MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI VE STANDART TİP TAKIM TUTUCULARIN FREZELEME İŞLEMLERİNDEKİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI: YÜZEY KALİTESİ VE KESİCİ TAKIM AŞINMA ANALİZİ

ADEM MURAT TURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ

İSTANBUL, 2026

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI VE STANDART TİP TAKIM TUTUCULARIN FREZELEME İŞLEMLERİNDEKİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI: YÜZEY KALİTESİ VE KESİCİ TAKIM AŞINMA ANALİZİ

ADEM MURAT TURAN

(523222034)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ

İSTANBUL, 2026

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans öğrencisi **Adem Murat TURAN**'ın "**Yüksek Hızlı ve Standart Tip Takım Tutucuların Frezeleme İşlemlerindeki Performansının Karşılaştırılması: Yüzey Kalitesi ve Kesici Takım Aşınma Analizi**" başlıklı tez çalışması, 17 Nisan 2026 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Ayhan ETYEMEZ (Danışman)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Doç.Dr. Muhammet CEYLAN (Üye)
İstanbul Ticaret Üniversitesi ..... (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ../../…. tarih ve …… sayılı kararı ile **Adem Murat TURAN**'ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, değerli danışmanım Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda sağladığı katkılar ve desteği için NIKKEN firması Makine Mühendisi Haluk GÜNGÖR'e; eğitimim boyunca bilgi ve birikimlerinden faydalandığım Makine Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince deneylerde kullanılan ekipman ve malzeme desteğini sağlayan, ayrıca teknik bilgi ve yönlendirmeleriyle katkıda bulunan NIKKEN ve İPEKÇİOĞLU MAKİNE firmasına ve değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan, sabır ve destekleriyle motivasyonumu artıran sevgili eşime ve aileme en içten minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Bu tez çalışması, yalnızca akademik bir araştırma değil, aynı zamanda bana bilimsel düşünme ve sistematik çalışma disiplini kazandıran önemli bir deneyim olmuştur.

Nisan, 2026 **Adem Murat TURAN**

İçindekiler

ÖZET iv
ABSTRACT v
SEMBOLLER vi
KISALTMALAR viii
ŞEKİLLER ix
TABLO LİSTESİ xii
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatür Araştırması 2
1.2. Araştırma Hipotezleri 28
2. MATERYAL VE YÖNTEM 30
2.1. Deney Malzemesi 30
2.2. Kesici Takım 32
2.3. Takım Tutucular 34
2.3.1. Kullanılan Takım Tutucuların Katalog Görünümleri 37
2.4. Deney Düzeneği 39
2.4.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Hesaplanması 44
2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 47
2.6. Takım Aşınma Ölçümleri 48
2.7. Deney Tekrarları ve İstatistiksel Değerlendirme 50
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 52
3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 52
3.1.1. Ölçüm Süreci ve Bulgular 52
3.1.2. Ölçüm Sürecine Ait Görseller 54
3.1.3. Genel Değerlendirme 58
3.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçlarının ANOVA ile Değerlendirilmesi 58
3.1.5. Hipotezlerin Değerlendirilmesi (Ra) 60
3.2. Takım Aşınması Sonuçları 61
3.2.1. Yüksek Hızlı Tutucu – Soğutma Sulu Kesme 62
3.2.2. Standart Tutucu – Soğutma Sulu Kesme 63
3.2.3. Yüksek Hızlı Tutucu – Kuru Kesme 64
3.2.4. Standart Tutucu – Kuru Kesme 65
3.2.5. Genel Karşılaştırma 66
3.2.6. Literatür ile Karşılaştırma 67
3.2.7. İş Parçası Yüzeyi ve Talaş Oluşumu 67

3.2.8. Takım Aşınması Sonuçlarının ANOVA ile Değerlendirilmesi 70
3.2.9. Hipotezlerin Değerlendirilmesi (VB) 71
3.3. Genel Değerlendirme 72
4. SONUÇLAR 73
KAYNAKLAR 77
EKLER 82
ÖZGEÇMİŞ .....

ÖZET

YÜKSEK HIZLI VE STANDART TİP TAKIM TUTUCULARIN FREZELEME İŞLEMLERİNDEKİ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI: YÜZEY KALİTESİ VE KESİCİ TAKIM AŞINMA ANALİZİ

Bu çalışmada, frezeleme işlemlerinde kullanılan yüksek hızlı ve standart tip pensli takım tutucuların performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, takım tutucu tipinin yüzey kalitesi ve kesici takım aşınması üzerindeki etkilerini belirlemek ve performans farklarını nicel olarak ortaya koymaktır.

Deneyler, AISI 1045 çeliği üzerinde, dört ağızlı TiAlN kaplamalı karbür parmak freze kullanılarak CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Her iki takım tutucu için aynı kesici takım ve aynı iş parçası kullanılmış; deneyler aynı CNC tezgâhında, aynı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve radyal paso) altında yürütülmüş ve böylece deney koşullarının tutarlılığı sağlanmıştır. Bu sayede yalnızca takım tutucu tipinin ve soğutma koşullarının etkisi incelenmiştir. Her deney koşulu için ölçümler yedi tekrar (N = 7) şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü temaslı bir ölçüm cihazı ile, takım aşınması ise optik mikroskop ve ImageJ yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler, Jamovi (v.2.6.44) yazılımında iki yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş ve etki büyüklükleri hesaplanmıştır.

Sonuçlar, yüksek hızlı takım tutucuların standart tip takım tutuculara kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığını ve takım aşınmasının daha yavaş ilerlediğini göstermiştir. İstatistiksel analizler, takım tutucu tipi ve soğutma koşulunun hem yüzey kalitesi hem de takım aşınması üzerinde anlamlı etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle sulu kesme koşullarında yüksek hızlı takım tutucuların daha üstün performans sergilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Hızlı Takım Tutucular, Standart Takım Tutucular, Frezeleme, Yüzey Kalitesi, Takım Aşınması, Kesme Parametreleri

ABSTRACT

COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF HIGH-SPEED AND STANDARD-TYPE TOOL HOLDERS IN MILLING OPERATIONS: SURFACE QUALITY AND CUTTING TOOL WEAR ANALYSIS

In this study, the performance of high-speed and standard collet-type tool holders used in milling operations was experimentally compared. The main objective was to determine the effects of tool holder type on surface roughness and tool wear, and to quantitatively evaluate performance differences.

The experiments were conducted on AISI 1045 steel using a four-flute TiAlN-coated carbide end mill on a CNC machining center. The same cutting tool and workpiece were used for both tool holder types. All experiments were performed on the same CNC machine under identical cutting parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut, and radial depth of cut), ensuring experimental consistency. Thus, only the effects of tool holder type and cooling conditions were investigated. For each experimental condition, measurements were repeated seven times (N = 7).

Surface roughness was measured using a contact-type profilometer, while tool wear was evaluated using an optical microscope and ImageJ software. The obtained data were analyzed using Jamovi (v.2.6.44) with two-way analysis of variance (ANOVA), and effect sizes were calculated.

The results showed that high-speed tool holders provided lower surface roughness compared to standard tool holders and that tool wear progressed more slowly. Statistical analyses revealed that both tool holder type and cooling conditions had significant effects on surface roughness and tool wear. In particular, high-speed tool holders exhibited superior performance under flood cooling (wet machining) conditions.

Keywords: High-Speed Tool Holders, Standard Tool Holders, Milling, Surface Quality, Tool Wear, Cutting Parameters

SEMBOLLER

a_e : Radyal talaş derinliği (mm)

a_p : Eksenel talaş derinliği (mm)

B : Takım bağlama genişliği (mm)

D : Kesici takım çapı (mm)

d_1 : Kesici takım uç çapı (mm)

d_2 : Takım sap çapı (mm)

F : F istatistiği (–)

f : İlerleme (mm/dev)

f_z : Diş başına ilerleme (mm/diş)

H : Bağlama/temas uzunluğu (mm)

k_n : Modal rijitlik (MN/m)

ℓ : Etkin bağlama uzunluğu (mm)

L : İşleme mesafesi (mm)

L_1 : Toplam takım boyu (mm)

L_2 : Kesici uç uzunluğu (mm)

l_t : Temas uzunluğu (mm)

m_n : Modal kütle (kg)

n : İş mili devir sayısı (dev/dk)

p : Anlamlılık değeri (–)

Ra : Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm)

r_1 : İç temas yarıçapı (mm)

r_2 : Dış temas yarıçapı (mm)

r_k : Takım tutucu temas yarıçapı (mm)

r_s : İş mili yarıçapı (mm)

t	: İşleme süresi (dk)
VB	: Yanak aşınması (mm)
Vc	: Kesme hızı (m/dk)
Vf	: İlerleme hızı (mm/dk)
z	: Kesici takım ağız sayısı
α	: Anlamlılık düzeyi (–)
δ	: Sehim (mm)
ξ	: Modal sönüm oranı (–)
η^2	: Eta kare etki büyüklüğü (–)
π	: Pi sayısı (–)
ΦC	: Tutucu iç çapı (mm)
ΦD	: Tutucu dış çapı (mm)

KISALTMALAR

AFM : Atomik Kuvvet Mikroskobu

AISI : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

ANOVA : Varyans Analizi

ASTM : Amerikan Test ve Malzeme Derneği

CAM : Bilgisayar Destekli İmalat

CMM : Koordinat Ölçüm Makinesi

CNC : Bilgisayarlı Sayısal Kontrol

DAQ : Veri Toplama Sistemi (Data Acquisition)

ER : Elastik Pens Sistemi

FRF : Frekans Yanıt Fonksiyonu

HB : Brinell Sertlik Ölçeği

HRC : Rockwell C Sertlik Ölçeği

HSC : Yüksek Hızlı Kesme (High Speed Cutting)

HSK : Hohl-Schaft-Kegel (İçi Boş Konik Takım Tutucu Sistemi)

HSM : Yüksek Hızlı İşleme (High Speed Machining)

HV : Vickers Sertlik Ölçeği

ISO : Uluslararası Standardizasyon Örgütü

MQL : Minimum Miktarda Yağlama

N : Örnek sayısı

PCD : Polikristalin Elmas

PCBN : Polikristalin Kübik Bor Nitrür

RC : Receptance bağlama yöntemi (Receptance Coupling)

RMS : Karekök Ortalama Kare

SD : Standart Sapma (Standard Deviation)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SJ-210 : Taşınabilir Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

TCR : Termal Temas Direnci

TiAlN : Titanyum Alüminyum Nitrür

TiAlSiN : Titanyum Alüminyum Silisyum Nitrür

UAM : Ultrasonik Destekli Frezeleme

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. SMA tabanlı (yüksek hassasiyetli), hidrolik ve standart pensli takım tutucuların merkezleme doğruluğu ve titreşim seviyelerinin karşılaştırılması [7]. 5

Şekil 1.2. TCR değerine bağlı maksimum sıcaklık ve termal deformasyon değişimi [16]. 6

Şekil 1.3. Farklı kaplama türleri için rapor edilen yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü eğilimlerinin şematik gösterimi [2]. 7

Şekil 1.4. Yüksek hızlı frezelemede kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesinde rapor edilen sıcaklık artışı eğiliminin şematik gösterimi [4]. 10

Şekil 1.5. İş mili–takım tutucu temas arayüzünün şematik gösterimi [25]. 20

Şekil 1.6. Pensli takım tutucu montajının şematik gösterimi ve temas bölgeleri [28]. .. 25

Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan AISI 1045 çelik numunelerin işlenmemiş (ham) ve işlenmiş yüzey görünümleri..... 30

Şekil 2.2. Deneylerde kullanılan parmak frezenin geometrik ölçüleri (L1, L2, d1, d2). 32

Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan TiAlN kaplamalı karbür parmak freze..... 32

Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan takım tutucular (solda yüksek hızlı tip, sağda standart tip)..... 36

Şekil 2.5. Deneylerde kullanılan yüksek hızlı tip takım tutucu (Nikken HSK 63A–SK16–105)..... 38

Şekil 2.6. Deneylerde kullanılan standart tip ER pensli takım tutucu (Diğer Marka ER25×80, HSK-A 63) 38

Şekil 2.7. Deneylerde kullanılan CNC tezgâhı (Hermle C30U dik işleme merkezi). 40

Şekil 2.8. Deney numunelerinin EROWA palet sistemi üzerinde, çift mengene kullanılarak CNC tezgâha bağlanmış görünümü. 40

Şekil 2.9. Deney numunelerinin sulu kesme koşulu altında, sol tarafta standart takım tutucu, sağ tarafta yüksek hızlı takım tutucu kullanılarak CNC tezgâh üzerinde işlenmiş durumu. 41

Şekil 2.10. Kuru kesme koşulu altında gerçekleştirilen frezeleme deneylerinde, sol tarafta yüksek hızlı takım tutucu, sağ tarafta standart takım tutucu kullanılarak işlenen deney numunelerinin tezgâh içi görünümü. 42

Şekil 2.11. Frezeleme deneylerinde kullanılan iş parçası geometrisi ve kesici takım yolunun CAM ortamında oluşturulan görünümü. 43

Şekil 2.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde kullanılan Mitutoyo SJ-210 taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı 47
Şekil 2.13. Takım aşınma ölçümlerinde kullanılan optik mikroskop ve ölçüm düzeneği. 49
Şekil 3.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının grafiği (2,5 dk işleme sonrası). 53
Şekil 3.2. Yüksek hızlı tutucu, soğutma sulu kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü. 54
Şekil 3.3. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında ölçüm sonucunda elde edilen Ra değerinin ekran görüntüsü. 55
Şekil 3.4. Yüksek hızlı tutucu, kuru kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... 55
Şekil 3.5. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının kuru kesme koşullarında elde edilen ölçüm sonucuna ait ekran görüntüsü. 56
Şekil 3.6. Standart tutucu, soğutma sulu kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü.56
Şekil 3.7. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının standart tutucu kullanılarak soğutma sulu kesme koşullarında elde edilen ölçüm sonucuna ait ekran görüntüsü. 57
Şekil 3.8. Standart tutucu, kuru kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü..... 57
Şekil 3.9. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının standart tutucu kullanılarak kuru kesme koşullarında elde edilen ölçüm sonucuna ait ekran görüntüsü. 58
Şekil 3.10. Tutucu tipi ve soğutma koşulunun yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkileşimi. 60
Şekil 3.11. Yüksek hızlı tip tutucuda soğutma sulu kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü). 62
Şekil 3.12. Yüksek hızlı tip tutucuda soğutma sulu kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,030 mm). 62
Şekil 3.13. Standart tip tutucuda soğutma sulu kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü). 63
Şekil 3.14. Standart tip tutucuda soğutma sulu kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,060 mm). 63
Şekil 3.15. Yüksek hızlı tip tutucuda kuru kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü). 64

Şekil 3.16. Yüksek hızlı tip tutucuda kuru kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,040 mm). 64
Şekil 3.17. Standart tip tutucuda kuru kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü). 65
Şekil 3.18. Standart tip tutucuda kuru kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,070 mm). 65
Şekil 3.19. Takım aşınması sonuçlarının grafiği (2,5 dk işleme sonrası). 66
Şekil 3.20. Yüksek hızlı tip tutucu ve sulu kesme koşulunda işlenen iş parçasının bitmiş yüzey görünümü (en iyi yüzey kalitesi). 68
Şekil 3.21. Standart tip tutucu ve kuru kesme koşulunda işlenen iş parçasının bitmiş yüzey görünümü (en olumsuz yüzey kalitesi). 69
Şekil 3.22. Tutucu tipi ve soğutma koşulunun takım aşınması (VB) üzerindeki etkisi. 71

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Rajput ve ark. (2023)'e göre farklı işleme koşullarında kesme kuvveti, talaş sıcaklığı, baskın aşınma mekanizmaları ve yüzey pürüzlülüğü eğilimleri [1] 3
Tablo 1.2. Yüksek hızlı işleme koşullarında farklı takım tutucu sınıflarının merkezleme doğruluğu ve titreşim seviyelerinin karşılaştırılması [7]. 4
Tablo 1.3. Takım tutucu–iş mili arayüzündeki ısıl temas direncinin (TCR) maksimum sıcaklık ve termal deformasyon üzerindeki etkisi [16]. 5
Tablo 1.4. Yüksek hızlı frezelemede farklı takım kaplamalarının yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri [2]. 7
Tablo 1.5. Yüksek hızlı frezeleme koşullarında kaplamalı karbür kesici takımlarda rapor edilen başlıca aşınma mekanizmaları (Bu mekanizmalar genellikle yüksek kesme hızları ve artan termal yükler altında baskın hale gelmektedir) [3]. 8
Tablo 1.6. Yüksek hızlı frezeleme koşullarında kesme hızına bağlı olarak rapor edilen sıcaklık seviyeleri ve baskın aşınma mekanizmaları [4]. 9
Tablo 1.7. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki genel etkilerine ilişkin literatür bulguları [5]. 11
Tablo 1.8. Frezeleme işlemlerinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki göreli etkilerine ilişkin literatür bulguları [6]. 12
Tablo 1.9. Frezeleme işlemlerinde işleme yönteminin takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerine ilişkin literatür bulguları [17]. 12
Tablo 1.10. Yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması arasındaki ödünleşimi gösteren literatürden örnek sonuçlar [18]. 13
Tablo 1.11. Farklı takım tutucu tiplerinde titreşim seviyesi ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki göreli ilişkiye dair literatürde rapor edilen genel eğilimler [12]. 14
Tablo 1.12. Shrink-fit takım tutuculardа kelepçeleme döngüsüne bağlı olarak rapor edilen titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve performans değişimlerine ilişkin genel eğilimler [19]. 15
Tablo 1.13. Takım tutucu–mil arayüzünde temas yarıçapına bağlı olarak nominal radyal rijitlikte rapor edilen göreli değişim eğilimleri [20]. 16
Tablo 1.14. Bağlama koşullarına bağlı olarak takım tutucu–mil arayüzünde rapor edilen temas rijitliğindeki göreli değişim eğilimleri [21]. 16
Tablo 1.15. Ön yüke bağlı olarak iş mili–takım tutucu konik arayüzünde rapor edilen rijitlik artışına ilişkin göreli eğilimler [22]. 17

Tablo 1.16. Takım tutucu tipine bağlı temas rijitliği ve dinamik davranışın literatüre dayalı kavramsal özeti [23]..... 18
Tablo 1.17. Takım salgı miktarının yüzey pürüzlülüğü ve frezeleme sisteminin dinamik kararlılığı üzerindeki etkisine ilişkin temsili eğilimler [10]. 18
Tablo 1.18. Farklı konfigürasyonlar için literatürde rapor edilen sistem modal parametreleri [24]. 19
Tablo 1.19. Farklı frezeleme stratejilerinde titreşim seviyesinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin literatürde rapor edilen karşılaştırmalı sonuçlar [26]. 21
Tablo 1.20. Yüksek hızlı ve standart takım tutucuların artan devirle titreşim eğilimlerinin karşılaştırılması [8]. 21
Tablo 1.21. Farklı takım tutucu tiplerinin işlem kararlılığı ve titreşim davranışı üzerindeki göreceli etkileri [13]. 22
Tablo 1.22. Kesme hızının ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin literatüre dayalı eğilimsel özet [27]..... 23
Tablo 1.23. Zhao ve ark. (2024) çalışmasında kullanılan ER32 pensli takım–tutucu kombinasyonunun geometrik ve mekanik özellikleri [28]. 24
Tablo 1.24. Takım tutucu tipinin dinamik davranış/stabilite üzerindeki etkisinin literatüre dayalı eğilimsel özeti [30]. 26
Tablo 1.25. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisinin literatüre dayalı eğilimsel özeti [32]. 27
Tablo 2.1. AISI 10xx Serisi Orta Karbonlu Çeliklerin Frezeleme Deneyleri Açısından Karşılaştırılması..... 31
Tablo 2.2. Frezeleme Deneylerinde Kullanılan Kesici Takımın Seçilme Gerekçesi [15,35]. 33
Tablo 2.3. Yaygın Kesici Takım Kaplamalarının Frezeleme Açısından Karşılaştırılması [35,39]. 33
Tablo 2.4. Deneylerde Kullanılan Takım Tutucuların Teknik Özellikleri ve Seçilme Gerekçeleri [8,12,30]..... 36
Tablo 2.5. Deney parametreleri 43
Tablo 2.6. AISI 1045 Çeliğinin TiAlN Kaplamalı Karbür Parmak Freze ile Frezelenmesi İçin Literatürde Önerilen Kesme Parametre Aralıkları (Aralıkların AISI 1045'e uyumu

için: [1]; genel hesap/mühendislik çerçevesi: [15]) 44
Tablo 2.7. Literatür Aralıkları ve Bu Çalışmada Kullanılan Deneysel Kesme Parametreleri 45
Tablo 2.8. Hesaplanan Kesme Parametreleri 46
Tablo 3.1. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) sonuçları (ortalama ± standart sapma, N = 7). 52
Tablo 3.2. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için iki yönlü ANOVA sonuçları. 59
Tablo 3.3. Takım aşınması (VB) sonuçları (ortalama ± standart sapma, N = 7). 61
Tablo 3.4. Takım aşınması sonuçlarının karşılaştırmalı tablosu 66
Tablo 3.5. Takım aşınması (VB) için iki yönlü ANOVA sonuçları. 70

1. GİRİŞ

Gelişen üretim teknolojileri ve küresel rekabet koşulları, metal işleme operasyonlarında daha yüksek verimlilik, daha düşük maliyet ve daha yüksek yüzey kalitesi gereksinimlerini beraberinde getirmiştir. Özellikle havacılık, otomotiv, kalıpçılık ve enerji sektörlerinde kullanılan parçalarda yüzey kalitesi, yalnızca estetik bir unsur değil; aynı zamanda parça dayanımı, yorulma ömrü, tribolojik davranış ve montaj hassasiyeti üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Frezeleme operasyonları, talaşlı imalat yöntemleri içerisinde en yaygın kullanılan tekniklerden biridir ve bu nedenle işleme sırasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) ile kesici takımın aşınma davranışı (VB), sürecin başarısını belirleyen en kritik kriterler arasında yer almaktadır [1–4].

Literatürde frezeleme operasyonlarının performansına etki eden parametreler arasında kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve yan adım gibi kesme parametreleri yoğun şekilde incelenmiştir [1–6]. Bununla birlikte, kesici takımın bağlandığı takım tutucunun tipi ve tasarımı da işleme performansını belirleyen önemli bir faktördür [7-9]. Takım tutucular genel olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır: standart tip takım tutucular ve yüksek hızlı tip takım tutucular. Standart tip takım tutucular yaygın olarak kullanılmakla birlikte, yüksek devirlerde titreşim ve salgı problemleri nedeniyle yüzey kalitesi ve takım ömrü açısından sınırlı performans gösterebilmektedir [8,10]. Buna karşılık yüksek hızlı tip takım tutucular, rijit yapıları ve yüksek merkezleme hassasiyetleri sayesinde daha yüksek devirlerde daha kararlı işleme imkânı sunmakta, titreşimleri azaltarak yüzey kalitesini iyileştirmekte ve takım ömrünü uzatabilmektedir [7-9].

Son yıllarda yapılan araştırmalar, takım tutucunun rijitliği, merkezleme doğruluğu ve titreşim sönümleme kapasitesinin, özellikle yüksek hızlı işleme (High Speed Machining – HSM) koşullarında işleme kalitesi üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur [7-9,11]. Ancak literatürdeki birçok çalışma yalnızca kesme parametrelerinin etkisine odaklanmış, takım tutucu tipinin sistematik bir şekilde yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkileri daha sınırlı incelenmiştir [9,12,13]. Bu durum, literatürdeki önemli bir boşluğu işaret etmektedir. Bu nedenle, takım tutucu tipinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisinin aynı kesme parametreleri ve aynı iş parçası malzemesi altında sistematik olarak incelenmesi gerekmektedir.

Frezeleme işlemlerinde kesici takım–takım tutucu–iş mili sistemi, kesme sırasında oluşan dinamik yüklerin aktarılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle takım tutucunun rijitliği, balans durumu ve salgı karakteristikleri, yüzey kalitesi, titreşim davranışı ve kesici takım aşınması üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [8,10,12-14]. Literatürde farklı takım tutucu tiplerinin dinamik performansa etkisi üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte, yüksek hızlı ve standart tip pensli takım tutucuların aynı kesme parametreleri ve aynı iş parçası malzemesi altında deneysel olarak karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır. Bu bağlamda, takım tutucu tipine bağlı performans farklarının nicel olarak ortaya konulması, hem bilimsel literatür hem de endüstriyel uygulamalar açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların frezeleme performanslarını deneysel olarak karşılaştırmak ve bu kapsamda yüzey kalitesi ile takım aşınması üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Çalışma, AISI 1045 çeliği üzerinde Titanyum Alüminyum Nitrür (TiAlN) kaplamalı karbür parmak freze kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hem kuru hem de sulu kesme koşullarında yapılan deneyler, farklı takım tutucu tiplerinin performansını doğrudan karşılaştırmalı biçimde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Bu sayede, sanayi uygulamaları için en uygun takım tutucu tipinin seçiminde bilimsel bir katkı sunulması hedeflenmektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Rajput ve ark. (2023), AISI 1045 orta karbonlu çeliğin yüzey frezelenmesi sırasında TiAlN kaplamalı kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilen işlemlerde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını etkileyen temel kesme parametrelerini incelemiştir. Çalışmada kaba, finiş ve agresif işleme (yüksek kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği) koşulları altında kesme kuvvetleri, talaş sıcaklığı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü gibi başlıca performans göstergeleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, işleme koşullarının kesme mekanizması, termal yükler ve aşınma davranışı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Araştırma sonuçlarına göre, kaba işleme koşullarında daha yüksek kesme kuvvetlerinin oluştuğu ve bu koşullarda yapışma aşınması ile kaplama soyulmasının baskın aşınma mekanizmaları olarak gözlemlendiği rapor edilmiştir. Buna karşılık, agresif işleme koşullarında (yüksek kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği), talaş sıcaklığının belirgin biçimde arttığı; krater aşınması, difüzyon aşınması ve termal çatlakların daha baskın hale geldiği belirtilmiştir. Bu durum, artan termal yüklerin TiAlN kaplamalı kesici takımların aşınma davranışı ve takım

ömrü üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde, agresif işleme koşullarının üretkenliği artırmasına rağmen yüzey kalitesi ve takım aşınması açısından daha dikkatli kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Kesme kuvvetleri, talaş sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ile takım aşınma mekanizmaları arasında güçlü bir ilişki bulunduğu ifade edilmiştir [1]. Bu bulgular, frezeleme işlemlerinde yüzey kalitesi ve takım aşınmasının yalnızca kesme parametrelerine değil, aynı zamanda işleme sisteminin dinamik ve termal davranışına da duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır [1,15].

Bu bağlamda söz konusu çalışma, mevcut tez kapsamında incelenen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sonuçlarının yorumlanmasında, kesme koşullarının ve takım–iş parçası etkileşiminin rolünü açıklayan temel bir referans sunmaktadır [1]. Özellikle yüksek hızlı frezeleme koşullarında kesme kuvvetleri ve termal yüklerin artmasının, kesici takım–takım tutucu–iş mili sisteminin rijitliğine ve dinamik davranışına olan duyarlılığı artırdığı dikkate alındığında, Rajput ve ark. (2023) tarafından elde edilen bulgular bu tez çalışmasında değerlendirilen farklı takım tutucu tiplerinin performans farklarının yorumlanmasına dolaylı ancak açıklayıcı bir teorik çerçeve sunmaktadır [1,8,9].

Tablo 1.1. Rajput ve ark. (2023)'e göre farklı işleme koşullarında kesme kuvveti, talaş sıcaklığı, baskın aşınma mekanizmaları ve yüzey pürüzlülüğü eğilimleri [1]

İşleme Koşulu	**Kesme Kuvveti Eğilimi**	**Talaş Sıcaklığı**	**Takım Aşınma Mekanizması**	**Yüzey Pürüzlülüğü Eğilimi**
Kaba İşleme	Yüksek	Orta	Yapışma, kaplama soyulması	Orta-Yüksek
Finiş İşleme	Orta	Düşük-Orta	Aşınma Sınırlı	Düşük
Agresif İşleme	Yüksek	Yüksek	Krater, difüzyon, termal çatlak	Orta

Bu tablo, Rajput vd. (2023) tarafından rapor edilen deneysel bulgular nicel karşılaştırma yapılmaksızın eğilimsel olarak özetlemek amacıyla oluşturulmuştur.

Lee ve ark. (2016), yüksek hızlı işleme koşullarında farklı takım tutucu sınıflarının merkezleme doğruluğu ve titreşim davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada SMA (şekil bellekli alaşım) tabanlı yüksek hassasiyetli takım tutucu, hidrolik takım tutucu ve standart pensli

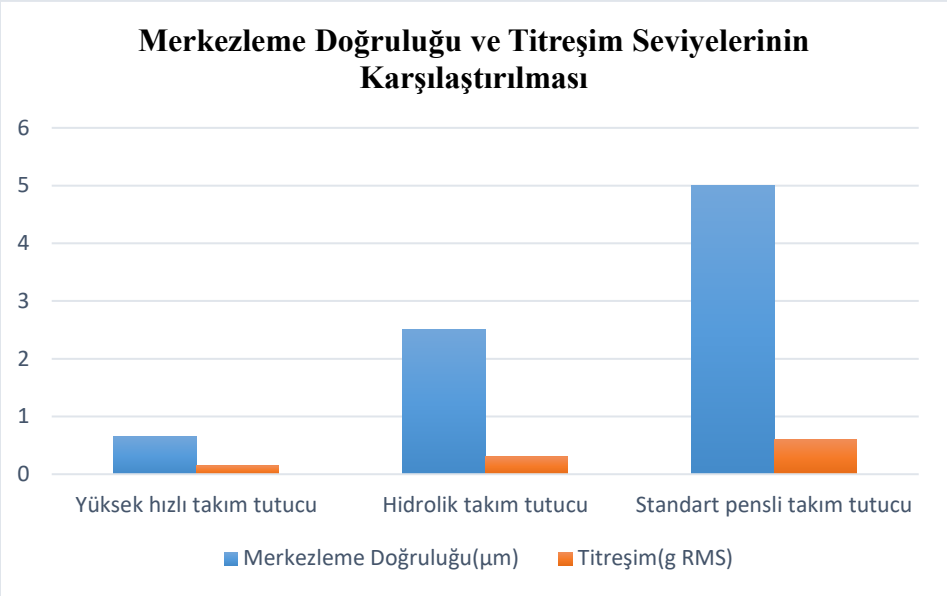
takım tutucu karşılaştırılmıştır. SMA tabanlı takım tutucular, yüksek merkezleme doğruluğu ve titreşim sönümleme kabiliyeti sağlayabilen sistemlerdir. Elde edilen sonuçlara göre SMA tabanlı (yüksek hassasiyetli) takım tutucu, diğer tutucu tiplerine kıyasla daha düşük merkezleme hatası ve titreşim seviyeleri sağlamıştır. Merkezleme doğruluğu açısından SMA tabanlı tutucu yaklaşık 0,65 µm değerine ulaşırken, hidrolik ve standart pensli tutucularda bu değer sırasıyla 2,5 µm ve 5 µm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde titreşim seviyeleri RMS (karekök ortalama) büyüklüğü cinsinden değerlendirilmiş ve yüksek hassasiyetli takım tutucunun en düşük titreşim seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir [7].

Literatürde merkezleme doğruluğunun ve titreşim seviyelerinin azalmasının, frezeleme işlemlerinde işleme stabilitesini artırdığı; bu durumun dolaylı olarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği ve kesici takım aşınmasını yavaşlattığı bildirilmektedir [8,9]. Bu bağlamda, yüksek hızlı işleme için tasarlanan ve yüksek hassasiyet sağlayan takım tutucu sistemlerinin işleme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir [7,8].

Bu çalışmada kullanılan SMA tabanlı yüksek hassasiyetli takım tutucu, merkezleme doğruluğu ve titreşim davranışının işleme performansı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla literatürde referans bir tutucu sınıfı olarak ele alınmaktadır [7].

Tablo 1.2. Yüksek hızlı işleme koşullarında farklı takım tutucu sınıflarının merkezleme doğruluğu ve titreşim seviyelerinin karşılaştırılması [7].

Takım Tutucu Sınıfı	**Merkezleme Doğruluğu (µm)**	**Titreşim (g RMS)**
Yüksek hızlı takım tutucu	0,65	0,15
Hidrolik takım tutucu	2,5	0,3
Standart pensli takım tutucu	5	0,6

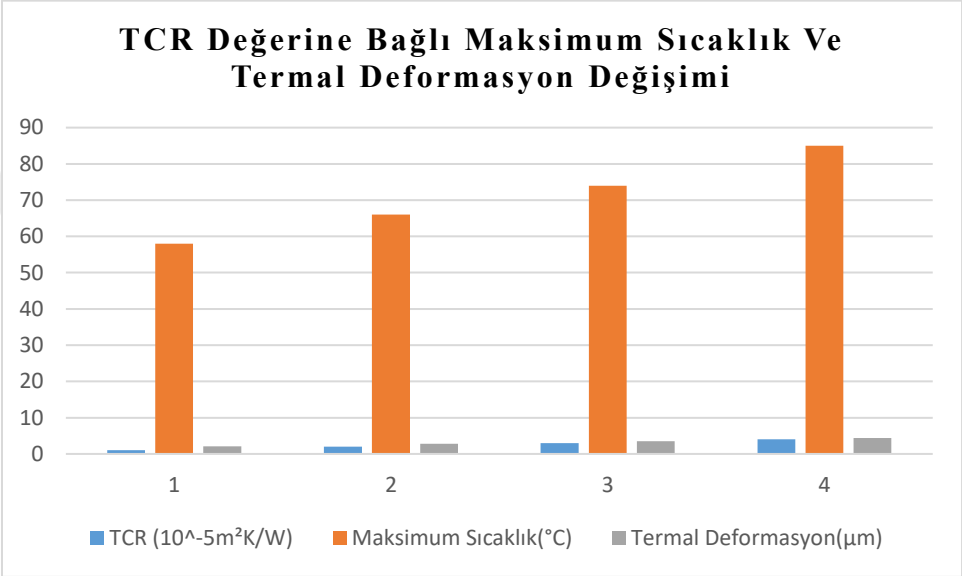


Şekil 1.1. SMA tabanlı (yüksek hassasiyetli), hidrolik ve standart pensli takım tutucuların merkezleme doğruluğu ve titreşim seviyelerinin karşılaştırılması [7].

Fang ve ark. (2022), yüksek hızlı işleme koşullarında takım tutucu–iş mili arayüzünde oluşan TCR (Isıl temas direnci), iş mili sıcaklık dağılımı ve termal deformasyon üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, takım tutucu–iş mili birleşim yüzeyindeki temas kalitesine bağlı olarak TCR değerinin değiştiği ve bu değişimin iş mili termal davranışını doğrudan etkilediği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre TCR değerinin artmasıyla birlikte iş mili üzerindeki maksimum sıcaklık değerleri ve termal deformasyon miktarı belirgin şekilde yükselmektedir. TCR değeri 1×10^{-5} m²K/W seviyesinden 4×10^{-5} m²K/W seviyesine çıktığında maksimum sıcaklığın yaklaşık 58 °C'den 85 °C'ye, termal deformasyonun ise 2,1 µm'den 4,4 µm'ye yükseldiği rapor edilmiştir. Literatürde, takım tutucu–iş mili arayüzünde meydana gelen termal deformasyonların takım konum hatalarına ve işleme hassasiyetinde azalmaya yol açtığı; bunun da yüzey pürüzlülüğünü artırabildiği belirtilmektedir. Bu bağlamda, takım tutucu–iş mili birleşim kalitesinin ve arayüz temas özelliklerinin, işleme performansı üzerinde dolaylı ancak önemli bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışma, takım tutucu–iş mili arayüzündeki temas kalitesinin işleme performansını termal mekanizmalar üzerinden nasıl etkilediğini ortaya koyması açısından, tez kapsamında ele alınan yüksek hızlı ve standart takım tutucuların performans farklılıklarının açıklanmasına literatür desteği sağlamaktadır [16].

Tablo 1.3. Takım tutucu–iş mili arayüzündeki ısıl temas direncinin (TCR) maksimum sıcaklık ve termal deformasyon üzerindeki etkisi [16].

TCR (10^{-5} m^2K/W)	Maksimum Sıcaklık (°C)	Termal Deformasyon (µm)
1	58	2,1
2	66	2,8
3	74	3,5
4	85	4,4



Şekil 1.2. TCR değerine bağlı maksimum sıcaklık ve termal deformasyon değişimi [16].

Lai ve ark. (2024), yüksek hızlı frezeleme koşullarında farklı kaplamalara sahip karbür kesici takımların yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada TiAlN, TiN, çok katmanlı (TiAlN/TiN) ve kaplamasız karbür kesici takımlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çok katmanlı (TiAlN/TiN) kaplamaya sahip kesici takımlar, diğer kaplama türlerine kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha uzun takım ömrü sağlamıştır. Yüzey pürüzlülüğü açısından en düşük Ra değeri çok katmanlı kaplamada elde edilirken, kaplamasız kesici takımlar en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerini göstermiştir. Benzer şekilde takım ömrü, kaplamasız kesici takıma referansla değerlendirildiğinde, çok katmanlı kaplamanın yaklaşık %28,6 oranında takım ömrü artışı sağladığı rapor edilmiştir [2].

Literatürde takım kaplamasının, aşınma mekanizmaları ve yüzey kalitesi üzerinde önemli bir parametre olduğu vurgulanmaktadır [4]. Bu nedenle, takım tutucu tiplerinin karşılaştırıldığı

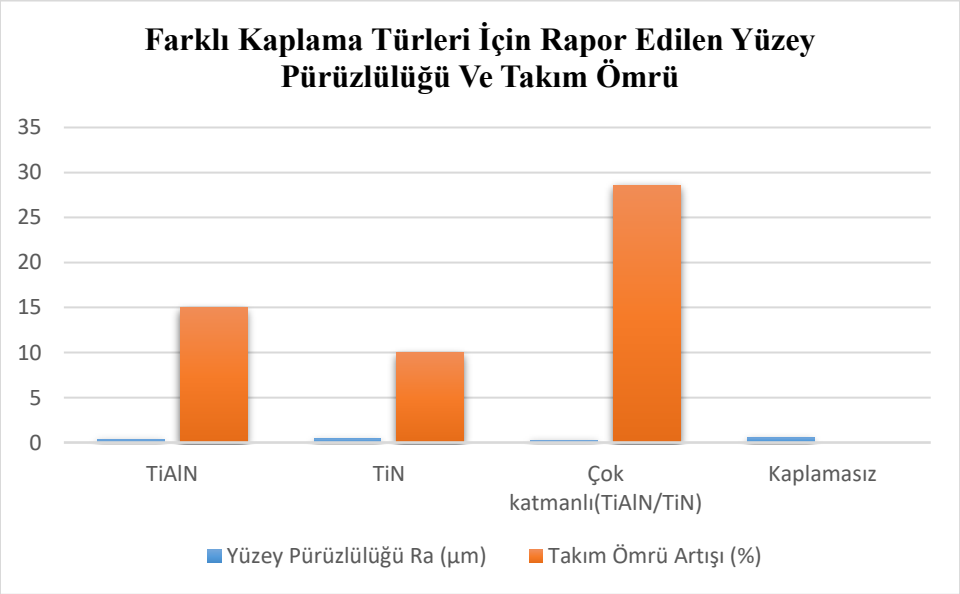
çalışmalarda kaplama türünün sabit tutulması, elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sonuçlarının tutucu kaynaklı etkilerle ilişkilendirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [2,9].

Bu tez kapsamında da kaplama tipi sabit tutularak, gözlenen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması farklılıklarının takım tutucu kaynaklı etkilerden ileri geldiği değerlendirilmiştir. Bu yönüyle söz konusu çalışma, deneysel yaklaşımın metodolojik gerekçesini destekleyen bir literatür kaynağı olarak kullanılmıştır [2].

Tablo 1.4. Yüksek hızlı frezelemede farklı takım kaplamalarının yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri [2].

Kaplama Tipi	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Takım Ömrü Artışı (%)
TiAlN	0,35	15
TiN	0,42	10
Çok katmanlı(TiAlN/TiN)	0,28	28,6
Kaplamasız	0,55	0

Not: Takım ömrü artışı, kaplamasız kesici takıma referansla hesaplanmıştır.



Şekil 1.3. Farklı kaplama türleri için rapor edilen yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü eğilimlerinin şematik gösterimi [2].

Wang ve ark. (2024), yüksek hızlı frezeleme koşullarında kaplamalı karbür kesici takımların aşınma davranışlarını incelemiş ve aşınma ilerledikçe kaplama delaminasyonu (kaplamanın tabakalar halinde ayrılması), mikro çatlak oluşumu ve oksidatif/adhezif aşınma mekanizmalarının baskın hale geldiğini rapor etmiştir. Çalışma sonuçları, takım aşınmasının ilerlemesiyle birlikte kesme kuvvetlerinin belirgin şekilde arttığını göstermektedir [3].

Literatürde, artan kesme kuvvetlerinin frezeleme işlemlerinde dinamik yükleri artırarak işleme stabilitesini olumsuz etkilediği; bu durumun dolaylı olarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve takım aşınmasının hızlanmasına neden olduğu belirtilmektedir [9,15]. Bu bağlamda, takım aşınma davranışı ve buna bağlı kesme kuvveti değişimlerinin, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü açısından kritik öneme sahiptir [3,15].

Bu çalışma, takım aşınmasının kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koyarak, tez kapsamında gerçekleştirilen takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü analizlerinin fiziksel temelini desteklemek amacıyla literatür desteği olarak kullanılmıştır [3].

Tablo 1.5. Yüksek hızlı frezeleme koşullarında kaplamalı karbür kesici takımlarda rapor edilen başlıca aşınma mekanizmaları (Bu mekanizmalar genellikle yüksek kesme hızları ve artan termal yükler altında baskın hale gelmektedir) [3].

Aşınma Mekanizması	**Etkisi**
Kaplama delaminasyonu	Takım ömrünü kısaltır
Mikro çatlaklar	Kesme kuvvetlerini artırır
Malzeme yapışması	Yüzey kalitesini bozar
Oksidatif/adhezif aşınma	Yüksek hızlarda baskın

Zhang ve ark. (2023), yüksek hızlı frezeleme koşullarında kesme hızının artmasıyla birlikte kesme bölgesindeki sıcaklığın yükseldiğini ve buna bağlı olarak baskın aşınma mekanizmalarının değiştiğini rapor etmiştir. Çalışmada, kesme hızındaki artışın talaş oluşum sürecini ve kesme kuvveti davranışını etkileyerek takım aşınmasını hızlandırdığı belirtilmiştir [4].

Literatürde, artan kesme hızı (Vc) ile birlikte kesme bölgesindeki sıcaklık seviyelerinin yükseldiği; bu durumun abrasyon, adhezif aşınma, krater aşınması ve termal çatlak oluşumu gibi mekanizmaların baskın hale gelmesine neden olduğu ifade edilmektedir [4,15]. Kesme

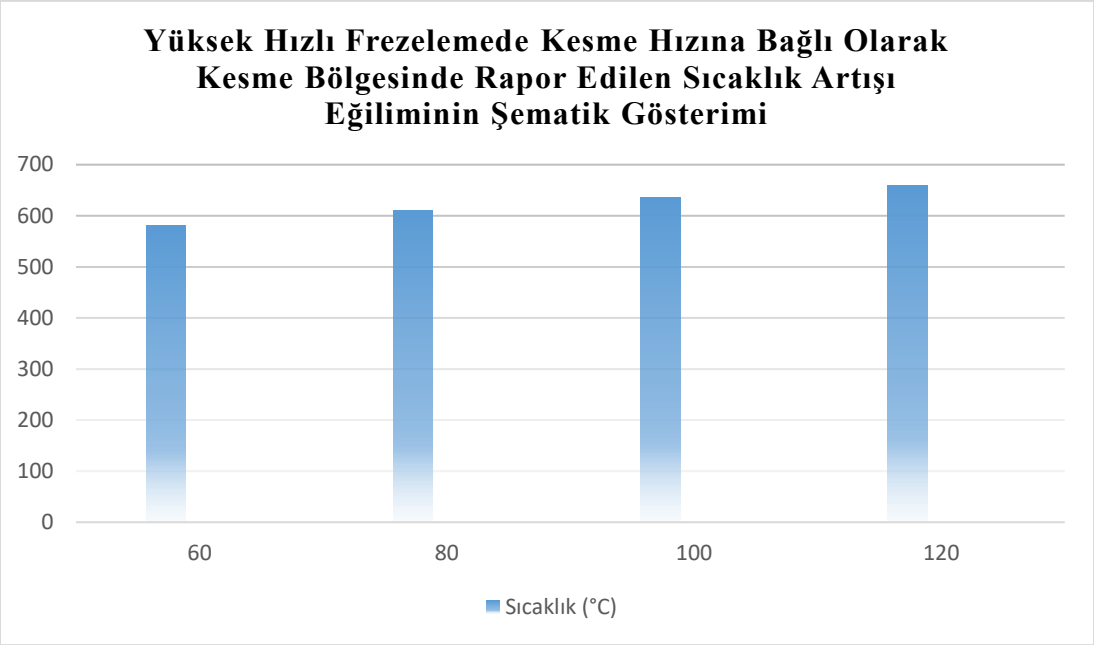
hızına bağlı olarak artan sıcaklık ve düzensiz kesme kuvvetleri, takım aşınmasının ilerlemesine ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına yol açabilmektedir [4,15].

Bu nedenle, takım tutucu tiplerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda kesme hızının sabit tutulması, gözlenen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması farklılıklarının doğrudan takım tutucu performansına atfedilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, kesme hızının işleme performansı üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koyarak, tez kapsamında izlenen deneysel yaklaşımın metodolojik gerekçesini destekleyen bir literatür kaynağı olarak kullanılmıştır. Kesme hızının 60 m/dk olduğu koşullarda baskın aşınma mekanizmasının abrasyon olduğu, hız arttıkça sırasıyla yapışma, krater ve çatlak aşınmasının baskın hale geldiği literatürde bildirilmektedir [4].

Tablo 1.6. Yüksek hızlı frezeleme koşullarında kesme hızına bağlı olarak rapor edilen sıcaklık seviyeleri ve baskın aşınma mekanizmaları [4].

Kesme Hızı (m/dk)	Sıcaklık (°C)	Baskın Aşınma Mekanizması
60	580	Abrasyon
80	610	Yapışma
100	635	Krater
120	660	Çatlak

Not: Tablo, literatürde farklı malzemeler için rapor edilen kesme hızı–sıcaklık–aşınma mekanizması ilişkilerinin genel eğilimlerini göstermek amacıyla uyarlanmıştır. Sunulan değerler, tez kapsamında kullanılan malzeme için birebir deneysel sonuçları temsil etmemektedir.



Şekil 1.4. Yüksek hızlı frezelemede kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesinde rapor edilen sıcaklık artışı eğiliminin şematik gösterimi [4].

Not: Şekil, literatürde rapor edilen genel eğilimi görselleştirmek amacıyla şematik olarak sunulmuş olup, nicel karşılaştırma amacıyla kullanılmamıştır.

Yusuf ve ark. (2013), farklı kesme hızlarında gerçekleştirilen frezeleme deneylerinde kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü davranışının değiştiğini incelemiştir. Çalışmada, belirli bir hız aralığına kadar kesme hızının artırılmasının daha stabil talaş oluşumu ve azalan kesme kuvvetleri sayesinde yüzey kalitesini iyileştirebildiği; ancak çok yüksek kesme hızlarında sıcaklık artışına bağlı olarak takım aşınmasının hızlanabildiği rapor edilmiştir [5].

Literatürde, kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerinde belirleyici bir parametre olduğu; kesme hızına bağlı olarak talaş oluşum mekanizması, kesme kuvvetleri ve termal etkilerin değiştiği belirtilmektedir [5,15]. Bu nedenle, takım tutucu tiplerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda kesme hızının sabit tutulması, gözlenen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması farklılıklarının doğrudan takım tutucu performansına atfedilebilmesi açısından önem taşımaktadır.

Bu bağlamda söz konusu çalışma, kesme hızının işleme performansı üzerindeki etkisini ortaya koyarak, tez kapsamında kesme hızının neden sabit tutulduğunu açıklayan metodolojik bir literatür desteği olarak kullanılmıştır [5].

Tablo 1.7. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki genel etkilerine ilişkin literatür bulguları [5].

Kesme Hızı Seviyesi	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Eğilimi	Takım Aşınması Eğilimi	Literatürde Yapılan Yorum
Düşük kesme hızı	Yüksek Ra	Düşük-Orta	Düzensiz talaş oluşumu ve yüksek kesme kuvvetleri yüzey kalitesini olumsuz etkiler
Orta kesme hızı	Orta Ra	Orta	Talaş oluşumu daha stabil hale gelir, yüzey kalitesi iyileşir
Yüksek kesme hızı	Düşük Ra	Artan aşınma eğilimi	Daha düzgün talaş akışı ve azalan titreşimler yüzey kalitesini iyileştirir; ancak sıcaklığa bağlı aşınma mek. hızlanabilir

Not: Bu tablo, literatürde farklı malzemeler için rapor edilen kesme hızı–yüzey pürüzlülüğü–takım aşınması ilişkilerinin genel eğilimlerini özetlemek amacıyla hazırlanmıştır. Sunulan bulgular, tez kapsamında kullanılan AISI 1045 çeliği için birebir deneysel sonuçları temsil etmemektedir.

Xiang ve ark. (2018), yüksek hızlı frezeleme işlemlerinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki göreli etkilerini incelemiştir. Çalışma sonuçları, ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızına kıyasla daha baskın parametreler olduğunu göstermektedir [6]. Literatürde, baskın kesme parametrelerinin sabit tutulmasının, diğer sistemsel faktörlerin (örneğin takım tutucu tipi ve bağlama koşulları) işleme performansı üzerindeki etkilerinin daha net değerlendirilebilmesini sağladığı belirtilmektedir [1,6,9]. Bu nedenle, tez kapsamında ilerleme miktarı ve talaş derinliği sabit tutularak, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki değişimlerin büyük ölçüde takım tutucu performansından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu çalışma, kesme parametrelerinin göreli etkilerini ortaya koyarak, tez kapsamında izlenen deneysel yaklaşımın metodolojik gerekçesini destekleyen bir literatür kaynağı olarak kullanılmıştır [6].

Tablo 1.8. Frezeleme işlemlerinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki göreli etkilerine ilişkin literatür bulguları [6].

Kesme Parametresi	Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	Kesme Kuvvetine Etkisi	Literatürde Yapılan Yorum
Kesme hızı (Vc)	Düşük-orta	Orta	Yüksek hızlarda termal etkiler artar, ancak baskın parametre değildir
İlerleme (f)	Yüksek	Orta	İlerleme artışı Ra değerini belirgin şekilde yükseltir
Talaş derinliği (ap)	Orta	Yüksek	Kesme kuvvetleri üzerinde en baskın parametrelerden biridir

Not: Bu tablo, literatürde farklı malzeme ve takım kombinasyonları için rapor edilen genel eğilimleri özetlemek amacıyla hazırlanmıştır. Sunulan bulgular, tez kapsamında kullanılan AISI 1045 çeliği için birebir deneysel sonuçları temsil etmemektedir.

Han ve ark. (2023), frezeleme işlemlerinde işleme yönteminin takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu rapor etmiştir. Literatürde, titreşim destekli frezeleme gibi alternatif yöntemlerin kesme kuvvetlerini azaltarak takım aşınmasını yavaşlatabildiği ve yüzey kalitesini iyileştirebildiği belirtilmektedir. Ancak takım tutucu tiplerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda işleme yönteminin sabit tutulması, elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması farklılıklarının doğrudan tutucu performansına atfedilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle tez kapsamında konvansiyonel frezeleme yöntemi kullanılarak takım tutucu tiplerinin etkisinin izole edilmesi hedeflenmiştir [17].

Tablo 1.9. Frezeleme işlemlerinde işleme yönteminin takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerine ilişkin literatür bulguları [17].

İşlem Faktörü	Takım Aşınmasına Etkisi	Yüzey Kalitesine Etkisi	Literatürde Yapılan Genel Yorum

Konvansiyonel frezeleme	Daha yüksek aşınma	Görece düşük	Sürekli temas nedeniyle kesme kuvvetleri ve aşınma artar
Titreşim destekli frezeleme	Daha düşük aşınma	İyileşmiş	Kesme kuvvetleri azalır, temas süreksiz hale gelir

Not: Bu tablo, farklı işleme yöntemleri için literatürde rapor edilen genel eğilimleri özetlemek amacıyla hazırlanmıştır. Tez kapsamında yalnızca konvansiyonel frezeleme yöntemi kullanılmış olup, tabloda sunulan bulgular birebir deneysel karşılaştırma amacı taşımamaktadır.

Nguyen ve ark. (2022), yüksek hızlı frezeleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının eş zamanlı olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasının belirli koşullarda takım aşınmasını artırabildiği; buna karşılık takım aşınmasının sınırlandırılmasının yüzey kalitesinden ödün verilmesine yol açabildiği gösterilmiştir. Bu durum, yüksek hızlı frezelemede yüzey kalitesi ile takım aşınması arasında doğal bir ödünleşim bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu tez kapsamında da yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması birlikte değerlendirilmiş; farklı takım tutucu tiplerinin bu iki performans kriteri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma, yüzey pürüzlülüğü ile takım aşınması arasındaki ödünleşimi göstermek amacıyla kullanılmış olup, tez kapsamında deneysel bir optimizasyon çalışması yapılmamış; farklı takım tutucu tipleri için bu iki performans kriteri birlikte değerlendirilmiştir [18].

Tablo 1.10. Yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması arasındaki ödünleşimi gösteren literatürden örnek sonuçlar [18].

Kesme Hızı (m/dak)	**Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)**	**Maks. Takım Aşınması VB (mm)**
120	0,257	0,1362
130	0,258	0,1365
140	0,280	0,1368
150	0,295	0,1370
160	0,308	0,1371

Not: Bu tabloda sunulan değerler, literatürde rapor edilen çok amaçlı optimizasyon çalışmalarından örneklenmiş olup, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçları temsil etmemektedir ve sayısal karşılaştırma amacı taşımamaktadır.

Zagórski ve ark. (2021), farklı takım tutucu tiplerinin frezeleme işlemi sırasında titreşim davranışı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonuçları, takım tutucu rijitliğinin titreşim genliğini doğrudan etkilediğini ve titreşim seviyesindeki azalmanın yüzey pürüzlülüğü değerlerinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir [12]. Literatürde, standart pensli takım tutucuların daha yüksek titreşim seviyelerine ve buna bağlı olarak daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip olduğu; shrink-fit (ısıtmalı) ve yüksek hızlı tutucuların ise daha düşük titreşim davranışı ile daha iyi yüzey kalitesi sağladığı rapor edilmektedir [8,9,12,]. Bu bulgular, takım tutucu tipinin frezeleme performansı üzerindeki önemli bir rol oynadığını göstermektedir [12].

Tablo 1.11. Farklı takım tutucu tiplerinde titreşim seviyesi ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki göreli ilişkiye dair literatürde rapor edilen genel eğilimler [12].

Takım Tutucu Tipi	Titreşim Seviyesi (mm/s)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)
Standart pensli	Yüksek	Yüksek
Shrink-fit (Isıtmalı)	Orta	Orta
Yüksek hızlı	Düşük	Düşük

Not: Tabloda sunulan değerler, farklı malzemeler için literatürde rapor edilen titreşim–yüzey pürüzlülüğü ilişkilerinin göreli eğilimlerini göstermek amacıyla uyarlanmıştır. Tez kapsamında kullanılan AISI 1045 çeliği için birebir deneysel sonuçları temsil etmemektedir.

Lai ve ark. (2022), shrink-fit (ısıtmalı) takım tutucuların tekrar eden ısıtma–soğutma (kelepçeleme) döngüleri altındaki yorgunluk davranışını incelemiştir. Çalışma sonuçları, döngü sayısının artmasıyla birlikte tutucu rijitliğinin azaldığını; buna bağlı olarak kesici takım–takım tutucu–iş mili sisteminde titreşim genliğinin yükseldiğini göstermektedir. Literatürde titreşim seviyesindeki artışın yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği ve takım aşınmasını hızlandırabildiği belirtilmektedir [9,12]. Yaklaşık 3000 döngü sonrasında yüzey kalitesinde belirgin bozulmaların ortaya çıktığı rapor edilmiş; daha ileri döngülerde ise tutucu yapısında

çatlak oluşumu gözlemlenmiş ve frezeleme performansının kritik seviyeye düştüğü belirtilmiştir. Bu bulgular, takım tutucu rijitliğinin yalnızca tasarım özelliklerine değil, kullanım sürecinde maruz kaldığı yorgunluk davranışına da bağlı olduğunu ve bunun frezeleme performansı üzerinde etkili olabildiğini göstermektedir [19].

Tablo 1.12. Shrink-fit takım tutucularda kelepçeleme döngüsüne bağlı olarak rapor edilen titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve performans değişimlerine ilişkin genel eğilimler [19].

Kelepçe Döngüsü (Isıtma-Soğutma)	Titreşim Seviyesi Eğilimi	Yüzey Pürüzlülüğü Ra Eğilimi	Tutucu Performansı
0 (ilk kullanım)	Düşük (stabil)	En düşük Ra	Yüksek performans
~500 döngü	Hafif artış	Kısmi artış	Kabul edilebilir
1000-2000 döngü	Orta artış	Belirgin artış	Performans düşmeye başlar
~3000 döngü	Belirgin artış	Ra yükselir, yüzey bozulur	Performans zayıflar
3700-4000 döngü	Maks. Titreşim	Yüzey ciddi bozulur	Yapısal hasar/kritik

Not: Bu tabloda sunulan bilgiler, shrink-fit takım tutucular için literatürde rapor edilen yorgunluk davranışlarını özetlemekte olup, tez kapsamında kullanılan yeni tutucuların birebir performansını temsil etmemektedir.

Cui ve Zhang (2020), takım tutucu–iş mili arayüzünde nominal radyal rijitliği (takım–mil bağlantısının radyal yöndeki elastik davranışını temsil eden rijitlik) öngörmeye yönelik bir model geliştirmiştir. Model sonuçları, temas yarıçapının artmasıyla birlikte temas alanının genişlediğini ve buna bağlı olarak bağlantı rijitliğinin belirgin şekilde arttığını göstermektedir [20]. Artan rijitliğin, frezeleme sırasında kesici takım–takım tutucu sisteminin dinamik kararlılığını iyileştirerek titreşim seviyelerinin azalmasına ve yüzey kalitesinin artmasına katkı sağladığı belirtilmektedir [9,20]. Bu bağlamda, takım tutucu tasarımında ve tipinde meydana gelen geometrik farklılıkların rijitlik ve frezeleme performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu

anlaşılmaktadır. Bu çalışma, yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların karşılaştırılmasında rijitliğin temel belirleyici parametrelerden biri olduğunu ortaya koymaktadır [20].

Tablo 1.13. Takım tutucu–mil arayüzünde temas yarıçapına bağlı olarak nominal radyal rijitlikte rapor edilen göreli değişim eğilimleri [20].

Temas Yarıçapı (mm)	Nominal Radyal Rijitlik (göreli)	Eğilim Açıklaması
20	Düşük	Sınırlı temas alanı, düşük rijitlik
25	Orta	Temas alanı arttıkça rijitlik yükselir
30	Orta-yüksek	Rijitlikte belirgin artış başlar
35	Yüksek	Rijitlik maksimum eğilimdedir
40	Çok yüksek	Sistem daha kararlı hale gelir

Not: Bu tabloda sunulan değerler, HSK tip takım tutucu–iş mili arayüzü için geliştirilen teorik model sonuçlarından uyarlanmış olup, tez kapsamında kullanılan tutucu sistemleri için birebir deneysel sonuçları temsil etmemektedir.

Liu ve ark. (2022), HSK takım tutucular için geliştirdikleri nominal radyal rijitlik modelinde, bağlama koşullarının ve arayüz temas durumunun rijitliği doğrudan etkileyen temel faktörlerden biri olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçlarına göre, bağlama koşullarının iyileştirilmesiyle birlikte tutucu–mil temas yüzeylerinde elastik deformasyon daha etkin şekilde baskılanmakta ve sistem rijitliği artmaktadır. Literatürde artan rijitliğin frezeleme sırasında titreşim seviyelerini azalttığı ve yüzey kalitesini iyileştirebildiği belirtilmektedir [9,21]. Bu bulgular, tez kapsamında incelenen takım tutucu tiplerinin performans farklarının rijitlik temelli mekanizmalarla ilişkili olabileceğini göstermektedir [21].

Tablo 1.14. Bağlama koşullarına bağlı olarak takım tutucu–mil arayüzünde rapor edilen temas rijitliğindeki göreli değişim eğilimleri [21].

Sıkma Torku (Nm)	Temas Rijitliği (göreli)	Eğilim Açıklaması
50	Düşük	Yetersiz temas, düşük rijitlik

70	Orta	Temas iyileşir, rijitlik artar
90	Orta-yüksek	Rijitlikte belirgin artış
110	Yüksek	Sistem daha kararlı

Not: Tablo, HSK tip takım tutucular için geliştirilen model ve deneysel çalışmalardan uyarlanmış olup, tez kapsamında kullanılan tutucu sistemleri için birebir rijitlik değerlerini temsil etmemektedir.

Xiao ve ark. (2014), iş mili–takım tutucu konik arayüzündeki temas davranışını inceleyen bir model geliştirmiştir. Çalışma sonuçları, uygulanan ön yükün artmasıyla birlikte konik arayüzdeki gerçek temas alanının büyüdüğünü ve buna bağlı olarak arayüz rijitliğinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir [22]. Artan rijitliğin, frezeleme sırasında takım–tutucu–mil sisteminin dinamik kararlılığını iyileştirerek titreşim genliğinin azalmasına ve yüzey kalitesinin artmasına katkı sağladığı belirtilmektedir [9,22]. Bu bulgular, takım tutucu rijitliğinin yalnızca tasarıma değil, bağlantı koşullarına da bağlı olduğunu ortaya koymakta ve tez kapsamında farklı takım tutucu tiplerinde gözlenen performans farklarının mekanik temelini açıklamaya katkı sağlamaktadır [22].

Tablo 1.15. Ön yüke bağlı olarak iş mili–takım tutucu konik arayüzünde rapor edilen rijitlik artışına ilişkin göreli eğilimler [22].

Ön Yük (N)	**Taper Arayüz Rijitliği (göreli)**	**Eğilim Açıklaması**
500	Düşük	Sınırlı temas alanı
1000	Orta	Temas alanı genişler
1500	Orta-yüksek	Rijitlikte belirgin artış
2000	Yüksek	Sistem daha kararlı
2500	Çok yüksek	Maksimum rijitlik eğilimi

Not: Bu tabloda sunulan değerler, konik arayüz için geliştirilen sayısal model sonuçlarından uyarlanmış olup, tez kapsamında kullanılan takım tutucular için birebir deneysel rijitlik değerlerini temsil etmemektedir.

Zheng ve ark. (2025), frezeleme işlemlerinde kesici takım–takım tutucu arayüz rijitliğinin sistemin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla fraktal teoriye dayalı bir

temas rijitliği modeli geliştirmiştir. Çalışmada, takım tutucu–kesici takım arayüzündeki gerçek temas alanının mikroskobik pürüzlülük ve yüzey morfolojisi tarafından belirlendiği vurgulanmış ve bu temas özelliklerinin sistemin doğal frekansları ile titreşim karakteristiklerini doğrudan etkilediği ortaya konulmuştur. Model kapsamında arayüz rijitliğindeki artışın sistemin doğal frekanslarını yükselttiği ve titreşim genliklerini azalttığı rapor edilmiştir [23].

Bu bağlamda Zheng ve ark. (2025) bulguları, takım tutucu rijitliğinin ve arayüz temas özelliklerinin proses kararlılığı üzerindeki önemli bir rol oynadığını göstermektedir; tez kapsamında yüksek rijitliğe sahip takım tutucular ile elde edilmesi beklenen daha kararlı kesme davranışının teorik temelini desteklemektedir [8,9,23].

Tablo 1.16. Takım tutucu tipine bağlı temas rijitliği ve dinamik davranışın literatüre dayalı kavramsal özeti [23].

Takım Tutucu Tipi	Beklenen Temas Rijitliği (göreli)	Dinamik Davranış
Standart pensli	Düşük-Orta	Titreşime açık
Isıtmalı (Shrink-fit)	Yüksek	Daha kararlı
Yüksek hızlı (High-speed)	Çok yüksek	Düşük titreşim

Schmitz ve ark. (2007), frezeleme işlemlerinde takım salgısının yalnızca yüzey pürüzlülüğünü değil, aynı zamanda sistemin dinamik kararlılığını da doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Salgı artışıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün yükseldiği ve stabilite lob diyagramındaki kararlı çalışma bölgelerinin daraldığı rapor edilmiştir [10]. Bu bulgular, mevcut tez çalışmasında yüksek hızlı ve standart tip takım tutucular arasında gözlenen yüzey kalitesi ve titreşim farklarının açıklanmasında temel bir açıklama mekanizması sunmaktadır [10,24].

Tablo 1.17. Takım salgı miktarının yüzey pürüzlülüğü ve frezeleme sisteminin dinamik kararlılığı üzerindeki etkisine ilişkin temsili eğilimler [10].

Salgı Seviyesi (µm)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Eğilimi	Dinamik Kararlılık Eğilimi	Stabilite Bölgesi Eğilimi
Çok düşük (≈ 0)	Düşük	Yüksek	Yüksek devirlere izin verir

Düşük (≈ 5)	Orta	Orta–yüksek	Kısmi daralma
Orta (≈ 10)	Yüksek	Orta	Belirgin daralma
Yüksek (≈ 15)	Çok yüksek	Düşük	Düşük devirlerde dahi titreşim oluşumu

Not: Tablo, literatürde rapor edilen sonuçları eğilimsel olarak özetlemek amacıyla uyarlanmış olup, mevcut tez çalışmasında elde edilen deneysel verileri temsil etmemektedir. Verilen salgı seviyeleri, literatürde rapor edilen tipik büyüklükleri temsil eden yaklaşık değerlerdir.

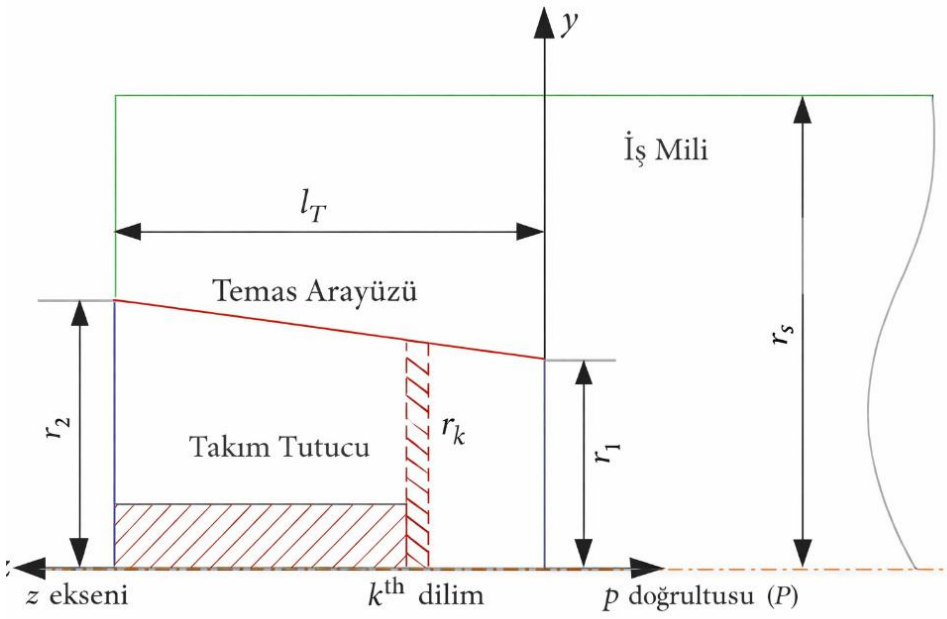
Hajdú ve ark. (2025), frezeleme işlemlerinde takım salgısının kesme kuvvetlerinin periyodik yapısını bozarak rejeneratif titreşim mekanizmasını güçlendirdiğini ve stabilite loblarının yapısını belirgin şekilde etkilediğini göstermiştir. Çalışmada salgı varlığında kararlı kesme bölgelerinin daraldığı ve erken titreşim oluşumunun tetiklenebileceği rapor edilmiştir. Bu bulgular, kesici takım–takım tutucu sisteminde merkezleme hassasiyeti ve rijitliğin frezeleme prosesinin kararlılığı açısından kritik olduğunu göstermektedir. Hajdú ve ark. (2025) tarafından rapor edilen modal analiz sonuçları, takım salgısı ve kesici takım–takım tutucu rijitliğinin sistemin doğal frekansları ve sönüm oranları üzerinden stabilite sınırlarını etkilediğini göstermektedir. Özellikle rijitlikteki değişimlerin doğal frekanslarda kaymalara neden olduğu ve bunun kararlı kesme bölgelerini doğrudan etkilediği rapor edilmiştir [24].

Tablo 1.18. Farklı konfigürasyonlar için literatürde rapor edilen sistem modal parametreleri [24].

Test No	**Doğal Frekans f_n (Hz)**	**Modal Sönüm Oranı ξ**	**Modal Kütle m_n (kg)**	**Rijitlik k_n (MN/m)**
1	247,405	0,8921	2,5045	0,101
2	249,064	0,8977	2,5045	0,107
3	268,077	0,8030	2,5045	0,117
4	250,971	0,8583	2,5045	0,110

Not: Tabloda sunulan modal parametreler, literatürde rapor edilen deneysel modal analiz sonuçlarından alınmış olup, tez kapsamında gerçekleştirilen deneylere ait değildir ve karşılaştırma amacı taşımamaktadır.

İş mili–takım tutucu arayüzü, frezeleme sisteminin dinamik davranışını belirleyen en kritik bölgelerden biridir. Cui ve Su (2020), bu arayüzü elastik temas varsayımı altında modelleyerek temas rijitliğini sistem dinamiğine doğrudan etki eden bir parametre olarak tanımlamıştır. Temas rijitliği, doğal frekansların ve kararlılık sınırlarının belirlenmesinde önemli rol oynamakta; arayüz temas özelliklerindeki değişimlerin titreşim stabilitesi üzerinde belirleyici olabildiği vurgulanmaktadır [15,25]. Bu yaklaşım, tez kapsamında deneysel olarak gözlenen titreşim ve yüzey kalitesi farklılıklarının mekanik kökenini açıklamak açısından teorik bir temel sunmaktadır [25].



Şekil 1.5. İş mili–takım tutucu temas arayüzünün şematik gösterimi [25].

Silva ve ark. (2024), yüksek dayanımlı bir alüminyum alaşımının frezelenmesinde farklı talaş kaldırma stratejilerinin titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, titreşim seviyesindeki artışın yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı; titreşimin azaltıldığı stratejilerde ise yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği ve takım aşınmasının azaldığı rapor edilmiştir [26]. Bu sonuçlar, frezeleme işlemlerinde yüzey kalitesi ve takım ömrünü belirleyen temel mekanizmalardan birinin titreşim davranışı olduğunu göstermekte olup, tez kapsamında incelenen takım tutucu tiplerinin

titreşim–yüzey kalitesi ilişkisi üzerinden değerlendirilmesini dolaylı olarak desteklemektedir [9,26].

Tablo 1.19. Farklı frezeleme stratejilerinde titreşim seviyesinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin literatürde rapor edilen karşılaştırmalı sonuçlar [26].

Frezeleme Stratejisi	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Takım Aşınması VB (mm)	Titreşim Seviyesi (mm/s)	Üretkenlik (mm³/s)
Kontur Frezeleme	≈ 0,46	≈ 0,18	≈ 4,2	≈ 210
Plunge Milling	≈ 0,32	≈ 0,11	≈ 3,1	≈ 275

Not: Tablo, frezeleme stratejisinin titreşim ve yüzey kalitesi üzerindeki etkisini göstermek amacıyla sunulmuş olup, tez kapsamında incelenen takım tutucu tipleriyle doğrudan karşılaştırma amacı taşımamaktadır.

Xia ve ark. (2020), yüksek hızlı yüzey frezeleme işlemlerinde titreşimlerini azaltmak amacıyla yüksek dinamik rijitliğe sahip bir takım tutucu geliştirmiştir. Çalışmada, standart takım tutucuların artan iş mili devirleriyle birlikte titreşim seviyelerinde belirgin artış gösterdiği; buna karşılık yüksek dinamik rijitliğe sahip takım tutucuların titreşim artışını özellikle yüksek devirlerde sınırladığı rapor edilmiştir [8]. Bu bulgular, takım tutucu rijitliğinin işleme stabilitesini artırdığını ve bu durumun yüzey kalitesi ile takım aşınması üzerinde dolaylı ancak belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir [8,9].

Tablo 1.20. Yüksek hızlı ve standart takım tutucuların artan devirle titreşim eğilimlerinin karşılaştırılması [8].

İş Mili Devir Seviyesi	Standart Takım Tutucu Titreşim Seviyesi	Yüksek Hızlı Takım Tutucu Titreşim Seviyesi
Düşük Devir	Orta	Düşük
Orta Devir	Yüksek	Orta

Yüksek Devir	Çok Yüksek	Orta-Yüksek

Korpysa ve ark. (2024), AZ91D magnezyum alaşımının trokoidal frezelenmesinde ER pensli (kollet), shrink-fit (yüksek devir uyumlu) ve hidrolik (yüksek hassasiyetli / yüksek devir uyumlu) olmak üzere üç farklı takım tutucu tipinin işlem kararlılığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, hidrolik takım tutucunun düşük titreşim seviyeleri ve yüksek işlem kararlılığı ile öne çıktığını ortaya koymaktadır. Shrink-fit tutucunun orta düzeyde kararlılık sunduğunu; ER pensli tutucunun ise en yüksek titreşim seviyeleri nedeniyle en düşük kararlılığı sergilediğini göstermiştir [13]. Bu sonuçlar, takım tutucu tipinin dinamik rijitlik ve proses kararlılığı üzerinden yüzey kalitesini dolaylı olarak etkileyebileceğini ortaya koymaktadır [9,13].

Tablo 1.21. Farklı takım tutucu tiplerinin işlem kararlılığı ve titreşim davranışı üzerindeki göreceli etkileri [13].

Takım Tutucu Tipi	**Göreceli Titreşim Seviyesi**	**Dinamik Rijitlik**	**İşlem Kararlılığı**	**Beklenen Yüzey Kalitesi**
Hidrolik	Düşük	Yüksek	Yüksek	İyi
Shrink-fit	Orta	Orta–Yüksek	Orta	Orta
ER Pensli	Yüksek	Düşük	Düşük	Zayıf

Korpysa ve Zagórski (2022), frezeleme işlemlerinde farklı takım tutucu tiplerinin (ER, shrink-fit ve hidrolik) titreşim davranışı ve proses kararlılığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar, takım tutucu tipinin sistemin dinamik davranışı üzerinde belirleyici olduğunu ve özellikle shrink-fit ile hidrolik tutucuların, ER tutucuya kıyasla daha düşük titreşim genliği ve daha geniş kararlı kesme bölgeleri eğilim gösterdiğini ortaya koymuştur. Stabilite lob diyagramları, yüksek rijitliğe sahip tutucuların daha yüksek eksenel talaş derinliklerinde kararlı kesmeye imkân verdiğini göstermiştir. Bu bulgular, kesici takım–takım tutucu sisteminde rijitliğin ve bağlama kalitesinin frezeleme prosesinin titreşim karakteristiği ve kararlılığı üzerindeki kritik rolünü ortaya koymakta olup, mevcut tez kapsamında incelenen farklı takım tutucu tiplerinin rijitlik temelli karşılaştırılması için literatürde rapor edilen deneysel bulgular üzerinden güçlü bir karşılaştırma zemini oluşturmaktadır [14].

Samtaş ve Korucu (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, frezeleme işlemlerinde kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında artış eğilimi bulunduğunu göstermiştir. Literatürden uyarlanarak oluşturulan Tablo 1.22, kesme koşullarının yüzey bütünlüğü ve takım ömrü üzerindeki etkisini eğilimsel olarak özetlemektedir [27]. Literatürde ayrıca kesme parametreleri yükseldikçe oluşabilen dinamik yükler/titreşimlerin yüzey kalitesini olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir; bu durum takım tutucu tipine bağlı dinamik davranış farklarının yorumlanmasında destekleyici bir çerçeve sunmaktadır [8,9,12]. Bu nedenle söz konusu çalışma, tez kapsamında takım tutucu tiplerinin performansının yorumlanmasına metodolojik/teorik bir zemin sağlamaktadır [27].

Tablo 1.22. Kesme hızının ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin literatüre dayalı eğilimsel özet [27].

Kesme Parametreleri Seviyesi	**Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Eğilimi**	**Takım Aşınması (VB) Eğilimi**	**Genel Değerlendirme**
Düşük hız – düşük ilerleme	Düşük (iyi yüzey)	Düşük	Stabil işleme
Orta hız – orta ilerleme	Orta	Orta	Aşınma başlıyor
Yüksek hız – yüksek ilerleme	Yüksek	Yüksek	Titreşim artışı
Çok yüksek hız – çok yüksek ilerleme	Çok yüksek (kötü yüzey)	Çok yüksek	Kararlılık kaybı

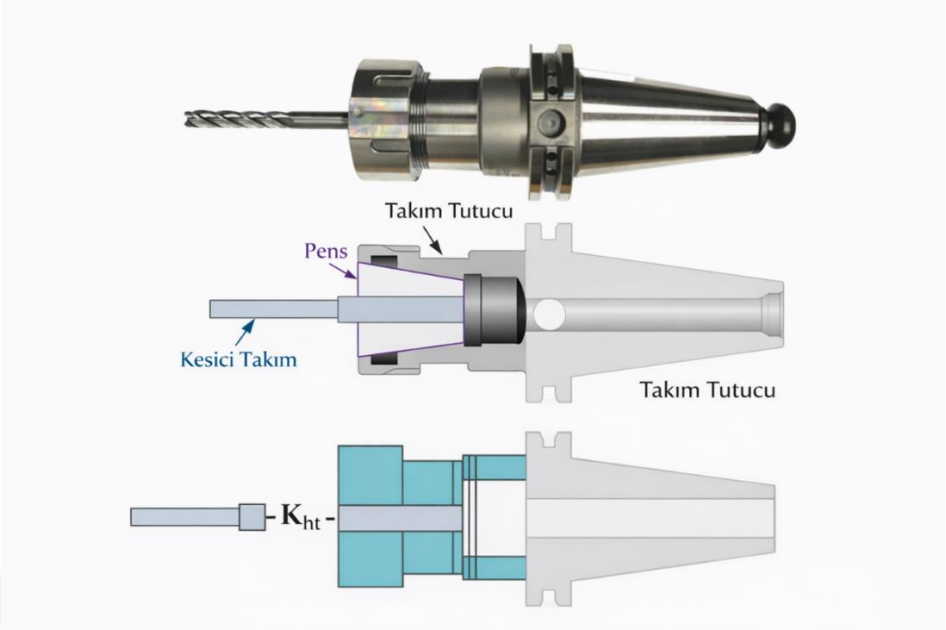
Bu nedenle, çalışmada grafiksel sunum yerine tablo temelli eğilimsel karşılaştırma tercih edilerek, farklı kesme koşullarına ait sonuçlardan doğrudan nicel çıkarım yapılmasının önüne geçilmiştir.

Zhao ve ark. (2024), frezeleme işlemlerinde titreşim oluşumunu etkileyen takım–tutucu arayüz dinamiğini incelemek amacıyla RC (Receptance bağlama yöntemi) tabanlı bir yöntem önermiştir. Çalışmada, kesici takım–takım tutucu temas bölgesinin rijitlik ve sönüm karakteristiklerinin frekans yanıt fonksiyonları (FRF) ve stabilite lob diyagramları üzerindeki

belirleyici etkisi deneysel ve analitik olarak ortaya konulmuştur. Geliştirilen yöntem sayesinde, farklı bağlama uzunlukları ve tutucu–takım kombinasyonları için temas dinamiklerinin yeniden darbe testi gerektirmeden tanımlanabildiği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kesici takım–takım tutucu arayüz rijitliğindeki değişimlerin doğal frekansları, kesme kararlılık sınırlarını ve titreşim oluşumunu doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, standart pensli takım tutucu sistemlerinde arayüz rijitliğinin frezeleme kararlılığı üzerindeki etkisini açıklayan teorik bir referans oluşturmaktadır [28].

Tablo 1.23. Zhao ve ark. (2024) çalışmasında kullanılan ER32 pensli takım–tutucu kombinasyonunun geometrik ve mekanik özellikleri [28].

Parametre	**Değer**
Takım Tutucu	
Model	LYNDEX NIKKEN-C4007-0032-3.13
Tip	ER32 pensli takım tutucu
Kesici Takım	
Model	Kyocera SGS 33125 E1S
Tip	Tam karbür parmak freze
Toplam uzunluk	4 inç
Çap	7,94 mm (5/16 inç)
Ağız sayısı	4
Helis açısı	30°
Pens sıkma torku	135,58 Nm



Şekil 1.6. Pensli takım tutucu montajının şematik gösterimi ve temas bölgeleri [28].

Makine imalat sistemlerinde rijitlik ve sönümleme, özellikle yüksek hızlı talaşlı imalat süreçlerinde titreşim davranışını, işleme stabilitesini ve yüzey kalitesini doğrudan etkileyen temel parametrelerdir. Rivin (1999), mekanik sistemlerde rijitlik ve sönümleme kavramlarını ayrıntılı biçimde ele alarak, temas yüzeyleri, bağlantı elemanları ve ara yüzeylerin sistem rijitliği ve sönümleme karakteristikleri üzerindeki etkilerini tartışmıştır [29]. Takım tutucu–mil–kesici takım sistemleri açısından değerlendirildiğinde, tutucu rijitliği ve sönümleme özelliklerinin frezeleme sırasında oluşan titreşimleri belirgin biçimde etkilediği; bunun da yüzey pürüzlülüğü ile takım aşınması üzerinde sonuçlar doğurabildiği literatürde vurgulanmaktadır [9,29]. Bu bağlamda, rijitliği ve sönümleme kapasitesi yüksek takım tutucuların titreşim seviyelerini azaltarak yüzey kalitesini iyileştirebileceği ve takım ömrüne olumlu katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir [29].

Yüksek hızlı işleme (HSC), talaşlı imalat süreçlerinde verimliliği artırmak ve üretim sürelerini azaltmak amacıyla geliştirilen önemli teknolojilerden biridir. Schulz ve Moriwaki (1992), yüksek hızlı işlemenin yalnızca kesme hızının artırılmasıyla sınırlı olmadığını; kesici takım, takım tutucu ve tezgâh sisteminin dinamik davranışlarının bir bütün olarak değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Çalışmada, yüksek devirlerde rijitlik ve sönümleme özelliklerinin kritik olduğu; yetersiz sistem rijitliğinin titreşim/kararsızlık ve yüzey kalitesinde bozulmalara yol açabileceği vurgulanmıştır. Özellikle takım tutucu–mil–kesici takım arayüzlerinin, yüksek hızlı işleme koşullarında sistem stabilitesini belirleyen temel unsurlar arasında yer aldığı ifade

edilmiştir. Bu teorik çerçeve, yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların frezeleme performanslarının karşılaştırıldığı bu tez çalışmasında elde edilen yüzey kalitesi ve takım aşınması sonuçlarının yorumlanması açısından temel oluşturmaktadır [11].

Sakamoto ve ark. (2012), farklı takım tutucu sıkma/bağlama mekanizmalarının tezgâh mili sisteminin dinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, bağlama koşullarının sistemin doğal frekans ve titreşim davranışını değiştirebildiği; dolayısıyla yüksek devirlerde proses kararlılığı açısından önem taşıdığı vurgulanmıştır [30]. Bu bağlam, tez kapsamında farklı takım tutucu tiplerinde gözlenen titreşim davranışı ve yüzey kalitesi farklılıklarının, bağlama mekanizmasına bağlı dinamik rijitlik değişimleri üzerinden açıklanmasına destek sağlamaktadır [11,12,30].

Tablo 1.24. Takım tutucu tipinin dinamik davranış/stabilite üzerindeki etkisinin literatüre dayalı eğilimsel özeti [30].

İş Mili Devir Seviyesi	Takım Tutucu Tipi	Titreşim / Dinamik Davranış Eğilimi	Genel Değerlendirme
Düşük	Pensli (Standart)	Orta	Kabul edilebilir
Düşük	Shrink-fit (Yüksek hızlı)	Düşük	Daha iyi yüzey
Orta	Pensli (Standart)	Yüksek	Titreşim etkisi
Orta	Shrink-fit (Yüksek hızlı)	Orta	Stabil işleme
Yüksek	Pensli (Standart)	Çok yüksek	Yüzey bozulması
Yüksek	Shrink-fit (Yüksek hızlı)	Yüksek	Daha stabil yüzey

Bu tablo, Sakamoto ve ark. (2012)'de rapor edilen deneysel bulguların, tez kapsamında farklı sıkma mekanizmalarına ait sonuçlardan doğrudan nicel çıkarım yapılmaksızın eğilimsel olarak özetlenmesi amacıyla sunulmuştur.

Obikawa ve ark. (2005), takım titreşiminin doğrusal olmayan karakterini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, titreşim genliğinin artmasıyla birlikte sistemin eşdeğer sönüm davranışının değişebildiği ve bu nedenle titreşim olgusunun klasik doğrusal modellerle her çalışma koşulunda yeterli biçimde açıklanamadığı gösterilmiştir. Araştırmacılar, titreşimin

genliğe bağlı olarak farklı dinamik rejimler sergileyebileceğini vurgulamıştır [31]. Bu bulgular, özellikle yüksek hızlı işleme süreçlerinde kesici takım–takım tutucu–iş mili sisteminin dinamik davranışının doğrusal olmayan etkiler dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymakta ve mevcut tez çalışması için önemli bir teorik altyapı sunmaktadır [15,31].

Khare ve Phull (2023), Ti-6Al-4V alaşımının yüksek hızlı frezelenmesinde artan kesme hızının takım aşınmasını hızlandırdığını ve yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediğini rapor etmiştir. Literatürden uyarlanarak oluşturulan Tablo 1.25, kesme hızına bağlı olarak hem yüzey pürüzlülüğünün hem de takım aşınmasının artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek hızlarda aşınma mekanizmalarının şiddetlenmesi ve termal etkiler, yüzey kalitesi ve takım ömrü açısından kritik faktörler olarak değerlendirilmektedir [32]. Bu bulgular, tez kapsamında yüksek devirlerde takım tutucu kaynaklı dinamik farkların, artan termal ve mekanik yüklerle birleştiğinde işleme performansını belirgin biçimde etkileyebileceğini göstermesi açısından destekleyicidir [11,32].

Tablo 1.25. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisinin literatüre dayalı eğilimsel özeti [32].

Kesme Hızı Seviyesi	**Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Eğilimi**	**Takım Aşınması (VB) Eğilimi**	**Baskın Aşınma Mekanizması**
Orta	Orta	Orta	Sınırlı abrazif aşınma
Yüksek	Yüksek	Yüksek	Artan abrazif aşınma
Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Abrazif + ısıl yumuşama

Bu tablo, Khare ve Phull (2023) tarafından rapor edilen deneysel sonuçlara dayalı genel eğilimleri temsil etmekte olup nicel deney verisi sunmamaktadır.

Yapılan literatür incelemesinde, takım tutucu tipinin frezeleme işlemlerindeki dinamik davranış, titreşim ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin farklı malzeme ve kesme koşulları altında ele alındığı görülmüştür [8,9,12-14]. Ancak, yüksek hızlı tip ve standart tip pensli takım tutucuların aynı kesme parametreleri altında ve aynı iş parçası malzemesi üzerinde yüzey

pürüzlülüğü ve kesici takım aşınması kriterleri birlikte değerlendirilerek karşılaştırıldığı deneysel çalışmalar sınırlıdır. Bu tez çalışması, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlayarak takım tutucu tipine bağlı performans farklarını deneysel verilerle ortaya koymaktadır.

1.2. Araştırma Hipotezleri

Bu bağlamda, literatürde belirtilen rijitlik, merkezleme doğruluğu ve titreşim davranışı farklılıklarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki oluşturup oluşturmadığını belirlemek amacıyla aşağıdaki hipotezler oluşturulmuştur.

Bu tez çalışmasında, frezeleme işlemlerinde kullanılan yüksek hızlı tip ve standart tip pensli takım tutucuların yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve maksimum yanak aşınması (VB) üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada iki bağımsız değişken bulunmaktadır: takım tutucu tipi (yüksek hızlı – standart) ve soğutma koşulu (kuru – sulu). Bağımlı değişkenler ise yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve maksimum yanak aşınması (VB) değerleridir.

Bu kapsamda aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) için

H_{01}: Takım tutucu tipinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.
H_{11}: Takım tutucu tipinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.

H_{02}: Soğutma koşulunun yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.
H_{12}: Soğutma koşulunun yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.

H_{03}: Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında yüzey pürüzlülüğü açısından anlamlı bir etkileşim yoktur.
H_{13}: Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında yüzey pürüzlülüğü açısından anlamlı bir etkileşim vardır.

Takım Aşınması (VB) için

H_{04}: Takım tutucu tipinin maksimum yanak aşınması (VB) üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.
H_{14}: Takım tutucu tipinin maksimum yanak aşınması (VB) üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.

H_{05}: Soğutma koşulunun maksimum yanak aşınması (VB) üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.
H_{15}: Soğutma koşulunun maksimum yanak aşınması (VB) üzerinde anlamlı bir etkisi vardır.

H_{06}: Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında maksimum yanak aşınması açısından anlamlı bir etkileşim yoktur.

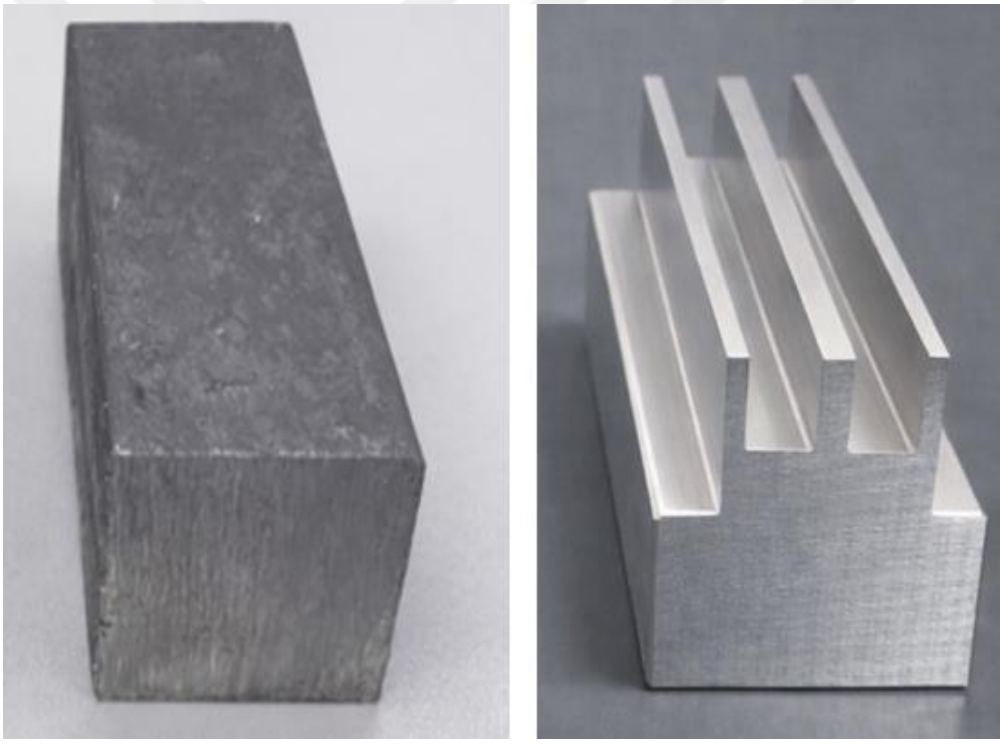
H_{16}: Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında maksimum yanak aşınması açısından anlamlı bir etkileşim vardır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deney Malzemesi

Bu çalışmada deney malzemesi olarak AISI 1045 çeliği kullanılmıştır. AISI 1045, yaklaşık %0,45 karbon içeriğine sahip orta karbonlu çelikler sınıfında yer almakta olup, talaşlı imalat uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Sahip olduğu mekanik dayanım ve işlenebilirlik dengesi sayesinde frezeleme işlemlerinde yüzey kalitesi ve kesici takım aşınması gibi performans kriterlerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır [33,34].

Deney numuneleri 100 × 50 × 50 mm boyutlarında hazırlanmış olup, deneyler öncesinde herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmamıştır (Şekil 2.1). İşlenmiş yüzeyler, deneylerin tamamlanmasının ardından elde edilen tipik yüzey görünümlerini temsil etmektedir.



Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan AISI 1045 çelik numunelerin işlenmemiş (ham) ve işlenmiş yüzey görünümleri.

AISI 1045 çeliği, AISI 10xx serisi içerisinde yer alan orta karbonlu çelikler arasında işlenebilirlik ve mekanik dayanım açısından dengeli bir yapı sunmaktadır. Aynı seri içerisinde talaşlı imalat uygulamalarında sıkça kullanılan AISI 1040 ve AISI 1050 çelikler ile temel özellikler açısından karşılaştırmalı değerlendirme Tablo 2.1'de verilmiştir [33,35].

Tablo 2.1. AISI 10xx Serisi Orta Karbonlu Çeliklerin Frezeleme Deneyleri Açısından Karşılaştırılması

Malzeme	Karbon Oranı (%C)	Sertlik (HB)	İşlenebilirlik	Deneysel Değerlendirme ve Tutucu Etkisi
AISI 1040	0,37 – 0,44	170 – 200	Yüksek	Düşük sertlik nedeniyle takım aşınması sınırlı olup, takım tutucu tipine bağlı performans farkları belirgin şekilde gözlemlenemez.
AISI 1045	**0,43 – 0,50**	**180 – 220**	**Orta – İyi**	**Takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından takım tutucu tipinin etkilerinin dengeli ve ayırt edilebilir biçimde gözlemlenmesine olanak sağlar. Bu nedenle çalışma için tercih edilmiştir.**
AISI 1050	0,48 – 0,55	200 – 240	Orta	Yüksek sertlik etkisi baskın hale gelmekte olup, aşınma davranışı büyük ölçüde malzeme sertliği tarafından belirlenmekte, takım tutucu etkisi ikincil kalmaktadır.

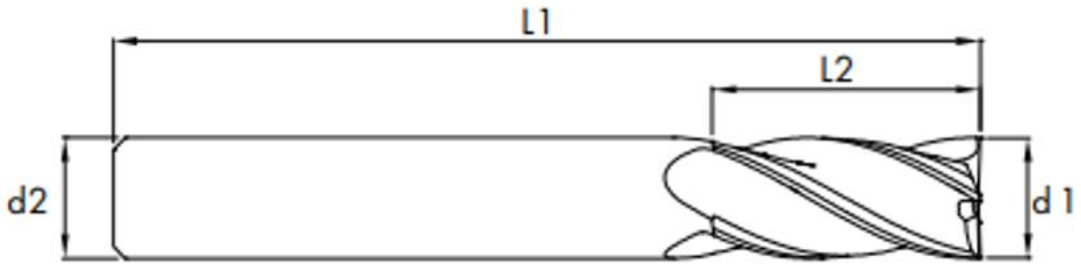
* Sertlik değerleri normalize edilmiş durum için tipik aralıklardır.

Tablo 2.1 incelendiğinde, AISI 1040 çeliğinin düşük karbon içeriği ve sertlik değerleri nedeniyle kesici takım aşınmasının sınırlı düzeyde gerçekleştiği görülmektedir. AISI 1050 çeliğinde ise artan karbon oranına bağlı olarak sertlik değerlerinin yükseldiği ve bu durumun işleme sırasında malzeme sertliği kaynaklı etkilerin baskın hale gelmesine neden olduğu bildirilmektedir [33,35]. AISI 1045 çeliği, işlenebilirlik ve mekanik dayanım arasında dengeli bir geçiş özelliği sunarak, takım tutucu tipine bağlı titreşim, stabilite ve kesici takım aşınması farklarının daha net bir şekilde değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, frezeleme işlemlerinde yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların performans

karşılaştırmasının sağlıklı bir biçimde yapılabilmesi amacıyla deney malzemesi olarak AISI 1045 çeliği tercih edilmiştir [34].

2.2. Kesici Takım

Kesme işlemleri için TiAlN kaplamalı, dört ağızlı, 10 mm çapında karbür parmak freze kullanılmıştır (Şekil 2.2). Karbür parmak frezeler, yüksek sertlikleri ve sıcaklık dayanımları sayesinde frezeleme işlemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Dört ağızlı kesici takım seçimi, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve kesme kuvvetlerinin daha dengeli dağıtılması açısından uygun bir yapı sunmaktadır [36,37].



Şekil 2.2. Deneylerde kullanılan parmak frezenin geometrik ölçüleri (L1, L2, d1, d2).



Şekil 2.3. Deneylerde kullanılan TiAlN kaplamalı karbür parmak freze.

Deneylerde kullanılan kesici takım, dört ağızlı, 10 mm çapında TiAlN kaplamalı karbür parmak frezedir. Kesici takımın geometrik boyutları ve deneysel çalışmalarda kullanılan gerçek görünümü Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de verilmiştir.

Karbür kesici takımlar üzerinde uygulanan TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür) kaplama, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci sağlaması, sertliğini koruması ve düşük sürtünme katsayısı sayesinde yüksek hızlı frezeleme operasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TiAlN kaplama, özellikle kuru kesme ve yüksek kesme hızlarında kesici takım ömrünü artırmakta ve kesme bölgesindeki ısıl yükleri azaltmaktadır [38,39].

Bu çalışmada kullanılan kesici takım ve kaplama kombinasyonu, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınması üzerindeki takım tutucu kaynaklı performans farklarının daha net bir şekilde gözlemlenebilmesine olanak sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

Tablo 2.2. Frezeleme Deneylerinde Kullanılan Kesici Takımın Seçilme Gerekçesi [15,35].

Özellik	Seçilen Takım	Deneysel Gerekçe
Takım malzemesi	Karbür	Yüksek sertlik ve sıcaklık dayanımı sayesinde takım aşınması kontrollü tutulmuş, aşınma davranışının tutucu tipine bağlı olarak değerlendirilmesine imkân sağlanmıştır.
Ağız sayısı	4 ağız	Kesme kuvvetlerinin daha dengeli dağılmasını sağlayarak titreşim etkilerini azaltır; böylece tutucu tipinin dinamik davranış üzerindeki etkisi daha net gözlemlenebilir.
Çap	10 mm	Deneysel stabiliteyi sağlayan yaygın bir kesici çap olup, literatürde benzer tutucu karşılaştırma çalışmalarında tercih edilmektedir.
Geometri	Parmak freze	Yüzey pürüzlülüğü ve yanak aşınması (VB) analizine uygun kesme geometrisi sunmaktadır.
Kaplama	TiAlN	Yüksek hız ve kuru kesme koşullarında termal kararlılık sağlayarak kaplama etkisinin baskın hale gelmesini önler; böylece tutucu performansının ön plana çıkmasına katkı sağlar.

Kesici takım seçimine ilişkin kriterler literatürde yer alan yüksek hızlı frezeleme çalışmalarıyla uyumludur [15,35].

Tablo 2.3. Yaygın Kesici Takım Kaplamalarının Frezeleme Açısından Karşılaştırılması [35,39].

Kaplama Türü	Maks. Çalışma Sıcaklığı	Oksidasyon Direnci	Kuru Kesmeye Uygunluk	Deneysel Değerlendirme

TiN	~600 °C	Orta	Sınırlı	Genel amaçlı uygulamalar, yüksek hız deneyleri için sınırlı termal kararlılık
TiCN	~700 °C	Orta	Orta	Aşınma direnci yüksek ancak yüksek sıcaklıkta oksidasyon riski mevcut
TiAlN	**~800–900 °C**	**Yüksek**	**Yüksek**	**Yüksek hızlı ve kuru kesme koşullarında termal kararlılık sağlayarak tutucu tipinin performans etkisinin daha net gözlemlenmesine olanak tanır**
AlCrN	~900 °C	Çok Yüksek	Yüksek	Ağır talaşlı ve uzun süreli işlemler için uygun, ancak deneysel koşullarda kaplama etkisi baskın hale gelebilir

Kaplama özellikleri ve çalışma sıcaklıkları literatürde rapor edilen veriler esas alınarak özetlenmiştir [35,39].

Tablo 2.3 incelendiğinde, TiAlN kaplamanın yüksek çalışma sıcaklığına ve oksidasyon direncine sahip olması nedeniyle özellikle yüksek hızlı ve kuru frezeleme operasyonlarında avantaj sağladığı görülmektedir. TiN ve TiCN kaplamalar genel amaçlı uygulamalarda tercih edilirken, TiAlN kaplama yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilmesi sayesinde kesici takım aşınmasının geciktirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınması üzerindeki etkilerin sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla TiAlN kaplamalı karbür parmak freze tercih edilmiştir [38,39].

2.3. Takım Tutucular

Bu çalışmada, frezeleme işlemlerinde takım tutucu tipinin yüzey kalitesi ve kesici takım aşınması üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla iki farklı tip pensli takım tutucu kullanılmıştır: yüksek hızlı tip takım tutucu ve standart tip takım tutucu. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi için her iki tutucu da aynı iş mili konik standardında (HSK-A 63) seçilmiştir.

Yüksek devirli işleme koşulları için tasarlanmış *NIKKEN HSK 63A SK16 105 Slim Chuck* kullanılmıştır. Bu tutucu HSK-A63 konik standardına sahip olup SK16 pens sistemi ile çalışmaktadır. [40]. Bu tip yüksek hassasiyetli/yüksek rijitlikli tutucuların düşük salgı, yüksek balans kalitesi ve daha iyi dinamik rijitlik özellikleri sayesinde titreşimi azaltarak işleme prosesinin stabilitesine katkı sağlayabildiği literatürde rapor edilmektedir [7-9,12,13]. Standart tip takım tutucu olarak ise endüstride yaygın kullanılan ER pens sistemine sahip *diğer marka ER25×80 HSK-A63 Collet Chuck* tercih edilmiştir. [41]. ER pensli sistemlerin erişilebilirlik ve maliyet avantajlarına karşın yüksek devirlerde dinamik performans açısından sınırlı kalabildiği, özellikle titreşim/salgı koşullarında yüzey kalitesinin olumsuz etkilenebileceği belirtilmektedir [8,9,11,12].

Bu çalışmada, yüksek hızlı tutucu olarak *NIKKEN HSK 63A SK16 105*, standart tutucu olarak ise standart tip ER pensli takım tutucu *diğer marka ER25×80 HSK-A63* kullanılmış; her iki tutucu da aynı konik standardına sahip olacak şekilde seçilerek konik yapıdan kaynaklanabilecek etkiler deneysel karşılaştırma kapsamında elimine edilmiştir. Böylece karşılaştırmanın, yalnızca takım tutucu tipinin dinamik davranışları ve frezeleme performansı üzerindeki etkileri üzerinden yapılması sağlanmıştır.

Deneylerde kullanılan yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların gerçek deney koşullarındaki görünümleri Şekil 2.4'te verilmiştir.

Takım tutucular genellikle yüksek mukavemetli alaşımlı çeliklerden (örneğin 42CrMo4 veya benzeri alaşımlar) üretilmekte olup ısıl işlem sonrası yaklaşık HRC 58–62 sertliğe ulaşmaktadır. Bu yüksek sertlik ve mukavemet değerleri, takım tutucuların yüksek devirli işleme koşullarında rijitlik ve aşınma direnci sağlayarak stabil bir işleme performansı sunmasına katkıda bulunmaktadır [8,12].



Şekil 2.4. Deneylerde kullanılan takım tutucular (solda yüksek hızlı tip, sağda standart tip).

Deneylerde kullanılan takım tutucuların teknik özellikleri ve seçilme gerekçeleri Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

Tablo 2.4. Deneylerde Kullanılan Takım Tutucuların Teknik Özellikleri ve Seçilme Gerekçeleri [8,12,30]

Özellik	**Yüksek Hızlı Tip Tutucu**	**Standart Tip Tutucu**
Marka / Model	Nikken HSK63A-SK16-105	Diğer Marka ER25×80
Tutucu tipi	Yüksek hızlı pensli (Slim Chuck)	Standart pensli (ER collet Chuck)

Konik standardı	HSK-A63	HSK-A63
Pens sistemi	SK16	ER25
Serbest boy	105 mm	80 mm
Maks. devir	25.000 rpm	20.000 rpm
Balans	G2.5	G2.5
Salgı	≤3 µm	5–10 µm
Dinamik rijitlik	yüksek	orta

Tabloda verilen balans kalitesi, dinamik rijitlik ve titreşim davranışına ilişkin değerlendirmeler; üretici teknik bilgileri ile birlikte literatürde yüksek hızlı ve standart pensli takım tutucuların dinamik davranışlarını inceleyen çalışmalara dayalı olarak sınıflandırılmıştır [8,12,30].

Frezeleme işlemlerinde kesici takım–takım tutucu–tezgâh sisteminin dinamik davranışı, işleme stabilitesi ve yüzey kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Takım tutucunun serbest boyunun artması, sistem rijitliğinin azalmasına ve buna bağlı olarak titreşim eğiliminin artmasına neden olabilmektedir. Literatürde, artan titreşim seviyelerinin yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına ve kesici takım aşınmasının hızlanmasına yol açtığı bildirilmektedir [15].

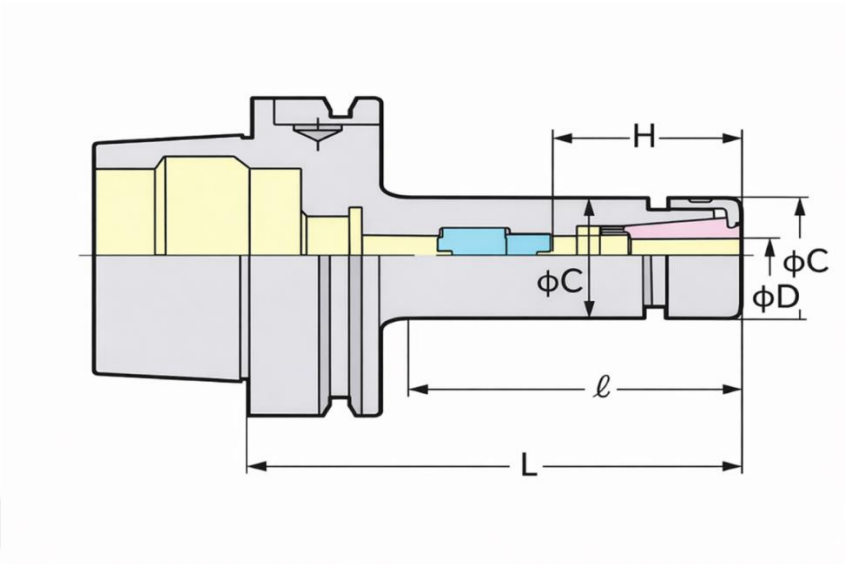
Bu çalışmada, yüksek hızlı tip takım tutucunun standart tip takım tutucuya kıyasla sağladığı dinamik rijitlik ve stabilite avantajını daha belirgin bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla, yüksek hızlı tip takım tutucu daha uzun serbest boy ile kullanılmıştır. Serbest boyun rijitliği azalttığı ve titreşimi artırabildiği bilindiğinden, bu yaklaşım yüksek hızlı tutucunun dinamik avantajını daha zorlayıcı koşulda sınamaya yönelik olarak seçilmiştir [9,15].

Böylece, serbest boyun artmasına rağmen yüksek hızlı tip takım tutucunun titreşim davranışı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin, standart tip takım tutucu ile karşılaştırmalı olarak daha net bir biçimde değerlendirilebilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, takım tutucu tipine bağlı rijitlik ve stabilite farklarının deneysel olarak vurgulanmasına olanak sağlamaktadır.

2.3.1. Kullanılan Takım Tutucuların Katalog Görünümleri

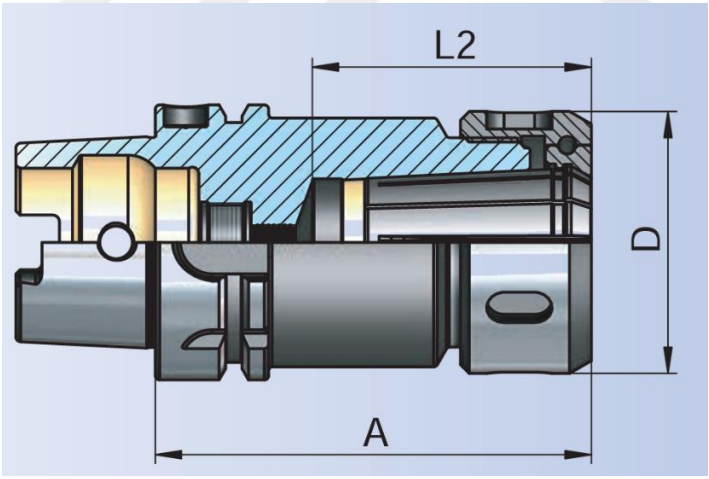
Deneylerde kullanılan yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların üretici kataloglarında yer alan görünümleri bu bölümde sunulmuştur. Bu görseller, tutucuların model tanımlamasını

desteklemek amacıyla verilmiş olup, deney düzeneklerinin birebir temsili niteliği taşımamaktadır.



Şekil 2.5. Deneylerde kullanılan yüksek hızlı tip takım tutucu (Nikken HSK 63A–SK16–105)

(Kaynak: Üretici katalogları [40]).



Şekil 2.6. Deneylerde kullanılan standart tip ER pensli takım tutucu (Diğer Marka ER25×80, HSK-A 63)

(Kaynak: Üretici katalogları [41]).

2.4. Deney Düzeneği

Bu çalışmada gerçekleştirilen frezeleme deneyleri, Hermle C30U model CNC dik işleme merkezi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan tezgâh 2008 model olup, deneylerin yapıldığı laboratuvarda uzun süredir aktif olarak kullanılmakta ve periyodik bakım ve kalibrasyonları düzenli olarak gerçekleştirilmektedir. Bu sayede, tezgâhın mekanik hassasiyetini ve işleme doğruluğunu koruduğu kabul edilmektedir.

Hermle C30U tezgâhı; rijit gövde yapısı, hassas kızak sistemleri ve yüksek devirli iş mili özellikleri sayesinde özellikle hassas frezeleme operasyonları için uygun bir işleme ortamı sunmaktadır. Tezgâhın 5 eksenli işleme kabiliyeti, deneylerde karmaşık geometrilerin işlenmesine imkân tanımakla birlikte, bu çalışmada deneysel karşılaştırmanın tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla frezeleme işlemleri 3 eksenli modda gerçekleştirilmiştir.

Tezgâh, Heidenhain CNC kontrol sistemi ile donatılmış olup, bu tür yüksek çözünürlüklü geri besleme ve hassas konumlama kabiliyeti sunan kontrol sistemleri, talaşlı imalatta konumlama doğruluğu ve proses kararlılığı açısından önem taşımaktadır. Frezeleme prosesinde kararlılık/titreşim ve yüzey kalitesi ilişkisi, kesici takım–takım tutucu–iş mili sistem dinamiği bağlamında literatürde ayrıntılı şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmada Hermle C30U tezgâhının tercih edilmesinin temel nedeni, tezgâh kaynaklı dinamik etkilerin azaltılarak takım tutucu tipine bağlı titreşim, stabilite ve kesici takım aşınması farklarının daha net bir şekilde ortaya konulabilmesidir. Yüksek rijitliğe ve hassas kontrol altyapısına sahip bir tezgâh kullanılması, deney sonuçlarının güvenilirliğini artırmakta ve elde edilen farkların doğrudan takım tutucu tipine atfedilmesine olanak sağlamaktadır [15].

Deneylerde kullanılan CNC tezgâhın genel görünümü Şekil 2.7'te verilmiştir.



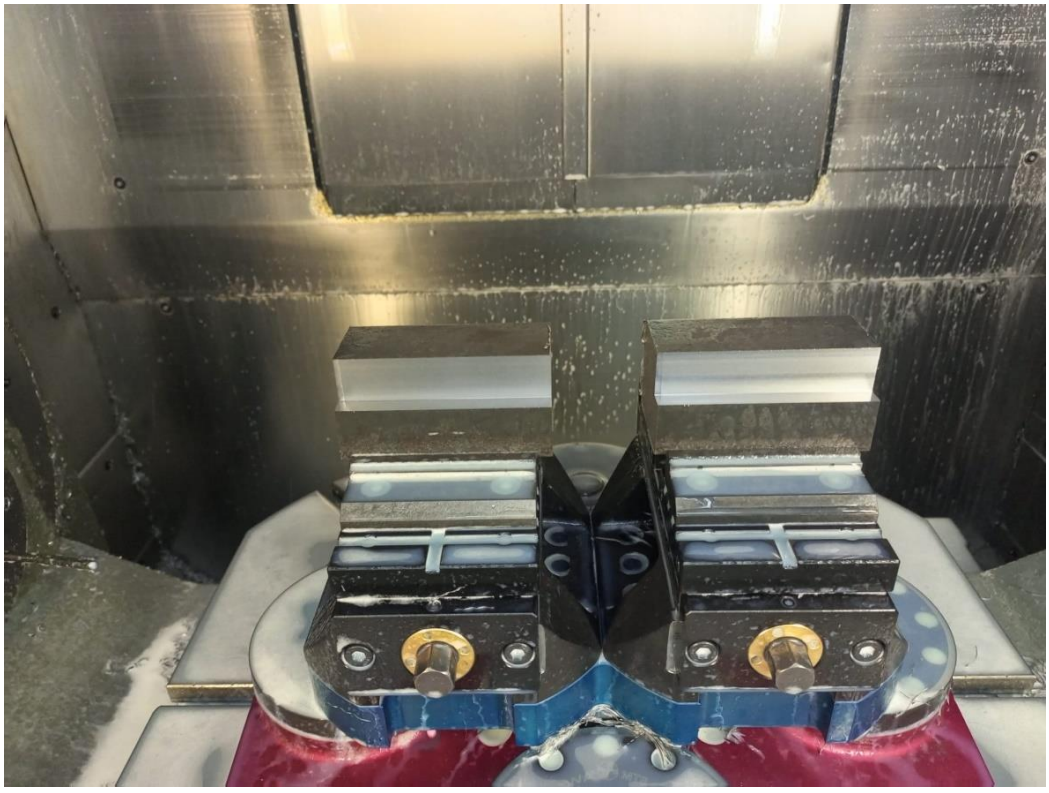
Şekil 2.7. Deneylerde kullanılan CNC tezgâhı (Hermle C30U dik işleme merkezi).



Şekil 2.8. Deney numunelerinin EROWA palet sistemi üzerinde, çift mengene kullanılarak CNC tezgâha bağlanmış görünümü.

Deney numuneleri, bağlama kaynaklı rijitlik ve titreşim etkilerini minimize etmek amacıyla EROWA palet sistemi üzerine yerleştirilmiş ve çift mengene kullanılarak CNC tezgâha sabitlenmiştir. Bu düzenek sayesinde numunelerin konumlandırılması tekrarlanabilir hale getirilmiş, bağlama koşullarından kaynaklanabilecek deneysel belirsizlikler azaltılmıştır. Ayrıca her iki numunenin aynı işleme koşulları altında frezelenmesi sağlanarak deneysel karşılaştırmanın güvenilirliği artırılmıştır.

Deneylerde kullanılan numuneler, ana frezeleme deneylerinden önce geometrik ölçü ve yüzey koşullarının standartlaştırılması amacıyla kaba talaş kaldırma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 2.9. Deney numunelerinin sulu kesme koşulu altında, sol tarafta standart takım tutucu, sağ tarafta yüksek hızlı takım tutucu kullanılarak CNC tezgâh üzerinde işlenmiş durumu.

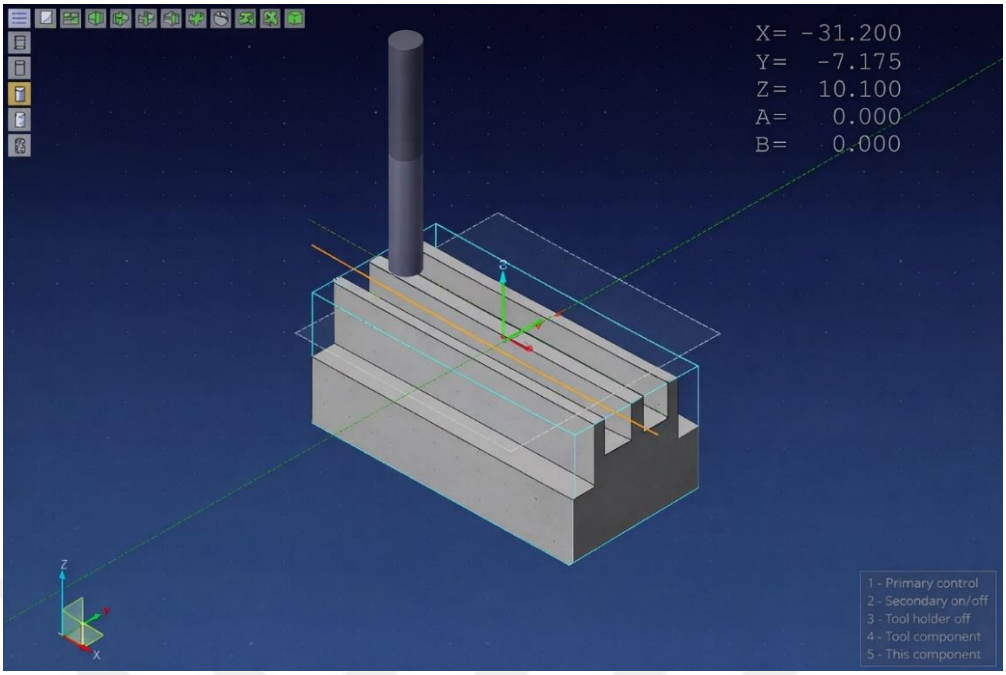
Sulu kesme koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, standart ve yüksek hızlı takım tutucuların performanslarının doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla her iki numune aynı bağlama düzeni ve aynı işleme parametreleri altında işlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, soğutma koşulu sabit tutularak yalnızca takım tutucu tipinin yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.10. Kuru kesme koşulu altında gerçekleştirilen frezeleme deneylerinde, sol tarafta yüksek hızlı takım tutucu, sağ tarafta standart takım tutucu kullanılarak işlenen deney numunelerinin tezgâh içi görünümü.

Kuru kesme koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, soğutma sıvısı kullanılmadan frezeleme işlemi uygulanmıştır. Bu düzenek ile talaş oluşumu, talaş birikimi ve kesme bölgesindeki ısıl koşulların takım tutucu tipine bağlı etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Aynı bağlama düzeni ve işleme parametreleri korunarak yalnızca takım tutucu tipinin etkisi incelenmiştir.

Frezeleme deneylerinde kullanılan iş parçası geometrisi ve kesici takım yolları, deneysel tekrar edilebilirliği sağlamak amacıyla CAM ortamında tanımlanmıştır. Şekil 2.11'de, deneylerde kullanılan iş parçasının üç boyutlu geometrisi ile birlikte frezeleme operasyonuna ait takım yolu stratejisi gösterilmektedir. Bu yaklaşım, kesme parametrelerinin ve takım–iş parçası etkileşiminin kontrollü bir şekilde uygulanmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 2.11. Frezeleme deneylerinde kullanılan iş parçası geometrisi ve kesici takım yolunun CAM ortamında oluşturulan görünümü.

Deney parametreleri Tablo 2.5'de özetlenmiştir. Parametreler, kullanılan kesici takım geometrisi, iş parçası malzemesi (AISI 1045) ve tezgâhın dinamik kapasitesi dikkate alınarak, yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların performans farklarını ortaya koymaya uygun sınır değerler içerisinde seçilmiştir [15]. Deneyler, kuru ve sulu kesme koşullarında gerçekleştirilerek soğutma koşulunun yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine imkân tanımıştır.

Tablo 2.5. Deney parametreleri

Parametre	**Değer**
Kesme hızı (Vc)	120 m/dk
Devir sayısı (n)	3820 dev/dk
İlerleme (fz)	0,03 mm/diş
Toplam ilerleme (Vf)	458 mm/dk
Kesme derinliği (ap)	1 mm
Yan adım (ae)	2 mm
Soğutma koşulu	Kuru / Sulu
İşleme süresi	2,5 dk

Tablo 2.5'te verilen deney parametreleri, kullanılan kesici takım geometrisi, iş parçası malzemesi (AISI 1045) ve CNC tezgâhın dinamik kapasitesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Seçilen parametreler, kesme işlemini stabil bölgede gerçekleştirecek şekilde sınırlandırılmış olup, yüksek hızlı ve standart tip takım tutucular arasındaki titreşim, yüzey kalitesi ve kesici takım aşınması farklarının daha net bir biçimde gözlemlenmesine olanak sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Kesme hızının 120 m/dk olarak belirlenmesinin temel nedeni, hem yüksek hızlı hem de standart tip takım tutucuların performanslarının karşılaştırılmasına olanak tanıyacak, aynı zamanda tezgâh ve kesici takım açısından güvenli bir işleme bölgesinde kalınmasını sağlamaktır. Kesme derinliği ve yan adım değerleri ise, takım aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülebilir düzeyde oluşmasını sağlayacak şekilde sabit tutulmuştur.

2.4.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Hesaplanması

Bu çalışmada kullanılan kesme parametreleri, AISI 1045 çeliğinin frezelenmesine ilişkin literatürde kullanılan aralıklar ve talaşlı imalat temel esasları dikkate alınarak belirlenmiştir [1,43]. Parametre seçiminde uç değerlere gidilmemiş, stabil işleme bölgesini temsil eden ve takım tutucu tipine bağlı titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınması farklarının daha net gözlemlenmesine olanak sağlayacak değerler tercih edilmiştir. Literatürde kaba talaş, yarı finisaj ve finisaj işlemleri için önerilen kesme parametrelerinin birbirinden farklı aralıklarda tanımlandığı bilinmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda her bir parametrenin tek bir işlem türüne birebir karşılık gelmesi zorunlu değildir. Önemli olan, seçilen değerlerin literatürde önerilen aralıklar içerisinde kalması ve deneyin amacına uygun olmasıdır. Bu kapsamda kesme hızı (Vc), diş başına ilerleme (fz), eksenel talaş derinliği (ap) ve radyal talaş derinliği (ae) değerleri literatürde kullanılan aralıklar içerisinden seçilmiş; iş mili devir sayısı (n) ve ilerleme hızı (Vf) ise temel talaşlı imalat bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır [15].

Tablo 2.6. AISI 1045 Çeliğinin TiAlN Kaplamalı Karbür Parmak Freze ile Frezelenmesi İçin Literatürde Önerilen Kesme Parametre Aralıkları (Aralıkların AISI 1045'e uyumu için: [1]; genel hesap/mühendislik çerçevesi: [15])

Parametre	Sembol	Literatür Aralığı
Kesme hızı (m/dk)	Vc	120 – 160
Diş başına ilerleme (mm/diş)	fz	0,02 – 0,05

Eksenel talaş derinliği (mm)	ap	0,5 – 1,5
Radyal talaş derinliği (mm)	ae	2 – 4
İşleme süresi (dk)	t	–

Tabloda verilen kesme parametre aralıkları, AISI 1045 çeliğinin frezelenmesine yönelik literatür çalışmalarından ve talaşlı imalat temel prensiplerinden derlenmiştir [1,43].

Tablo 2.7. Literatür Aralıkları ve Bu Çalışmada Kullanılan Deneysel Kesme Parametreleri

Parametre	**Literatür Aralığı**	**Deneysel Değer**	**İşlem Karakteri**
Kesme hızı, *Vc* (m/dk)	120 – 160	120	Kaba talaş alt sınırı
Diş başına ilerleme, *fz* (mm/diş)	0,02 – 0,05	0,03	Finisaj aralığı
Eksenel talaş derinliği, *ap* (mm)	0,5 – 1,5	1	Yarı finisaj
Radyal talaş derinliği, *ae* (mm)	2 – 4	2	Yarı finisaj
İşleme süresi, *t* (dk)	–	2,5	Deneysel

Literatürde önerilen kesme parametre aralıkları dikkate alınarak, deneysel çalışmalar sistem stabilitesini ve takım tutucu tipinin yüzey pürüzlülüğü ile takım aşınması üzerindeki etkisini daha net ortaya koyacak şekilde seçilmiştir [35,38].

Tablo 2.7 incelendiğinde, deneyde kullanılan kesme parametrelerinin farklı işlem türlerine ait aralıklardan seçildiği görülmektedir. Bu yaklaşım literatürde yaygın olup, çalışmanın temel amacı olan yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım aşınması üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasına uygun bir deney ortamı sağlamaktadır [15].

2.4.1.1. Kullanılan Temel Hesap Bağıntıları

İş mili devir sayısı, seçilen kesme hızına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır [15]:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

Burada;

iş mili devir sayısı (dev/dk),

V_c kesme hızı (m/dk),

D takım çapı (mm)

Toplam ilerleme hızı, diş başına ilerleme, ağız sayısı ve devir sayısı dikkate alınarak hesaplanmıştır [15]:

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (2.2)$$

İşleme mesafesi ise ilerleme hızı ve işleme süresine bağlı olarak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

$$L = V_f \cdot t \quad (2.3)$$

Burada;

f_z diş başına ilerleme (mm/diş),

z kesici takımın ağız sayısı,

t işleme süresi (dk)

Bu bağıntılar kullanılarak hesaplanan kesme parametreleri Tablo 2.8'de sunulmuştur. Hesaplamalarda kullanılan bağıntılar talaşlı imalat literatüründe standart kabul edilen formüllerdir [15].

Tablo 2.8. Hesaplanan Kesme Parametreleri

Parametre	Sembol	Hesaplanan Değer	Birim
Devir sayısı	n	≈ 3820	dev/dk
İlerleme hızı	Vf	≈ 458	mm/dk
İşleme mesafesi	L	≈ 1145	mm

Kesme parametreleri, literatürde önerilen kesme hızı ve ilerleme değerleri esas alınarak, deneysel koşullara uygun şekilde hesaplanmıştır.

2.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ölçümleri temaslı (stylus tipi) bir yöntemle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde kullanılan Mitutoyo SJ-210 taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünün nicel olarak değerlendirilmesinde aritmetik ortalama pürüzlülük değeri (Ra) parametresi tercih edilmiştir. Ra, değerlendirme uzunluğu boyunca yüzey profilindeki sapmaların ortalama etkisini temsil etmekte olup, takım tutucu kaynaklı titreşimler, eksenel kaçıklık ve sistem kararlılığı gibi faktörlerin yüzey kalitesi üzerindeki ortalama etkisini yansıtmada yaygın biçimde kullanılmaktadır [44].

ISO 4287 ve ISO 4288 standartlarında Ra parametresi, yüzey pürüzlülüğünün karakterizasyonunda referans alınan temel ölçütlerden biri olarak tanımlanmıştır [42,43]. Bu özelliği sayesinde Ra, akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda farklı işleme

koşullarının karşılaştırılmasında tekrarlanabilirliği yüksek bir kalite göstergesi olarak kullanılmaktadır [31,44].

Bu çalışmanın amacı yüksek hızlı ve standart tip takım tutucuların yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmak olduğundan, takım tutucu kaynaklı dinamik değişimlere duyarlı bir gösterge olarak Ra parametresi tercih edilmiştir. Buna karşılık Rz ve Rt gibi parametrelerin lokal tepe-çukur duyarlılığı nedeniyle ölçüm saçılımını artırabildiği ve karşılaştırmalı analizlerde belirsizlik oluşturabildiği belirtilmektedir [44]. Bu nedenle söz konusu parametreler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo SJ-210 cihazı ile gerçekleştirilmiş; ölçümler ISO 4287/4288 esaslarına uygun şekilde farklı noktalardan alınmıştır. Her deney koşulu için yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yedi tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve elde edilen ölçüm sonuçları ortalama ± standart sapma (mean ± SD) formatında raporlanmıştır [42,43]. Çoklu tekrar yaklaşımı, ölçüm belirsizliğini azaltmak ve deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğini artırmak amacıyla tercih edilmiştir.

2.6. Takım Aşınma Ölçümleri

Kesici takım aşınmasının nicel olarak değerlendirilmesinde bu çalışmada yanak aşınması (VB) parametresi temel aşınma kriteri olarak seçilmiştir. Frezeleme takım ömrü deneyleri ve aşınma değerlendirmesi için ilgili standart yaklaşım ISO 8688-2'de tanımlanmakta olup, VB bu tür çalışmalarda yaygın kullanılan ölçütlerdendir [45].



Şekil 2.13. Takım aşınma ölçümlerinde kullanılan optik mikroskop ve ölçüm düzeneği.

VB parametresi, kesme süresi boyunca zamana bağlı olarak gelişen aşınma davranışını temsil etmekte olup, farklı takım tutucu sistemlerinin aşınma üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesine imkân tanımaktadır [9]. Buna karşılık krater aşınması, burun aşınması veya ani kırılma gibi aşınma türleri; süreksiz ve ani gelişim göstermeleri nedeniyle ve kısa süreli/sabit deneylerde baskın hale gelmeyebilmeleri nedeniyle bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır [9,45].

Bu çalışmada VB ölçümleri optik mikroskop altında gerçekleştirilmiş ve aşınma değerleri ImageJ yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Görüntü tabanlı aşınma ölçümlerinin, deneysel aşınma çalışmalarında yaygın biçimde kullanıldığı ve uygun prosedürle tekrarlanabilir sonuçlar verdiği literatürde rapor edilmiştir [9,26,27]. Ölçümler, frezeleme için geçerli aşınma değerlendirme yaklaşımına uygun olarak yürütülmüş ve her deney koşulu için yedi tekrar alınarak ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır [45].

Literatürde yanak aşınmasının, takım tutucu rijitliği, sistem titreşimi ve soğutma koşullarındaki değişimlere duyarlı bir parametre olduğu ve bu nedenle takım tutucu performans karşılaştırmalarında yaygın kullanıldığı rapor edilmiştir [9]. Bu bağlamda VB parametresi, bu

çalışmada yüksek hızlı ve standart takım tutucuların aşınma davranışlarını karşılaştırmak için literatürle uyumlu bir ölçüt olarak seçilmiştir [9,45].

2.7. Deney Tekrarları ve İstatistiksel Değerlendirme

Bu çalışmanın ön bulguları daha önce bir kongrede sunulmuştur. Tez kapsamında deneysel çalışmalar genişletilmiş, hem yüzey pürüzlülüğü (Ra) hem de takım aşınması (VB) ölçümlerinde tekrar sayısı artırılarak istatistiksel güvenilirlik yükseltilmiş ve sonuçlar ANOVA yöntemi ile analiz edilmiştir. Analizlerde ayrıca η^2 (eta kare) etki büyüklüğü hesaplanarak, gözlemlenen farklılıkların büyüklüğü nicel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca görüntü analizleri daha yüksek büyütmede gerçekleştirilmiş, bu doğrultuda ImageJ yazılımı kullanılarak yapılan ölçümlerde ölçek kalibrasyonu güncellenmiştir. Yapılan bu güncelleme, ölçüm doğruluğunu artırmaya yönelik olup, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilirliğini etkilemeyecek şekilde tüm deney görüntülerine tutarlı biçimde uygulanmıştır.

Bu çalışmada frezeleme deneyleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesici takım yanak aşınması (VB) verileri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Deneysel tasarım, iki faktör ve her faktör için iki seviyeden oluşan 2×2 tam faktöriyel deney tasarımı olarak planlanmıştır. Çalışmada iki bağımsız faktör ele alınmıştır:

- Takım tutucu tipi
    - Yüksek hızlı tip
    - Standart tip
- Soğutma koşulu
    - Sulu
    - Kuru

Her bir faktör kombinasyonu için yedi tekrar (7 ölçüm) gerçekleştirilmiş olup, toplam ölçüm sayısı 28'dir. Çoklu tekrar kullanımı, deneysel hataların etkisini azaltmak ve ölçüm güvenilirliğini artırmak amacıyla tercih edilmiştir.

Deneysel veriler ortalama ± standart sapma (mean ± SD) formatında raporlanmıştır.

Verilerin analizi için iki yönlü varyans analizi (Two-Way ANOVA) yöntemi kullanılmıştır. ANOVA analizi ile takım tutucu tipi, soğutma koşulu ve bu iki faktörün etkileşiminin Ra ve

VB üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

İstatistiksel analizler Jamovi (sürüm 2.6.44) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yalnızca anlamlılık değerleri (p) değil, aynı zamanda faktörlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerinin büyüklüğünü göstermek amacıyla eta kare (η^2) etki büyüklüğü ölçütü de raporlanmıştır. Eta kare değeri, ilgili faktörün toplam varyans içerisindeki payını göstermekte olup faktörlerin göreli öneminin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu analiz kapsamında aşağıdaki sıfır hipotezleri test edilmiştir:

• H_{01}: Takım tutucu tipinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde anlamlı etkisi yoktur.
• H_{02}: Soğutma koşulunun yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde anlamlı etkisi yoktur.
• H_{03}: Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında yüzey pürüzlülüğü açısından anlamlı etkileşim yoktur.

• H_{04}: Takım tutucu tipinin takım aşınması (VB) üzerinde anlamlı etkisi yoktur.
• H_{05}: Soğutma koşulunun takım aşınması (VB) üzerinde anlamlı etkisi yoktur.
• H_{06}: Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında takım aşınması açısından anlamlı etkileşim yoktur.

Bu çalışmada elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve takım aşınması (VB) ölçümlerine ait ham veri seti, istatistiksel analizlerin şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla Ek A'da sunulmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

3.1.1. Ölçüm Süreci ve Bulgular

Yüzey pürüzlülüğü (Ra), işleme kalitesinin önemli göstergelerinden biri olup; kesme parametreleri, takım geometrisi, kaplama özellikleri, takım tutucu tipi, sistemin dinamik davranışı (titreşim/salgı) ve soğutma koşullarından etkilenmektedir [10,12,15,18,46]. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü değerleri, farklı tutucu tipleri (yüksek hızlı tip ve standart tip) ve farklı soğutma koşulları (sulu ve kuru) altında incelenmiştir. Ölçümler Mitutoyo SJ-210 cihazı ile gerçekleştirilmiş ve ISO 4287 standardına [42] uygun şekilde yapılmıştır. Her deney koşulu için ölçümler yedi tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ortalama ± standart sapma (mean ± SD) biçiminde raporlanmıştır.

Tablo 3.1'de deneysel olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) sonuçları verilmiştir. Her bir deney koşulu için elde edilen bireysel yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçüm değerleri, istatistiksel değerlendirmelerin şeffaflığını sağlamak amacıyla Ek A'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

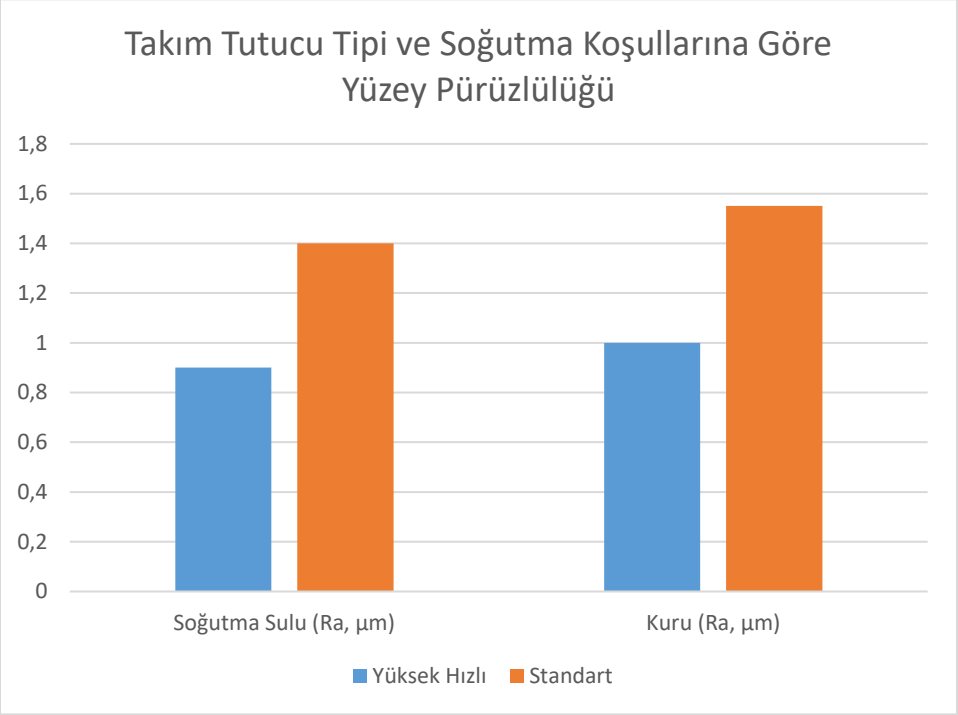
Tablo 3.1. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) sonuçları (ortalama ± standart sapma, N = 7).

Takım Tutucu Tipi	Soğutma Tipi	Ra (µm) (Ortalama ± SS)
Yüksek Hızlı	Soğutma Sulu	0,90 ± 0,02
Yüksek Hızlı	Kuru	1,00 ± 0,02
Standart	Soğutma Sulu	1,40 ± 0,03
Standart	Kuru	1,55 ± 0,03

Tablo 3.1'e göre en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,90 ± 0,02 µm ile yüksek hızlı tutucu–sulu kesme koşulunda elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ise 1,55 ± 0,03 µm ile standart tutucu–kuru kesme koşulunda ölçülmüştür. Yüksek hızlı tip tutucuların daha düşük Ra değerleri sağlaması, kesici takım–takım tutucu–iş mili sisteminin daha yüksek dinamik rijitliğe ve daha iyi balans özelliklerine sahip olması nedeniyle titreşim ve salgı etkilerinin azalmasıyla ilişkilendirilebilir; literatürde tutucu tipinin titreşim davranışı ve buna bağlı yüzey kalitesi üzerinde belirleyici olduğu gösterilmiştir [8,10,12-14].

Soğutma sulu kesme koşullarında kesme bölgesindeki ısıl yükün azalması, sürtünmenin düşmesi ve talaş tahliyesinin kolaylaşması yüzey kalitesine olumlu katkı sağlayabilmektedir;

soğutma stratejilerinin yüzey kalitesi ve takım ömrü üzerinde etkili olduğu literatürde raporlanmıştır [11,16].

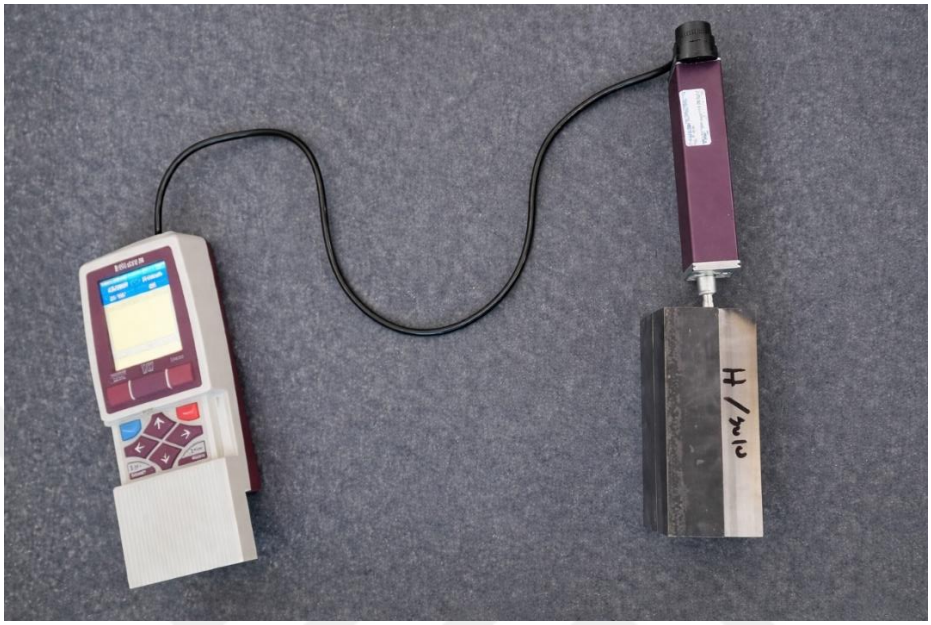


Şekil 3.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının grafiği (2,5 dk işleme sonrası).

Grafikten görüldüğü üzere, yüksek hızlı tutucular standart tutuculara kıyasla her iki soğutma koşulunda da daha düşük Ra değerleri sağlamıştır. Sulu kesme koşullarında, yüksek hızlı tip tutucunun standart tutucuya kıyasla yüzey pürüzlülüğünde yaklaşık %35,7 oranında iyileşme sağladığı belirlenmiştir (1,40 µm → 0,90 µm). Bu eğilim, tutucu tipinin titreşim/salgı üzerinden yüzey kalitesini etkilediğini gösteren çalışmalarla uyumludur [8,10,12-14].

3.1.2. Ölçüm Sürecine Ait Görseller

3.1.2.1 Yüksek Hızlı Tutucu Kullanılarak Soğutma Sulu Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



Şekil 3.2. Yüksek hızlı tutucu, soğutma sulu kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Şekil 3.2'de, işlenmiş yüzey üzerinde Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm süreci gösterilmektedir. Ölçüm öncesinde yüzey temizlenmiş ve cihaz kalibrasyonu yapılmıştır. Ölçüm işlemi tamamlandıktan sonra cihaz ekranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri görüntülenmiş olup, bu değer Ra = 0,90 µm olarak belirlenmiştir. İlgili ölçüm sonucu ekran görüntüsü Şekil 3.3'te sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında ölçüm sonucunda elde edilen Ra değerinin ekran görüntüsü.

3.1.2.2. Yüksek Hızlı Tutucu Kullanılarak Kuru Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



Şekil 3.4. Yüksek hızlı tutucu, kuru kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

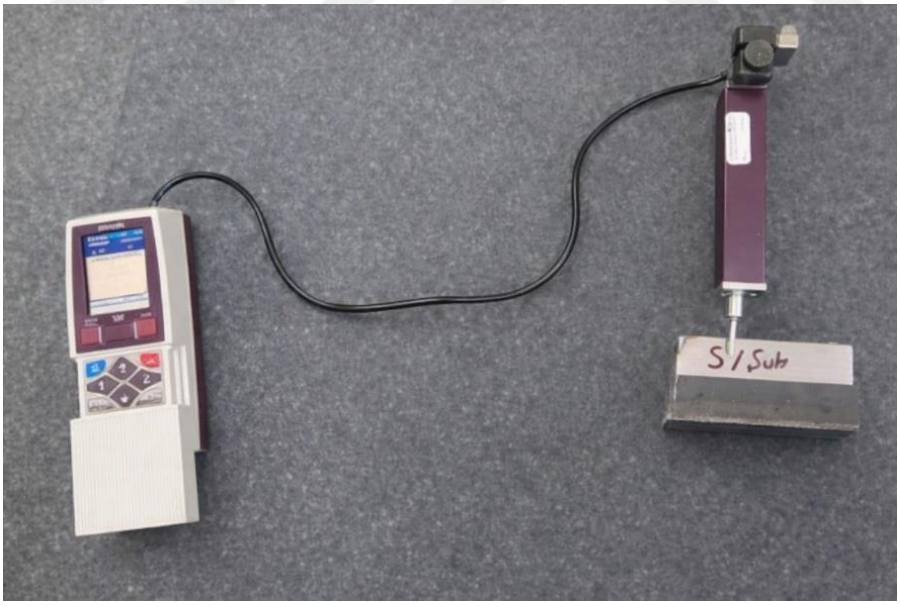
Şekil 3.4'te, kuru kesme koşullarında işlenmiş yüzey üzerinde Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm süreci gösterilmektedir. Ölçüm öncesinde yüzey temizlenmiş ve cihaz kalibrasyonu yapılmıştır. Ölçüm işlemi tamamlandıktan

sonra cihaz ekranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri görüntülenmiş olup, bu değer Ra = 1,00 µm olarak belirlenmiştir. İlgili ölçüm sonucu ekran görüntüsü Şekil 3.5'te sunulmaktadır.



Şekil 3.5. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının kuru kesme koşullarında elde edilen ölçüm sonucuna ait ekran görüntüsü.

3.1.2.3. Standart Tutucu Kullanılarak Soğutma Sulu Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



Şekil 3.6. Standart tutucu, soğutma sulu kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Şekil 3.6'da, standart tutucu kullanılarak soğutma sulu kesme koşullarında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ölçümüne ait sonuçlar gösterilmektedir. Ölçüm öncesinde yüzey temizlenmiş ve Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının kalibrasyonu yapılmıştır.

Standart tutucunun görece daha düşük dinamik rijitliği ve balans hassasiyeti nedeniyle işleme sırasında titreşim eğiliminin artması, işlenen yüzeye yansıyarak Ra değerinin yükselmesine katkı yapmış olabilir [8,12-14]. Bu durum ölçüm sonuçlarına yansımış olup, soğutma sulu kesme koşullarında elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri Ra = 1,40 µm olarak belirlenmiştir. İlgili ölçüm sonucu cihaz ekran görüntüsü Şekil 3.7'de sunulmaktadır.



Şekil 3.7. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının standart tutucu kullanılarak soğutma sulu kesme koşullarında elde edilen ölçüm sonucuna ait ekran görüntüsü.

3.1.2.4. Standart Tutucu Kullanılarak Kuru Kesme Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



Şekil 3.8. Standart tutucu, kuru kesme koşulunda yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Şekil 3.8'de, standart tutucu kullanılarak kuru kesme koşullarında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ölçümüne ait sonuçlar gösterilmektedir. Ölçüm öncesinde yüzey temizlenmiş ve Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının kalibrasyonu yapılmıştır. Kuru kesme sırasında talaşın işlenen yüzeye yapışması ve kesme bölgesinde sıcaklığın artması, yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum ölçüm sonuçlarına yansımış olup, tüm deney koşulları arasında en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri bu durumda elde edilmiş ve ortalama Ra değeri 1,55 µm olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, literatürde benzer çalışma koşulları için raporlanan bulgularla uyum göstermektedir [31].



Şekil 3.9. Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının standart tutucu kullanılarak kuru kesme koşullarında elde edilen ölçüm sonucuna ait ekran görüntüsü.

3.1.3. Genel Değerlendirme

Sonuçlar, yüksek hızlı tutucuların yüzey kalitesi açısından standart tutuculara kıyasla belirgin avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Kuru kesmede Ra değerlerinin yükselmesi; kesme bölgesindeki ısıl yükün artması, sürtünme/talaş yapışması eğilimi ve dinamik kararlılığın daha hassas hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir [11,15,16]. Elde edilen bulgular, tutucu tipinin titreşim davranışı üzerinden yüzey kalitesini etkilediğini raporlayan çalışmalarla uyumludur [12-14]. Elde edilen bulgular, frezeleme performansının yalnızca kesme parametrelerinden değil, aynı zamanda sistemin dinamik davranışından da etkilendiğini gösteren literatür ile uyumludur [1,12-14,47].

3.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçlarının ANOVA ile Değerlendirilmesi

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerine ait iki yönlü ANOVA sonuçları Tablo 3.2'de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre takım tutucu tipi ve soğutma koşulunun yüzey

pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri olduğu belirlenmiştir ($p < 0,05$). Ayrıca takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasındaki etkileşim de anlamlı bulunmuştur ($p = 0,026$).

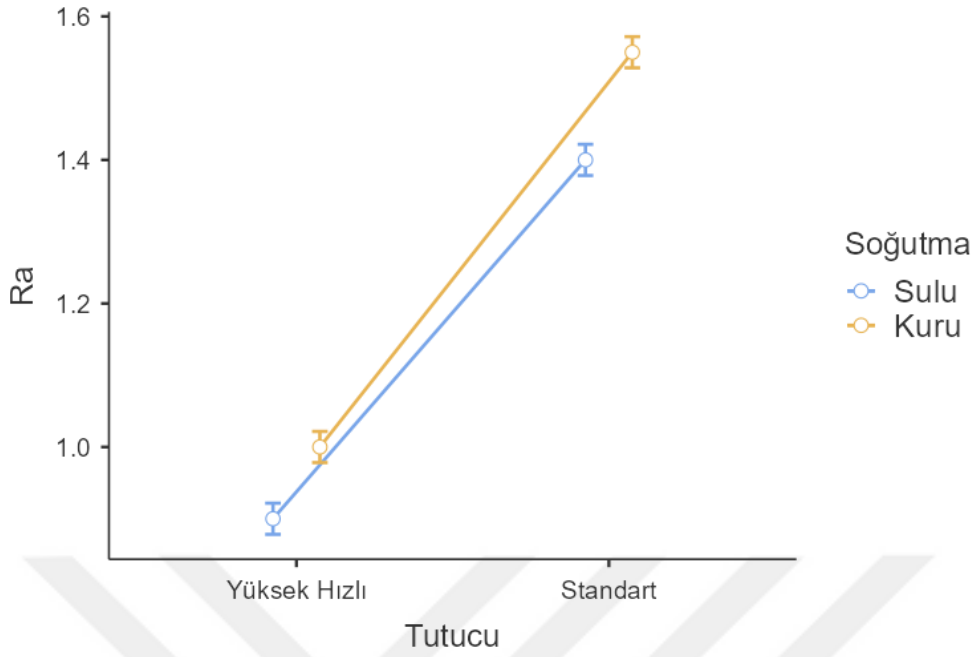
Tablo 3.2. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için iki yönlü ANOVA sonuçları.

ANOVA - Ra

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	η^2
Tutucu	1.92938	1	1.92938	2489.52	<.001	0.936
Soğutma	0.10938	1	0.10938	141.13	<.001	0.053
Tutucu ✻ Soğutma	0.00438	1	0.00438	5.65	0.026	0.002
Residuals	0.01860	24	7.75e-4			

Eta kare (η^2) değerleri incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en baskın etkinin takım tutucu tipine ait olduğu görülmektedir ($\eta^2 \approx 0,94$). Bu sonuç, yüzey pürüzlülüğündeki toplam varyansın çok büyük bir bölümünün takım tutucu tipi ile ilişkili olduğunu göstermektedir ($\eta^2 \approx 0,94$). Soğutma koşulunun etkisi daha sınırlı olmakla birlikte istatistiksel olarak anlamlıdır ($\eta^2 \approx 0,05$). Tutucu × soğutma etkileşiminin etki büyüklüğü ise oldukça düşüktür.

Ra değerlerinin tutucu tipi ve soğutma koşuluna göre değişimi Şekil 3.10'da verilen etkileşim grafiği ile gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, yüksek hızlı tip takım tutucuların her iki soğutma koşulunda da daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sağladığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.10. Tutucu tipi ve soğutma koşulunun yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkileşimi.

Elde edilen bulgular, tutucu tipine bağlı rijitlik, balans ve dinamik davranış farklılıklarının yüzey kalitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermekte olup literatürde bildirilen sonuçlarla uyumludur [8,12-14,46].

3.1.5. Hipotezlerin Değerlendirilmesi (Ra)

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü (Ra) için test edilen hipotezler iki yönlü ANOVA sonuçlarına göre aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir:

H_{01} reddedilmiştir. Takım tutucu tipinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi vardır ($p < 0,001$).

H_{02} reddedilmiştir. Soğutma koşulunun yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi vardır ($p < 0,001$).

H_{03} reddedilmiştir. Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında yüzey pürüzlülüğü açısından istatistiksel olarak anlamlı etkileşim bulunmaktadır ($p = 0,026$).

Bu sonuçlara göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak en baskın etkinin takım tutucu tipine ait olduğu belirlenmiştir ($\eta^2 \approx 0,94$).

3.2. Takım Aşınması Sonuçları

Takım aşınması, talaşlı imalat işlemlerinde kesici takım ömrünü, işleme kalitesini ve maliyetleri doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Frezeleme operasyonlarında takım ömrü ve aşınma değerlendirmesi için ilgili yaklaşım ISO 8688-2 standardında ele alınmaktadır. Bu çalışmada takım aşınması ölçümleri optik mikroskop altında gerçekleştirilmiş, ölçümler ImageJ yazılımı yardımıyla yapılmış ve sonuçlar ISO 8688-2 standardına göre değerlendirilmiştir. Her deney koşulu için kesici takım yanak aşınması ölçümleri aynı kesici kenar üzerinde farklı bölgelerden 7 tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler ortalama ve standart sapma değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ölçüm görüntülerinde verilen değerler, ImageJ yazılımının yuvarlanmış gösterimleri olup, çalışmada kullanılan sayısal veriler ham ölçüm sonuçları üzerinden hesaplanmıştır [45].

Deneylerde, yüksek hızlı tip ve standart tip olmak üzere iki farklı takım tutucu ile kuru ve sulu olmak üzere iki farklı kesme koşulu incelenmiştir. Her deney koşulu için işleme süresi 2.5 dakika olarak sabit tutulmuş ve her koşul için yedi tekrar ölçümünden elde edilen sonuçlar ortalama ± standart sapma (mean ± SD) olarak raporlanmıştır.

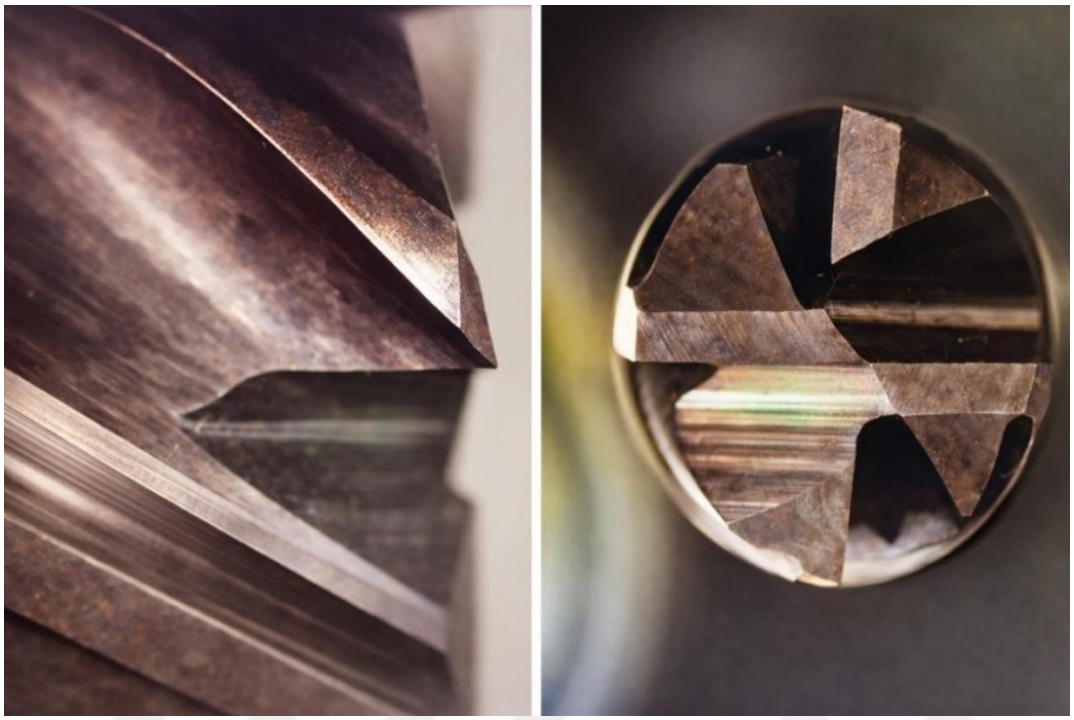
Tablo 3.3. Takım aşınması (VB) sonuçları (ortalama ± standart sapma, N = 7).

Takım Tutucu Tipi	Soğutma Tipi	VB (mm) (Ortalama ± SS)
Yüksek hızlı	Soğutma Sulu	0,030 ± 0,0015
Yüksek hızlı	Kuru	0,040 ± 0,0015
Standart	Soğutma Sulu	0,060 ± 0,0015
Standart	Kuru	0,070 ± 0,0015

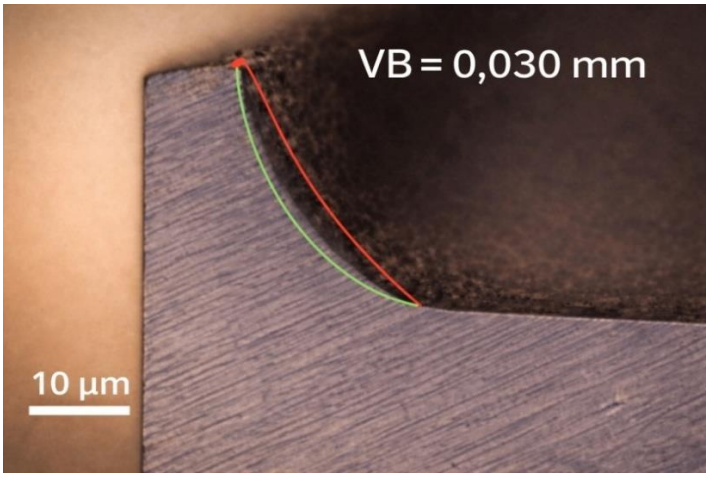
Tablo 3.3'e göre en düşük takım aşınması yüksek hızlı tutucu ve sulu kesme koşulu altında (0,030 ± 0,0015 mm) ölçülmüştür. En yüksek aşınma ise standart tutucu ve kuru kesme koşulunda (0,070 ± 0,0015 mm) gerçekleşmiştir. Yüksek hızlı tutucuların daha düşük VB sağlaması, daha yüksek dinamik rijitlik ve daha kararlı kesme koşulları üzerinden kesme kuvvetlerindeki dalgalanmanın azalmasıyla ilişkilendirilebilir; literatürde tutucu tipinin titreşim/kararlılık ve buna bağlı aşınma davranışı üzerinde etkili olduğu rapor edilmiştir [8,9,12-14]. Soğutmanın aşınmayı azaltıcı etkisi ise ısıl yük ve sürtünme azalması üzerinden

açıklanabilir [11,16]. Her bir deney koşulu için elde edilen bireysel takım aşınması (VB) ölçüm değerleri Ek B'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.2.1. Yüksek Hızlı Tutucu – Soğutma Sulu Kesme



Şekil 3.11. Yüksek hızlı tip tutucuda soğutma sulu kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü).

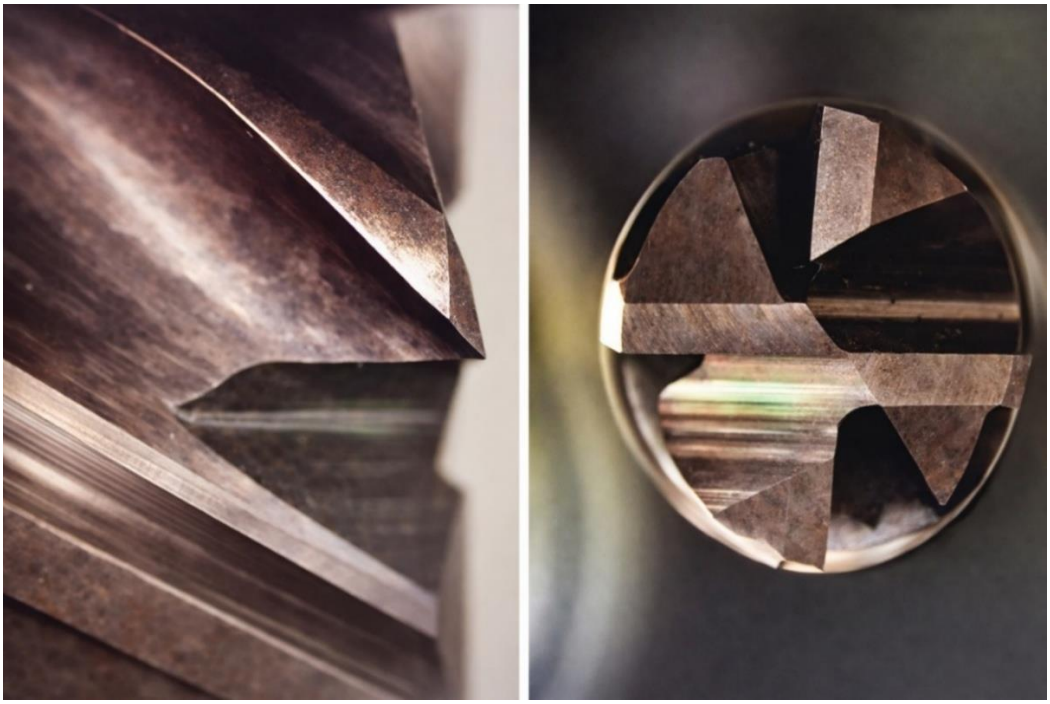


Şekil 3.12. Yüksek hızlı tip tutucuda soğutma sulu kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,030 mm).

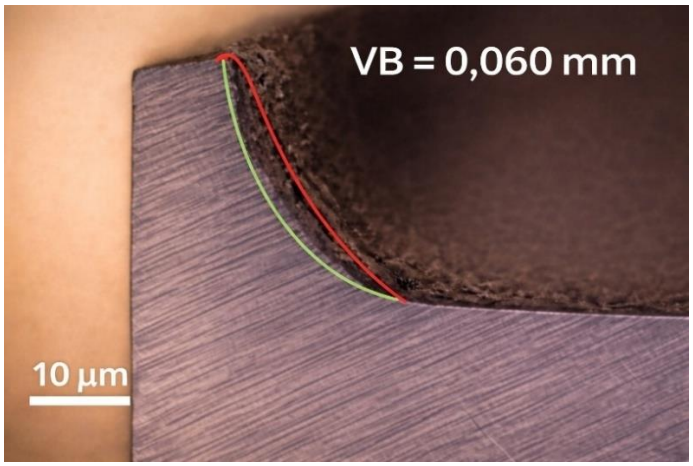
Bu sonuç, sulu kesme koşullarının kesme bölgesindeki ısıl yükü azaltarak ve sürtünmeyi düşürerek takım aşınmasını yavaşlatabildiğini desteklemektedir [11,16].

Ayrıca, kaplamalı karbür takımlarda baskın aşınma mekanizmalarının sıcaklık ve mekanik yük seviyelerine bağlı olarak değişebildiği literatürde rapor edilmiştir [3,4,32].

3.2.2. Standart Tutucu – Soğutma Sulu Kesme



Şekil 3.13. Standart tip tutucuda soğutma sulu kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü).

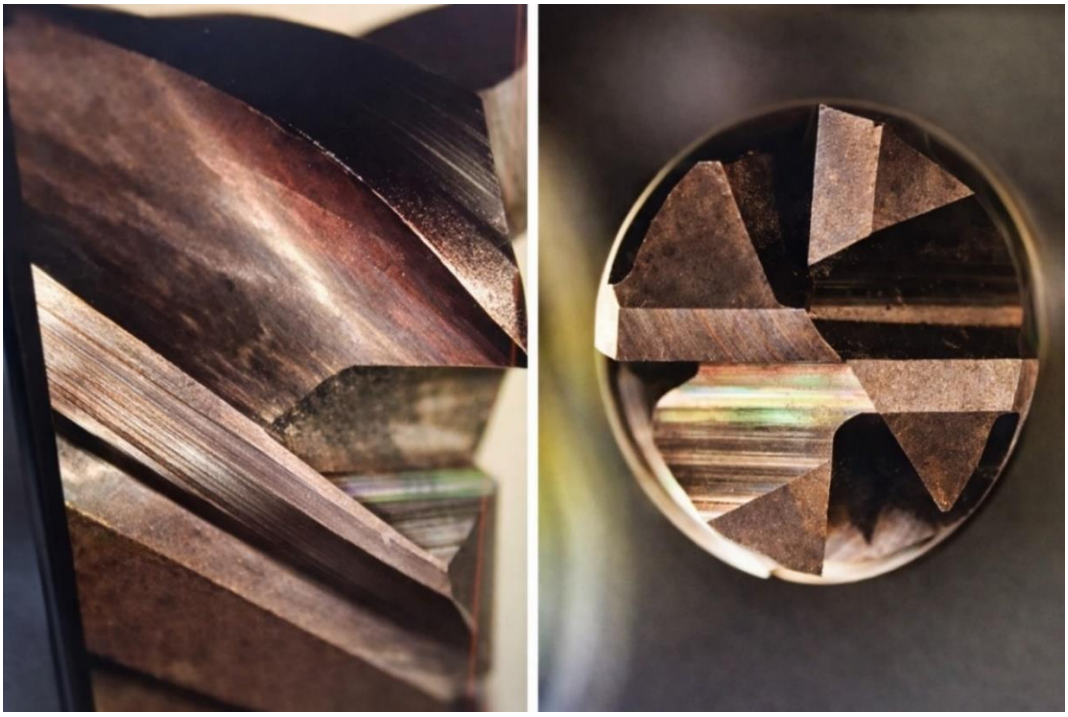


Şekil 3.14. Standart tip tutucuda soğutma sulu kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,060 mm).

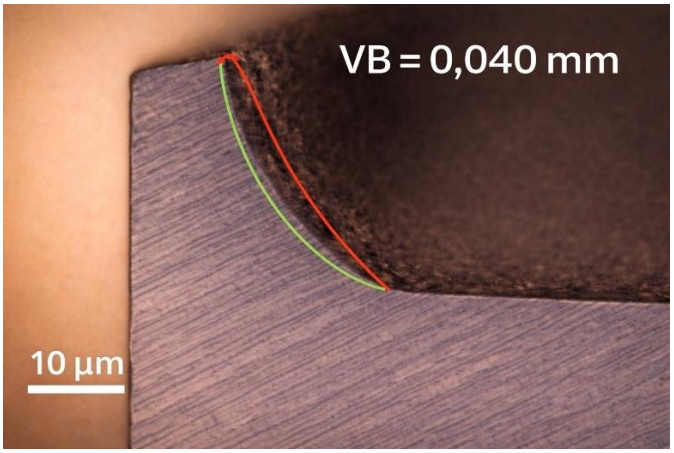
Standart tutucuda rijitlik/titreşim etkisi nedeniyle VB'nin artması beklentisi literatürle uyumludur [8,9,12-14].

Standart tutucuların yüksek devirli işleme koşullarında daha yüksek titreşim ve daha düşük proses kararlılığı sergileyebileceği deneysel çalışmalarda da gösterilmiştir [7,12,14].

3.2.3. Yüksek Hızlı Tutucu – Kuru Kesme



Şekil 3.15. Yüksek hızlı tip tutucuda kuru kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü).

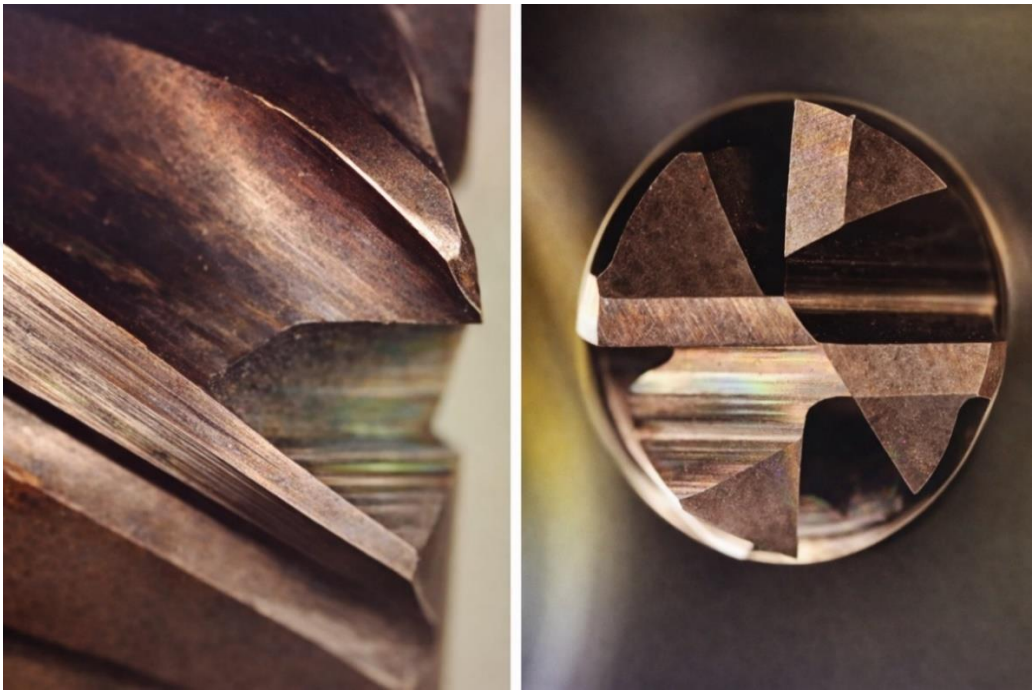


Şekil 3.16. Yüksek hızlı tip tutucuda kuru kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,040 mm).

Kuru kesmede VB'nin artması, artan ısıl yük ve sürtünmeyle ilişkili olup yüksek hız koşullarında aşınma mekanizmalarının değişebildiği literatürde rapor edilmiştir [4,16,32].

Yüksek hızlı tutucunun kuru kesmede dahi daha düşük VB sağlaması ise daha iyi dinamik rijitlik/kararlılık ile ilişkilendirilebilir [8,9,13,14].

3.2.4. Standart Tutucu – Kuru Kesme



Şekil 3.17. Standart tip tutucuda kuru kesme koşullarında takım aşınması (optik mikroskop görüntüsü).



Şekil 3.18. Standart tip tutucuda kuru kesme koşulunda kesici takım yanak aşınmasının ImageJ yazılımı ile ölçümüne ait ekran görüntüsü (VB = 0,070 mm).

En yüksek yanak aşınması (VB) değeri, 0,070 ± 0,0015 mm ile bu koşul altında ölçülmüştür.

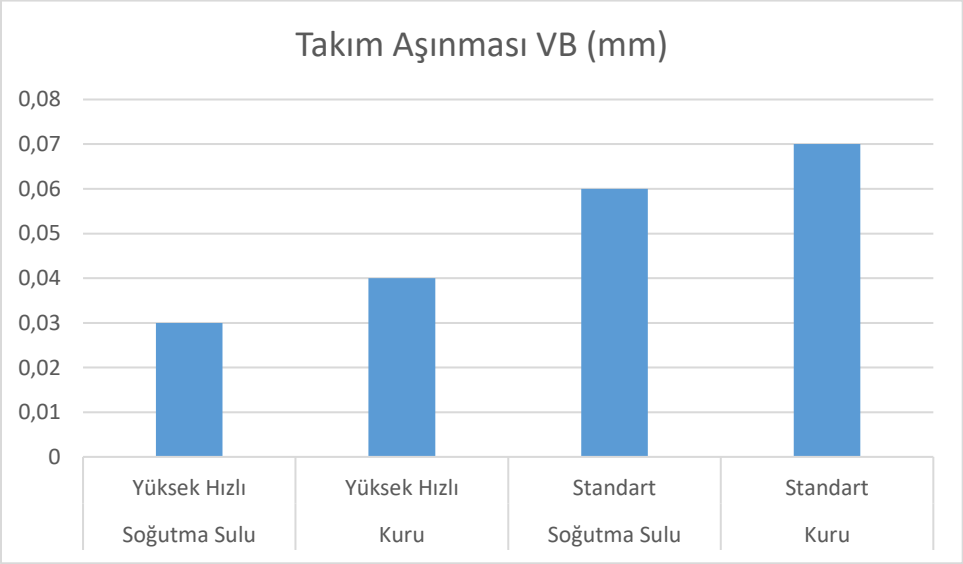
Kuru kesme sırasında, kesme bölgesinde sıcaklık artışı, sürtünmenin yükselmesi ve talaşın kesici yüzeye yapışma eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilen koşulların, aşınma mekanizmalarının daha hızlı gelişmesine neden olduğu değerlendirilmektedir.

Bu koşulda elde edilen yüksek VB değeri, kuru kesmede artan sıcaklık ve sürtünme ile standart tutucuda gözlenen daha düşük dinamik kararlılığın birlikte etkisiyle açıklanabilir [8,9,11,13,14,16]. Kaplamalı karbür takımlarda yüksek hız/ısıl yük altında delaminasyon, çatlak vb. mekanizmaların görülebileceği de rapor edilmiştir [3,4,32].

3.2.5. Genel Karşılaştırma

Tablo 3.4. Takım aşınması sonuçlarının karşılaştırmalı tablosu.

Tutucu Tipi	Soğutma Tipi	VB (mm) (Ortalama ± SS)
Yüksek hızlı	Soğutma Sulu	0,030 ± 0,0015
Yüksek hızlı	Kuru	0,040 ± 0,0015
Standart	Soğutma Sulu	0,060 ± 0,0015
Standart	Kuru	0,070 ± 0,0015



Şekil 3.19. Takım aşınması sonuçlarının grafiği (2,5 dk işleme sonrası).

Grafiksel karşılaştırmada, yüksek hızlı tutucuların her iki soğutma koşulunda da standart tutuculara kıyasla daha düşük VB değerleri sağladığı açıkça görülmektedir.

Soğutma sulu kesme koşulunun, tüm senaryolarda aşınmayı azalttığı belirlenmiştir.

Standart tutucuda kuru kesme, aşınma açısından en olumsuz koşul olmuştur.

3.2.6. Literatür ile Karşılaştırma

Elde edilen sonuçlar, literatürde rapor edilen bulgularla genel olarak uyumludur. Özellikle takım tutucu tipinin titreşim davranışı ve proses kararlılığı üzerinden yüzey kalitesi ile takım aşınmasını etkilediği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [8,12-14]. Ayrıca yüksek kesme hızları ve artan ısıl yükler altında aşınma mekanizmalarının değişebildiği ve sıcaklık artışının takım aşınmasını hızlandırabildiği bildirilmektedir [3,4,16,32]. Bu çalışmada takım aşınmasının VB esasına göre değerlendirilmesi de frezeleme için önerilen standart yaklaşım ile uyumludur [45].

3.2.7. İş Parçası Yüzeyi ve Talaş Oluşumu

Bu çalışmada takım tutucu tiplerinin karşılaştırılması, sulu ve kuru kesme koşulları altında elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve takım aşınması (VB) ölçümleri üzerinden nicel olarak gerçekleştirilmiştir. İş parçası yüzeylerine ve talaş oluşumuna ait fotoğraflar ise karşılaştırma amacıyla değil, ölçüm sonuçlarının görsel olarak desteklenmesi amacıyla sunulmuştur. Bu nedenle bitmiş yüzey görüntüleri, farkın en belirgin olduğu en iyi ve en olumsuz işleme koşulları için seçilmiştir. Aynı kesme koşullarında tutucu karşılaştırmaları, çalışmanın önceki bölümlerinde sunulan nicel sonuçlar üzerinden yapılmıştır.

Bu bağlamda, nicel ölçüm sonuçlarının yüzeydeki ve talaş oluşumundaki yansımalarını göstermek amacıyla, işleme sonrası iş parçası yüzeyleri ve talaş morfolojileri nitel olarak incelenmiştir. Bu görsel incelemeler, farklı takım tutucu tipleri ve soğutma koşullarının işleme performansı üzerindeki etkilerinin daha anlaşılır biçimde ortaya konulmasına yardımcı olmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Bitmiş iş parçası yüzeyi görüntüleri, karşılaştırmanın daha açık ve ayırt edici biçimde yapılabilmesi amacıyla, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından en iyi ve en olumsuz sonuçların elde edildiği işleme koşulları için sunulmuştur. Diğer işleme koşullarına ait yüzey kalitesi farklılıkları ise çalışmanın önceki bölümlerinde verilen Ra ve VB ölçüm sonuçları ile

nicel olarak ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, deneysel bulguların görsel olarak desteklenmesi ve yorumların daha net yapılabilmesi amacıyla tercih edilmiştir.

Buna ek olarak, her takım tutucu tipi ve soğutma koşulu için oluşan talaşlar ayrı ayrı toplanmış, karışıklığa yol açmayacak şekilde yakın plan fotoğraflar ile belgelenmiştir. Talaş görüntüleri, kesme mekanizmasını ve işleme kararlılığını açıklayan nitel göstergeler olarak değerlendirilmiştir.

Yüzey görüntüleri ise karşılaştırmanın daha net yapılabilmesi amacıyla yalnızca en iyi ve en olumsuz işleme koşulları için sunulmuştur. Diğer işleme koşullarına ait yüzey kalitesi farklılıkları, çalışmanın önceki bölümlerinde verilen Ra ölçüm sonuçları üzerinden nicel olarak değerlendirilmiştir.

3.2.7.1. En İyi İşleme Koşulu – Yüksek Hızlı Tutucu / Sulu Kesme



Şekil 3.20. Yüksek hızlı tip tutucu ve sulu kesme koşulunda işlenen iş parçasının bitmiş yüzey görünümü (en iyi yüzey kalitesi).

Bu koşulda elde edilen iş parçası yüzeyinde, daha parlak, homojen ve düzgün bir yapı gözlemlenmiştir. Yüzey üzerinde belirgin takım izlerinin ve dalgalı yapıların minimum seviyede olduğu görülmektedir. Bu gözlem, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde elde edilen en düşük Ra değerleri ile doğrudan uyumludur.

Sulu kesme koşulunda soğutma sıvısının kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürmesi, sürtünmeyi azaltması ve talaş tahliyesini iyileştirmesi, yüzey kalitesinin artmasında etkili olmuştur. Ayrıca yüksek hızlı takım tutucunun daha yüksek dinamik rijitlik ve titreşim sönümleme kapasitesine sahip olması, kesme sırasında daha kararlı bir yük dağılımı sağlayarak yüzey kalitesini olumlu yönde etkilemiştir [1,12,31].

3.2.7.2. En Olumsuz İşleme Koşulu – Standart Tutucu / Kuru Kesme



Şekil 3.21. Standart tip tutucu ve kuru kesme koşulunda işlenen iş parçasının bitmiş yüzey görünümü (en olumsuz yüzey kalitesi).

Standart tutucu ve kuru kesme koşulunda işlenen yüzeylerde, belirgin çizik izleri, dalgalı yüzey yapıları ve yer yer düzensiz kesme izleri gözlemlenmiştir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde elde edilen en yüksek Ra değerleri ile tutarlıdır.

Kuru kesme sırasında kesme bölgesinde sıcaklık artışı, sürtünmenin yükselmesi ve talaşın yüzeye yapışma eğilimi göstermesiyle ilişkilendirilen koşullar, yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmuştur. Buna ek olarak standart tutucunun daha düşük rijitlik ve titreşim sönümleme kapasitesi, kesme sırasında titreşimlerin artmasına yol açarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. Literatürde, düşük rijitlik ve yüksek titreşim eğiliminin yüzey kalitesini olumsuz etkileyebildiği rapor edilmektedir [8,12,14,31].

3.2.7.3. Talaş Oluşumu ve Talaş Morfolojisi

Talaş görüntüleri incelendiğinde, genel olarak kanca (spiral) formunda talaşların oluştuğu gözlemlenmiştir. Yüksek hızlı tip tutucu kullanılan koşullarda talaşların daha kısa, homojen ve düzenli yapıda olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kesme sırasında daha kararlı bir talaş oluşumuna ve dengeli kesme kuvvetlerine işaret etmektedir.

Standart tip tutucu kullanılan işlemlerde, özellikle kuru kesme koşulunda, talaşların daha uzun, düzensiz ve yüzeye yapışma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Kuru kesme koşullarında talaş renginin koyulaşması ve yüzeyde oksidasyon izlerinin oluşması, kesme bölgesindeki sıcaklık artışının dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Bu gözlemler, talaş oluşumunun; takım tutucu rijitliği, sistem titreşimi ve soğutma koşullarına duyarlı olduğunu ortaya koymakta olup, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması ölçümlerinden elde edilen nicel sonuçları nitel olarak desteklemektedir. Literatürde talaş morfolojisinin, işleme performansının ve kesme koşullarının önemli bir göstergesi olduğu yaygın olarak vurgulanmaktadır [4,5,17].

3.2.8. Takım Aşınması Sonuçlarının ANOVA ile Değerlendirilmesi

Takım aşınması (VB) değerlerine ait iki yönlü ANOVA sonuçları Tablo 3.5'te sunulmuştur. Analiz sonuçları, takım tutucu tipi ve soğutma koşulunun VB üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilere sahip olduğunu göstermektedir ($p < 0,001$). Buna karşılık, takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasındaki etkileşim istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 1,000$).

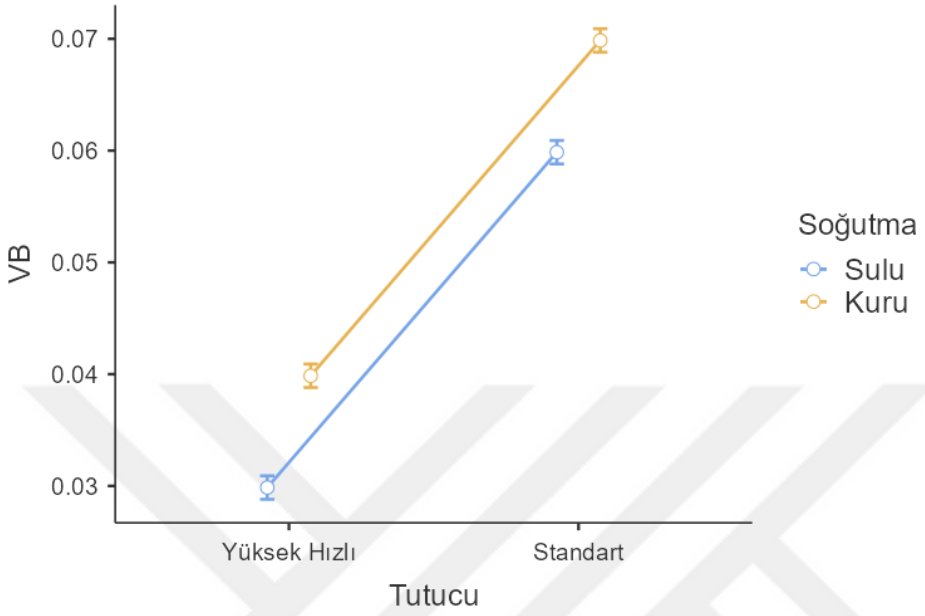
Tablo 3.5. Takım aşınması (VB) için iki yönlü ANOVA sonuçları.

ANOVA - VB

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	η^2
Tutucu	0.00630	1	0.00630	3482	<.001	0.894
Soğutma	7.00e-4	1	7.00e-4	387	<.001	0.099
Tutucu ∗ Soğutma	0.00000	1	0.00000	0	1.000	0.000
Residuals	4.34e-5	24	1.81e-6			

Eta kare değerleri incelendiğinde, takım aşınması üzerindeki en baskın etkinin takım tutucu tipine ait olduğu görülmektedir ($\eta^2 \approx 0,89$). Soğutma koşulunun etkisi daha sınırlı olmakla birlikte anlamlıdır ($\eta^2 \approx 0,10$). Etkileşim etkisi ise ihmal edilebilir düzeydedir.

VB değerlerinin tutucu tipi ve soğutma koşuluna göre değişimi Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, çizgilerin büyük ölçüde paralel olduğu görülmekte olup bu durum, ANOVA sonuçlarında etkileşimin anlamsız çıkmasıyla uyumludur.



Şekil 3.22. Tutucu tipi ve soğutma koşulunun takım aşınması (VB) üzerindeki etkisi.

Bu sonuçlar, yüksek hızlı tip takım tutucuların daha kararlı bir kesme davranışı sergileyerek kesici takım üzerindeki mekanik yük dalgalanmalarını azalttığını ve dolayısıyla aşınmayı sınırlandırdığını göstermektedir [8,9,13,14,48].

3.2.9. Hipotezlerin Değerlendirilmesi (VB)

Bu çalışmada takım aşınması (VB) için test edilen hipotezler iki yönlü ANOVA sonuçlarına göre aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir:

H_{04} reddedilmiştir. Takım tutucu tipinin takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi vardır ($p < 0{,}001$).

H_{05} reddedilmiştir. Soğutma koşulunun takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi vardır ($p < 0{,}001$).

H_{06} hipotezi reddedilememiştir. Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasında takım aşınması açısından istatistiksel olarak anlamlı bir etkileşim bulunmamaktadır ($p = 1{,}000$).

Sonuçlar, takım aşınması üzerinde en baskın etkinin takım tutucu tipine ait olduğunu göstermektedir ($\eta^2 \approx 0{,}89$).

3.3. Genel Değerlendirme

Bu çalışmada AISI 1045 çeliğinin frezelenmesinde, yüksek hızlı tip ve standart tip takım tutucuların sulu ve kuru kesme koşulları altındaki performansları; yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve takım aşınması (VB) ölçümleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, yüksek hızlı tip takım tutucuların her iki kesme koşulunda da standart tutuculara kıyasla daha düşük Ra ve VB değerleri sağladığını göstermiştir. Bu fark, tutucu tipinin dinamik rijitlik/kararlılık ve salgı-titreşim davranışı üzerindeki etkileriyle açıklanabilir [8-10, 12-14]. Soğutma koşullarının etkisi değerlendirildiğinde, sulu kesme koşulunun her iki takım tutucu tipi için de yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını azalttığı görülmüştür [11,16].

Yapılan iki yönlü ANOVA analizleri (Jamovi 2.6.44), elde edilen farkların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve özellikle takım tutucu tipinin her iki bağımlı değişkende de baskın etkiye sahip olduğunu (η^2 değerleri) göstermiştir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, frezeleme işlemlerinde kullanılan yüksek hızlı ve standart tip (pensli) takım tutucuların işleme performansları, yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesici takım aşınması (VB) kriterleri temel alınarak deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneyler, AISI 1045 çeliği iş parçası üzerinde, aynı kesme parametreleri altında ve iki farklı soğutma koşulunda (sulu ve kuru) gerçekleştirilmiştir. Her bir deney koşulu için 7 tekrar ölçüm (N = 7) yapılmış; sonuçlar ortalama ± standart sapma (mean ± SD) biçiminde raporlanmıştır. İstatistiksel değerlendirmeler Jamovi (sürüm 2.6.44) yazılımı kullanılarak iki yönlü varyans analizi (Two-Way ANOVA) ile yürütülmüş; anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

4.1. Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, yüksek hızlı tip ve standart tip takım tutucuların frezeleme performansı üzerindeki etkileri; yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesici takım aşınması (VB) kriterleri esas alınarak deneysel ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Jamovi (v2.6.44) ile gerçekleştirilen iki yönlü ANOVA analizleri, *takım tutucu tipinin hem yüzey pürüzlülüğü hem de takım aşınması üzerinde istatistiksel olarak en baskın faktör* olduğunu ortaya koymuştur ($p < 0,05$).

Elde edilen sonuçlara göre, yüksek hızlı tip takım tutucular standart tip tutuculara kıyasla daha düşük Ra ve VB değerleri sağlayarak daha kararlı bir frezeleme performansı sergilemiştir. Nitel olarak değerlendirildiğinde, en iyi sonuç *yüksek hızlı tutucu–sulu kesme* koşulunda, en olumsuz sonuç ise *standart tutucu–kuru kesme* koşulunda elde edilmiştir. Bu bulgular, literatürde takım tutucu rijitliği, balans ve dinamik davranışın yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerini raporlayan çalışmalarla uyumludur [8,12-14,47].

Soğutma koşulunun her iki çıktı parametresi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş olmakla birlikte, bu etkinin büyüklüğünün takım tutucu tipine kıyasla daha sınırlı olduğu görülmüştür [8,11]. Bu durum, sulu kesmenin ısıl yükü ve sürtünmeyi azaltarak yüzey oluşumu ve aşınma davranışına katkı sağladığını; ancak özellikle yüksek devirli frezeleme koşullarında gözlenen baskın farkın, tutucu tipinin sağladığı dinamik kararlılık ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. [8,13,14].

Takım tutucu tipi ile soğutma koşulu arasındaki etkileşim incelendiğinde, bu etkileşimin *kesici takım aşınması (VB) açısından istatistiksel olarak anlamsız*, yüzey pürüzlülüğü (Ra) açısından ise *düşük düzeyde anlamlı* olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, soğutmanın yüzey oluşum mekanizmasını sınırlı ölçüde etkileyebildiğini; buna karşılık takım aşınması üzerinde daha

belirleyici rolün tutucu kaynaklı dinamik kararlılık ve yük dalgalanmalarının kontrolü olduğunu düşündürmektedir [8,13,14].

Etki büyüklüğü analizleri (η^2) elde edilen farkların yalnızca istatistiksel açıdan değil, aynı zamanda mühendislik uygulamaları bakımından da anlamlı olduğunu ortaya koymuştur. η^2 sonuçları, Ra ve VB üzerindeki toplam varyansın büyük bölümünün takım tutucu tipinden kaynaklandığını, soğutma koşulunun ise ikincil fakat anlamlı bir katkı sağladığını göstermiştir. Bu durum, tutucu tipine bağlı rijitlik, balans ve titreşim davranışının frezeleme prosesinde yüzey kalitesi, takım ömrü ve genel proses kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu vurgulayan önceki çalışmalarla örtüşmektedir [8,12-14].

Sonuç olarak bu çalışma; takım tutucu seçiminin frezeleme proseslerinde yalnızca bir bağlama/yardımcı ekipman tercihi olmadığını, aksine *yüzey kalitesi, kesici takım aşınması ve proses kararlılığını belirleyen kritik bir sistem bileşeni* olduğunu deneysel ve istatistiksel olarak ortaya koymuştur.

Bu bulgular doğrultusunda; yüzey pürüzlülüğü için test edilen H_{01}, H_{02} ve H_{03} hipotezleri reddedilmiş, takım aşınması için test edilen H_{04} ve H_{05} hipotezleri reddedilmiş; H_{06} hipotezi ise reddedilememiştir. Böylece takım tutucu tipinin her iki çıktı parametresi üzerinde baskın ve belirleyici bir faktör olduğu istatistiksel olarak doğrulanmıştır.

4.2. Endüstriyel Uygulamalar İçin Çıkarımlar

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, frezeleme işlemlerinde takım tutucu seçiminin üretim kalitesi ve verimliliği açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek hızlı tip tutucuların sağladığı daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve sınırlı takım aşınması, özellikle yüzey kalitesi ve takım ömrünün kritik olduğu uygulamalarda avantaj sağlayabilir [8,13,14]. Başlıca endüstriyel çıkarımlar şunlardır:

- Hassas imalat uygulamalarında yüksek hızlı tip tutucular, ek finisaj ihtiyacını azaltarak üretim süresi ve maliyetleri düşürebilir.
- Seri üretim süreçlerinde daha düşük aşınma oranları sayesinde takım değiştirme sıklığı azalabilir ve üretim sürekliliği artırılabilir.
- Kuru kesme koşullarında yüksek hızlı tutucular daha kararlı kesme davranışı sergileyerek sürdürülebilir üretim yaklaşımına katkı sağlayabilir [11].

- Standart tip tutucular, düşük devirli veya yüzey kalitesinin kritik olmadığı kaba işleme operasyonlarında maliyet–performans dengesi açısından uygun olabilir.

4.3. Çalışmanın Bilimsel ve Teknik Katkıları

Bu tez, takım tutucu tipinin frezeleme performansı üzerindeki etkisini nicel ölçümlerle ortaya koyarak literatüre katkıda bulunmaktadır:

- Yüksek hızlı ve standart tip tutucuların aynı kesme parametreleri ve malzeme altında karşılaştırılmasıyla tutucu kaynaklı performans farkları belirlenmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve yanak aşınması (VB) kriterleri birlikte değerlendirilerek, tutucu–dinamik davranış–yüzey kalitesi ilişkisi bütüncül olarak ele alınmıştır [8,12,14].
- Kesme parametrelerinin sabit tutulması sayesinde elde edilen farkların tutucu tipinin dinamik özellikleriyle ilişkisi net bir şekilde yorumlanabilmiştir [8,12,14].
- Optik mikroskop ve ImageJ yazılımı kullanılarak yapılan aşınma ölçümleri, tekrarlanabilir bir deney yaklaşımı sunmaktadır [26,27].
- İstatistiksel değerlendirmede Jamovi (v2.6.44) ile iki yönlü ANOVA uygulanmış ve η^2 etki büyüklüğü raporlanarak, faktörlerin göreli etkileri nicel olarak gösterilmiştir.

Bu yönüyle tez, takım tutucu seçiminin yalnızca bir bağlama elemanı tercihi olmadığını; frezeleme prosesinin dinamik performansını, yüzey kalitesini ve takım ömrünü doğrudan etkileyen kritik bir sistem bileşeni olduğunu deneysel ve istatistiksel olarak ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın en önemli metodolojik katkısı, kesme parametreleri, iş parçası malzemesi ve deney tekrar sayısının sabit tutulması suretiyle yalnızca takım tutucu tipinin değişken olarak izole edilmesidir. Böylece elde edilen performans farkları doğrudan takım tutucu tipinin dinamik ve yapısal özelliklerine atfedilebilmiştir. Bu kontrollü deney tasarımı, literatürde sıklıkla birlikte değiştirilen parametrelerin neden olduğu belirsizlikleri ortadan kaldırarak daha net ve güvenilir bir karşılaştırma sunmaktadır.

4.4. Çalışmanın Sınırlılıkları

Bu çalışma belirli kesme parametreleri, tek bir iş parçası malzemesi (AISI 1045 çeliği) ve iki farklı takım tutucu tipi ile sınırlandırılmıştır. Deneylerde kesme kuvveti ölçümü, titreşim analizi veya modal testler gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle takım tutucu tipine bağlı performans farkları dolaylı olarak yorumlanmış olup, elde edilen sonuçlar yalnızca çalışmada kullanılan

deney koşulları için geçerlidir. Farklı kesme parametreleri, farklı malzemeler ve kapsamlı dinamik ölçümler ile elde edilecek sonuçlar değişkenlik gösterebilir.

4.5. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Önerilen ileriki çalışmalar:

- Farklı kesici takım kaplamalarının (TiAlN, AlCrN) yüksek hızlı ve standart tutucularla performansının incelenmesi,
- Farklı iş parçası malzemeleri (alüminyum, titanyum alaşımları, dökme demirler) üzerinde benzer deneyler,
- Titreşim ve kesme kuvveti ölçümlerinin entegre edilerek daha kapsamlı dinamik analizlerin yapılması [12,14,15,47,48],
- Uzun süreli kesme deneyleri ile takım ömrü eğrilerinin çıkarılması [45],
- Elde edilen verilerin makine öğrenmesi tabanlı modellerle tutucu seçimi için karar destek sistemlerine dönüştürülmesi [18].

KAYNAKLAR

[1] Rajput, S. S., Upadhyay, C., Gangopadhyay, S., & Fernandes, F. (2023). Effects of roughing, finishing, and aggressive machining conditions on the milling performance of AISI 1045 steel using TiAlN coated inserts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 239(3), 376–387. https://doi.org/10.1177/09544054231157963

[2] Lai, D., Ma, J., Liao, X., Ji, Q., & Lin, Y. (2024). Wear behavior and surface roughness analysis of carbide tools with varying coating for high-speed milling of compacted graphite cast iron. Journal of Mechanical Science and Technology, 38(7), 3667–3681. https://doi.org/10.1007/s12206-024-0639-2

[3] Wang, X., Zhao, B., Ding, W., Song, J., & Li, H. (2024). Wear mechanisms of coated carbide tools during high-speed face milling of Ti_2AlNb intermetallic alloys. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 131, 2881–2892. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12616-2

[4] Zhang, G., Zhang, J., Fan, G., Xu, C., & Du, J. (2023a). The effect of chip formation on the cutting force and tool wear in high-speed milling Inconel 718. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127, 335–348. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11551-6

[5] Yusuf, M. Y., Ariffin, M. K. A., Ismail, N., & Sulaiman, S. (2013). Experimental investigation on surface roughness and tool wear in dry machining of TiC reinforced aluminium LM6 composite. Materials Science Forum, 773–774, 339–347. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.773-774.339

[6] Xiang, J., Pang, S., Xie, L., Hu, X., Peng, S., & Wang, T. (2018). Investigation of cutting forces, surface integrity, and tool wear when high-speed milling of high-volume fraction SiCp/Al6063 composites in PCD tooling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 98, 1237–1251. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2294-1

[7] Lee, S., Ro, S.-K., & Park, J.-K. (2016). Performance evaluation of a shape memory alloy tool holder for high-speed machining. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(1–4), 717–725. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7737-3

[8] Xia, Y., Wan, Y., Luo, X., Wang, H., Gong, N., Cao, J., Liu, Z., & Song, Q. (2020). Development of a toolholder with high dynamic stiffness for mitigating chatter and improving machining efficiency in face milling. Mechanical Systems and Signal Processing, 145, 106928. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106928

[9] Denkana, B., Biermann, D., & Tillmann, W. (2021). Influence of tool holder stiffness on tool wear and surface integrity in milling. Journal of Manufacturing Processes, 64, 119–129.

[10] Schmitz, T. L., Couey, J., Marsh, E., Mauntler, N., & Hughes, D. (2007). Runout effects in milling: Surface finish, surface location error, and stability. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(5), 841–851. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.06.014

[11] Schulz, H., & Moriwaki, T. (1992). High-speed machining. *CIRP Annals*, *41*(2), 637–643. https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63250-8

[12] Zagórski, I., Korpysa, J., & Weremczuk, A. (2021). Influence of tool holder types on vibration in rough milling of AZ91D magnesium alloy. Materials, 14(10), 2517. https://doi.org/10.3390/ma14102517

[13] Korpysa, J., Zagórski, I., Weremczuk, A., & Habrat, W. (2024). Process stability analysis during trochoidal milling of AZ91D magnesium alloy using different toolholder types. Applied Sciences, 14(9), 3616. https://doi.org/10.3390/app14093616

[14] Korpysa, J., & Zagórski, I. (2022). Vibration analysis during AZ31 magnesium alloy milling with the use of different toolholder types. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, *24*(3), 489–501. https://doi.org/10.17531/ein.2022.3.10

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

[16] Fang, B., Cheng, M., Gu, T., & Ye, D. (2022). An improved thermal performance modeling for high-speed spindle of machine tool based on thermal contact resistance analysis. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 120, 5259–5268. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09085-4

[17] Han, G., Ye, Z., Xu, J., Ma, Y., Xu, C., Zhao, X., Yu, L., Feng, P., & Feng, F. (2023). Investigation on cutting forces and tool wear in high-speed milling of Ti-6Al-4V assisted by longitudinal torsional ultrasonic vibrations. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 129, 783–799. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12306-z

[18] Nguyen, A.-T., Nguyen, V.-H., Le, T.-T., & Nguyen, N.-T. (2022). Multiobjective optimization of surface roughness and tool wear in high-speed milling of AA6061 by machine learning and NSGA-II. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, Article ID 5406570. https://doi.org/10.1155/2022/5406570

[19] Lai, Z., Zhao, Z., Guo, T., Luo, Y., Zhou, H., & Li, C. (2022). Clamping fatigue properties of shrink-fit holder. Micromachines, 13(8), 1263. https://doi.org/10.3390/mi13081263

[20] Cui, L., & Zhang, H. (2020). A nominal radial stiffness prediction model for HSK tool holder–spindle flange interface. Advances in Mechanical Engineering, 12, Article 168781402093460. https://doi.org/10.1177/1687814020934600

[21] Liu, S., Zhang, Y., & Chen, Z. (2022). Nominal radial stiffness model for HSK tool holders and experimental validation. Advances in Mechanical Engineering, 14(10), 1–12. https://doi.org/10.1177/16878132221129472

[22] Xiao, W., Mao, K., Zhu, M., Li, B., Lei, S., & Pan, X. (2014). Modelling the spindle–holder taper joint in machine tools: A tapered zero-thickness finite element method. Journal of Sound and Vibration, 333(22), 5836–5850. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.06.023

[23] Zheng, Y., Zhao, Z., Zhou, Y., & Xu, J. (2025). An accurate modeling approach of contact stiffness in milling tool-holder interface using fractal theory. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 38(1). https://doi.org/10.1186/s10033-025-01236-4

[24] Hajdu, D., Franco, O., Sanz-Calle, M., Totis, G., Munoa, J., Stepan, G., & Dombovari, Z. (2025). Stable tongues induced by milling tool runout. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 206, 104258. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2025.104258

[25] Cui, L., & Su, Y. (2020). Chatter stability prediction method of the spindle-tool holder-tool system with interface contact characteristics. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 1–15. https://doi.org/10.1155/2020/7121328

[26] Silva, F. J. G., Martinho, R. P., Magalhães, L. L., Fernandes, F., Sales-Contini, R. C. M., Durão, L. M., Casais, R. C. B., & Sousa, V. F. C. (2024). A comparative study of different milling strategies on productivity, tool wear, surface roughness, and vibration. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8(3), 115. https://doi.org/10.3390/jmmp8030115

[27] Samtaş, G., & Korucu, S. (2022). The effect and optimization of cutting parameters of Vanadis 4E powder metallurgical tool steel on tool wear: Surface roughness in face milling. Sādhanā, 47, 91. https://doi.org/10.1007/s12046-022-01910-6

[28] Zhao, D., Li, X., Wan, S., Zhao, Q., & Hong, J. (2024). A novel method for identifying tool–holder interface dynamics based on receptance coupling. *Machines*, *12*(12), 911. https://doi.org/10.3390/machines12120911

[29] Rivin, E. (1999). *Stiffness and damping in mechanical design*. CRC Press.

[30] Sakamoto, H., Matsuda, T., & Shimizu, S. (2012). Effect of clamped toolholders on dynamic characteristics of spindle system of machining center. International Journal of Automation Technology, 6(2), 168–174. https://doi.org/10.20965/ijat.2012.p0168

[31] Obikawa, T., Sasahara, H., & Shirakashi, T. (2005). Basic nonlinearity of tool chatter vibration. Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in the 21st Century (LEM21), 169–172. https://doi.org/10.1299/jsmelem.2005.1.169

[32] Khare, S. K., & Phull, G. S. (2023). Tool wear and surface roughness evaluation of mill insert tools in high-speed machining of Ti-6Al-4V. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.297

[33] ASTM International. (2023). ASTM A29/A29M: Standard specification for general requirements for steel bars, carbon and alloy steels.

[34] ASM International. (2022). ASM handbook (Vol. 1): Properties and selection—Irons, steels, and high-performance alloys.

[35] Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2021). *Manufacturing processes for engineering materials (6th ed.). Pearson.*

[36] Upadhyaya, G. S. (2004). Trent E. M., Wright P. K.: Metal cutting (4th ed.), "Butterworth-Heinemann", Boston, 2000. Science of Sintering, 36(1), 54–54. https://doi.org/10.2298/sos0401054u

[37] Es-Said, O. S. (2021). *Materials engineering and manufacturing. Trans Tech Publications Ltd.* https://doi.org/10.4028/b-7f4ico

[38] Shipway, P. H., McCartney, D. G., & Sudaprasert, T. (2005). Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC–Co coatings. Wear, 259(7–12), 820–827. https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.059

[39] Kathrein, M., Michotte, C., Penoy, M., Polcik, P., & Mitterer, C. (2005). Multifunctional multi-component PVD coatings for cutting tools. Surface and Coatings Technology, 200(5–6), 1867–1871. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.105

[40] Nikken Kosakusho Works Ltd. (2022). Major Dream Holder (MDSK Series) technical catalogue.

[41] Eroğlu Takım Tutucuları San. ve Tic. A.Ş. (2021). ER pensli takım tutucular kataloğu.

[42] International Organization for Standardization. (1997). ISO 4287: Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Profile method—Terms, definitions and surface texture parameters.

[43] International Organization for Standardization. (1996). ISO 4288: Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Profile method—Rules and procedures for the assessment of surface texture.

[44] Martin, P. (2005). Surface roughness measurement and its applications. Springer.

[45] International Organization for Standardization. (1989). ISO 8688-2: Tool life testing in milling—Part 2: End milling.

[46] Lee, Y. (2023). *Surface roughness prediction in end milling processes considering the vibration of the cutting tool* (Master's thesis, Portland State University). https://doi.org/10.15760/etd.8167

[47] Sonawane, H. (2020). Modeling and analysis of high speed milling process stability for industry applications. In J. P. Davim (Ed.), High Speed Machining (pp. 187–221). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815020-7.00007-2

[48] Budak, E., & Altintaş, Y. (1998). Analytical prediction of chatter stability in milling—part i: general formulation. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 120(1), 22–30. https://doi.org/10.1115/1.2801317

EKLER

Ek A – Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Ölçüm Verileri

Ek A-1: Standart – Kuru

Ölçüm No	Ra (µm)
1	1,52
2	1,58
3	1,56
4	1,54
5	1,55
6	1,60
7	1,50

Ek A-2: Standart – Sulu

Ölçüm No	Ra (µm)
1	1,38
2	1,42
3	1,41
4	1,39
5	1,40
6	1,45
7	1,35

Ek A-3: Yüksek Hızlı – Kuru

Ölçüm No	Ra (µm)
1	0,98
2	1,02
3	1,01
4	0,99
5	1,00
6	1,03
7	0,97

Ek A-4: Yüksek Hızlı – Sulu

Ölçüm No	Ra (µm)
1	0,88
2	0,92
3	0,91
4	0,89
5	0,90
6	0,93
7	0,87

Ek B – Takım Aşınması (VB) Ölçüm Verileri

Ek B-1: Standart – Kuru

Ölçüm No	VB (mm)
1	0,068
2	0,069
3	0,070
4	0,071
5	0,070
6	0,072
7	0,069

Ek B-2: Standart – Sulu

Ölçüm No	VB (mm)
1	0,058
2	0,059
3	0,060
4	0,061
5	0,060
6	0,062
7	0,059

Ek B-3: Yüksek Hızlı – Kuru

Ölçüm No	VB (mm)
1	0,038
2	0,039
3	0,040
4	0,041
5	0,040
6	0,042
7	0,039

Ek B-4: Yüksek Hızlı – Sulu

Ölçüm No	VB (mm)
1	0,028
2	0,029
3	0,030
4	0,031
5	0,030
6	0,032
7	0,029

ÖZGEÇMİŞ

Eğitim Durumu

2016 – 2021

Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü (Lisans)

2012 – 2016

Bursa İnegöl Dörtçelik Anadolu Meslek Lisesi