, genellikle iş mili ve kesici takımın hareketsiz olduğu bir durumda uygulanmaktadır. Bu nedenle, kesme kuvvetlerinin oluşturduğu değişken yükler, sıcaklık etkileri ve takım-iş parçası etkileşiminden doğan nonlineer dinamik davranışlar ölçümlere yansıtılamamaktadır. Bu durum, gerçek işleme sırasında ortaya çıkan titreşim modlarının eksik veya farklı şekilde temsil edilmesine neden olabilir.

Çekiç testi yöntemi, sistem konfigürasyonundaki küçük değişikliklere karşı oldukça hassastır. İş parçası geometrisi, bağlama elemanlarının rijitliği veya takım boyundaki değişiklikler, frekans cevabında önemli farklılıklara yol açabilir. Bu nedenle, her bir üretim konfigürasyonu için ayrı bir ölçüm yapılması gerekebilir, bu da zaman ve kaynak gereksinimini artırır. Çekiç testi temelde lineer sistem varsayımına dayanır ve yapısal rijitlik ile sönümlenme özelliklerinin doğrusal kabul edildiği bir analiz yaklaşımıdır. Ancak kesme kuvvetleri, takım aşınması, termal deformasyonlar ve malzeme heterojenliği gibi faktörler sistemi nonlineer hale

getirebilir. Bu durum, özellikle kompozit malzemelerin veya sert metallerin işlenmesinde, elde edilen verilerin gerçek süreç koşullarını tam olarak yansıtmamasını zorlaştırmaktadır.

Çekiç testi, talaşlı imalat süreçlerinde takım-tezgah sisteminin dinamik davranışlarını belirlemek için pratik ve yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ancak, ölçüm hassasiyeti, statik koşullarda uygulanması ve operatör bağımlılığı gibi sınırlamalar, daha gelişmiş ve otomasyon odaklı alternatif yöntemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yöntemler, kesme sırasında gerçek zamanlı veri toplamasını, daha hassas modal analizler yapılmasını ve sistem dinamiklerinin daha doğru modellenmesini mümkün kılmaktadır. Aşağıda çekiç testine başlıca alternatif yöntemler açıklanmaktadır.

Shaker tabanlı modal analiz, titreşim sistemine harici bir sarsıcı (shaker) kullanılarak uyarım uygulanması prensibine dayanır. Bu yöntem, sistemin daha kontrollü ve tekrarlanabilir bir şekilde zorlanmasını sağlar. Çekiç testine kıyasla daha uzun süren bir ölçüm süreci gerektirse de, elde edilen frekans cevabı fonksiyonları (FRF) daha yüksek doğruluk ve hassasiyet sunar. Özellikle yüksek frekanslı modların tespitinde ve düşük genlikli titreşim davranışlarının incelenmesinde shaker sistemleri tercih edilmektedir.

Operasyonel modal analiz, işleme sırasında kesici takım ve iş parçasından doğrudan titreşim verisi toplayarak dinamik özelliklerin belirlenmesine imkan tanır. Bu yöntem, sistemin gerçek kesme kuvvetleri altındaki davranışını modellediği için daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar. Özellikle yüksek hassasiyetli talaşlı imalat uygulamalarında ve kesme kuvvetlerinin etkisinin önemli olduğu kompozit malzeme işleme süreçlerinde tercih edilmektedir.

Lazer Doppler vibrometreler, temas gerektirmeyen ölçüm teknikleriyle yapının titreşim hızını ve ivmesini yüksek hassasiyetle belirler. Bu yöntem, ivmeölçer montajından kaynaklanabilecek ek

kütle etkisini ortadan kaldırarak daha doğru modal analiz yapılmasını sağlar. Ayrıca karmaşık geometrilere sahip iş parçalarının titreşim davranışının ayrıntılı incelenmesine imkan verir.

Sonlu elemanlar yöntemi, takım-tezgah-iş parçası sisteminin dijital ikizinin oluşturulmasına olanak sağlar. Sanal modal analiz, fiziksel ölçüm yapmadan sistemin doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını belirleyebilir. Özellikle karmaşık takım ve iş parçası geometrilerinde, fiziksel testlerden önce optimum konfigürasyonları tahmin etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, FEA tabanlı analizlerin doğruluğu, modelleme sürecinde kullanılan malzeme özellikleri ve sınır koşullarının doğru tanımlanmasına bağlıdır.

9. Gelecek Perspektifler

Çekiç testi, talaşlı imalat ve özellikle frezeleme süreçlerinde sistem dinamiklerinin belirlenmesinde uzun süredir tercih edilen, hızlı ve endüstriyel uyumu yüksek bir yöntemdir. Bununla birlikte, endüstri 4.0 ve akıllı üretim teknolojilerinin gelişimi, bu yöntemin hem ölçüm hassasiyeti hem de otomasyon seviyesinin artırılması için önemli fırsatlar sunmaktadır. Gelecekte çekiç testinin doğruluğunu, verimliliğini ve süreç içi uygulanabilirliğini geliştirmek üzere odaklanılması gereken başlıca alanlar aşağıda sunulmuştur.

Gelecekteki iyileştirmelerden biri, test sürecinde kullanılan ivmeölçer ve kuvvet sensörlerinin hassasiyetinin artırılması ve gömülü sensör teknolojilerinin entegrasyonudur. Mikro-elektromekanik sistem (MEMS) tabanlı çok eksenli sensörler ve akıllı takım tutucular, ölçümlerin gerçek zamanlı yapılmasına ve operatör bağımlılığının azaltılmasına imkan tanıyacaktır. Bu sayede, çekiç testi statik bir ölçüm yöntemi olmaktan çıkarak dinamik üretim süreci izleme araçlarından biri haline gelebilir.

Çekiç testinde ölçüm doğruluğunu etkileyen temel faktörlerden biri darbenin yönü, şiddeti ve tekrarlanabilirliğidir. Gelecekte bu sınırlamayı aşmak için, robotik sistemler veya otomatik darbe üreteçleri ile tekrarlanabilir ve standartlaştırılmış uyarım teknikleri geliştirilecektir. Böylece ölçümlerde insan faktörünün etkisi minimize edilecek ve farklı konfigürasyonlar için yüksek tekrarlanabilirlik sağlanacaktır.

Çekiç testinden elde edilen frekans cevabı fonksiyonlarının (FRF) yorumlanması, yüksek hacimli veriler ve kompleks mod şekilleri nedeniyle uzman bilgi gerektirir. Gelecekte, yapay zeka ve makine öğrenmesi tabanlı algoritmaların entegrasyonu ile modal parametrelerin otomatik çıkarılması, anomali tespiti ve stabilite lob diyagramlarının hızlı bir şekilde oluşturulması mümkün olacaktır. Bu yaklaşım, kestirimci bakım ve otomatik süreç optimizasyonu için de kritik bir rol oynayabilir.

Geleceğin akıllı üretim ortamlarında, fiziksel çekiç testlerinden elde edilen veriler, sayısal modellerin ve dijital ikizlerin doğrulanması için kritik bir veri kaynağı olacaktır. Sonlu elemanlar analizi (FEA) ve sistem dinamiği modelleri ile entegre çalışan bir dijital ikiz altyapısı sayesinde, fiziksel test ihtiyacı azalacak, farklı takım-tezgah konfigürasyonları üretim öncesinde sanal ortamda optimize edilecektir.

Kaynakça

[1] Tlustý, J. (1985). Machine dynamics. *In Handbook of High-Speed Machining Technology* (pp. 48–153). Springer.

[2] Altintas, Y. (2012). *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design* (2nd ed.). Cambridge University Press.

[3] Schmitz, T. L., & Smith, K. S. (2009). *Machining dynamics: Frequency response to improved productivity*. Springer.

[4] Budak, E. (1998). *Analytical prediction of chatter stability in milling—Part I: General formulation*. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120(1), 22–30.

[5] Schmitz, T. L., & Duncan, G. S. (2005). *Three-component force measurement for stability analysis of milling*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(4), 857–867.

[6] Quintana, G., & Ciurana, J. (2011). *Chatter in machining processes: A review*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(5), 363–376.

[7] Munoa, J., Beudaert, X., Dombóvari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., & Stepan, G. (2016). *Chatter suppression techniques in metal cutting*. *CIRP Annals*, 65(2), 785–808.

[8] Davies, M. A., Pratt, J. R., Dutterer, B. S., & Burns, T. J. (2002). *Stability prediction for milling with slender end mills*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(2), 217–225.

[9] Budak, E., & Altintas, Y. (1998). *Analytical prediction of chatter stability in milling—Part II: Application to multi-degree of freedom systems*. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120(1), 31–36.

[10] Arrazola, P. J., Outeiro, J. C., Özel, T., Umbrello, D., & Davies, M. (2021). *Recent advances in modelling of metal machining processes. CIRP Annals*, 70(2), 587–610.

[11] Öztürk, E. & Budak, E. (2010) *Dynamics and stability of five-axis ball-end milling. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.132, No.2.

[12] Ateş, E. (2022). *Machining parameters and distortion analyses in end milling of AA2050 and AA7050 (Master's Thesis)*. Advisors: Prof. Dr. Fahrettin Öztürk & Prof. Dr. Zafer Evis, Ankara Yildirim Beyazıt University.

[13] Altintas, Y., & Weck, M. (2004). *Chatter stability of metal cutting and grinding. CIRP Annals*, 53(2), 619–642.

[14] Campomanes, M., & Altintas, Y. (2003). *An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125(3), 416–422.

[15] Cao, Z., Huang, T., Zhang, H., Wu, B., Zhang, X.-M., & Ding, H. (2024). *A deep learning model for online prediction of in-process dynamic characteristics of thin-walled complex blade machining. Journal of Intelligent Manufacturing*, 36, 2629–2655.

[16] Aggogeri, F., Merlo, A., & Pellegrini, N. (2021). *Active vibration control development in ultra-precision machining. Journal of Vibration and Control*.

[17] Zatarain, M., Bediaga, I., Munoa, J., & Lizarralde, R. (2008). *Stability of milling processes with continuous spindle speed variation: analysis in the frequency and time domains, and experimental correlation. CIRP Annals*, 57(1), 379–384.

