



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TORNA TEZGAHI İÇİN DİNAMOMETRE
TASARIMI VE İMALATI

Hasan Hüseyin DEĞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hasan Hüseyin DEĞER tarafından hazırlanan “**TORNA TEZGAHI İÇİN DİNAMOMETRE TASARIMI VE İMALATI**” adlı tez çalışması 20/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mürsel EKREM

.....

Danışman

Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hasan Hüseyin DEĞER

Tarih: 30.01.2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TORNA TEZGAHI İÇİN DİNAMOMETRE TASARIMI VE İMALATI

Hasan Hüseyin DEĞER

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK

2025, 92 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK

Prof. Dr. Mürsel EKREM

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ

Bu tez kapsamında, torna tezgâhlarında işleme sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin gerçek zamanlı ve doğru biçimde ölçülmesini sağlayacak bir dinamometre sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışmanın amacı, talaşlı imalat süreçlerinde kesme kuvvetlerinin güvenilir şekilde ölçülmesini sağlayarak verim kayıplarını ve yüzey kalitesi problemlerini azaltmaya yönelik uygulanabilir bir ölçüm çözümü geliştirmektir. Bu doğrultuda, dinamometre gövdesi torna tezgâhına entegre edilebilecek şekilde tasarlanmış ve ölçüm sistemi iki adet **150 kg kapasiteli, 1 g hassasiyetli basma tip loadcell** kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen dinamometrenin güvenilirliğini belirlemek amacıyla statik kalibrasyon testleri gerçekleştirilmiş; ölçüm doğruluğu, lineerlik ve tekrarlanabilirlik özellikleri değerlendirilmiştir. Kalibrasyon sonuçları, sistemin kararlı ve doğrusal bir ölçüm davranışı sergilediğini göstermiştir. Deneysel çalışmalarda iş parçası malzemesi olarak **AISI 6150 çeliği** kullanılmış ve her biri aynı özelliklere sahip **4 adet numune** üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı işleme parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla **4 farklı devir sayısı (250, 500, 750 ve 1000 dev/dk)**, **3 farklı ilerleme (0,10; 0,20; 0,30 mm/dev)** ve **3 farklı talaş derinliği (1, 2 ve 3 mm)** kullanılarak toplam **27 deney kombinasyonu** oluşturulmuş, her deney **3 tekrar** şeklinde uygulanarak **toplam 81 deney** gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre ölçümlerin yaklaşık **%70'inin stabil** olduğu belirlenmiştir. En uygun işleme koşulları, **1000 dev/dk devir sayısı, 0,10 mm/dev ilerleme ve 1 mm talaş derinliği** kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu parametrelerde en düşük yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değerleri ölçülmüş olup, **Ra = 0,56 µm, Rz = 2,25 µm, kesme kuvveti (Fc) = 136,78 N ve ilerleme kuvveti (Ff) = 17,33 N** olarak belirlenmiştir. En olumsuz sonuçlar ise **500 dev/dk devir, 0,30 mm/dev ilerleme ve 2 mm talaş derinliği** koşullarında elde edilmiş; bu durumda **Ra = 3,03 µm, Rz = 9,50 µm, Fc = 1078,60 N ve Ff = 155,36 N** değerleri ölçülmüştür.

Sonuç olarak, torna tezgâhları için **düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli ve endüstriyel uygulamalara uygun** bir dinamometre sistemi geliştirilmiştir. Elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar, geliştirilen sistemin hem akademik çalışmalarda kesme kuvvetlerinin analizi hem de endüstriyel üretim süreçlerinde optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tornalama, dinamometre, kesme kuvveti, yük hücresi, deneysel analiz, yüzey pürüzlülüğü

ABSTRACT
MS
DYNAMOMETER DESIGN AND MANUFACTURING FOR A TURNING
MACHINE

Hasan Hüseyin DEĞER

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY THE DEGREE OF
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK

2025, 92 Pages

Jury

Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK

Prof. Dr. Mürsel EKREM

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ

Within the scope of this thesis, a dynamometer system has been designed and manufactured to enable real-time and accurate measurement of cutting forces occurring during machining on lathe machines. The scope of this thesis, a dynamometer system has been designed and manufactured to enable real-time and accurate measurement of cutting forces occurring during machining on lathe machines. The aim of the study is to develop a practical measurement solution to reduce efficiency losses and surface quality problems by enabling reliable measurement of cutting forces in machining processes. In this regard, the dynamometer body was designed to be integrated into a lathe machine, and the measurement system was constructed using two 150 kg capacity, 1 g precision push-type load cells. In this regard, the dynamometer body was designed to be integrated into a lathe machine, and the measurement system was constructed using two 150 kg capacity, 1 g precision push-type load cells. In order to determine the reliability of the developed dynamometer, static calibration tests were conducted; measurement accuracy, linearity, and reproducibility were evaluated. The calibration results showed that the system exhibited stable and linear measurement behavior. In the experimental studies, AISI 6150 steel was used as the workpiece material, and experiments were conducted on four samples, each having the same properties. In the experimental studies, AISI 6150 steel was used as the workpiece material, and experiments were conducted on four samples, each having the same properties. A total of 27 experiment combinations were created using 4 different speed counts (250, 500, 750 and 1000 rpm), 3 different feed rates (0.10, 0.20, 0.30 mm / min) and 3 different chip depths (1, 2 and 3 mm) in order to study the effect of different machining parameters, a total of 81 experiments were performed by applying each experiment in the form of 3 repetitions.

According to the test results, it was determined that approximately 70% of the measurements were stable. The most suitable processing conditions were obtained with the combination of 1000 rpm spindle speed, 0.10 mm/rev feed rate, and 1 mm chip depth. According to the test results, it was determined that approximately 70% of the measurements were stable. The most suitable processing conditions were obtained with the combination of 1000 rpm spindle speed, 0.10 mm/rev feed rate, and 1 mm chip depth. In these parameters, the lowest surface roughness and cutting force values were measured and $R_a = 0.56 \mu\text{m}$, $R_z = 2.25 \mu\text{m}$, cutting force (F_c) = 136.78 N and feed force (F_f) = 17.33 N were determined. The most negative results were obtained under conditions of 500 rpm, 0.30 mm/rev feed rate, and 2 mm chip depth; In this case, the measured values were $R_a = 3.03 \mu\text{m}$, $R_z = 9.50 \mu\text{m}$, $F_c = 1078.60 \text{ N}$, and $F_f = 155.36 \text{ N}$. In this case, the measured values were $R_a = 3.03 \mu\text{m}$, $R_z = 9.50 \mu\text{m}$, $F_c = 1078.60 \text{ N}$, and $F_f = 155.36 \text{ N}$.

As a result, a low-cost, high-precision, and industrially applicable dynamometer system for lathe machines has been developed. The numerical and experimental results obtained demonstrate that the developed system can be effectively used both for the analysis of cutting forces

Keywords: Turning, dynamometer, cutting force, load cell, experimental analysis, surface roughness

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bana kazandırdığı bilgi ve deneyimlerle yolumu aydınlatan, her aşamada desteğini esirgemeyen, araştırmanın her safhasında rehberlik eden değerli danışmanım Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK'e şükranlarımı sunarım. Onun yönlendirmeleri ve cesaretlendirici yaklaşımı sayesinde bu süreci başarıyla tamamladım

Bu süreçte bana maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hasan Hüseyin DEĞER
KONYA-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3.TORNA TEZGÂHLARINDA KULLANILAN DİNAMOMETRE SİSTEMLERİ: TASARIM YAKLAŞIMLARI, UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ.....	10
3.1. Giriş	10
3.2. Dinamometre Sistemlerinin Sınıflandırılması	11
3.2.1. Strain gauge tabanlı dinamometre sistemleri.....	12
3.2.2 Piezoelektrik tabanlı dinamometre sistemleri.....	15
3.2.3 Film sensör tabanlı dinamometre sistemleri	18
3.2.4 Yük hücreli dinamometre sistemleri.....	21
3.2.5 Kablosuz/IoT tabanlı dinamometre sistemleri	25
3.2.6 MEMS tabanlı dinamometre sistemleri	29
3.3 Dinamometre Performanslarının Karşılaştırılması	33
3.3.1 Hassasiyet ve duyarlılık	33
3.3.2 Dinamik yanıt ve frekans performansı.....	35
3.3.3 Çapraz duyarlılık (cross-talk) ve ayırıştırma başarısı	36
3.3.4 Maliyet ve uygulama kolaylığı	37
3.3.5 Modülerlik, entegrasyon ve kullanılabilirlik	39
3.3.6 Karşılaştırmalı analizler	40
3.4. Zorluklar Ve Gelecek Araştırma Alanları	41
3.4.1 Zorluklar	41
3.4.2 Gelecek yönelimler	42
3.5. Sonuç	42
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
4.1. Giriş	46
4.2. Sistem Donanımı.....	46
4.3. Torna Tezgâhı Dinamometresi	47
4.4. Yük Hücreleri (Loadcell).....	48
4.5. Sistem Kalibrasyonu	48

4.6. CAD Tasarım.....	48
4.7. Pano Detayları.....	50
4.8. Deneysel Çalışma	54
4.9. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı.....	57
4.10. Yüzey Pürüzlülük Cihazı ve Ölçme Şartları.....	58
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	59
5.1. Genel Değerlendirme	59
5.2. Deney Tasarımının Genel Özellikleri	60
5.2.1. Tekrarların karşılaştırılması.....	61
5.2.2. Bulgular	61
5.2.3. Yorum	62
5.3. Devir Sayısının (n) Etkisi	62
5.4. İlerlemenin (f) Kesme ve İlerleme Kuvvetlerine Etkisi.....	68
5.5. Talaş Derinliğinin (ap) Kesme ve İlerleme Kuvvetlerine Etkisi	69
5.6. Bölge Faktörünün Kesme ve İlerleme Kuvvetlerine Etkisi	70
5.7. Kesme (Fc) ve İlerleme (Ff) Kuvvetlerinin Karşılaştırılması ve Ek Bulgular	70
6. TARTIŞMA, GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
6.1. Tartışma	76
6.1.1. Devir sayısının (n) etkisi.....	76
6.1.2. İlerlemenin (f) etkisi	76
6.1.3. Talaş derinliğinin (ap) etkisi	77
6.1.4. Genel değerlendirme.....	77
6.2. Genel Sonuçlar Ve Katkıları	77
6.3. Öneriler	79
6.3.1. Endüstriyel uygulamalar için	79
6.3.2. Akademik / gelecek çalışmalar için	80
6.4. Ek Tartışmalar.....	80
6.4.1. Enerji tüketimi açısından yorum.....	80
6.4.2. Talaş oluşumunun rolü.....	81
6.4.3. Yüzey kalitesinin fonksiyonel önemi	81
6.4.4. İstatistiksel analiz ve optimizasyon	81
6.4.5. Endüstriyel uygulamalara katkı	82
KAYNAKLAR	83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Bir tornalama işleminde kesme kuvveti bileşenlerinin yönleri	13
Şekil 3.2.	Folyo tipi gerinim ölçer	15
Şekil 3.3.	Yük hücresi kullanılarak hazırlanan Kesme kuvveti ölçüm düzeneği	25
Şekil 3.4.	Kablosuz tabanlı bir Deneyisel kurulumun şematik gösterimi.....	28
Şekil 4.1.	Deneyde kullanılan düzeneğin resmi	47
Şekil 4.2.	Tornalamada kullanılacak dinamometrenin deney anı.....	47
Şekil 4.3.	Torna dinamometresinin solidworks programında görünümü	48
Şekil 4.4.	Torna dinamometresinin Solidworks programında patlatılmış görünümü...	49
Şekil 4.5.	Zemic Model: L6E3-150KG-D55 loadcell	50
Şekil 4.6.	Yük hücresi modülü (DVP202LC MODEL)	50
Şekil 4.7.	Delta PLC (DVP-12SA2 MODEL).....	51
Şekil 4.8.	Delta PLC ekran (DOP-107EG MODEL PLC)	51
Şekil 4.9.	Delta güç kaynağı (Delta DRL-24V75W1AZ)	52
Şekil 4.10.	Veri okuma sistemi montajlı hali	52
Şekil 4.11.	Kalibrasyon sayfası	53
Şekil 4.12.	Veri kaydetme sayfası	53
Şekil 4.13.	Grafik izleme sayfası.....	54
Şekil 4.14.	Deney planı	56
Şekil 4.15.	Deney numune parçası	57
Şekil 4.16.	Deneylerde kullanılan cnc torna tezgâhı	57
Şekil 4.17.	(a) Mitutoyo sj-201 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (b) yüzey ölçüm anı	58
Şekil 5.1.	Değişken işleme parametrelerine göre kesme kuvveti (F_c) değişimi.....	64
Şekil 5.2.	Değişken işleme parametrelerine göre ilerleme kuvveti (F_f) değişimi	65
Şekil 5.3.	Değişken işleme parametrelerine göre R_a değişimi	66
Şekil 5.4.	Değişken işleme parametrelerine göre R_z değişimi	67
Şekil 5.5.	500 dev/dk da $a_p = 1$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri	72
Şekil 5.6.	500 dev/dk da $a_p = 1,5$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri.....	72
Şekil 5.7.	500 dev/dk da $a_p = 2$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri	72
Şekil 5.8.	750 dev/dk da $a_p = 1$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri	73
Şekil 5.9.	750 dev/dk da $a_p = 1,5$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri.....	73
Şekil 5.10.	750 dev/dk da $a_p = 2$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri.....	73
Şekil 5.11.	1000 dev/dk da $a_p = 1$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri.....	73
Şekil 5.12.	1000 dev/dk da $a_p = 1,5$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri.....	74
Şekil 5.13.	1000 dev/dk da $a_p = 2$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri.....	74
Şekil 5.14.	Deney sonuç verileri.....	75

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Dinamometre türleri temel kriterler açısından kıyası.....	41
Çizelge 3.2. Genel değerlendirme	45
Çizelge 4.1. 6150 çeliğin mekanik özellikleri	55
Çizelge 4.2. Samsung PL20 cnc torna tezgahı özellikleri	58
Çizelge 5.1. Genel özet.....	62



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

db	Desibel
hz	Hertz
m²	Metrekare
Fc	Kesme kuvveti
Ff	İlerleme kuvveti
Fr	Radyal kuvvet
FS	Toplam Hata
IR	Kızılötesi
Ra	Ortalama Pürüzlülük
Rz	Ortalama Pürüzlülük Derinliği
a_p	Talaş Derinliği
f	İlerleme
CV	Uyum Varyasyon Katsayısı
R²	Doğrusal Regrasyon Modelleri
POM	Polioksimetilen
PTFE	Politetrafloroetilen
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
FSW	Friction Stir Welding
UIF	Evrensel Ters Filtre
GPRS	General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)
RF	Radyo Frekansı
TCM	Takım Durum İzleme
MEMS	Mikri Elektro Mekanik Sistemler

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının temel amacı, torna tezgâhlarında gerçekleşen işleme süreçlerinin daha verimli ve kontrollü bir şekilde yürütülmesini sağlamak amacıyla dinamik bir dinamometre tasarlamak ve üretmektir. Geliştirilmesi hedeflenen bu sistem, torna tezgâhlarında oluşan kuvvetlerin gerçek zamanlı olarak ölçülmesine olanak tanıyarak hem üretim kalitesini artırmayı hem de işleme sırasında ortaya çıkabilecek hataların önüne geçmeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda çalışma, akademik literatüre katkı sunmanın yanı sıra endüstriyel uygulamalar açısından da pratik bir çözüm ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Problem Durumu

Torna tezgâhları, metal işleme sektöründe yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılan makinelerdir. Ancak bu makinelerde iş parçası ve kesici takım etkileşimi sırasında ortaya çıkan kuvvetlerin doğru bir biçimde ölçülmesi çoğu zaman ihmal edilmektedir. Kuvvet değerlerinin bilinmemesi, işleme optimizasyonunu zorlaştırmakla birlikte makine performansının değerlendirilmesini de güçleştirmektedir. Ayrıca, farklı malzemelerin işlenmesi sırasında oluşan değişken kuvvetler göz önüne alınmadan yapılan işlemler, hem verimsizliğe hem de gereksiz malzeme kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle torna tezgâhlarında gerçek zamanlı kuvvet ölçümü yapabilen bir dinamometrenin geliştirilmesi, hem verimlilik hem de hata tespit süreçleri açısından önemli bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tez, söz konusu ihtiyaca yönelik yenilikçi bir çözüm sunmayı hedeflemektedir.

Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, torna tezgâhlarında işleme sırasında oluşan kuvvetleri algılayabilen, güvenilir bir dinamometre sistemi tasarlamak ve üretmektir. Tasarlanacak prototip, hem ölçüm doğruluğu hem de kullanım kolaylığı açısından kullanıcıların gereksinimlerini karşılayacak nitelikte olacaktır.

Çalışma kapsamında geliştirilen dinamometrenin performansı test edilerek, elde edilen verilerin işleme parametrelerinin iyileştirilmesine nasıl katkı sağlayabileceği araştırılacaktır. Üretilen sistemin, hem operatörlerin işleme sürecindeki değişimleri daha

net takip etmelerine hem de üretim kalitesinin artırılmasına yardımcı olması beklenmektedir. Ayrıca bu teknolojinin uygun tasarım geliştirmeleri ile diğerk işleme makinelerine uyarlanabilir olması da çalışma kapsamında değerdendirilmektedir.

Araştırmanın Önemi

Torna tezgâhları, metal işleme alanının temel ekipmanlarından biri olup birçok sektörde kritik öneme sahiptir. Ancak bu makinelerde oluşan kesme kuvvetlerinin çoğuzaman ölçülmeden işlem yapılması, işleme kalitesini olumsuz etkilemekte ve bazı durumlarda beklenmeyen arızalara yol açabilmektedir. Bu çalışma ile geliştirilecek olan dinamometre, operatörlere işleme sırasında oluşan kuvvet anlık olarak izleme fırsatı sunarak üretim sürecine önemli bir kontrol mekanizması kazandıracaktır. Böylece işleme hatalarının erken tespiti, takım ömrünün izlenmesi, üretim verimliliğinin artırılması ve malzeme kayıplarının azaltılması mümkün olacaktır. Ayrıca bu çalışma, sanayide giderek önem kazanan akıllı üretim sistemleri ve veri odaklı üretim anlayışı açısından önemli bir adım niteliğindedir. Dinamometreden elde edilen verilerin analiz edilmesi, gelecekte otomatik kontrol algoritmalarının geliştirilmesi için bir temel oluşturacaktır.

Varsayımlar

Bu çalışmada aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Geliştirilen dinamometrenin, torna tezgâhlarının dinamik çalışma koşullarında yeterli doğrulukta ölçüm yapacağı varsayılmaktadır.
- Ölçüm sonuçlarının, işleme parametrelerinin optimize edilmesi konusunda anlamlı ve uygulanabilir bilgiler sunacağı kabul edilmektedir.
- Tasarlanan cihazın torna tezgâhlarıyla mekanik ve elektronik uyumluluk göstereceğı ve kullanıcılar tarafından rahatlıkla kullanılabileceğı öngörülmektedir.

Sınırlılıklar

Çalışmanın kapsamına bağlı olarak aşağıdaki sınırlılıklar belirlenmiştir:

- Üretilen dinamometre prototipi yalnızca torna tezgâhlarında kullanılmak üzere tasarlanmış olup diğer makine türlerine uyumluluğu sınırlandırılmıştır.
- Ölçüm doğruluğu, kullanılan sensörlerin hassasiyeti ve sistem bileşenlerinin kalitesiyle doğrudan ilişkili olup belirli toleranslar içerebilir.
- Prototipin performans değerlendirmesi, belirli malzeme türleri ve sınırlı işleme koşulları altında yapılmış olup aşırı yük, yüksek hız veya farklı malzeme türleri için test edilmemiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde kuvvet ölçümü için birçok dinamometre geliştirilmiştir. Bu cihazlar genellikle yük hücresi (load cell) ve gerinim ölçer (strain-gage) prensiplerine dayanarak çalışmaktadır.

Yaldız ve Ünsaçar (2006), torna işlemleri sırasında oluşan üç ayrı kesme kuvveti bileşenini eş zamanlı olarak ölçebilen bir ölçüm cihazı geliştirmiştir. Ölçüm sonucu elde edilen sayısal veriler, veri toplama sistemi üzerinden bilgisayara aktarılabilmektedir. Cihaz, maksimum 3500 N'a kadar kuvvet ölçümüne uygun şekilde tasarlanmış olup ± 5 N hassasiyete sahiptir. Ölçümlerin güvenilirliğini artırmak için dinamometre hem statik hem de dinamik olarak kalibre edilmiş, ayrıca çapraz hassasiyet ve eksenellik testlerinden geçirilmiştir.

Totis ve Sortino (2011), torna proseslerinde ortaya çıkan üç eksenli kesme kuvvetlerini belirlemek amacıyla yeni bir dinamometre tasarlanmış ve prototipi üretmiştir. Cihaz, özellikle indekslenebilir takım tutucular ve döner taret mekanizmalarıyla donatılmış ileri seviye CNC torna tezgâhlarıyla uyumlu olacak şekilde geliştirilmiştir. Üretilen prototip, statik kalibrasyon testlerine tabi tutulmuş; dinamik karakteristiği ise darbe yöntemiyle gerçekleştirilen testler sonucunda ortaya konmuştur. Deneysel uygulamalar, dinamometrenin yarı finisaj ve finisaj operasyonlarında yüksek düzeyde kararlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, üç temel eksenindeki frekans bant genişlikleri X eksenini için 656 Hz, Z eksenini için 544 Hz ve Y eksenini için 984 Hz olarak ölçülmüştür.

Alipanahi vd. (2022), Dinamometre üzerinde yapılan ölçümlerde, doğrusal hata, histerezis, tekrarlanabilirlik ve eksenellik hatalarının sırasıyla % 4,9 , % 2,8 , % 1,45 ve % 0,7 değerlerinin altında kaldığını belirlemiştir. Bunun yanında, cihazın yapısal özelliklerine yönelik gerçekleştirilen hesaplamalı ve deneysel modal analizler, dinamometrenin 7000 rpm'e kadar olan hızlarda güvenli bir şekilde çalışabileceğini ortaya koymuştur.

Şeker vd. (2002a), Şekillendirme sürecinde St 44 çeliğinden üretilmiş iş parçası üzerinde kesme kuvvetlerinin belirlenmesine yönelik deneysel ölçümler yapmıştır. Elde

edilen bulgular, teorik hesaplamalarla karşılaştırıldığında, deney sonuçlarının kuramsal tahminlerle yüksek düzeyde örtüştüğünü tespit etmiştir.

Korkut (2003), Cihaza entegre edilen donanım ve yazılım bileşenleriyle birlikte, metal kesme süreçlerinde üç eksendeki kuvvet bileşenlerinin eş zamanlı olarak ölçülmesini ve kaydedilmesini sağlayan bir veri toplama altyapısı oluşturmuştur.

Uddin ve Songyi (2016), Sekizgen-elips halka geometrisi temel alınarak değiştirilmiş bir kuvvet dönüştürücüsü tasarlamış, modellenmiş ve yapısal analizlerini gerçekleştirmiştir. Dönüştürücünün duyarlılığını belirlemek için hem analitik hesaplama yöntemlerinden hem de sonlu elemanlar (FE) tabanlı nümerik analizlerden yararlanmışlardır.

Bourdim vd. (2012), Gerilme ölçerler, dinamometre üzerinde çekme, basma ve burulma deformasyonlarının en yoğun şekilde ortaya çıktığı bölgelere yerleştirilmiştir. Bu ölçerler, tam köprü konfigürasyonundaki bir Wheatstone devresi şeklinde bağlantılandırılmıştır. Köprüde oluşan herhangi bir dengesizlik, uygulanan itme kuvvetini ve torku algılayacak biçimde düzenlenmişler, bu yapı hem yüksek duyarlılık hem de kapsamlı sıcaklık kompanzasyonu sağlamıştır.

Yaldız vd. (2007), Sekizgen halka düzeni ve gerilme ölçerlerin yerleştirildiği noktalar, yapı deformasyona uğradığında en yüksek çıkış sinyalinin elde edilmesi ve çapraz duyarlılığın en aza indirilmesi hedeflenerek optimize etmişler. Dinamik kesme kuvvetlerinin belirlenmesi için ise, ölçüm eksenine bir ivmeölçer entegre edilmiş ve bu sensör verileri kullanılarak dinamik kuvvet bileşenleri hesaplanılmıştır.

Parida vd. (2015), FSW (Friction Stir Welding) işlemi için gerilme ölçer temelli, düşük maliyetli bir kuvvet ölçüm sistemi geliştirmiştir; sistemin tasarımı, üretimi ve kalibrasyon aşamaları başarıyla tamamlamıştır. Bu sistem sayesinde, işlem sırasında kuvvetlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve kaydedilmesi mümkün hâle getirilmiştir.

Karabay (2007), Sekizgen halka formundaki transdüktörler kullanılarak tasarlanıp üretilen dinamometre, dairesel halka elastisite teorisi temel alınarak geliştirilmiştir. Cihaz, ± 5 N düzeyinde ölçüm hassasiyetine sahiptir. Çapraz hassasiyetinin yalnızca % 0,05 olarak ölçülmüştür, bu etkinin ihmal edilebilecek kadar düşük olduğunu

gösterilmiştir. Bu nedenle, dinamometrenin güvenilir ve tutarlı ölçümler yapabilecek kapasitede olduğu söylenmiştir.

Totis vd. (2024), Geleneksel dinamometrelerin ve bunlarla kullanılan sayısal filtreleme yöntemlerinin karşılaşılan güçlükleri ve kısıtları, Evrensel Ters Filtre (UIF) yaklaşımı tanıtılarak incelemiştir. Bu doğrultuda, dinamometrenin altına yerleştirilen birden fazla ivmeölçer, altı serbestlik derecesine sahip rijit bir cismin hareketini izleyebilecek şekilde dikkatlice konumlandırmıştır.

Rizal vd. (2015), kablosuz ortamda kesme kuvvetlerinin ölçülmesine olanak sağlayan yenilikçi bir entegre döner dinamometre ve takım tutucu tasarlamıştır, üretilmiş ve deneysel olarak doğrulamıştır. Geliştirilen cihaz, döner takım tutucu gövdesine yerleştirilmiş özel tasarım bir kuvvet algılama bileşenine bağlı bir gerinim ölçer sensöründen oluşturulmuştur.

Kumar ve Yadav (2023a), Kuvvet ölçüm yönteminin üç ekseninde oluşan etkili kuvvetleri gerçek zamanlı olarak yüksek hassasiyetle izleyebildiğini göstermiştir. Yöntemin temel hedefi, kesme kuvvetlerinin ölçülmesine yönelik bir modeli optimize etmek ve bu doğrultuda güvenilir tahminler üretebilmektir.

Projoth vd. (2021a), Yük hücresi ve piezoelektrik sensör temelli iki farklı tornalama alet dinamometresinden yararlanılarak güvenilir ölçüm sonuçları elde etmiştir. Bu dinamometreler aracılığıyla, tornalama işlemini etkileyen çeşitli proses değişkenleri altında kesme kuvvetleri ölçülmüş ve ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Yaldız ve Ünsaçar (2006a), Gerinim ölçer (strain gauge) esaslı bir dinamometre tasarlamış ve geliştirmiş, ardından gerekli donanım ve yazılım bileşenleriyle bütünleştirilerek bir veri toplama sistemiyle uyumlu hâle getirmiştir. Bu dinamometre, tornalama işlemi sırasında üç dik kesme kuvveti bileşenini eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Ölçülen kuvvetlere ait sayısal veriler ise veri toplama birimi üzerinden bilgisayar ortamına aktarılıp kaydedilmiştir.

Gunay vd. (2006a), Deneysel ölçümlerden elde edilen birincil kesme kuvveti değerleri ile teorik hesaplamalar sonucu bulunan değerler arasında belirgin bir uyum olduğu görülmüştür. Bu tutarlılık, kullanılan yöntemin geçerliliğini ortaya koymakta ve

geliştirilen dinamometrenin kesme kuvvetlerini güvenilir biçimde ölçebildiğini doğrulamıştır.

Bharilya vd. (2015a), Temel hedefi, kesme kuvvetlerini düşürmek ve kesme hızını artırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, süreç parametreleri optimize etmiş ve tornalama işlemi sırasında iş parçasında daha kaliteli bir yüzey elde edebilmek için dinamometreden yararlanmıştır.

Sandwell vd. (2016), Optik kuvvet sensöründen elde edilen veriler ile referans kuvvet transdüserinin ölçümleri arasında yüksek düzeyde bir uyum sağladığını görmüştür. Geliştirilen dinamometre, kesme kuvvetlerini ölçme amacıyla test etmiş ve performansı geleneksel piezoelektrik dinamometre ile karşılaştırılarak değerlendirmiştir.

1995 yılında HAMİD ve ALİ, kesme kuvvetlerini farklı işlem parametreleri altında incelemek amacıyla KISTLER 9557b model bir dinamometreden yararlanmışlardır. Takımın iş parçasıyla temas etmesinin ardından, kısa süreli zaman aralıklarında geçici dinamik kuvvet davranışını kaydetmiş ve bu veriler üzerinden hem zaman hem de frekans temelli analizler gerçekleştirmişlerdir.

Delme işlemleri sırasında ortaya çıkan sürekli spiral talaşlar, talaşın uzaklaştırılmasında önemli sorunlara neden olmaktadır. Bu kapsamda, Ke vd., (2005), hem spiral hem de düz formdaki sürekli talaşların delme süreci boyunca nasıl oluştuğunu araştırmıştır. Talaş kaldırma hareketleri ile buna bağlı kuvvetler ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Ayrıca, uzun spiral ve düz talaşların meydana gelişini öngörebilmek amacıyla iki ayrı tahmin modeli geliştirilmiştir.

Strenkowski vd. (2004), Helisel matkaplarla gerçekleştirilen delme işlemlerinde eksenel kuvvet ve torkun öngörülebilmesi için analitik bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, eğik kesme süreci boyunca kesici uç bölgesinde oluşan kesme kuvvetlerinin temsil edilmesine dayanmaktadır. Benzer şekilde, radyal konuma bağlı olarak değişen kesme hızlarında yapılan ortogonal kesme deneylerinde çapraz kesme kenarları arasındaki etkileşimleri analiz etmiştir. Her bir kesme bölgesindeki kuvvetlerin modellenebilmesi için Eulerian tabanlı bir sonlu eleman modeli kullanmıştır.

Sahu vd. (2003), Bu çalışmada, helisel matkapların helis kanalı içine bir talaş yönlendirici eklenmesini önermiştir. Talaş yönlendiricili ve yönlendiricisiz matkaplarla

yapılan deneysel karşılaştırmalar, yönlendiricinin talaş tahliyesini iyileştirdiğini, matkabın kullanım ömrünü uzattığını, kritik delme derinliğini artırdığını ve kesme kuvvetlerini düşürdüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgular, dolaylı olarak matkabın maruz kaldığı eksenel kuvvet ve momentin de azaldığını göstermiştir.

Subasi vd. (2018), Statik performans bakımından değerlendirildiğinde, Al7050 malzemesiyle üretilen sensörün 1 N seviyesindeki düşük kuvvetleri dahi güvenilir biçimde algılayabildiği ve yüksek doğrusal davranış, tekrarlanabilirlik ile düşük histerezis özellikleri sergilediği görülmüştür. Ayrıca, sensörün deneysel olarak belirlenen en düşük bant genişliğinin 2 kHz olduğu tespit edilmiştir. Tepki ve yerleşme süreleri ise, dinamik frezeleme deneyleri sırasında ölçülen kuvvetlerle karşılaştırıldığında, referans sensörle yüksek derecede benzerlik göstermiştir.

Zameroski vd. (2024), Tork ve itme kuvvetine yönelik doğrulama testleri, ticari olarak mevcut bir mil üstü döner dinamometre kullanılarak yürütülmüştür. Elde edilen bulgular, iki farklı matkap çapı ve çeşitli ilerleme hızları için, alüminyum ve paslanmaz çelik numuneler üzerinde gerçekleştirilen kör delik delme deneyleri kapsamında sunmuştur.

Umurani ve Siregar (2019a), Torna işlemlerinde kullanılmak üzere bir torna aleti dinamometresi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu sistem, işlem sırasında iki eksenle oluşan kuvvet bileşenlerini ölçebilecek şekilde yapılandırmıştır. Tasarımın basitliği ve üretim maliyetinin düşük tutulması hedefleri dikkate alındığında, geliştirilen dinamometrenin performansı tatmin edici düzeyde bulmuştur.

Hanif vd. (2016a), X, Y ve Z eksenlerindeki kesme kuvvetleri, malzeme kaldırma hızındaki (MRR) değişimlere doğrudan tepki vermiştir. Düşükten orta seviyeye kadar olan hız artışlarında kuvvetlerdeki yükseliş sınırlı kalırken, orta hızların üzerine çıkıldığında kesme kuvvetlerinde belirgin ve daha keskin bir artış gözlenmiştir.

Rizal vd. (2022a), Üç eksenlerdeki kesme kuvvetlerini ölçebilen tri-aksiyel bir torna dinamometresi geliştirebilmek amacıyla, yeni bir çapraz giriş tipi kuvvet transdüktörü tasarlamış ve imal etmiştir. Bu yapıda, yüksek hassasiyetli piezorezistif strain gauge'lerden geniş ölçüde yararlanılmışlardır. Transdüktörün optimum şekilde tasarlanabilmesi için, piezorezistif strain gauge'lerin yerleşim noktaları Wheatstone

köprü devresi düzeninde gerilme analizleri yapılarak ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Panzer vd. (2012a), Üç bileşenli torna kuvvetlerini ölçmek üzere geliştirilen strain gauge tabanlı dinamometrenin performansı; tasarımın sade yapısı, düşük üretim maliyeti, yeterli doğruluk, rijitlik ve hassasiyet kriterleri dikkate alındığında başarılı bulunmuştur. Kesme hızının artması, kuvvet bileşenlerinde hafif bir düşüşe yol açsa da, yapılan varyans analizi bu etkinin %5 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermiştir. Buna karşılık, besleme hızındaki ve talaş derinliğindeki artışların, tüm kuvvet bileşenlerinde anlamlı ve belirgin artışlara neden olduğu tespit edilmiştir.

Rizal vd. (2018a), Dinamometrenin geometrik tasarımı, takımın kolayca değiştirilebilmesini sağlayarak işleme sürecine yüksek düzeyde esneklik kazandırmış ve sistemin ihtiyaçlara göre yeniden yapılandırılmasına imkân vermiştir.

Yaldiz vd. (2006), Statik ve dinamik kesme kuvvetleri, deformasyon ölçerler ile piezoelektrik ivmeölçer içeren bir dinamometre kullanarak belirlemiştir. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak AISI 1040 çeliği seçmiştir. İlerleme kuvveti, itme kuvveti ve ana kesme kuvveti; üç farklı kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği kombinasyonları uygulanarak ölçülmüştür.

Khammongkhon vd. (2025a), Ana gövdesinde iki kanallı bir delik yapısı barındıracak şekilde tasarlanarak geliştirilen bir torna dinamometresi oluşturulmuştur.

Yapılan literatür taramasında, tornalama işlemlerinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine birçok çalışmanın gerçekleştirildiği ve hâlâ devam etmekte olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, "Torna Tezgahı İçin Dinamometre Tasarımı ve İmalatı" adlı çalışmanın, farklı kesme parametreleri altında işlenmesiyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin incelenerek literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

3.TORNA TEZGÂHLARINDA KULLANILAN DİNAMOMETRE SİSTEMLERİ: TASARIM YAKLAŞIMLARI, UYGULAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

3.1. Giriş

Talaşlı imalat, metal şekillendirme yöntemleri arasında hassasiyetin ve üretim kalitesinin en çok önemsendiği alanlardan biridir. Bu nedenle, kesme kuvvetlerinin doğru şekilde tespit edilmesi; süreç ayarlarının optimize edilmesi ve takım kullanım süresinin artırılması açısından temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Kesme kuvvetleri, malzeme işlenebilirliği, takım-torna etkileşimi ve oluşan yüzey kalitesi gibi çok sayıda süreci doğrudan etkiler. Özellikle torna tezgahlarında kesme işlemi sürekli ve dairesel bir hareketle gerçekleştiği için, bu süreçte ulaşılan kuvvetlerin dinamik karakterleri çok daha büyük bir önem taşımaktadır(Lad ve Patel, t.y.; Öztürk ve Yıldızlı, 2018).

Kesme kuvvetlerinin doğru ölçümü, aynı zamanda sayısal analizlerin (örneğin sonlu eleman analizleri) doğruluğunu da belirler. Bu ölçüm ihtiyacına yanıt olarak geliştirilen **dinamometre sistemleri**, takım-tezgah arayüzüne entegre edilen sensörlü yapılardan oluşmaktadır. Bu sistemler, kesme sırasında ortaya çıkan kuvvet bileşenlerini (F_x , F_y , F_z) ayrı ayrı ve anlık olarak ölçerek, sürecin analizine ve kontrolüne olanak tanır(Korkmaz, 2019; Totis ve Sortino, 2011; Umurani ve Siregar, 2019).

Literatürde torna tezgâhları için geliştirilen dinamometre sistemleri; tasarım yaklaşımları, kullanılan sensör teknolojileri (strain gauge, piezoelektrik, yük hücresi, MEMS, vb.), montaj yöntemleri ve sinyal işleme teknikleri açısından büyük bir çeşitlilik göstermektedir. Strain gauge tabanlı sistemler yüksek doğruluk sunarken, piezoelektrik sensörler geniş frekans aralığı ve yüksek dinamik yanıt kabiliyeti ile öne çıkmaktadır(Khammongkhon vd., 2025b; Panzera vd., 2012b). Son yıllarda kablosuz veri iletimi, IoT entegrasyonu ve mikro-elektromekanik sistemlerin (MEMS) gelişmesiyle birlikte, taşınabilir ve çok daha kompakt dinamometre sistemlerinin ortaya çıktığı gözlemlenmektedir(Zhang vd., 2019; Vásquez Céspedes, 2011).

Örneğin, EN8 çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada, üç eksenli piezoelektrik triaxial dinamometre ile kesme kuvvetleri ölçülmüş ve LABVIEW yazılımı ile analiz

edilmiştir. Makalede, en uygun işleme parametrelerinin tespiti amacıyla Taguchi yöntemi uygulanmış ve sonuçların değerlendirilmesinde ANOVA analizinden yararlanılmıştır (Kumar ve Yadav, 2023b).

Benzer şekilde, başka bir çalışmada 15 kN kapasiteye sahip strain gauge temelli bir sistem, demiryolu taşıtlarının tekerleklerinin yenilenmesi gibi ağır şartlarda test edilmiş ve ortalama %5'lik bir hata ile yüksek doğrulukta veri elde edilmiştir (Kasprzak ve Pyzalski, 2021).

Kesme kuvvetlerinin aynı anda üç ekseninde ölçüldüğü daha hassas sistemlerde, piezoelektrik sensörler tercih edilmektedir. Örneğin, 0,1 N hassasiyetle çalışabilen piezoelektrik tabanlı dinamometreler, ince işleme işlemleri için geliştirilmiştir (Horváth vd., t.y.).

Dijital teknolojilerin üretim hatlarına entegrasyonu, kablosuz veri transferi ve IoT destekli izleme sistemlerinin kritik rolünü her geçen gün daha da artırmaktadır. Korkmaz (2019) tarafından geliştirilen çalışmada, Arduino tabanlı bir yapı ile tasarlanan sekizgen strain-halka dinamometreler, RF modülleri aracılığıyla kesme kuvveti verilerini buluta aktaran bir sistem olarak yapılandırılmıştır (Korkmaz, 2019).

Bu derleme makalesinin amacı, torna tezgâhlarında kullanılan dinamometre sistemlerinin genel tasarım ilkelerini, kullanılan sensör türlerini, uygulama alanlarını, avantaj ve dezavantajlarını teknik bir çerçevede değerlendirmek, Yapısal ve sensör teknolojisine göre sınıflandırmak, Performans ve doğruluk açısından karşılaştırmak, Endüstriyel ve akademik uygulamalara yönelik örneklerle açıklanarak, Gelecek gelişim yönleri öngörülerek ele almak ve literatürdeki eğilimleri sistematik olarak özetlemektir. Aynı zamanda sistemlerin **ölçüm hassasiyeti, uygulama kolaylığı, maliyet etkinliği, analiz yeteneği ve entegrasyon düzeyleri** açısından karşılaştırılması da hedeflenmektedir.

3.2. Dinamometre Sistemlerinin Sınıflandırılması

Dinamometre sistemleri, kullanılan sensör teknolojilerine ve yapısal tasarımlarına göre çeşitli alt kategorilere ayrılmaktadır. Bu sistemlerin temel farkları; hassasiyet, çapraz duyarlılık, maliyet, entegrasyon kolaylığı ve endüstriyel uygunluk gibi parametrelere

dayanmaktadır. Bu bölümde en yaygın kullanılan dinamometre türleri ve ilgili çalışmalardan örnekler ile sınıflandırma yapılmıştır.

3.2.1. Strain gauge tabanlı dinamometre sistemleri

Strain gauge esaslı dinamometreler, torna tezgâhlarında meydana gelen kesme kuvvetlerini ölçmede en yaygın kullanılan algılayıcı sistemler arasında yer almaktadır. Bu sensörler, bir yüzeye uygulanan mekanik gerilmeyi algılayarak, bu gerilmeyi elektriksel sinyallere dönüştürür. Genellikle Wheatstone köprüsü devresine entegre edilen strain gauge'ler, uygulanan kuvvete bağlı olarak doğrusal bir gerilim çıktısı sağlamaktadır (Horváth vd., t.y.).

Bu sistemlerde temel prensip; kesme işlemi sırasında kesici takım üzerine uygulanan kuvvetin, strain gauge'lerin yerleştirildiği elastik bir yapıya aktarılmasıdır. Bu yapıdaki deformasyon, strain gauge'ler tarafından algılanır ve elde edilen veriler, kuvvet bileşenlerine çevrilerek yorumlanır. Bu tür dinamometrelerde yapının rijitliği, yerleştirilen strain gauge'lerin konumu ve kalibrasyon yöntemleri sistemin genel doğruluğunu belirleyen başlıca faktörlerdir (Lad ve Patel, t.y.; Rizal vd., 2018b).

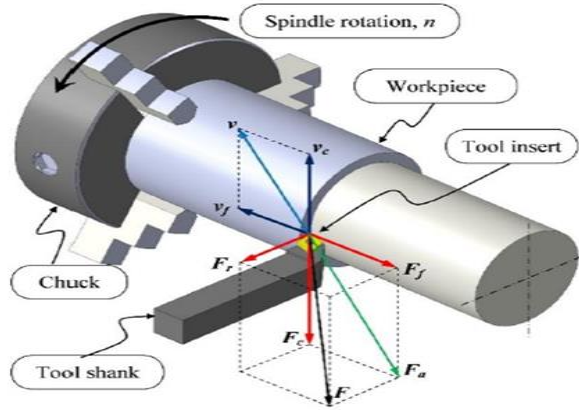
3.2.1.1. Strain gauge sistemlerinin avantajları :

- **Hassasiyet–rijitlik dengesi iyidir:** Yapıya bir delik açılarak hassasiyet artırılabilir ve buna rağmen takımın toplam rijitliği **neredeyse değişmez**.
- **Sinyal şartlandırması basittir:** Wheatstone köprü yapısı sayesinde çıkış sinyali kolayca elde edilir ve elektronik arabirim oldukça basittir.
- **Çapraz hassasiyet düşüktür:** Uygun konfigürasyonda (tam köprü) kuvvet bileşenleri birbirini etkilemez; P ve Q kuvvetleri bağımsız şekilde ölçülebilir.
- **Sıcaklık etkisi dengelenebilir:** Tüm strain gage'ler aynı sıcaklığa maruz kaldığında, köprü devresinde sıcaklık değişimi **birbirini yok eder** ve ölçümü bozmaz.
- **Kesici takımda değişiklik gerektirmez:** Sensör entegre edilmiş takım uygulamasında takım rijitliği değişmez, takım üzerinde ek bir modifikasyon gerekmez (Vásquez Céspedes, 2011).
- **Takıma kolay entegre edilebilir:** Strain gage'ler, takım veya takım saplamasına minimum geometrik değişikliklerle uygulanabilir; montajı kolaydır.

3.2.1.2. Strain gauge sistemlerinin dezavantajları:

- **Dinamik yanıtı sınırlıdır:** Bazı strain gage dynamometreler **yeterince hızlı cevap vermez**; yüksek frekanslı/dinamik kuvvet ölçümlerinde piezoelektrikler daha uygundur.
- **Ayrı kuvvet bileşenleri için ek gage gerekir:** Eksenel kuvvet (R) ölçülmek istenirse köprü devresine **ek strain gage'ler** eklenmelidir; devre karmaşıklaşır.
- **Tasarım optimizasyonu gerektirir:** Strain ring gibi yapılarda hem rijitlik hem hassasiyetin korunması için **özenli geometrik tasarım** gerekir.
- **Koruma ihtiyacı vardır:** Sensörler talaş, kesme sıvısı ve sıcaklık değişimlerinden korunmalıdır; aksi halde ölçüm kararlılığı etkilenebilir(Horváth vd., t.y.; Khammongkhon vd., 2025b; Rizal vd., 2018b; Vásquez Céspedes, 2011).

Yapılan bir çalışmada, torna işlemleri için üç eksenli strain gauge tabanlı bir dinamometre tasarlanmış ve kalibrasyon testleri sonucunda F_c , F_f ve F_p kuvvet bileşenleri için doğrusal regresyon modellerinin R^2 değerlerinin sırasıyla 0,9985 , 0,9784 ve 0,9989 olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, dinamometrenin kullanılan elastik elemanın tasarımına bağlı olarak maksimum 1500 N kesme kuvvetleri için boyutlandırıldığı ve turnalamada bu kuvvet aralığında başarılı şekilde ölçüm gerçekleştirebildiği rapor edilmiştir(Panzer vd., 2012b).



Şekil 3.1. Bir tornalama işleminde kesme kuvveti bileşenlerinin yönleri(Rizal vd., 2018b).

Kasprzak ve Pyzalski (2021) tarafından yapılan çalışmada, ağır tornalama işlemlerinde eksenel yüklerin aktif ölçümü ve sınırlandırılması için makine yapısına entegre edilen strain gauge tabanlı bir sensör sistemi geliştirilmiştir. Sistem toplam 7 adet CL20-8 halka tipi sensör (X ekseninde 3 adet, Z ekseninde 4 adet) içermekte ve -30 kN ile $+30$ kN arasındaki yüklerde test edilmiştir. CNC sistemleriyle entegre edilebilen bu

yapıda, eksenel kuvvet aktarımı sırasında sensörlerin ortalama bağıl hataları eksen gruplarına göre %1,45 ile % 4,95 arasında değişmiştir. Testler sırasında ölçümlerde belirgin bir sürüklenme (drift) gözlenmemiş, gürültü ise filtreleme ile giderilmiştir(Kasprzak ve Pyzalski, 2021).

Yapılan başka bir çalışmada, CNC torna tezgâhına özel geliştirilen strain gauge tabanlı bir dinamometre ile farklı devir, talaş derinliği ve ilerleme hızı kombinasyonlarında elde edilen kesme kuvvetleri ile yüzey pürüzlülüğü analiz edilmiştir(Melayim , 2019).

Rizal ve arkadaşları tarafından geliştirilen sekizgen halka (octagonal ring) yapısına sahip üç eksenli strain gauge dinamometre, yaklaşık 2900 N ölçüm kapasitesi ve 766 Hz seviyesindeki güvenli dinamik yanıtıyla endüstriyel tornalama uygulamalarına uygun bulunmuştur. Yapılan kalibrasyon testlerinde çapraz duyarlılık % 0,87'nin altında, doğrusallık hatası % 0,49–1,91 aralığında ve doğal frekans sapması %3,6'nın altında ölçülmüştür. Çalışmada ayrıca, ticari piezoelektrik dinamometrelere kıyasla daha düşük maliyetli, esnek ve yüksek hassasiyetli bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır(Rizal vd., 2018b).

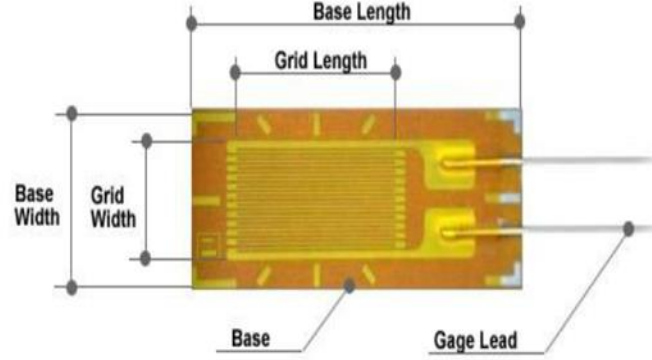
Lad ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 200 kg'a kadar kuvvetleri ölçebilen, düşük maliyetli ve eğitsel amaçlarla da kullanılabilen bir strain gauge dinamometre geliştirilmiştir(Lad ve Patel, t.y.).

Hanif ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek hızlı tornalama uygulamaları için tasarlanan takım saplaması tipinde strain gauge tabanlı üç bileşenli bir kuvvet dinamometresi geliştirilmiş; sistemin kuru tornalama koşullarında kesme kuvvetlerini ölçmede güvenilir ve düşük maliyetli bir alternatif sunduğu, kesme parametrelerinin optimizasyonunda ise Taguchi yönteminin basit adımlarla uygulanabilen etkin bir yaklaşım olarak kullanılabildiği gösterilmiştir. Geliştirilen dinamometrenin yaklaşık $\pm\%1$ hassasiyetle çalıştığı, kalibrasyon testlerinin tekrarıyla doğrulandığı ve çapraz duyarlılığın ihmal edilebilir düzeyde olduğu rapor edilmiştir(Hanif vd., 2016b).

3.2.1.3. Strain gauge tabanlı sistemlerin kullanım alanları

- Kesme kuvveti kaynaklı hata kompanzasyonu , Takım aşınma tahmini ,Takım kırılma önleme ,Eksen yük dengeleme(Kasprzak ve Pyzalski, 2021).

- Takım Durumu İzleme (TCM), işlenebilirlik analizi ve parametre optimizasyonu uygulamalarında kullanılabilir(Rizal vd., 2018b).
- Sistem; takım durumu izleme, talaş morfolojisi, kuvvet analizi ve proses optimizasyonu gibi uygulamalara uygundur(Panzera vd., 2012b).



Şekil 3.2. Folyo tipi gerinim ölçer

3.2.2 Piezoelektrik tabanlı dinamometre sistemleri

Piezoelektrik kuvvet sensörleri, üst ve alt plaka arasına yerleştirilmiş kuvars disklerden oluşan sandviç bir yapıya sahiptir ve uygulanan mekanik gerilimi elektriksel yüke dönüştürerek çalışır. Oluşan yük, charge amplifier aracılığıyla gerilim sinyaline çevrilir ve bu yapı özellikle yüksek frekanslı, dinamik kuvvet değişimlerinin hassas biçimde izlenmesini mümkün kılar(Vásquez Céspedes, 2011).

Piezoelektrik malzemelerin yüksek rijitliği, sensörün çok küçük deformasyonlarla dahi kararlı ve doğrusal bir çıkış üretmesini sağlar; ancak piezoelektrik elemanlarda zamanla yük kaçağı olduğu için uzun süreli statik kuvvet ölçümlerinde sınırlamalar bulunmaktadır. Güvenilir ölçüm için kablo ve konektörlerin yüksek yalıtım seviyesinde olması zorunludur(Vásquez Céspedes, 2011).

Horváth vd. (t.y.) tarafından geliştirilen üç eksenli piezoelektrik dinamometre, ince tornalamada ortaya çıkan 0–100 N aralığındaki kuvvetleri yaklaşık 0.1 N duyarlılıkla ölçebilecek biçimde tasarlanmıştır. Sensör, SiO₂ kristalinin mekanik yük altında elektriksel yük üretmesi prensibiyle çalışmakta olup yüksek iç empedans nedeniyle düşük giriş akımı gerektirmekte ve hücre–yükseleç arasındaki sinyal hatlarının yüksek yalıtımlı, korumalı yapıda olması zorunludur. Kalibrasyon aşamasında sensör duyarlılığı pC/N birimiyle belirlenmiş ve bu değer sinyal şartlandırıcı üzerinde tanımlanarak çıkışın

V/N formatına dönüştürülmesi sağlanmıştır. Bu tasarım, ince tornalama işlemlerinde küçük kuvvetlerin yüksek hassasiyetle ölçülmesine imkân veren referans bir ölçüm sistemi olarak sunulmaktadır(Horváth vd., t.y.).

Piezoelektrik dinamometrelerin büyük çoğunluğu F_x , F_y ve F_z (veya F_c , F_f , F_p) kuvvet bileşenlerini eşzamanlı olarak ölçebilen üç eksenli yapıdadır. Bu çok eksenli ölçüm kabiliyeti, tornalama işlemlerinde kesme kuvveti analizi, takım-iş parçası etkileşimi ve talaş oluşumunun dinamik karakterizasyonu için önemli bir avantaj sağlamaktadır(Totis ve Sortino, 2011b).

Bu genel yapı farklı ticari veya araştırma amaçlı dinamometre tasarımlarında çeşitli mimarilerle uygulanmaktadır.

Totis ve Sortino (2011) tarafından incelenen Kistler 9251A halka tipi sensör, yüksek yapısal rijitlik ve yaklaşık 1 kHz doğal frekans değeri ile ince tornalama gibi hızlı kuvvet değişimlerinin görüldüğü işlemler için uygun bir performans sunmaktadır. Ring sensörün kompakt yapısı, plate tipi piezoelektrik dinamometrelerde görülen kütle artışına bağlı doğal frekans düşüşünü büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Bununla birlikte, şarj yükselteci gerekliliği ile kablo-konektör bağlantılarının ölçüm doğruluğunda kritik rol oynaması önemli tasarım sınırlamaları olarak belirtilmektedir(Totis ve Sortino, 2011b).

Kumar ve Yadav (2023) tarafından EN8 çeliğinin tornalanmasına yönelik gerçekleştirilen çalışmada üç eksenli piezoelektrik dinamometre kullanılarak F_c , F_f ve F_p kuvvet bileşenleri yaklaşık 1000 Hz örnekleme hızıyla gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Kesici takım dinamometre üzerine yerleştirilmiş, kristallerde oluşan elektrik yükü DAQ birimi tarafından gerilim sinyaline dönüştürülmüş ve LABVIEW ortamında izlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin dinamik kuvvet analizi için yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sunduğunu göstermektedir(Kumar ve Yadav, 2023b).

Araştırmalarda sıkça kullanılan masaüstü piezoelektrik dinamometreler, çok küçük kuvvet dalgalanmalarını dahi hassas şekilde algılayabilmekte ve voltaj temelli lineer çıkışları sayesinde yüksek doğrulukta veri üretmektedir.3 Piezoelektrik sensörler, yüksek rezonans frekansı ve rijitlik bakımından avantajlı olsa da, strain-gage tabanlı sensörlere kıyasla daha düşük tekrar edilebilirlik ve daha yüksek maliyet dezavantajlarına sahiptir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklara karşı daha sınırlı dayanım göstermeleri kullanım alanlarını etkileyebilmektedir(Panzer vd., 2012b).

3.2.2.1. Piezoelektrik sensörlerin avantajları

- **Yüksek rijitlik:** Çok sert bir yapıya sahiptir ve bu nedenle kuvvet uygulanırken sadece çok küçük deformasyon oluşur.
- **Yüksek doğal frekans:** Yapısal özellikleri, geniş bir frekans bandında çalışmaya olanak tanır ve hızlı kuvvet değişimlerinin izlenmesini sağlar.
- **Düşük crosstalk:** Eksensel kuvvet bileşenleri arasında etkileşim oldukça düşüktür, bu da çok eksenli ölçümlerde doğruluğu artırır.
- **Doğrusal ve histeresissiz çıktı:** Kuvvet–gerilim ilişkisi doğrusal olup sensör ters yüklere karşı gecikmesiz yanıt verir.
- **Geniş ölçüm aralığı:** Quartz yapı sayesinde düşükten yükseğe geniş bir kuvvet aralığı ölçülebilir.
- **Sıcaklık dayanımı:** Duyarlılık yüksek sıcaklıklarda dahi sabit kalabilir (ör. 500 °C'ye kadar).
- **Uzun ömür:** Piezoelektrik malzemeler zamanla yıpranmadığından kullanım ömrü oldukça uzundur(Vásquez Céspedes, 2011).
- Küçük kuvvet dalgalanmalarını bile hassas şekilde tespit edebilirler(Öztürk ve Yıldızlı, 2018).
- Yüksek rijitlik ve düşük deformasyon , Geniş bant genişliği / yüksek rezonans frekansı , Düşük crosstalk (eksenler arası etkileşim düşük) , Lineerlik ve tekrarlanabilirlik , Takım tutucuya kompakt entegrasyon (Totis ve Sortino, 2011b).
- Küçük kesme kuvvetlerini hassas ölçebilme ,Üç bileşenli kuvvet ölçümü (Fc, Ff, Fp) ,Yüksek rijitlik ve düşük deformasyon ,Kompakt yapı ve kolay entegrasyon , Hazır modül kullanımı ve tekrarlanabilirlik , Kalibrasyon sonrası düşük ölçüm hatası(Horváth vd., t.y.).

3.2.2.2. Piezoelektrik sensörlerin dezavantajları

- **Gerçek statik kuvvet ölçümünde sınırlıdır:** Piezoelektrik malzeme zamanla biriktirdiği yükü kaybettiği için statik kuvvetler yalnızca belirli süre boyunca kararlı şekilde izlenebilir.

- **Yüksek izolasyon gerektirir:** Kablo ve konektörlerin çok iyi yalıtılmış olması şarttır; aksi hâlde kaçak akım ölçümü bozar.
- **Özel elektronik gereksinimi vardır:** Üretilen yük sinyalinin doğru işlenebilmesi için piezoelektrik sensörler genellikle şarj tipinde amplifikatörlerle birlikte kullanılmalıdır(Vásquez Céspedes, 2011).
- Kablo ve konektör etkilerine hassasiyet , Charge amplifier zorunluluğu , Makine yapısına duyarlılık , Standart plate-type piezo dinamometrelerde düşük doğal frekans(Totis ve Sortino, 2011b).
- Yüksek iç direnç nedeniyle özel elektronik gereksinimleri vardır ,Özel ekranlı (shielded) kablo ve konektör zorunluluğu , Voltaja duyarlı amplifikatör kullanılamaz, charge amplifier zorunluluğu , Zamanla yük kaçağı (drift) görülür , Time constant belirsizliği nedeniyle uzun süreli ölçümlerde kararsızlık olabilir , Kablo kaçakları sinyal hatasına neden olabilir(Horváth vd., t.y.).

3.2.2.3.Piezoelektrik sensörlerin kullanım alanları

Piezoelektrik kuvvet sensörleri, yüksek dinamik doğruluk gerektiren çok çeşitli imalat uygulamalarında kullanılmaktadır:

- Kesme kuvvetlerinin üç eksenle ölçümü.
- Kesme parametrelerinin optimizasyonu.
- Takım aşınmasının izlenmesi.
- Farklı takım ve kesme sıvılarının karşılaştırılması.
- Talaş oluşumu, titreşim ve chatter incelemesi(Vásquez Céspedes, 2011).
- Mikro işleme ve ince tornalama.
- Proses durum izleme ve modelleme çalışmaları(Kumar ve Yadav, 2023b).

3.2.3 Film sensör tabanlı dinamometre sistemleri

Film sensör tabanlı dinamometre yapıları, takım gövdesine veya gövdeye bağlı elastik kılıf/altlık üzerine açılan yuvalara yerleştirilen çok katmanlı gerinim algılayıcılarının kullanıldığı kompakt kuvvet ölçüm sistemleridir. Kesme kuvveti takım gövdesinde mikro gerinim oluşturduğunda, film tabakadaki direnç ızgarası bu deformasyonu direnç değişimine dönüştürür ve dört dirençten oluşan Wheatstone köprüsü devresi aracılığıyla kuvvet → gerinim → elektrik sinyali dönüşümü

gerçekleştirilir. Böylece takım barına gömülü ince film sensörler, harici bir dinamometreye ihtiyaç duymadan takım üzerindeki deformasyondan kesme kuvvetlerinin ölçülmesini mümkün kılar(Cheng vd., 2022).

Film sensörlerin takım gövdesine doğrudan entegre edilebilen ince ve çok katmanlı yapıları, takım rijitliği korunarak kesme kuvvetlerinin algılanmasına imkân tanır. Sensörün takım geometrisini belirgin biçimde bozmaması ve takım barına gömülü çalışması, özellikle yer kısıtı olan uygulamalarda geleneksel, hacimli dinamometrelere göre önemli bir kompaktlık avantajı sağlamaktadır. Bununla birlikte, sensörün yerleşimi, elastik altlık geometrisi, film sisteminin malzeme özellikleri ve sıcaklık gibi çevresel etkiler ölçüm performansını sınırlayabilmektedir. Buna rağmen, ince film sensör tabanlı kesme kuvveti ölçüm sistemleri, tornalamada/tek noktadan talaş kaldırma işlemlerinde gerçek zamanlı kuvvet izleme ve akıllı takım tasarımları için umut verici ve pratik bir çözüm olarak değerlendirilmektedir(Cheng vd., 2022).

Zhang ve arkadaşlarının tasarım örneğinde, film sensör çok katmanlı bir yapıya sahiptir: paslanmaz çelik altlık üzerinde Ni–Cr direnç film tabakası ve Si_3N_4 izolasyon katmanları bulunmaktadır. Vakum lehimleme yöntemi, sensörün elastik plakaya doğrudan ve sağlam bir şekilde bağlanmasını sağlayarak gerinim iletimini artırır ve coupling etkisini azaltır. Üç eksenli kuvvet ölçümü için film direnç ızgaraları tam köprü devrelerinde birleştirilmiş ve yüksek hassasiyet elde edilmiştir. Bu yapı, geleneksel yapıştırma tipi strain-gage çözümlerine göre daha kararlı, stabil ve yüksek duyarlılığa sahip bir alternatif sunarak tornalama işlemlerinin gerçek zamanlı kuvvet analizinde etkili bir yaklaşım ortaya koymaktadır(Zhang vd., 2019).

3.2.3.1. Film sensör avantajlar

- **Takım geometrisini bozmayan ince yapı:**Film sensör son derece ince olduğu için takımın yapısını ve kesme geometrisini değiştirmez(Cheng vd., 2022).
- **Gömülü tasarım → yüksek doğal frekansın korunması:**Sensör takım gövdesine entegre olduğu için ek kütle oluşturmaz; böylece sistemin doğal frekansı düşmez ve dinamik ölçüme uygundur(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Yüksek gerinim iletimi:**Gömülü film yapı, gerinimi doğrudan sensöre aktardığı için ölçüm doğruluğu artar(Zhang vd., 2019).

- **Coupling (eksenel etkileşim) hatasının azalması:**Çok eksenli kuvvetlerde oluşan eksenler arası girişim, gömülü film sensör yapısında belirgin şekilde azalır(Zhang vd., 2019).
- **Yapıştırıcı kaynaklı hataların olmaması:**Vakum lehimleme tekniği sayesinde yapıştırıcı tabakasının neden olduğu kararsızlık ve doğruluk kaybı ortadan kalkar(Zhang vd., 2019).
- **Yüksek hassasiyet:**Film sensör tabanlı sistemlerin, yapıştırma tipi strain-gage sistemlere göre daha yüksek duyarlılık sunduğu rapor edilmiştir(Zhang vd., 2019).
- **Düşük maliyet ve kolay üretilebilirlik:**Film sensör teknolojisi görece ucuzdur ve seri üretime uygundur(Cheng vd., 2022).
- **Kolay bakım ve değişim (tak-çıkart yapısı):**Film sensör modülleri gerektiğinde değiştirilebilir; bakım süreci basittir(Cheng vd., 2022).
- **Kütle eklememe avantajı:**Klasik dinamometrelerde görülen “artmış kütle → rijitlik düşmesi” problemi bu yapıda ortaya çıkmaz(Cheng vd., 2022).

3.2.3.2. Film sensör dezavantajlar

- **Sensör yerleşimine yüksek duyarlılık:**Yanlış konumlandırma veya kötü yüzey hazırlığı ölçüm doğruluğunu hızlı şekilde bozar(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **İnce film yapının mekanik dayanım sınırları:**Film tabakası piezoelektrik veya geleneksel strain-gage sistemlere göre mekanik olarak daha kırılgandır(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Sıcaklık ve yüzey gerilimine duyarlılık:**İnce katman yapısı, sıcaklık değişimi ve yüzey gerilimi ile hassasiyet kaybı yaşayabilir(Cheng vd., 2022).
- **Üretim ve katman kaplama süreçleri zordur:**Çok katmanlı film yapısı ve vakum lehimleme uzmanlık gerektirir; üretim süreci karmaşıktır(Zhang vd., 2019).
- **Darbe ve titreşimde hasar riski:**Sensör ince olduğundan yüksek darbe yüklerinde zarar görebilir(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Montaj kalitesine bağımlılık:**Film–substrat arayüzündeki mikro hatalar gerinim iletimini doğrudan etkiler(Zhang vd., 2019).

3.2.3.3. Film sensör kullanım alanları

- **Tornalamada F_x , F_y , F_z kuvvetlerinin doğrudan takım gövdesinden ölçümü:**Gövdeden ölçüm, dinamometreye göre daha gerçekçi kuvvet algısı sağlar(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Akıllı takım tasarımları:**Film sensörlerin gövdeye gömülü yapısı, akıllı takım konseptlerinin geliştirilmesine olanak tanır(Zhang vd., 2019).
- **Takım aşınması ve takım durumu izleme:**Aşınmaya bağlı küçük kuvvet değişimleri hassas şekilde tespit edilebilir(Zhang vd., 2019).
- **Talaş oluşumu ve titreşim analizleri:**Yüksek doğal frekans sayesinde chatter başlangıcı, talaş kopma davranışı ve dinamik kuvvet değişimleri incelenebilir(Cheng vd., 2022; Zhang vd., 2019).
- **Yer kısıtlı bölgelerde kompakt kuvvet ölçümü:**Geleneksel dinamometrelerin sığmadığı dar bölgelerde ince film sensörler kullanılabilir(Zhang vd., 2019).
- **Çok eksenli kuvvet karakterizasyonu:** F_x – F_y – F_z bileşenlerinin eşzamanlı ölçümünde kullanılabilir(Zhang vd., 2019).

3.2.4 Yük hücreli dinamometre sistemleri

Yük hücreleri, elastik bir eleman üzerindeki çok küçük deformasyonların strain-gage aracılığıyla elektriksel sinyale dönüştürülmesi prensibiyle çalışan transdüserlerdir. Uygulanan kuvvet, elastik kiriş üzerinde mikroskobik bir uzama oluşturur; bu uzama strain-gage tarafından direnç değişimi olarak algılanır ve Wheatstone köprüsü üzerinden gerilim sinyaline dönüştürülür. Ardından yükseltilen bu sinyal, kuvvet değerine çevrilerek işleme sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin güvenilir biçimde ölçülmesini sağlar(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021).

Düşük maliyetli, dayanıklı ve yüksek doğruluk sağlayan yapıları sayesinde yük hücreleri tornalama, doğrusal talaş kaldırma, takım aşınması izleme ve kesme parametrelerinin değerlendirilmesi gibi çok sayıda talaşlı imalat uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, sıcaklık değişimleri ve montaj hassasiyeti ölçüm doğruluğunu etkileyebileceği için uygun mekanik koruma ve köprü devresi tasarımları gerektirir(Özdemir, H. (2006)).

Bu çalışmada, tornalamada kesme kuvvetini izlemek amacıyla takım tutucuya bağlanan düz çubuk tip (straight-bar) bir yük hücresi kullanılarak düşük maliyetli bir dinamometre geliştirilmiştir. Sistem yalnızca tangensiyel kuvvet bileşenini (F_t) ölçmekle

birlikte, yapılan deneysel testler dinamometrenin performansının özellikle basitlik ve düşük maliyet kriterleri açısından yeterli olduğunu göstermiştir. Basit tasarımı ve doğrudan tezgâha entegre edilebilirliği, bu yöntemi temel kuvvet analizleri için uygun hâle getirmektedir(Umurani ve Siregar, 2019b).

Günay ve arkadaşları, talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisini incelemek için iki adet beam-type yük hücresi kullanarak bir torna dinamometresi geliştirmiştir. 200 kg kapasiteli hücreler, F_c ve F_f kuvvet bileşenlerinin ölçülmesini sağlamış; düşük toplam hata oranı (%0,02 FS) sayesinde deneysel ve teorik değerler arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Sistemin sınırlaması, radyal kuvvet (F_p) bileşeninin ölçülememesidir(Gunay vd., 2006b).

Projoth ve arkadaşlarının çalışmasında, dört gerinim ölçer içeren bir yük hücresi takım postuna rijit şekilde bağlanmış ve EN8 çeliğinin işlenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri doğrudan ölçülmüştür. Yük hücresinin oluşturduğu Wheatstone köprüsü, elastik gövdedeki mikro deformasyonları elektriksel sinyale dönüştürerek sistemin eksiksiz bir ölçüm zinciri oluşturmasını sağlamaktadır. Çalışmada elde edilen deneysel kuvvet değerlerinin tüm denemelerde tahmin edilen kuvvetlerle oldukça yakın çıkması, yük hücreli dinamometrenin tornalamada kesme kuvvetlerinin güvenilir biçimde ölçülmesini mümkün kıldığını göstermektedir. Bu yapı, proses parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği) kesme kuvveti üzerindeki etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesine de imkân tanımaktadır. Ayrıca yük hücreli dinamometrelerin literatürde takım aşınması takibi, kesme davranışının modellenmesi ve parametre değişimlerinin izlenmesi gibi pek çok talaşlı imalat uygulamasında yaygın biçimde kullanıldığı belirtilmektedir(Projoth vd., 2021b).

Şeker ve arkadaşları tarafından geliştirilen dinamometrede eğilme kirişli (bending-beam) yük hücreleri kullanılmış ve yaklaşık 2000 N kapasiteye sahip bu hücreler tornalama benzeri lineer talaş kaldırma işlemlerinde üç eksenli kuvvet ölçümü yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Düşük histerezis, yüksek doğruluk ve geniş çalışma sıcaklık aralığı sistemin güvenilirliğini artırmıştır. Deneysel kuvvet değerlerinin teorik hesaplamalarla uyumlu olması, tasarımın tekrarlanabilirlik ve doğruluk açısından başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu yapı, haddelenme yönünün talaş kaldırma davranışına etkilerinin incelenmesi gibi özel uygulamalarda avantaj sunmaktadır(Şeker vd., 2002b).

3.2.4.1. Yük hücreli dinamometre avantajlar :

- **Basit ve düşük maliyetli tasarım:**Kiriş tipi (beam type) veya tek eksenli strain-gage yapıları, üretim maliyeti düşük ve tasarımı basittir(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021; Umurani ve Siregar, 2019).
- **Kolay entegrasyon:**Sensörler takım tutucuya veya CNC tezgâhına kolayca monte edilebilir(Gunay vd., 2006b; Projoth vd., 2021b; Umurani ve Siregar, 2019b).
- **Yüksek doğruluk ve düşük hata oranı:**TEDEA / benzeri yük hücrelerinde toplam hata %0,02–0,03 FS seviyesindedir(Gunay vd., 2006b; Şeker vd., 2002b).
- **Düşük histerezis ve yüksek tekrarlanabilirlik:**%0,03 mertebesinde histerezis ve tekrarlanabilirlik ile stabil kuvvet ölçümü sağlar(Şeker vd., 2002b).
- **Geniş çalışma kapasitesi:**200–2000 N arası değişen yük hücresi kapasiteleri birçok talaş kaldırma koşulu için yeterlidir(Gunay vd., 2006b; Şeker vd., 2002b).
- **Teorik modellerle uyum:**Deneyisel F_c değerlerinin Kienzle gibi teorik modellerle uyumlu olması sensörün güvenilirliğini doğrular(Gunay vd., 2006b).
- **CNC ile uyumluluk:**CNC torna magazinine entegre edilebilen kompakt dinamometre tasarımları mümkündür(Gunay vd., 2006b).
- **Dayanıklı ve ağır koşullara uygun yapı:**Kiriş tipi hücreler sert işleme koşullarına karşı dayanıklıdır (Özdemir, H. , 2006).
- **Veri toplama sistemleriyle uyumluluk:**DAQ kartları ile kolay bağlantı sağlar; analog çıkışı işlemek kolaydır (Özdemir, H. , 2006).

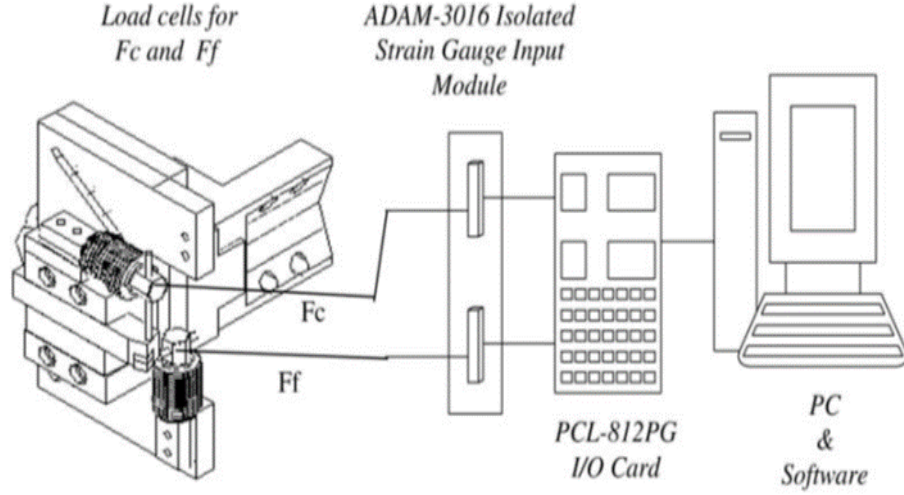
3.2.4.2. Yük hücreli dinamometre dezavantajlar

- **Eksen sınırlaması:**Basit tasarımlar genellikle **tek eksen (F_t)** veya **iki eksen (F_c – F_f)** ölçebilir; çok eksenli kuvvet ölçümü sınırlıdır(Gunay vd., 2006b; Projoth vd., 2021b; Umurani ve Siregar, 2019b).
- **Yük hücresi kapasitesi tasarımı sınırlar:**Seçilen talaş derinliği, ilerleme ve malzeme sertliği; sensör kapasitesine göre kısıtlanır (200–2000 N aralığında)(Gunay vd., 2006b; Şeker vd., 2002b).
- **Titreşim ve rijitlik etkilerine duyarlılık:**Kiriş tipi tasarımlar yüksek frekanslı titreşimlerde doğruluk kaybı yaşayabilir(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021; Şeker vd., 2002).

- **Montaj ve yüzey hazırlığı hassasiyeti:** Strain-gage montajı hassas yüzey hazırlığı ister; yanlış yapıştırma doğruluğu düşürür (Özdemir, H. , 2006).
- **Sıcaklık duyarlılığı:** Strain-gage sistemleri sıcaklık değişimlerinden etkilenir; kompanzasyon gerekebilir (Özdemir, H. , 2006).
- **Yan yük (off-axis) etkisi:** Yük hücreleri sadece belirlenen ekseninde iyi çalışır; çapraz yükler doğruluğu bozar (Şeker vd., 2002b).

3.2.4.3. Yük hücreli dinamometre kullanım alanları

- **Tornalama ve Shaping İşlemleri :**
 - Tek eksenli Ft veya çok eksenli Fc–Ff–Fp kuvvet ölçümü(Özdemir, H. , 2006; Gunay vd., 2006; Projoth vd., 2021; Şeker vd., 2002; Umurani ve Siregar, 2019).
 - Kesme hızının, ilerlemenin ve talaş derinliğinin kuvvet üzerindeki etkilerinin incelenmesi(Projoth vd., 2021b; Umurani ve Siregar, 2019b).
 - Talaş açısı, takım geometrisi, takım malzemesi gibi parametrelerin kuvvet davranışına etkilerinin deneysel olarak belirlenmesi(Özdemir, H. , 2006; Gunay vd., 2006).
- **Model Doğrulama ve Parametre Çalışmaları:**
 - Teorik kesme kuvveti modellerinin (Kienzle vb.) doğrulanması(Gunay vd., 2006b).
 - Parametrik analizler, işlem optimizasyonu çalışmaları(Projoth vd., 2021b).
- **Takım Durumu ve Aşınma İzleme:** Takım aşınmasının kuvvet artışına etkisinin belirlenmesi(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021).
- **Titreşim ve İşleme Kararlılığı İncelemesi:** Titreşim ve chatter eğiliminin değerlendirilmesi (dolaylı olarak kuvvet değişimlerinden)(Özdemir, H. , 2006; Projoth vd., 2021).
- **Akademik ve Eğitim Amaçlı Kullanımlar:** Basit ve düşük maliyetli yapısı nedeniyle eğitim ve laboratuvar çalışmaları için uygundur(Umurani ve Siregar, 2019b).
- **Hadde yönü gibi malzeme davranışı incelemeleri:** Rolling direction gibi üretim yönlerinin talaş kaldırmaya etkisinin belirlenmesi(Şeker vd., 2002b).



Şekil 3.3. Yük hücresi kullanılarak hazırlanan Kesme kuvveti ölçüm düzeneği(Gunay vd., 2006b).

3.2.5 Kablosuz/IoT tabanlı dinamometre sistemleri

Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için kullanılan klasik takım tutucu sensörleri, kablolu yapıdan çıkarılarak kablosuz veri aktarımı yapabilen akıllı sistemlere dönüştürülmüştür. Bu yaklaşımda gerinim ölçerlerden alınan düşük seviyeli sinyaller önce köprü devresinden çıkartılmakta, ardından yükseltilip ADC üzerinden dijitalleştirildikten sonra Bluetooth modülü aracılığıyla bilgisayara iletilmektedir. Böylece takım tutucu üzerinde oluşan kablo karmaşası ortadan kaldırılmış; daha esnek, düzenli ve gerçek zamanlı veri izleme imkânı sağlanmıştır(Uquillas ve Hsiao, 2016).

Kablosuz yapı aynı zamanda yüksek frekans içeren titreşim (chatter) verilerinin anlık olarak takip edilmesini mümkün kılmaktadır(Uquillas ve Hsiao, 2016).

Literatürde RF, GPRS, Bluetooth ve Zigbee gibi kablosuz iletişim yöntemlerinin düşük veri iletim hızları, sınırlı kapsama alanı ve bazı güvenlik zayıflıkları nedeniyle çoğunlukla kısa mesafeli ve basit uygulamalarda tercih edildiği; ayrıca yağış, sis ve elektromanyetik gürültü gibi çevresel faktörlerden etkilenerek performans kaybı yaşayabildikleri belirtilmektedir. Buna karşılık GPRS tabanlı sistemlerin daha güncel altyapıları sayesinde çevresel etkenlerden daha az etkilendiği vurgulanmaktadır. Ancak tez kapsamında geliştirilen düzeneğe cihazlar arası mesafenin çok kısa olması, ortamda harici elektromanyetik gürültünün yok denecek kadar az olması ve seçilen modülün ekonomik oluşu nedeniyle RF tabanlı bir kablosuz iletişim yapısı tercih edilmiş ve sistem bu yöntemle başarılı şekilde çalıştırılmıştır(Korkmaz, M. , 2019).

Tez çalışmasında ayrıca sekizgen halkalı gerinim ölçer tabanlı dinamometreye NRF24L01 modülü entegre edilerek kesme kuvvetlerinin uzaktan izlenmesi sağlanmıştır.

Analog kuvvet sinyalleri, verici Arduino tarafından dijital forma dönüştürülüp kablosuz olarak alıcı modüle aktarılmış; alıcı Arduino tarafından yeniden işlenerek gerçek zamanlı voltaj-kuvvet eğilimleri bilgisayar monitöründe başarılı şekilde görüntülenmiştir(Korkmaz, M. , 2019).

Literatürde modern kuvvet sensörlerinin kablosuz ölçüm sistemlerine yöneldiği belirtilmekte; strain-gage tabanlı yapılarda kızılötesi telemetri kullanılarak veri aktarımı yapılan örnekler bulunmaktadır. Bu çalışmalar, dinamometre sinyallerinin kabloya bağlı olmadan da iletilebileceğini ve sensörün takım gövdesine entegre edilerek kablosuz veri iletiminin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir(Vásquez Céspedes, 2011).

Vásquez (2011) tarafından sunulan örnek uygulamada, Wheatstone köprüsünden elde edilen gerinim sinyali önce yükseltilmiş, ardından kızılötesi (IR) bir verici diyot aracılığıyla alıcıya aktarılmıştır. Bu yaklaşım, kablo karmaşasını ortadan kaldırması, hızlı kurulum sağlaması ve atölye koşullarına kolay uyum göstermesi gibi avantajlara sahip olmakla birlikte; verici-alıcı eksen hizalaması gerektirmesi ve sıcaklık değişimlerinin sebep olduğu sürüklenme nedeniyle ek kalibrasyon ihtiyacı duyması gibi sınırlamalara da sahiptir(Vásquez Céspedes, 2011).

3.2.5.1. Kablosuz/Iot tabanlı dinamometre avantajlar

- **Ortam Düzeni ve Kablolamasız Kullanım**

- Kablo kullanımını ortadan kaldırdığı için, torna tezgâhındaki hareketli parçaların çalışma alanını kısıtlamaz(Uquillas ve Hsiao, 2016).
- Kablolama ihtiyacını ortadan kaldırır, sistemin taşınabilirliğini artırır(Korkmaz, M. , 2019).
- Kabloların ortadan kalkması, takım tutucu etrafında düzeni ve güvenliği artırır(Vásquez Céspedes, 2011).
- Üretim hattında kabloların kırılması, kopması veya gürültü alması gibi sorunları azaltır(Korkmaz, M. , 2019).

- **Kurulum Kolaylığı**

- Kurulum daha hızlı ve pratiktir, içeriye kablo döşeme ihtiyacı yoktur(Uquillas ve Hsiao, 2016).
- Atölye ortamına uyum, hızlı montaj ve kolay kullanım avantajları sunar(Vásquez Céspedes, 2011).

- **Enerji Verimliliği / Düşük Güç**
 - Bluetooth'un düşük güç tüketimi, sisteme enerji verimliliği sağlar(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - NRF24L01 modülü ile düşük güç tüketimi ve yeterli veri hızı elde edilir (250 kbps–2 Mbps)(Korkmaz, M. , 2019).
- **Endüstri 4.0 ve IoT Uyumu**
 - Sensör Endüstri 4.0 eğilimleriyle uyumludur; IoT tabanlı izleme uygulamalarına entegre edilebilir(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - Endüstri 4.0 ve IoT odaklı akıllı üretim sistemleri(Korkmaz, M. , 2019).
- **Gerçek Zamanlı İzleme**
 - Kablosuz yapı, chatter (titreşim) başlangıcının erken tespiti için gerçek zamanlı takip sağlar(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - Kesme kuvvetinin gerçek zamanlı takibi(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - Torna ve freze tezgâhlarında uzaktan kesme kuvveti izleme(Korkmaz, M. , 2019).
- **Ekonomik / Esnek Sistem**
 - Arduino tabanlı yapı sayesinde uygun maliyetli ve kolay özelleştirilebilir bir kablosuz ölçüm platformu sunar(Korkmaz, M. , 2019).
 - Gerinim ölçer + kablosuz aktarım kombinasyonu ekonomik bir çözüm sağlar(Korkmaz, M. , 2019).

3.2.5.2. Kablosuz/IoT tabanlı dinamometre dezavantajlar

- **Örnekleme ve Veri Hızı Sınırlamaları**
 - Kablosuz sistemde baud rate sınırlaması bulunduğu için örnekleme hızı kablolu sistemlere göre düşüktür (yaklaşık 230.400 bps)(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - Nyquist'e tam uygun olmayan örnekleme nedeniyle sinyalde aliasing (katlanma) oluşabilir(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - Bazı yüksek frekans bileşenleri doğrudan algılanamayabilir, alts örnekleme (undersampling) teknikleri gerekebilir(Uquillas ve Hsiao, 2016).
 - Sistem mimarisi, kablolu Kistler gibi ticari piezoelektrik dinamometrelere göre daha düşük frekans yanıtına sahiptir(Korkmaz, M. , 2019).

- **Kablosuz Haberleşme Problemleri**

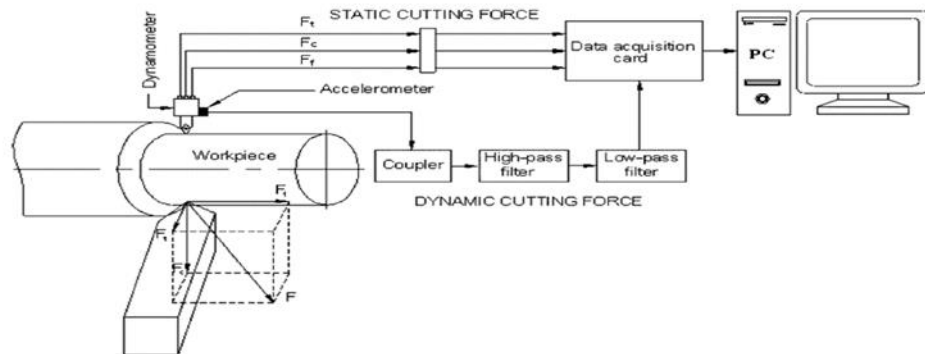
- RF tabanlı modüllerin iletişim mesafesi sınırlıdır (yaklaşık 20 m). Kablosuz iletişim; gürültü, engel, metal yüzeyler ve sinyal zayıflamasından etkilenebilir(Korkmaz, M. , 2019).

- **IR Haberleşmenin Sınırlamaları**

- Alıcı ve verici arasındaki doğrultu gereklidir.
- Kızılötesi sistem, sinyali doğru alabilmek için aynı ekseninde olmalıdır.
- Isı kaynaklı sürüklenme (thermal drift) için ek kompanzasyon gerekir(Vásquez Céspedes, 2011).

3.2.5.3. Kablosuz/IoT tabanlı dinamometre kullanım alanları

- Tornalamada chatter (titreşim) başlangıcının erken tespiti..
- Kesme kuvvetinin gerçek zamanlı takibi.
- Takım tutucu üzerinden online proses izleme.
- Kablolü dinamometre kullanımının mümkün olmadığı tezgâh içi uygulamalar(Uquillas ve Hsiao, 2016).
- Torna ve freze tezgâhlarında uzaktan kesme kuvveti izleme.
- Takım aşınması, takım kırılması ve proses kontrolü için gerçek zamanlı gözetim.
- Endüstri 4.0 ve IoT odaklı akıllı üretim sistemleri.
- Kablosuz veri toplamaya ihtiyaç duyulan mobil / kompakt üretim hücreleri(Korkmaz, M. , 2019).



Şekil 3.4. Kablosuz tabanlı bir DeneySEL kurulumun şematik gösterimi(Yaldız ve Ünsaçar, 2006b).

3.2.6 MEMS tabanlı dinamometre sistemleri

MEMS tabanlı kuvvet sensörleri, polikristal silikon rezonatörlerin kuvvet uygulanmasıyla değişen doğal titreşim frekanslarını ölçerek kuvveti dolaylı biçimde algılayan mikro ölçekli yapılardır. Kompakt boyutları, takım gövdesine doğrudan entegre edilebilmelerine olanak tanırken, rezonatör tabanlı bu yapı yüksek hassasiyet ve geniş bant yanıtı sağlamaktadır. Teknolojinin hâlen deneysel aşamada olması, bu sensörlerin ticari dinamometre sistemlerine tam entegrasyonunun zaman alabileceğini göstermektedir(Vásquez Céspedes, 2011).

MEMS tabanlı piezodirençli gerinim ölçerler, silikon tabanlı piezorezistörlerin mekanik gerinime bağlı olarak direnç değiştirmesi prensibine dayanan mikro ölçekte sensör elemanlarıdır. Çalışmada kullanılan MEMS gerinim ölçer, üst ve alt katmanı poliimid izolasyonla kaplanmış; orta katmanında ise piezorezistif yarı iletken eleman, altın bağlantı telleri, metal pad ve metal pin içeren bir sandviç yapıdan oluşmaktadır. Bu yapı, küçük boyutu, yüksek duyarlılığı, büyük direnç değeri ve seri üretime uygun MEMS üretim teknikleri sayesinde akıllı kesici takımlara entegre edilmeye elverişlidir. Kullanılan ticari MEMS gerinim ölçerin elektriksel direnci $1000\ \Omega$, duyarlılık katsayısı (sensitivity coefficient) $150 \pm 5\%$ ve boyutları $3 \times 0,20 \times 0,04\ \text{mm}^3$ olarak rapor edilmiştir. Bu özellikler doğrultusunda MEMS sensör, geliştirilen akıllı kesici takımda X ve Y doğrultularında kesme kuvvetlerini ölçmek üzere tercih edilmiştir.(Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Bu çalışmada geliştirilen MEMS tabanlı yarı iletken gerinim ölçerler, yüksek gauge factor değerleri sayesinde geleneksel metal folyo sensörlere kıyasla belirgin biçimde daha yüksek hassasiyet sunmaktadır. Sensörün yaklaşık 771 Hz seviyesinde ölçülen doğal frekansı, dinamik testlerde kesme kuvveti değişimlerine hızlı ve kararlı biçimde yanıt verebildiğini göstermiştir. Bu performans, MEMS tabanlı yapıların yüksek hızlı talaşlı imalat uygulamalarında dinamik kesme kuvvetlerinin güvenilir şekilde izlenmesi için güçlü bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymaktadır(Zhao vd., 2016).

İlgili çalışmada, tornalamada iki eksenli kesme kuvvetinin ölçülmesi amacıyla MEMS tabanlı piezodirençli gerinim ölçerlere sahip kompakt bir dinamometre geliştirilmiştir. Sensörler, birbirine dik konumlandırılmış çift sekizgen halka (TMPOR) yapısına entegre edilmiş; sonlu elemanlar analizleriyle belirlenen maksimum gerinim

bölgelerine yerleştirilerek deformasyonun doğrudan algılanması sağlanmıştır. Bu tasarımla elde edilen duyarlılık değeri 0,31 mV/N, doğal frekans ise 771 Hz olarak rapor edilmiş; ayrıca geleneksel folyo tipi gerinim ölçerlere kıyasla yaklaşık 16 kat daha yüksek hassasiyet sağlandığı belirtilmiştir(Mohanraj vd., 2023).

3.2.6.1. MEMS tabanlı kuvvet sensörlerinin avantajları

- **Mikro boyut ve entegrasyon kolaylığı:**MEMS sensörler çok küçük boyutlara sahiptir; kesici takım gövdesine veya takım tutucuya gömülü biçimde entegre edilebilir, kesme bölgesine oldukça yakın konumlandırılabilir ve tezgâhtaki hareket alanını kısıtlamaz(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Yüksek hassasiyet / yüksek gauge factor:**Yarı iletken tabanlı MEMS piezodirençler, metal folyo strain-gage'lere göre onlarca kat (yaklaşık 16 kata ve $\sim 150 \pm 5\%$ gauge factor seviyelerine) varan duyarlılık sunar; bu sayede üç eksenle çok küçük kuvvet değişimleri bile güvenilir biçimde algılanabilir(Mohanraj vd., 2023; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Yüksek rijitlik + hassasiyet kombinasyonu:**MEMS elemanlar, sensör yapısının rijitliğini önemli ölçüde korurken hassasiyetten ödün vermeden ölçüm yapılmasına imkân tanır(Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Düşük kütle ve yüksek doğal frekans:**Sensör boyutlarının küçük ve kütlelerinin düşük olması, sistemin doğal frekansını yükseltir (yaklaşık 700–770 Hz ve civarı) ve yüksek hızlı talaşlı imalat koşullarında bile dinamik kuvvetlerin izlenmesine olanak tanır(Mohanraj vd., 2023; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Azaltılmış çapraz etkileşim (cross-talk):**Özellikle sekizgen halka gibi optimize edilmiş taşıyıcı yapılarla birleştirildiğinde, eksenler arası girişim oranı %0,14–4,4 aralığına kadar indirilebilmektedir; bazı tasarımlarda X–Y yönleri arasında yalnızca %2–3 civarında çapraz etkileşim rapor edilmiştir(Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Kompakt yapı, seri üretim ve nispeten düşük maliyet:**MEMS üretim teknolojileri, seri üretime uygun mikro-fabrikasyon süreçleri ile hassas, tekrarlanabilir ve görece olarak düşük maliyetli sensörler elde edilmesini sağlar.

Küçük boyut, kablo kanalı ve Wheatstone köprü devreleriyle entegre kompakt sensör tasarımlarına imkân verir(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

- MEMS tabanlı kuvvet sensörleri, kesici takıma gömülü “akıllı takım” yapılarının geliştirilmesine, gerçek zamanlı kuvvet izlemeye ve Endüstri 4.0 / IoT tabanlı durum izleme ve kestirimci bakım sistemlerine entegrasyona elverişlidir(Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018).

3.2.6.2. MEMS tabanlı kuvvet sensörlerinin dezavantajları / sınırlılıkları

- **Sıcaklık duyarlılığı:**Yarı iletken piezodirençler, metal strain-gage'lere göre sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenir; sıcaklık katsayıları yüksektir ve sıcaklık kompanzasyonu yapılması gerekir(Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018; Mohanraj vd., 2023; Zhao vd., 2016).
- **Bağlantı ve montaj hassasiyeti:**MEMS sensörlerin performansı, yapıştırma kalitesi, adeziv kalınlığı, sensör konumu ve yüzey hazırlığına oldukça duyarlıdır. Bağlantıdaki küçük hatalar, özellikle bazı eksenlerde (örneğin Fp) lineerlik, tekrarlanabilirlik ve genel doğruluk üzerinde olumsuz etki yapabilir(Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Sınırlı deformasyon/tolerans aralığı:**MEMS sensörler genellikle küçük deformasyon aralıkları için tasarlanmıştır; yüksek yük ve aşırı şekil değiştirme durumlarında zarar görebilir, bu nedenle özel paketlenme ve koruma tabakaları gerektirir(Mohanraj vd., 2023).
- **Çevresel etkilere hassasiyet:**Mikro bağlantılar ve ince film yapıları nedeniyle çevresel faktörlere karşı daha hassastırlar; bu da uzun dönem kararlılık ve dayanıklılık açısından ek tasarım önlemleri gerektirir(Mohanraj vd., 2023).
- **Sistem montajına bağlı doğal frekans sapmaları:**Tezgâh–takım birleşiminin rijitliği, laboratuvar ortamında elde edilen doğal frekans değerlerinin gerçek çalışma koşullarında bir miktar düşmesine neden olabilir; bu da dinamik performansın montaj şartlarına bağlı olduğunu gösterir(Zhao vd., 2016).

3.2.6.3. MEMS tabanlı kuvvet sensörlerinin başlıca kullanım alanları

- **Tornalamada ve diğer talaş kaldırma işlemlerinde üç eksenli kesme kuvveti ölçümü:** F_c , F_f ve F_p bileşenlerinin aynı anda ölçülmesi; talaş kaldırma bölgesindeki yük dağılımının ve kesme mekanizmasının analiz edilmesi (Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Takım aşınması ve takım durumu / takım ömrü izleme:** Kesme kuvveti bileşenlerindeki küçük değişimleri algılayabildiği için, takım aşınmasının ve kesme durumundaki bozulmaların erken tespitinde kullanılabilir; kesme parametrelerinin (V_c , f , a_p) optimizasyonuna katkı sağlar (Mohanraj vd., 2023; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **chatter analizi, dinamik kuvvet davranışı:** Yüksek doğal frekans ve duyarlılık sayesinde titreşim, chatter başlangıcı, durma-başlama esnasındaki ani yüklenmeler ve dinamik kuvvet dalgalanmaları detaylı olarak incelenebilir (Mohanraj vd., 2023; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Akıllı kesici takımlar ve mikro işleme uygulamaları:** CNC torna ve freze tezgâhlarında doğrudan takım gövdesine gömülü kuvvet sensörleri ile “akıllı takım” tasarımları; mikro frezeleme, mikro tornalama gibi mikro imalat süreçlerinde mikro kuvvet ölçümü (Mohanraj vd., 2023; Vásquez Céspedes, 2011; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).
- **Genel sensör uygulamaları:** Titreşim, ivme, basınç ve mikro hareket algılama gibi çok farklı fiziksel büyüklüklerin ölçümünde kullanılabilir (Mohanraj vd., 2023).

3.3 Dinamometre Performanslarının Karşılaştırılması

Farklı sensör teknolojilerine dayanan dinamometre sistemleri, ölçüm performansı açısından belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Bu sistemler genellikle şu ölçütlere göre değerlendirilir:

- Hassasiyet (duyarlılık)
- Çapraz duyarlılık (cross-talk)
- Dinamik tepki frekansı
- Sistem maliyeti
- Kalibrasyon zorluğu
- Modülerlik ve entegrasyon kolaylığı

3.3.1 Hassasiyet ve duyarlılık

Piezoelektrik sistemler, en yüksek duyarlılığı sağlayan teknolojilerdendir. Örneğin:

Araştırılan makalede, piezo tabanlı sistem 0,1 N hassasiyet ile çalışmakta ve %1,5 altında hata vermektedir(Horváth vd., t.y.).

Totis ve Sortino (2011), geliştirdikleri piezo halkalı modüler dinamometrede kullanılabilir frekans bant genişliğinin uygun filtreleme ile tüm eksenlerde yaklaşık 1 kHz'e kadar genişletilebildiğini; karşılaştırma için incelenen ticari plaka tipi piezoelektrik dinamometrede ise sistem frekans cevabının 500 Hz'in altında kaldığını bildirmiştir(Totis ve Sortino, 2011b).

Mohanraj vd. tarafından geliştirilen MEMS tabanlı sensör, iki eksenli kuvvet ölçümü için iki adet birbirine dik konumlandırılmış sekizgen halka (TMPOR) üzerine yerleştirilmiş piezorezistif gerinim ölçerlerden oluşmaktadır. Geliştirilen sensörde eksen başına elde edilen hassasiyet 0,31 mV/N seviyesindedir ve doğal frekansı 771 Hz olarak rapor edilmiştir. (Mohanraj vd., 2023).

Zhao vd. (2018) tarafından geliştirilen MEMS tabanlı akıllı kesici takımında, X ve Y yönlerindeki kesme kuvvetleri için hassasiyet her iki köprüde de **0,1 mV/N** olarak elde edilmiştir. Statik kalibrasyon sonucunda çapraz enterferans hatası X yönünde **%1,97**, Y yönünde ise **%3,03** olarak rapor edilmiştir(Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Strain gauge tabanlı sistemler genellikle daha düşük hassasiyet sağlasa da, birçok çalışmada yeterli doğrulukla kuvvet ölçümleri yapabildikleri ortaya konmuştur.

Rizal vd. (2018), geliştirdikleri üç eksenli strain-gage tabanlı dinamometrede hassasiyetin yaklaşık $31,3 \times 10^{-3} - 172,4 \times 10^{-3} \text{ mV/N}$ aralığında olduğunu ve özellikle radyal kuvvet bileşeni için çapraz duyarlılık hatasının **%0,87 düzeyinin altında kaldığını** bildirmiştir(Rizal vd., 2018b).

Derlemede, farklı halka geometrilerinin ölçüm duyarlılığını belirgin şekilde etkilediği; özellikle eliptik sekizgen halkaların daha yüksek deformasyon üreterek sensör duyarlılığını artırdığı vurgulanmıştır(Mohanraj vd., 2023).

Makalenin statik kalibrasyon sonuçlarına göre geliştirilen akıllı kesici takım, hem X hem de Y yönlerinde **0,1 mV/N** hassasiyete sahiptir ve bu değer küçük kesme kuvvetlerindeki değişimleri algılamak için yeterli duyarlılık sunmaktadır(Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Çalışmada kullanılan düz çubuk tipi yük hücresinin, özellikle düşük elastik modüllü POM ve PTFE malzemelerinde oluşan küçük tangensiyel kuvvet değişimlerine karşı yeterli duyarlılık gösterdiği, statik kalibrasyonun 0,05–0,5 N aralığında doğrusal yanıt verdiği belirtilmiştir(Umurani ve Siregar, 2019b).

Çalışmada kullanılan dört gerinim ölçerli yük hücresi, EN8 çeliğinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerini doğrudan ve doğrusal şekilde algılayabilmiş; deneysel değerlerin tahmin edilen değerlerle neredeyse tamamen örtüşmesi sensör düzeninin yeterli duyarlılığa sahip olduğunu göstermiştir(Projoth vd., 2021b).

Çalışmada, takım gövdesindeki elastik bölgenin geometrik olarak optimize edilmesiyle ince film gerinim sensörünün yerel deformasyonu daha etkili algıladığı ve buna bağlı olarak sensörün statik duyarlılığının belirgin biçimde yükseldiği görölmüştür(Cheng vd., 2022).

Çalışmada, ince film direnç ızgaralarıyla oluşturulan üç tam köprü devresinin yüksek doğrusal yanıt verdiği ve film sensörün Ni–Cr alaşımının yüksek gerinim katsayısı sayesinde dinamometrenin ölçüm duyarlılığını belirgin biçimde artırdığı gösterilmiştir(Zhang vd., 2019).

Statik kalibrasyon sonuçları, yeni tasarlanan triaxial piezoelektrik dinamometrenin üç ekseninde % 6'nın altında statik hata ve % 3'ün altında çapraz etkileşimle çalışarak yarı finiş ve finiş işleme koşullarında yeterli ölçüm hassasiyeti sunduğunu göstermiştir(Totis ve Sortino, 2011b).

Geliştirilen gerinim ölçerli dinamometrenin 200 kg'a kadar olan kesme ve ilerleme kuvvetlerini ölçebildiği, deney sonuçlarında artan talaş derinliğiyle birlikte kuvvet değerlerinin doğrusal şekilde yükselmesi sensörün yeterli duyarlılığa sahip olduğunu göstermiştir(Lad ve Patel, t.y.).

3.3.2 Dinamik yanıt ve frekans performansı

Dinamik yük altında ölçüm başarısı özellikle kesintili kesme işlemlerinde önemlidir:

Totis ve Sortino (2011), piezo halkalı modüler dinamometrede kullanılabilir frekans bant genişliklerini X, Z ve Y yönlerinde sırasıyla **656 Hz, 544 Hz ve 984 Hz** olarak rapor etmiş; referans alınan ticari plaka tipi piezo dinamometre konfigürasyonunda ise sistem frekans cevabının **500 Hz'in altında kaldığını** ve bu nedenle yeni sistemle daha geniş frekans bandında kuvvet verisi toplanabildiğini belirtmiştir(Totis ve Sortino, 2011b).

Çalışmada, bir dinamometrenin doğal frekansının kesme titreşimlerinin en az dört katı olması gerektiği ve bu nedenle ring sertliğinin artırılıp kütlelenin azaltılmasının dinamik yanıtı iyileştirdiği belirtilmiştir(Mohanraj vd., 2023).

Çalışmada, sensörün elde ettiği yüksek hassasiyet ve lineerlik sayesinde akıllı kesici takımın yüksek hızlı ve hassas talaşlı imalat koşullarında kullanılabilecek dinamik kararlılığa sahip olduğu belirtilmiştir(Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Elde edilen deneysel sonuçlar, farklı iş mili hızlarında tangensiyel kuvvet tepkisinin ani dalgalanmalara yol açmadan stabil şekilde değiştiğini, dolayısıyla sistemin düşük hızlı talaşlı imalat koşullarında yeterli dinamik kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir(Umurani ve Siregar, 2019b).

Dönen sistemin her deneme noktasında deneysel ve tahmini kuvvet değerlerinin yakın seyretmesi, yük hücresinin CNC tornalama sırasında değişen hız, ilerleme ve talaş derinliği koşullarında kararlı bir dinamik yanıt verdiğini kanıtlamaktadır(Projoth vd., 2021b).

Statik yükleme denemelerinde sensörün uygulanan kuvvete anlık olarak karşılık veren ve kısa sürede kararlı bir seviyeye ulaşan gerinim ve çıkış voltajı eğrileri, sistemin dinamik ölçüm koşullarında yeterli tepki hızına sahip olduğunu ortaya koymaktadır(Cheng vd., 2022).

Sonlu eleman analizi, maksimum gerilmenin sensör merkezinde yoğunlaştığını ve yapı içinde kararlı bir deformasyon dağılımı oluştuğunu ortaya koyarak dinamometrenin yüksek rijitlik altında hızlı ve güvenilir bir ölçüm tepkisine sahip olduğunu doğrulamıştır(Zhang vd., 2019).

Dynamometrenin frekans bant genişliği X yönünde 656 Hz, Z yönünde 544 Hz ve Y yönünde 984 Hz olarak belirlenmiş; uygun filtreleme ile tüm eksenlerde kullanılabilir bant genişliğinin 1 kHz'e kadar genişletilebildiği doğrulanmıştır(Totis ve Sortino, 2011b).

Etki tepki testlerinde cihazın doğal frekanslarının yatay yönde **737 Hz**, dikey yönde ise **1067 Hz** olarak belirlenmesi, tasarımın titreşim etkilerini bastıracak düzeyde yüksek bir dinamik performansa sahip olduğunu göstermiştir(Rizal vd., 2018b).

Çalışmada geliştirilen yük hücresinin 200 kg'a kadar tasarlanan kuvvet aralığında güvenli biçimde çalıştığı, elde edilen deneysel sonuçlarda maksimum 65,92 kg kuvvetin dahi tasarım sınırının oldukça altında kaldığı ve bu nedenle sistemin verilen yük koşulları altında güvenli olduğu doğrulanmıştır(Lad ve Patel, t.y.).

3.3.3 Çapraz duyarlılık (cross-talk) ve ayrıştırma başarısı

Birden fazla eksenle kuvvet ölçümü yapılırken eksenler arası sinyal karışması önemli bir sorundur.

Rizal vd. (2018) tarafından geliştirilen sekizgen halka tabanlı dinamometrede, geometrik olarak optimize edilen halka yapısı sayesinde eksenler arası çapraz etkileşim **%0,87 seviyesine kadar düşürülmüş**, böylece kuvvet bileşenlerinin bağımsız ölçümü önemli ölçüde iyileştirilmiştir.(Rizal vd., 2018b).

Sekizgen ve türevi halka yapılarında gerinim bölgelerinin doğru belirlenmesiyle çapraz duyarlılığın azaltılabildiği; uygun konumlandırılmış strain-gauge yerleşiminin cross-talk değerlerini %1'in altına indirebildiği ifade edilmiştir(Mohanraj vd., 2023).

Statik kalibrasyon bulgularına göre sistemin X ve Y yönlerindeki çapraz enterferans değerleri sırasıyla **%1,97** ve **%3,03** olarak ölçülmüş; bu düşük seviyedeki cross-talk, her eksenin kendi kuvvet bileşenini diğerinden bağımsız biçimde doğru şekilde algılayabildiğini göstermektedir(Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Çalışmada kullanılan düz çubuk tip yük hücresi yalnızca tangensiyel kuvveti (Ft) ölçebilen tek eksenli bir yapıya sahip olduğundan, sensör doğrudan Ft bileşenini

algılamakta ve çok eksenli sistemlerde gerekli olan kuvvet ayrıştırmasına ihtiyaç duyulmamaktadır(Umurani ve Siregar, 2019b).

Çalışmada kullanılan yük hücreli dinamometre, torna işleminde kesme kuvvetinin tek bir bileşenini ölçmek amacıyla kullanılmış olup, kuvvet bileşenlerinin ayrıştırılmasına veya eksenler arası etkileşim analizine yönelik bir uygulama raporlanmamıştır(Projoth vd., 2021b).

İnce film direnç ızgarasının takım gövdesinde gerininin en yüksek olduğu bölgeye yerleştirilmesi, sensörün uygulanan dış kuvvetin oluşturduğu lokal deformasyonu doğrudan algılamasını sağlayarak ölçüm duyarlılığını artırmaktadır(Cheng vd., 2022).

Dinamometrenin sekizgen bağlantı plakasına simetrik yerleştirilen film ızgaraları ve üç tam köprü devresi, F_x ve F_z bileşenlerinin devre 3 tarafından ayrıştırılmasını sağlayarak sistemde çok yönlü kuvvetlerin neden olduğu etkileşimi etkin biçimde azaltmaktadır(Zhang vd., 2019).

Statik testlerde eksenler arası crosstalk değerlerinin F_x – F_y arasında %2,94'e, F_z – F_x / F_y arasında ise %1,81'in altına düşmesi, sensörün üç kuvvet bileşenini birbirinden büyük oranda ayırıştırabildiğini göstermektedir(Totis ve Sortino, 2011b).

Çapraz duyarlılık analizinde F_r yönündeki hata oranının yalnızca %0,87 olduğu, diğer bileşenlerde ise hataların çoğunlukla %5'in altında seyrettiği; sadece F_f bileşeninin F_c ölçümüne etkisinin %9,58'e ulaştığı belirlenmiştir(Rizal vd., 2018b).

3.3.4 Maliyet ve uygulama kolaylığı

Maliyet açısından strain gauge sistemler öne çıkmaktadır:

Lad ve arkadaşlarının çalışmasında geliştirilen strain gauge sistemin maliyeti yalnızca 7190 ₹ olarak hesaplanmıştır(Lad ve Patel, t.y.).

Umurani ve Siregar (2019) tarafından geliştirilen tek eksenli düz bar load-cell tabanlı dinamometre yalnızca **120 USD** maliyetle üretilebilmiş ve bu sayede düşük bütçeli, basit kuvvet ölçümü gerektiren uygulamalar için uygun bir alternatif olarak sunulmuştur.(Umurani ve Siregar, 2019b).

Vásquez Céspedes (2011), piezoelektrik tabanlı kuvvet ölçüm sistemlerinin yüksek performans sunmasına rağmen, yüksek izolasyon gereksinimleri, özel kuartz sensörler, amplifikatörler ve sinyal şartlandırıcı devre ihtiyaçları nedeniyle kurulum ve

bakım maliyetlerinin oldukça yüksek olduğunu vurgulamaktadır.(Vásquez Céspedes, 2011).

Piezoelektrik dinamometrelerin yüksek duyarlılık ve geniş bant genişliği sağlamasına karşın maliyetlerinin küçük ve orta ölçekli işletmeler için yüksek olduğu; buna karşılık strain-gauge tabanlı sistemlerin düşük maliyetli ve daha kolay uygulanabilir çözümler sunduğu belirtilmiştir(Mohanraj vd., 2023).

Ticari MEMS gerinim ölçerlerin küçük boyutu, yüksek direnci ve yüksek duyarlılığı sayesinde geliştirilen sistem kompakt, hafif ve CNC tezgâhlara ek bir modifikasyon gerektirmeden entegre edilebilen düşük maliyetli bir çözüm olarak sunulmuştur(Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Tasarımın temel hedefleri olan sadelik ve düşük maliyet doğrultusunda geliştirilen dinamometre toplamda **120 USD** maliyetle üretilmiş ve hem Arduino tabanlı veri toplama sistemiyle uyumluluğu hem de kolay montaj yapısı sayesinde ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm olarak sunulmuştur(Umurani ve Siregar, 2019b).

Yük hücresinin doğrudan takım tutucuya sabitlenebilmesi, sensör-köprü yapısının hazır birimlerden oluşturulması ve ölçümlerin panel üzerinden anlık okunabilmesi, sistemin ek donanım gerektirmeden kolay uygulanabilir ve atölye kullanımına uygun bir yapıda olduğunu göstermektedir(Projoth vd., 2021b).

Geliştirilen ince film sensörlü takım tasarımında sensörün doğrudan takım gövdesine entegre edilebilmesi, ilave dinamometre gereksinimini ortadan kaldırarak sistemi hem yapısal olarak sadeleştirmekte hem de uygulama kolaylığı sağlamaktadır(Cheng vd., 2022).

Film sensörün vakumla lehimlenerek elastomere doğrudan bağlanması, yapıştırma süreçlerinin neden olduğu hataları ortadan kaldırarak hem montajı sadeleştirmekte hem de uzun süreli kullanım için daha kararlı bir sensör entegrasyonu sunmaktadır(Zhang vd., 2019).

Piezo halkalı sensörün ticari bir takım sapına entegre edildiği modüler yapı, kesici ucun değiştirilmesinde sensör ön yükünü bozmadan işlem yapılmasına izin vererek endüstriyel kullanımda önemli bir uygulama kolaylığı sağlamaktadır(Totis ve Sortino, 2011b).

Oktagonal halkaların standart takım tutucuya iki plaka arasında yerleştirilmesi, sistemin torna tezgâhına ek yapısal modifikasyon gerektirmeden kurulabilmesine olanak sağlayarak uygulama kolaylığını artırmıştır(Rizal vd., 2018b).

3.3.5 Modülerlik, entegrasyon ve kullanılabilirlik

Takım entegrasyonuna uygun sistemler üretim ortamları için daha avantajlıdır:

Cheng vd. (2022), ince-film sensör entegre edilmiş torna takımı yapılarında hızlı sensör montajı, kolay değiştirilebilirlik ve çoklu aralıkta gerçek zamanlı kuvvet ölçümü sağlayan üç farklı entegrasyon mimarisi geliştirmiştir.(Cheng vd., 2022).

Totis ve Sortino (2011), piezo halkalı sensörün modüler kartuş yapısı sayesinde kesici ucun değiştirilmesi sırasında sensör ön yükünün bozulmadığını ve bunun sistemin en önemli tasarım kazanımlarından biri olduğunu vurgulamıştır(Totis ve Sortino, 2011b).

Khammongkhon vd. (2025) tarafından geliştirilen modüler yük hücresi tabanlı dinamometre, ana kesme kuvvetini **300 kgf'ye kadar** ölçebilecek kapasitede olup, kompakt ve modüler yapısı sayesinde bakım, entegrasyon ve taşınabilirlik açısından endüstriyel uygulamalara son derece uygun bir çözüm olarak sunulmuştur.(Khammongkhon vd., 2025b).

Tasarlanan akıllı kesici takımın gövdesine açılan özel yuvalara MEMS strain-gauge'ların yerleştirilebilmesi ve Wheatstone köprülerinin doğrudan takım üzerinde organize edilebilmesi, sistemin CNC tezgâhlarda yüksek uyumluluk ve kolay entegrasyon sağladığını göstermektedir(Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Düz çubuk yük hücresinin doğrudan takım tutucuya bağlanabilmesi ve ölçüm verilerinin Arduino–LCD sistemi üzerinden anlık olarak görüntülenebilmesi, dinamometrenin konvansiyonel torna tezgâhlarına ek bir modifikasyon gerektirmeden entegre edilebilen pratik ve kullanıcı dostu bir yapıda olduğunu göstermektedir(Umurani ve Siregar, 2019b).

Yük hücresi ve sensör montajının tek gövde üzerine entegre edilmesi sayesinde dinamometre doğrudan torna tezgâhının takım postuna bağlanmış; bu da sistemin CNC ortamında herhangi bir ek adaptöre ihtiyaç duymadan kullanılmasına olanak sağlamıştır(Projoth vd., 2021b).

Çalışmada sunulan elastik kovanlı, hızlı tak-çıkart yapılı ve kilitlemeli yerleştirme mekanizmasına sahip üç farklı entegrasyon mimarisi, ince film sensörün takım üzerine

hızlı, güvenilir ve değiştirilebilir biçimde monte edilebilmesine olanak tanıyarak sistemin kullanım esnekliğini artırmıştır(Cheng vd., 2022).

Değiştirilebilir uç geometrileriyle uyumlu flanş bağlantılı yapı ve sensörün octagonal plakalara vakumla sabitlenmesi, dinamometrenin farklı takım konfigürasyonlarında yeniden kalibre edilerek kolayca kullanılabilmesini sağlamaktadır(Zhang vd., 2019).

Tasarımın modüler kartuş yapısı sayesinde farklı pozitif ve negatif uç geometrilerinin aynı gövdeye kolayca takılabilmesi, dinamometrenin çok eksenli tornalama operasyonlarına yüksek uyumlulukla entegre edilebilmesini mümkün kılmıştır(Totis ve Sortino, 2011b).

Dinamometrenin geometrik tasarımının, takım sapının değiştirilmesine rağmen sensör düzeninin aynı kalmasına izin vermesi, sistemi modüler ve farklı tornalama operasyonlarına kolayca uyarlanabilir bir ölçüm aracı hâline getirmiştir(Rizal vd., 2018b).

Arduino tabanlı veri toplama kartının doğrudan gerinim ölçer devresine bağlanabilmesi ve ek bir yapısal modifikasyon gerektirmeden standart torna takım postuna entegre edilebilmesi, sistemin pratik ve eğitim amaçlı kullanıma son derece uygun olduğunu göstermiştir(Lad ve Patel, t.y.).

3.3.6 Karşılaştırmalı analizler

Torna tezgâhlarında kullanılan dinamometre sistemlerinin birbirlerine göre performans, uygulama kolaylığı, maliyet ve analiz kabiliyeti gibi açılardan karşılaştırılması, uygulama ihtiyaçlarına en uygun çözümün seçilmesinde kritik rol oynar. Aşağıdaki çizelge 3.1. yaygın dinamometre türleri temel kriterler açısından kıyaslanmıştır:

Çizelge 3.1. Dinamometre türleri temel kriterler açısından kıyası

Özellik / Sistem Türü	Strain Gauge	Piezoelektrik	Film Sensör	Yük Hücresi	Kablosuz/IoT	MEMS
Hassasiyet	Orta-Yüksek	Çok Yüksek	Düşük	Yüksek	Sensöre bağlı	Çok Yüksek
Dinamik Yanıt	Orta	Çok Yüksek	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Maliyet	Düşük	Yüksek	Çok Düşük	Orta	Orta-Yüksek	Yüksek
Uygulama Kolaylığı	Orta	Zor	Kolay	Kolay	Kolay	Zor
Montaj Zorluğu	Orta	Zor	Kolay	Kolay	Orta	Zor
Veri İşleme Gereksinimi	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Çevresel Etkilenme	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük	Orta	Orta

Bu analizde görüldüğü gibi, **piezoelektrik sistemler** ölçüm hassasiyeti ve dinamik yanıt açısından en güçlü adaylardır. Ancak maliyet ve karmaşıklık nedeniyle yaygın endüstriyel kullanımda sınırlamaları vardır. Strain gauge sistemler, uygun maliyetli olmalarının yanı sıra yeterli doğruluk sunarak güvenilir bir çözüm sağlar. Buna karşılık, film sensörlü sistemler ise genellikle düşük bütçeli deneysel çalışmalarda tercih edilmektedir. **Kablosuz sistemler** kullanım kolaylığı ve mobilite sağlarken, **MEMS sistemler** mikro ölçekte yüksek hassasiyetli uygulamalar için geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir.

3.4. Zorluklar Ve Gelecek Araştırma Alanları

Dinamometre sistemleri; sensör teknolojilerinin gelişmesi, veri işleme kapasitesinin artması ve dijital üretim yaklaşımlarının yaygınlaşmasıyla önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bununla birlikte, yüksek hassasiyetli kuvvet ölçümü için çözülmesi gereken bazı teknik zorluklar ve gelecekte odaklanılması gereken araştırma alanları bulunmaktadır.

3.4.1 Zorluklar

- **Yüksek sıcaklık:** Sensör performansını ve kararlılığını olumsuz etkileyebilir.

- **Mekanik gürültü ve titreşim:** Ölçüm doğruluğunu sınırlayabilen bir diğer önemli etkidir.
- **Kablosuz sistemlerde enerji yönetimi:** Batarya ömrü ve güç tüketimi önemli bir sınırlamadır.
- **Kalibrasyon karmaşıklığı:** Çok eksenli sistemlerde her eksenin ayrı kalibrasyonu zorlayıcıdır.
- **Sistem entegrasyonu:** CNC tezgâhlarla mekanik ve yazılımsal uyumluluk gerektirir.
- **Veri işleme yükü:** Yüksek örnekleme frekansları büyük veri hacimleri oluşturarak gerçek zamanlı analiz yükünü artırır.

3.4.2 Gelecek yönelimler

- **Sensör füzyonu:** MEMS, piezoelektrik ve ince film sensörlerin bir arada kullanılmasıyla geniş ölçüm aralığı ve daha yüksek doğruluk elde edilebilir.
- **Yapay zekâ destekli izleme:** Kesme kuvvetlerinin gerçek zamanlı yorumlanmasında makine öğrenimi algoritmalarının kullanımı artmaktadır.
- **Takıma entegre mikro sensörler:** Gelecekte MEMS tabanlı sensörlerin doğrudan kesici takımlara gömülmesiyle sürekli kuvvet takibi mümkün olacaktır.
- **Gerçek zamanlı bulut veri analizi:** 5G ve IoT altyapıları ile kesme kuvveti verilerinin uzaktan anlık işlenmesi mümkün hâle gelmektedir.
- **Enerji hasat eden sensör sistemleri:** Kablosuz ölçüm birimlerinde batarya ihtiyacını azaltmayı hedefleyen yeni teknolojiler geliştirilmektedir.
- **Hibrit sensör yapıları:** Aynı gövde içinde birden fazla sensör teknolojisinin birlikte kullanıldığı yeni nesil kuvvet sensörleri gündemdedir.

Bu bölümde sunulan değerlendirme, mevcut literatürde bildirilen genel eğilimlerin sentezinden oluşmaktadır

3.5. Sonuç

Bu derleme çalışmasında, torna tezgâhlarında kullanılan dinamometre sistemleri teknik özellikleri, performans ölçütleri, uygulama alanları ve sınırlamaları açısından incelenmiştir. Strain gauge, piezoelektrik, film sensör, yük hücresi, IoT sistemleri ve MEMS tabanlı yaklaşımlar literatürde çeşitli avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır.

- **Strain gauge** sistemler düşük maliyet ve yaygın kullanım açısından öne çıkarken,
- **Piezoelektrik** sistemler yüksek frekanslı izleme için en güçlü çözümdür.

- **Film sensörler** mikro üretim alanlarında esnek çözümler sağlarken,
- **Yük hücreleri** sağlamlık ve doğruluk açısından tercih edilmektedir.
- **IoT sistemleri**, veri iletimi açısından modern çözümler sunarken,
- **MEMS sistemler**, gelecek odaklı akıllı takım teknolojilerine entegre edilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, sensörlerin daha akıllı, küçük boyutlu ve enerji verimli hâle getirilmesi, bu sistemlerin torna proseslerinde daha etkin kullanılmasını sağlayacaktır.

Torna tezgâhlarında kullanılan dinamometre sistemleri, çağdaş üretim süreçlerinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve geliştirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Strain gauge, piezoelektrik, film sensörlü, yük hücreli, kablosuz/IoT ve MEMS tabanlı sistemlerin her biri, farklı avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Bu sistemlerin seçimi, uygulamanın gereksinimlerine, bütçeye, istenilen hassasiyete ve veri analiz derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışma ile farklı teknolojilerin yapısal prensipleri, avantaj/dezavantajları ve uygulama alanları karşılaştırmalı olarak sunulmuş, gelecekteki gelişim alanlarına da ışık tutulmuştur. Özellikle sensör teknolojilerindeki gelişmeler, daha kompakt, hassas ve akıllı dinamometre sistemlerinin önünü açmaktadır. Yüksek hassasiyetli ve çok eksenli ölçümler için piezoelektrik ve MEMS tabanlı sistemlerin, maliyet/performans dengesi için ise strain gauge sistemlerin öne çıktığı görülmüştür. Endüstri 4.0'ın etkisiyle, kablosuz ve bulut tabanlı sistemlerin gelecekte kullanım alanı giderek artacaktır.

Bu çalışmada, torna tezgâhlarında kullanılan dinamometre sistemleri; tasarım prensipleri, performans ölçütleri ve uygulama alanları açısından sistematik olarak incelenmiştir. Gerinim ölçer, piezoelektrik, ince film, yük hücreli, MEMS ve kablosuz sistemler gibi farklı teknolojilere dayalı çözümler, 40 makaleden elde edilen verilerle desteklenerek değerlendirilmiştir.

Strain gauge tabanlı sistemler, düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve eğitimsel uygulamalara uygun yapılarıyla öne çıkmaktadır. Bu sistemler, geniş bir işleme parametresi aralığında tatmin edici doğrulukta sonuçlar vermiştir. Ancak sıcaklık ve çapraz duyarlılık gibi bazı teknik sınırlamalar göz önünde bulundurulmalıdır(Hanif vd., 2016b; Kasprzak ve Pyzalski, 2021; Kazmi, t.y.; Khammongkhon vd., 2025b; Lad ve Patel, t.y.; Öztürk ve Yıldızlı, 2018; Panzera vd., 2012b, 2012c; Reyes Uquillas ve Syh-Shiuh Yeh, 2015; Rizal vd., 2018b; Saruulbold S. ve Oyunbat G., 2022; Sharma vd., t.y.;

Thangarasu vd., 2018; Uquillas ve Hsiao, 2016; Vadgeri vd., 2018; Yıldız ve Ünsaçar, 2006b, 2006d; Zhao vd., 2015).

Piezoelektrik sistemler, özellikle hassas işleme süreçleri için tercih edilen sistemler olup, 0.1 N seviyelerine kadar hassas ölçüm kapasitesine sahiptir. Geniş bant frekans tepkileri sayesinde, dinamik uygulamalarda yüksek performans göstermektedirler. Fakat bu sistemler genellikle daha pahalı ve entegrasyon açısından daha karmaşıktır (Bharilya vd., 2015b; Horváth vd., t.y.; Kumar ve Yadav, 2023b; Rizal vd., 2022b; Totis ve Sortino, 2011b).

Film sensörlü ve MEMS tabanlı sistemler, kompakt ve takım entegreli yapılarda öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler, modern CNC tezgâhlarında yerleşik ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır. MEMS sistemlerde çapraz duyarlılık oldukça düşük seviyelere indirilebilmiş ve bant genişliği artırılmıştır (Cheng vd., 2022; Mohanraj vd., 2023; Othman vd., 2022; Zhang vd., 2019; Zhao vd., 2016; Zhao, Zhao, ve Ge, 2018; Zhao, Zhao, Shao, vd., 2018).

Kablosuz haberleşmeli ve Arduino gibi mikrodenetleyici tabanlı sistemler ise düşük maliyetli, taşınabilir ve Endüstri 4.0 uyumlu uygulamalarda yaygınlık kazanmaktadır. Bu sistemler, özellikle uzaktan izleme, veri kaydı ve bulut tabanlı analiz gibi uygulamalarda oldukça uygundur (Korkmaz, M. (2019); Uquillas ve Hsiao, 2016; Vásquez Céspedes, 2011).

Yük hücreli sistemler ise yüksek dayanım, doğrusal tepki ve geniş kuvvet aralıklarında güvenilir performans sunmaları nedeniyle endüstriyel tornalama ve ağır işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılar, sağlam gövde tasarımları ve kolay kalibrasyon özellikleri sayesinde hem üretim ortamlarında hem de atölye tipi ölçüm düzeneklerinde pratik ve kararlı bir çözüm sağlar (Özdemir, H. (2006); Gunay vd., 2006; Projoth vd., 2021; Umurani ve Siregar, 2019).

Çizelge 3.2. Genel değerlendirme

Sistem Tipi	Hassasiyet	Maliyet	Entegrasyon	Dinamik Yanıt	Uygulama Alanı
Strain Gauge	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük / Orta	Eğitim, Ar-Ge, temel kuvvet ölçümü
Piezoelektrik	Çok Yüksek	Yüksek	Orta	Çok Yüksek	Hassas işleme, proses izleme
Film Sensörlü	Yüksek	Orta	Çok Yüksek	Orta / Yüksek	Takım entegreli sistemler, mikro-imalat
MEMS Tabanlı	Yüksek	Orta / Yüksek	Orta	Yüksek	Mikro-imalat, robotik, akıllı takımlar
Kablosuz (IoT)	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Uzaktan izleme, otomasyon
Yük Hücreli (Load Cell)	Orta / Yüksek	Orta	Orta	Orta	Endüstriyel tornalama, ağır işleme, yüksek kuvvet ölçümü

Yukarda Çizelge 3.2. de genel değerlendirme sonuçlarının değerlendirilmesi ve uygulama alanları verilmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Giriş

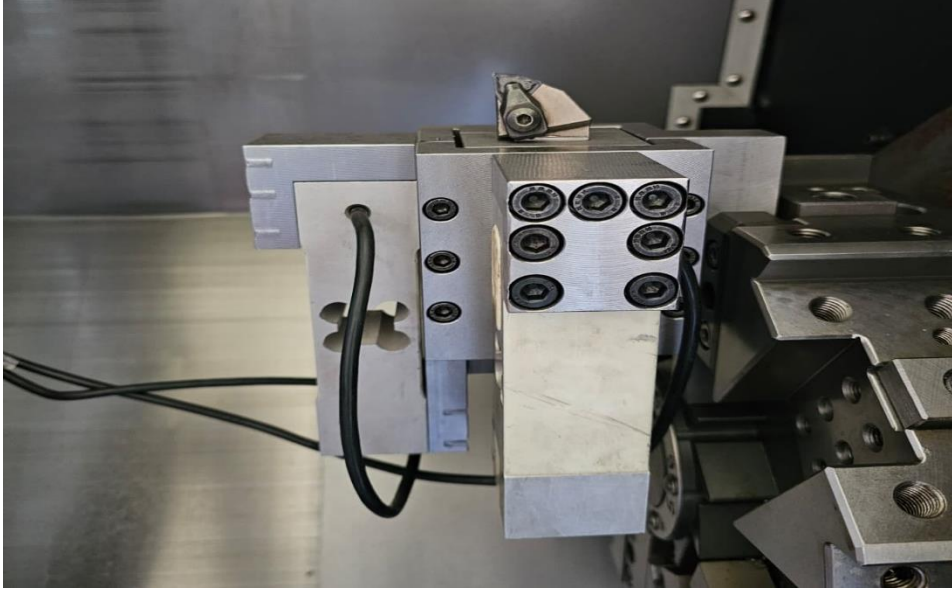
Bu çalışmada, CNC tezgâhında işleme parametrelerinin kesme ve ilerleme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, tornalama işlemi sırasında kesici takımın maruz kaldığı kesme ve ilerleme kuvvetlerini ölçebilmek için bir dinamometre tasarlanmış ve üretilmiştir. Dinamometre, Yük hücreleri (load cell) kullanılarak ölçüm yapacak şekilde tasarlanmıştır. Ölçümü için 150 kg kapasiteli (1 gram hassasiyetli) 2 tane basma tip Yük hücreleri kullanılmıştır. Yük hücrelerinden alınan sinyaller, Delta firmasının DVP202LC MODEL Yük hücresi modülünden Delta firmasının DVP-12SA2 MODEL PLC sine ordan da Delta firmasının DOP-107EG MODEL PLC Model ekranına veriler aktarılarak ekrandan elde edilen sayısal veriler hem izlenip hem de Excel formatında bilgisayardan müdahale edilebilecek şekilde kayıt altına alınıyor ekrandan aynı zamanda elde edilen kuvvetler anlık olarak grafik olarak izlenebilmektedir .kayıt altına alınan veriler sayesinde deneylerden elde edilen sayısal veriler kaydedilmiş ve Microsoft Excel ile grafiksel olarak sunulmuştur.

Deneylerde, iş parçası olarak yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip olması endüstride yaygın olarak kullanılması ve elde edilen sonuçların pratik uygulamalara daha yakın olmasını sağlamak için 6150 malzemesi kullanılmıştır. Deneyler, CNC torna tezgâhında farklı devir sayıları, ilerleme hızları ve talaş derinliklerinde gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri, yüzey pürüzlülük ölçme cihazı ile belirlenmiştir. Elde edilen veriler analiz edilerek, kesme ve ilerleme kuvveti ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelenmiştir.

Kesme işlemi sırasında oluşan talaş şekilleri ise, daha sonra incelemek üzere fotoğraflanıp kaydedilmiştir.

4.2. Sistem Donanımı

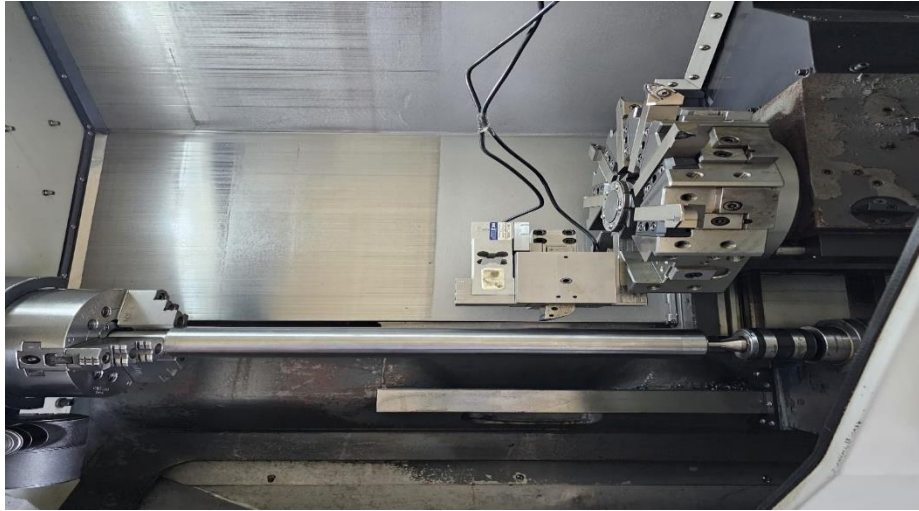
Torna tezgahı için tasarlanan dinamometre sistem donanımı Şekil 4.1 'te gösterilmektedir. Sistem, CNC ve üniversal tezgâhlara uyumlu sorunsuz şekilde çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.1. Deneyde kullanılan düzeneğin resmi

4.3. Torna Tezgâhı Dinamometresi

Tornalama işleminde kesici takıma etki eden kesme ve radyal kuvvetleri ölçmek amacıyla tasarlanan ve üretilen dinamometre, Şekil 4.2’te gösterilmektedir. Kuvvet ölçümü, 150 kg kapasiteli iki Yük hücresi (ZEMIC MODEL:L6E3-150KG-D55) kullanılarak yapılmaktadır. Yük hücre ölçerlerin düzgün bir şekilde sabitlenmesi ve tornalama anında talaşların zarar vermesini engelleyecek şekilde bir tasarım yapılmıştır. Torna katerinin tam merkezine yerleştirilen Pim Rulman düzeneği, kesme kuvvetini ölçmek için gerekli hareketi sağlamıştır. Daha sonra, Çelik malzemedan (CK45) yapılan ana gövde sistemine montajlanarak, ilerleme kuvvetini ölçmek için başka bir rulmanlı sistemle birleştirilmiştir. Bu sayede, oluşan kuvvet minimum sürtünme ile yük hücrelerine aktarılmıştır.



Şekil 4.2. Torna dinamometresi deney düzeneği.

4.4. Yük Hücreleri (Loadcell)

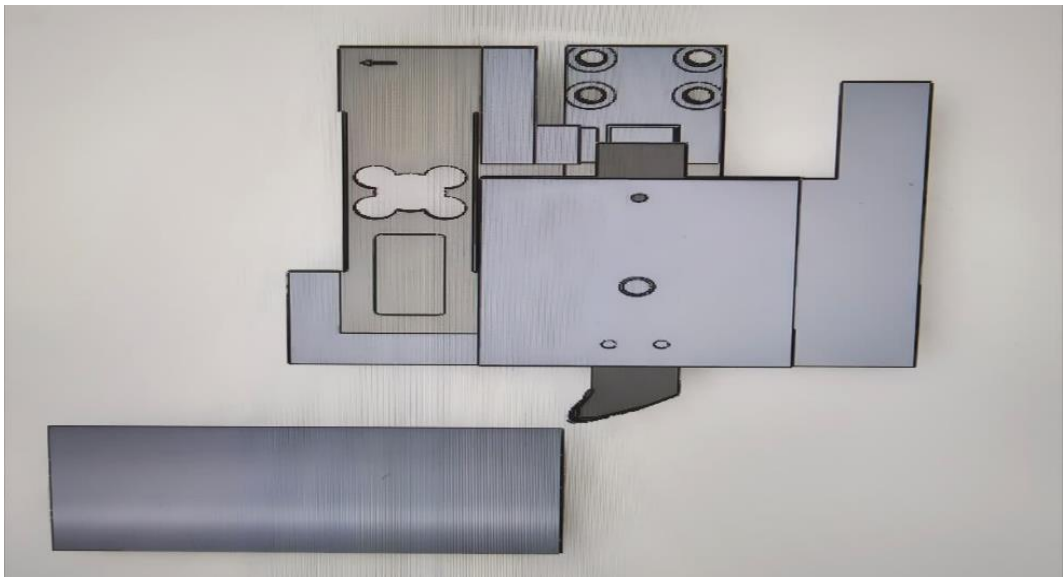
Dinamometrelerde toplamda 2 adet basma tipi yük hücresi (loadcell) kullanılmıştır. Bu gerinim ölçerler, 150 kg kapasitesinde olup (1 gram hassasiyetinde) kuvvet lme konusunda doğru sonuçlar sağlamaktadır. Sistemi oluşturan yk hücrelerine uygulanan kuvvet (N), Delta sistemleri aracılığıyla dijital ekranlarda okunabilmektedir. Ayrıca, elde edilen sayısal veriler kullanarak anlık veriler alınmış ve bilgisayar ekranında dijital olarak incelenmiş, bu verilerle grafikler oluşturulmuştur.

4.5. Sistem Kalibrasyonu

Deneylere başlanmadan önce, dinamometre kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işlemi için, daha önce kalibrasyonu yapılmış bir terazide ağırlığı ölçülen parçalar, sisteme yerleştirilerek plc ekranda kalibrasyon bölümünden kalibre edilerek daha sonrasında test edilmiştir, Delta marka PLC ekranda okunmuştur. kullanım kılavuzunda kalibrasyonun nasıl yapılacağına dair ayrıntılı bilgiler bulunmaktadır. Kalibrasyon tamamlandıktan sonra, çeşitli ağırlıklara sahip malzemeler kullanarak ölçüm doğruluğu kontrol edilmiştir.

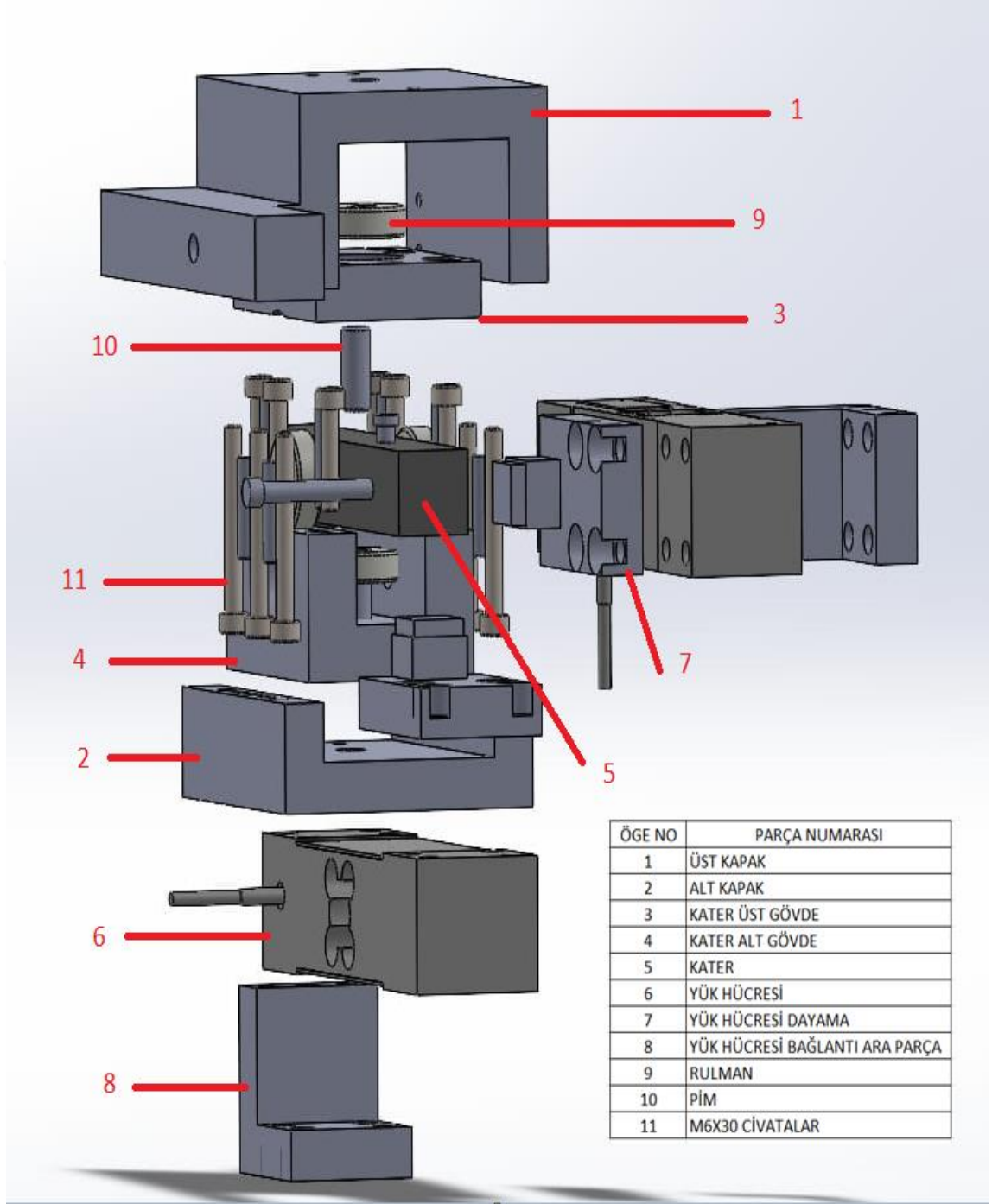
4.6. CAD Tasarım

Dinamometrenin modeli, SolidWorks 2025 bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanarak hazırlanmış ve gerekli analizler bu ortamda yapılmıştır. Tasarım sürecinde, deneylerde kullanılacak CNC torna tezgâhının teknik özellikleri dikkate alınmıştır. Ölçülen kuvvetlerin doğru şekilde belirlenebilmesi için dinamometre, orta noktasından rulmanlarla yataklandırılmış ve bu sayede yüksek hassasiyetle sonuç elde edilmesi amaçlanmıştır.



şekil 4.3. Torna dinamometresinin solidworks programında görünümü

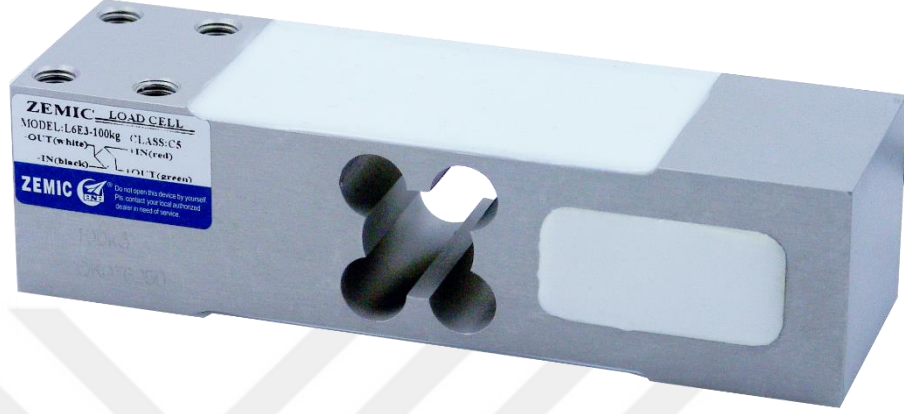
Aynı zamanda takımın boşa kalmasını engellemek amacıyla yay pim sistemiyle destekleme yapılmıştır yük hücrelerinin tamamı için. Solidworks programında çizimi tamamlanan dinamometrenin görünümü yukarda Şekil4.3. te gösterilmiştir, dinamometre sisteminin daha net anlaşılması için montaj patlatma görünümü ise aşağıda Şekil 4.4. te aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Torna dinamometresinin Solidworks programında patlatılmış görünümü

4.7. Pano Detayları

Torna tezgahı için tasarlanan Dinamometre sisteminde elde edilen sayısal verileri okuyabilmek için pano sistemi döşenmiştir bu sistemde Yük hücrelerinden (load cell) gelen veriler ölçüm yapacak şekilde tasarlanmıştır. Sistemde kullanılan Yük hücreleri Şekil 4.5. de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Zemic Model: L6E3-150KG-D55 loadcell

Şekil 4.5 de gösterilen loaceller daha sonrasında Delta firmasının DVP202LC MODEL yük hücresi modüllerine bağlanmıştır Yük hücresi modülleri şekil 4.6. da gösterilmektedir .



Şekil 4.6. Yük hücresi modülü (DVP202LC MODEL)

Yük hücresi modülü ise Delta marka DVP-12SA2 MODEL PLC sine bağlanmıştır PLC şekil4.7. da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Delta PLC (DVP-12SA2 MODEL)

PLC den data kablosu ile Delta firmasının DOP-107EG MODEL PLC Model ekranına bağlantı yapılmıştır bu bağlantı sayesinde elde edilen sayısal veriler ekrandan anlık olarak okunabilecek ve kayıt altına alınabilecektir, Delta ekran şekil 4.8. aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Delta PLC ekran (DOP-107EG MODEL PLC)

Son olarak sistemin çalışabilmesi için Delta DRL-24V75W1AZ Model güç kaynağı ile modül, PLC ve ekrana kablo ile giriş yapılmıştır güç kaynağı şekil 4.9. da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Delta güç kaynağı (Delta DRL-24V75W1AZ)

CNC Torna tezgahı üzerine yerleştirilmiş halde montajlı hali şekil 4.10.de aşağıda gösterilmiştir bütün ekipmanlar ray üzerine toplanıp CNC ye bağlanmıştır.

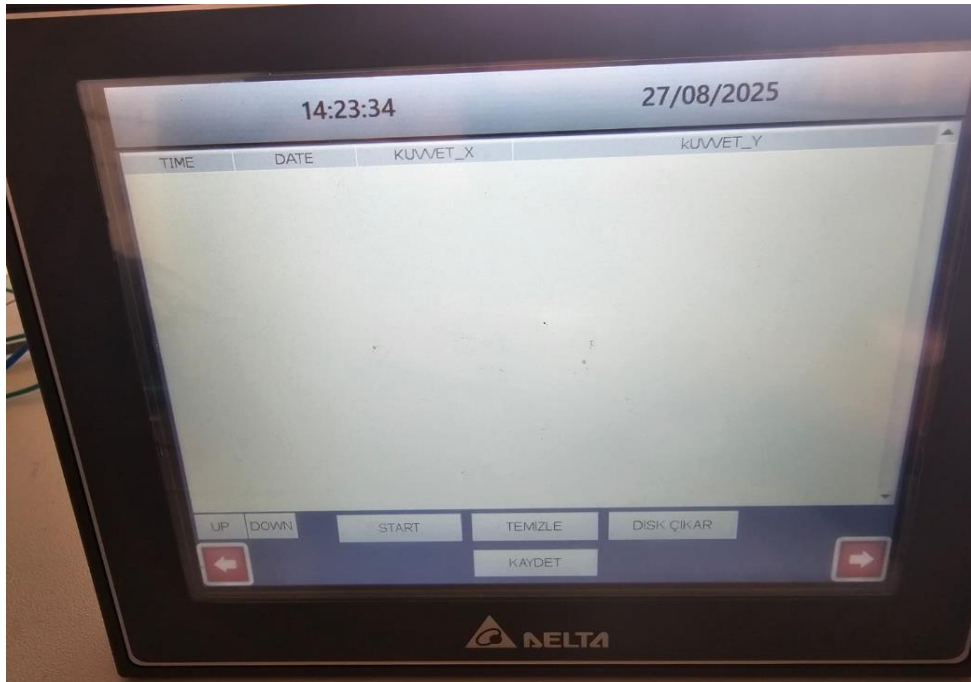


Şekil 4.10. Veri okuma sistemi montajlı hali

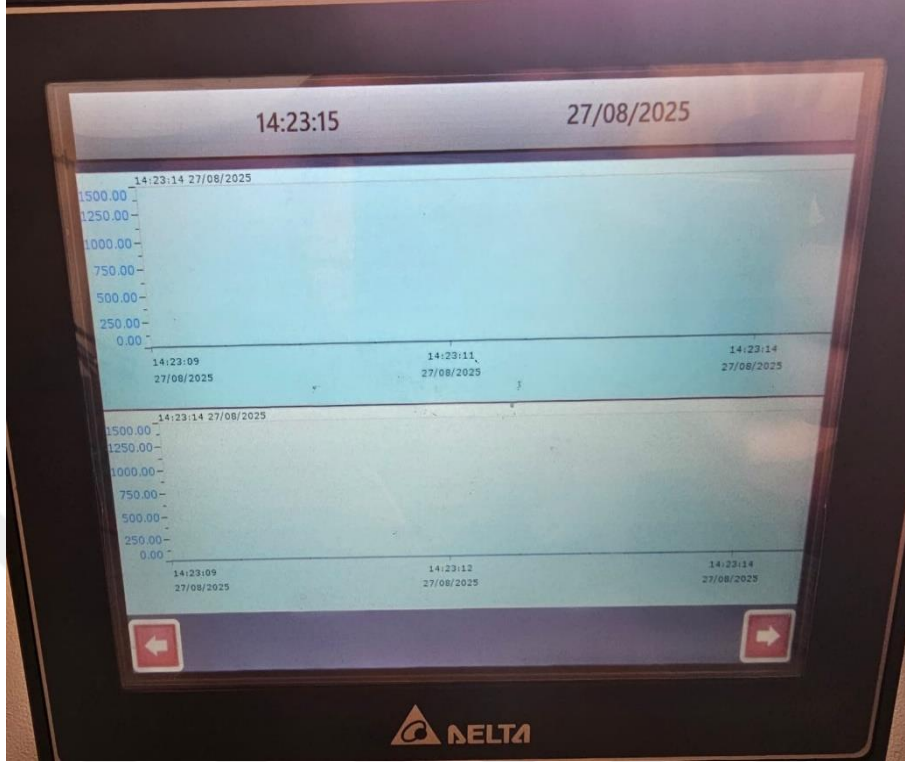
Sistem çalışır hale geldikten sonra WPL Soft yazılım programı ile ekranın içine yazılım yazılmıştır bu yazılım sayesinde kalibre etme sayfası veri kaydetme sayfası ve elde edilen sayısal verilerin anlık karşılaştırmalı grafik olarak izlenebilmesi için sayfalar tasarlanmıştır WPL Soft programı, Yük hücresi aracılığıyla fiziksel sistemlerden elde edilen analog verilerin dijital ortamda görselleştirilmesini, karşılaştırılmasını ve bu verilerle çalışacak özel bir arayüz tasarlanarak çeşitli fonksiyonlar ve gösterim şekilleriyle verilerin işlenmesini sağlar. aşağıda Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13. te bu ekran sayfalarının resimleri gösterilmiştir



Şekil 4.11. Kalibrasyon sayfası



Şekil 4.12. Veri kaydetme sayfası



Şekil 4.13. Grafik izleme sayfası

4.8. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalarda, iş parçası olarak yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip olması endüstride yaygın olarak kullanılması ve elde edilen sonuçların pratik uygulamalara daha yakın olmasını sağlamak için 6150 malzemesi kullanılmıştır, 6150 çeliği, mükemmel aşınma direnci ve yüksek yorulma dayanımıyla bilinir. Mükemmel mekanik özelliklere ve optimum korozyon direncine sahiptir. Yağda sertleştirme işlemiyle ekstra bir dayanıklılık kazanarak hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda en iyi performansı gösterir. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, savunma sanayi ve takım imalatı gibi sektörlerde da yaygın olarak kullanılır. Elastikiyet gerektiren uygulamalar için de uygun olup süspansiyon sistemlerinde ve yay üretiminde kullanıldığına da sıklıkla rastlanır.

Bu malzeme, düşük sıcaklıklarda gevrekleşmeye dirençlidir. Sıcak işlenebilirliğinin iyi olmasına rağmen soğuk işleme sırasında yüksek sertliği nedeniyle dikkatli olunması gerekir. Kademeli sertleşme özelliği sayesinde farklı bölgelerde kontrollü mekanik özellikler elde edilmesi mümkündür.

Bu çelik türü, mukavemet ve elastikiyetin dengeli olduğu darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için ideal bir seçenek olarak tercih edilebilir. Bu silindirlere ön aşama olarak homojenizasyon yaptırılmıştır daha stabil şartlarda kesme işlemi yapabilmek için . Çalışmada yer alan tüm numuneler aynı çap ve uzunluktadır, ayrıca her bir parçanın işlenmesinde bağlama şekli ve işleme yöntemleri aynı şekilde uygulanmıştır. Deneyde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 4.1 de aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1. 6150 çeliğin mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Akma Dayanımı (Yield Strength, 0,2% Offset)	850 – 1100 MPa
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	1050 – 1250 MPa
Sertlik (Rockwell C)	45 – 52 HRC
Uzatma (Elongation)	10 – 15%
Elastisite Modülü (Elastic Modulus)	205 – 210 GPa
Tokluk (Charpy V-notch Impact Toughness)	≥ 35 J
Kesit Daralması (Reduction of Area)	40 – 55%

Deneylerin hangi koşullar altında yapılacağı ise Şekil 4.14 te aşağıda sunulmuştur. Deney yapılmak üzere elimizde 4 adet aynı uzunlukta aynı çelik türden malzeme bulunmaktadır toplamda 325 mm işleme uzunluğumuz vardır 25 mm işleme mesafesinden bir çubukta 13 farklı deney yapabilme imkânımız vardır toplamda farklı işleme parametrelerinde 27 deney vardır 3 tekrarlı toplamda 81 deney yapılacaktır. Deney numune parçası ise aşağıda Şekil 4.15 da gösterilmiştir.

	BAŞLANGIÇ ÇAP	DENEY ÇUBUĞU	DENEY NUMARASI	DEVİR	İLERLEME	TALAŞ DERİNLİĞİ	BÖLGE NUMARASI	BİTİŞ ÇAP	İŞLEME UZUNLUĞU
1. Cİ TEKRAR	56	A	1	250	0,1	1	1	55	25
	56	A	2	500	0,1	1	2	55	25
	56	A	3	750	0,1	1	3	55	25
	56	A	4	250	0,2	1	4	55	25
	56	A	5	500	0,2	1	5	55	25
	56	A	6	750	0,2	1	6	55	25
	56	A	7	250	0,3	1	7	55	25
	56	A	8	500	0,3	1	8	55	25
	56	A	9	750	0,3	1	9	55	25
2. Cİ TEKRAR	56	A	10	500	0,1	1	10	55	25
	56	A	11	750	0,1	1	11	55	25
	56	A	12	1000	0,1	1	12	55	25
	56	A	13	500	0,2	1	13	55	25
	54	B	14	750	0,2	1	1	53	25
	54	B	15	1000	0,2	1	2	53	25
	54	B	16	500	0,3	1	3	53	25
	54	B	17	750	0,3	1	4	53	25
	54	B	18	1000	0,3	1	5	53	25
3. CÜ TEKRAR	54	B	19	500	0,1	1	6	53	25
	54	B	20	750	0,1	1	7	53	25
	54	B	21	1000	0,1	1	8	53	25
	54	B	22	500	0,2	1	9	53	25
	54	B	23	750	0,2	1	10	53	25
	54	B	24	1000	0,2	1	11	53	25
	54	B	25	500	0,3	1	12	53	25
	54	B	26	750	0,3	1	13	53	25
	47	C	27	1000	0,3	1	4	46	25
1. Cİ TEKRAR	55	A	28	500	0,1	1,5	1	53,5	25
	55	A	29	750	0,1	1,5	2	53,5	25
	55	A	30	1000	0,1	1,5	3	53,5	25
	55	A	31	500	0,2	1,5	4	53,5	25
	55	A	32	750	0,2	1,5	5	53,5	25
	55	A	33	1000	0,2	1,5	6	53,5	25
	55	A	34	500	0,3	1,5	7	53,5	25
	55	A	35	750	0,3	1,5	8	53,5	25
	55	A	36	1000	0,3	1,5	9	53,5	25
2. Cİ TEKRAR	55	A	37	500	0,1	1,5	10	53,5	25
	55	A	38	750	0,1	1,5	11	53,5	25
	55	A	39	1000	0,1	1,5	12	53,5	25
	55	A	40	500	0,2	1,5	13	53,5	25
	53,5	B	41	750	0,2	1,5	1	52	25
	53,5	B	42	1000	0,2	1,5	2	52	25
	53,5	B	43	500	0,3	1,5	3	52	25
	53,5	B	44	750	0,3	1,5	4	52	25
	53,5	B	45	1000	0,3	1,5	5	52	25
3. CÜ TEKRAR	53,5	B	46	500	0,1	1,5	6	52	25
	53,5	B	47	750	0,1	1,5	7	52	25
	53,5	B	48	1000	0,1	1,5	8	52	25
	53,5	B	49	500	0,2	1,5	9	52	25
	53,5	B	50	750	0,2	1,5	10	52	25
	53,5	B	51	1000	0,2	1,5	11	52	25
	53,5	B	52	500	0,3	1,5	12	52	25
	53,5	B	53	750	0,3	1,5	13	52	25
	47	C	54	1000	0,3	1,5	3	45,5	25
1. Cİ TEKRAR	52	A	55	500	0,1	2	1	50	25
	52	A	56	750	0,1	2	3	50	25
	52	A	57	1000	0,1	2	4	50	25
	52	A	58	500	0,2	2	5	50	25
	52	A	59	750	0,2	2	6	50	25
	52	A	60	1000	0,2	2	7	50	25
	52	A	61	500	0,3	2	8	50	25
	52	A	62	750	0,3	2	9	50	25
	52	A	63	1000	0,3	2	10	50	25
2. Cİ TEKRAR	52	A	64	500	0,1	2	11	50	25
	52	A	65	750	0,1	2	12	50	25
	52	A	66	1000	0,1	2	13	50	25
	53	B	67	500	0,2	2	1	51	25
	53	B	68	750	0,2	2	2	51	25
	53	B	69	1000	0,2	2	3	51	25
	53	B	70	500	0,3	2	4	51	25
	53	B	71	750	0,3	2	5	51	25
	53	B	72	1000	0,3	2	6	51	25
3. CÜ TEKRAR	53	B	73	500	0,1	2	7	51	25
	53	B	74	750	0,1	2	8	51	25
	53	B	75	1000	0,1	2	9	51	25
	53	B	76	500	0,2	2	10	51	25
	53	B	77	750	0,2	2	11	51	25
	53	B	78	1000	0,2	2	12	51	25
	53	B	79	500	0,3	2	13	51	25
	47	C	80	750	0,3	2	1	45	25
	47	C	81	1000	0,3	2	2	45	25

Şekil 4.14. Deney planı



Şekil 4.15. Deney numune parçası

4.9. Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı

Deneyler, Fanuc kontrol ünitesine sahip SAMSUNG SMEC PL20 CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir tezgah resmi Şekil 4.16 de gösterilmiştir. Bu tezgahın teknik özellikleri, Çizelge 4.2 de verilmiştir. Deney numunesi, CNC torna tezgahına aynaya bağlanarak puntalı konumda farklı talaş derinlikleri, ilerleme hızları ve devir sayılarında işlenmiştir.



Şekil 4.16. Deneylerde kullanılan cnc torna tezgâhı

Çizelge 4.2. Samsung PL20 cnc torna tezgâhı özellikleri

Özellikler	Değerler
Maksimum Tornalama Çapı	300 mm
Maksimum Tornalama Boyu	300 mm
CNC Kontrol Tipi	FANUC
İş Mili Konisi	ASA 6
Taret Sayısı	1 (10 istasyon)
Dönüş Hızı	4500 Devir
İş Mili Motor Gücü	7,5 kw
Ağırlık	3200 kg

4.10. Yüzey Pürüzlülük Cihazı ve Ölçme Şartları

Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (R_a - μm ve R_z - μm), yüzey pürüzlülüğünü yüksek hassasiyetle ölçebilen Mitutoyo SJ-201 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Bu cihaz, yüzey profilinin temaslı tarama yöntemiyle analiz edilmesi prensibiyle çalışmakta olup, elde edilen veriler yüzeyin genel düzgünlüğü ve işlem sonrası oluşan mikro geometrik yapılar hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Ölçümler sırasında her numune için birden fazla noktadan okumalar yapılmış, böylece yüzeyde oluşabilecek lokal değişimlerin genel değerlendirmeye etkisi minimize edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.17’te, çalışmada kullanılan Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının genel görünümü sunulmakta olup cihazın ölçüm probu, ekran birimi ve kontrol paneli gibi temel bileşenleri gösterilmektedir. Bu cihaz sayesinde elde edilen pürüzlülük değerleri, deneysel çalışmanın yüzey karakterizasyonu kısmında kritik bir rol oynamış ve numunelerin yüzey kalitesi hakkında kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlamıştır.

**Şekil 4.17.** (a) Mitutoyo sj-201 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (b) yüzey ölçüm anı

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

5.1. Genel Değerlendirme

Bu bölümde yapılan deneylerin güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği incelenmiştir. Her deney, aynı kesme parametreleri altında **üç tekrar** şeklinde yürütülmüş ve bu tekrarların birbirleriyle uyumu analiz edilmiştir.

Öncelikle ölçüm verileri ayrıntılı olarak gözden geçirilmiş, takım talaşa girmeden önce sensörün boşa çalıştığı kısa sürede oluşan “0” değerleri analiz dışı bırakılmıştır. Böylece yalnızca **talaş kaldırma anındaki gerçek kesme kuvveti (Fc), ilerleme kuvveti (Ff) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz)** değerleri değerlendirmeye alınmıştır.

Her deney için:

- Ortalama kesme kuvveti (Fc),
- Ortalama ilerleme kuvveti (Ff),
- Standart sapma (σ),
- Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra ve Rz)

hesaplanmış, daha sonra aynı parametrelerle yapılan üç tekrar bir araya getirilerek aralarındaki uyum **varyasyon katsayısı (CV)** ile değerlendirilmiştir.

Kabul kriterleri: ölçümlerin hassasiyetini değerlendirmek amacıyla Varyasyon Katsayısı (CV) hesaplanmıştır. :

- **CV < %20** olan gruplar **stabil/hassas** kabul edilmiştir.
- **CV ≥ %20** olan gruplar **kararsız/yüksek değişkenliğe sahip** olarak sınıflandırılmıştır(Bioanalytical Method Validation Guidance for Industry, 2018).

Bu analiz sonucunda elde edilen başlıca bulgular şunlardır:

1. Toplam **81 deney** gerçekleştirilmiş ve tamamı ayrıntılı olarak incelenmiştir.
2. Ölçümlerin başında sensör boşa çalıştığı için yaklaşık **%10 oranında sıfır değer** oluşmuş, bu kısımlar ayıklanmıştır.
3. Tekrarların büyük çoğunluğunda kuvvet değerleri birbirine yakın çıkmış; bu durum ölçümlerin genel olarak **güvenilir** olduğunu göstermiştir.
4. Bazı parametre kombinasyonlarında tekrarlar arasında belirgin farklar görülmüştür. Bu farkların olası nedenleri; takım aşınması, malzeme yapısındaki lokal farklılıklar ve işleme sırasında ortaya çıkan titreşimlerdir. Bu kombinasyonlar **kararsız** olarak değerlendirilmiştir.

5. Kararsızlıklar çoğunlukla **yüksek ilerleme** ve **yüksek kuvvet** koşullarında ortaya çıkmış; bu durumlarda aynı zamanda **Ra ve Rz değerleri de yükselmiş**, yüzey kalitesi olumsuz etkilenmiştir.
6. Stabil gruplar ise daha çok **orta devir** ve **düşük ilerleme** değerlerinde görülmüştür. Bu koşullarda hem kuvvetler birbirine yakın çıkmış hem de yüzey kalitesi daha iyi olmuştur.

Sonuç olarak, tekrar analizi, deneylerin büyük çoğunluğunun güvenilir ve tekrarlanabilir olduğunu; ancak özellikle yüksek ilerleme ve yüksek kuvvet koşullarında kararsızlıkların arttığını göstermiştir. Bu bulgular, ilerleyen bölümlerde yapılacak olan çalışmalarda hangi parametre kombinasyonlarının tercih edilmesi gerektiği konusunda yol gösterici olacaktır.

5.2. Deney Tasarımının Genel Özellikleri

- **Devir sayıları (n):** 250, 500, 750 ve 1000 dev/dk olmak üzere dört farklı kesme hızı kullanılmıştır.
- **Ölçülen kuvvetler:** Deneylerde yalnızca **kesme kuvveti (Fc)** ve **ilerleme kuvveti (Ff)** kaydedilmiştir.
- **Numune yapısı:** Her deney numunesi **13 bölgeye** ayrılmış, her bölgede **25 mm** işleme mesafesi uygulanmıştır. Böylece bir çubuk üzerinde toplam **325 mm** talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir.
- **Çubuk sayısı:** Deneyler **dört farklı çubuk** üzerinde yürütülmüştür.
- **Tekrarlar:** Her deney üç kez tekrar edilmiş, böylece **27 temel deney kombinasyonu** (devir $\times$ ilerleme $\times$ talaş derinliği) **81 ölçüm seti** ile temsil edilmiştir.

Bu yapı sayesinde yalnızca kuvvetlerin genel eğilimi değil, aynı zamanda **tekrar edilebilirlik, bölgesel farklılıklar** ve **çubuklar arası değişkenliğin etkileri** de analiz edilebilmiştir.

Ölçümler sırasında takım talaşa girmeden önce, kısa süreli “0” değerleri oluşmuştur. Bu değerler yük taşımadığı için analiz dışında bırakılmıştır. Böylece yalnızca **talaş kaldırma anındaki kuvvetler** değerlendirmeye alınmıştır.

Her deney için aşağıdaki parametreler hesaplanmıştır:

- Ortalama kesme kuvveti (F_c)
- Ortalama ilerleme kuvveti (F_f)
- Standart sapma (σ)
- Yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a , R_z)

5.2.1. Tekrarların karşılaştırılması

Her deney setinde üç tekrar ayrı ayrı incelenmiş ve ortalama değerler kıyaslanmıştır:

- **Tutarlı tekrarlar:** Ölçümler arasındaki fark %20'den küçük ise sonuçlar **güvenilir** kabul edilmiştir.
- **Kararsız tekrarlar:** Ölçümler arasındaki fark %20'den büyük ise sonuçlar, parametrelerin uç değerleri veya çevresel etkiler altında **kararsız** olarak değerlendirilmiştir (*Bioanalytical Method Validation Guidance for Industry*, 2018).

Ölçüm sistemlerinin doğruluk ve hassasiyet değerlendirmesinde, literatürde sensör ve ölçüm sistemleri için kabul gören validasyon yaklaşımları dikkate alınmış; bu kapsamda maksimum kabul edilebilir hata oranı %20 sınırı referans alınmıştır.

5.2.2. Bulgular

- Tekrarların yaklaşık **%70'i stabil** çıkmıştır. Yani 27 setin yaklaşık 19'unda üç tekrar birbirine çok yakın değerler üretmiştir.
- Kalan yaklaşık **%30'luk kısımda** belirgin farklar gözlenmiştir.
- Farkların en sık görüldüğü durumlar:
 - Yüksek ilerleme miktarı → talaş kırılması düzensiz, kuvvet dalgalı,
 - Büyük talaş derinliği → takım yüklenmesi artmış, özellikle F_f tekrarlar arasında farklılaşmıştır.
- **Bölge faktörü:** Aynı milin farklı bölgelerinde malzeme yapısı ve sertliği değişmiş veya mil uzunluğu sebebiyle bazı bölgelerde titreşim artmış olabilir. Bu durum da tekrar farklarını artıran bir etken olarak değerlendirilmiştir.

Özet olarak, deney setlerinin genel değerlendirmesi Çizelge 5.1'de verilmiştir:

Çizelge 5.1. Genel Değerlendirme

Deney Seti	Kuvvet Tutarlılığı	Ra Tutarlılığı	Genel Değerlendirme
Orta hız + düşük ilerleme	Çok iyi	Çok iyi	Stabil
Yüksek hız + düşük ilerleme	Çok iyi	Çok iyi	Stabil
Yüksek hız + orta ilerleme	İyi	İyi	Stabil
Yüksek ilerleme + yüksek derinlik	Kötü	Kötü	Kararsız
Düşük hız + yüksek derinlik	Kötü	Kötü	Sınırlı güvenilirlik
Orta parametreler genel	Çoğu stabil	Çoğu stabil	Tavsiye edilir

5.2.3. Yorum

- Deneylerin büyük kısmının güvenilir çıkması, kurulan ölçüm sisteminin **doğru ve kararlı** çalıştığını göstermektedir.
- Tekrar farklılıklarının yoğunlaştığı gruplar, genellikle parametrelerin **uç değerlerinde** (yüksek ilerleme, yüksek talaş derinliği, düşük hız) yer almaktadır.
- Bu durum, **optimum koşulların orta parametrelerde** bulunduğunu düşündürmektedir.
- Kararsız çıkan deneylerin, gelecekte daha fazla tekrar ile doğrulanması faydalı olacaktır.

Bu genel değerlendirmelerden sonra, sistem üzerine etki eden kesme parametreleri detaylı biçimde incelenmiştir.

5.3. Devir Sayısının (n) Etkisi

Deneyler 250, 500, 750 ve 1000 dev/dk olmak üzere dört farklı devirde yürütülmüş; kesme kuvvetleri (F_c , F_f) ile yüzey pürüzlülüğü (R_a) üzerindeki etkiler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, devir artışının her zaman yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemediğini göstermiştir. Özellikle **$f = 0,10 \text{ mm/dev}$** ve **$ap = 1,0 \text{ mm}$** sabit olduğu koşullarda **1000 dev/dk**, en düşük kuvvetleri ve en iyi yüzey kalitesini sağlamıştır.

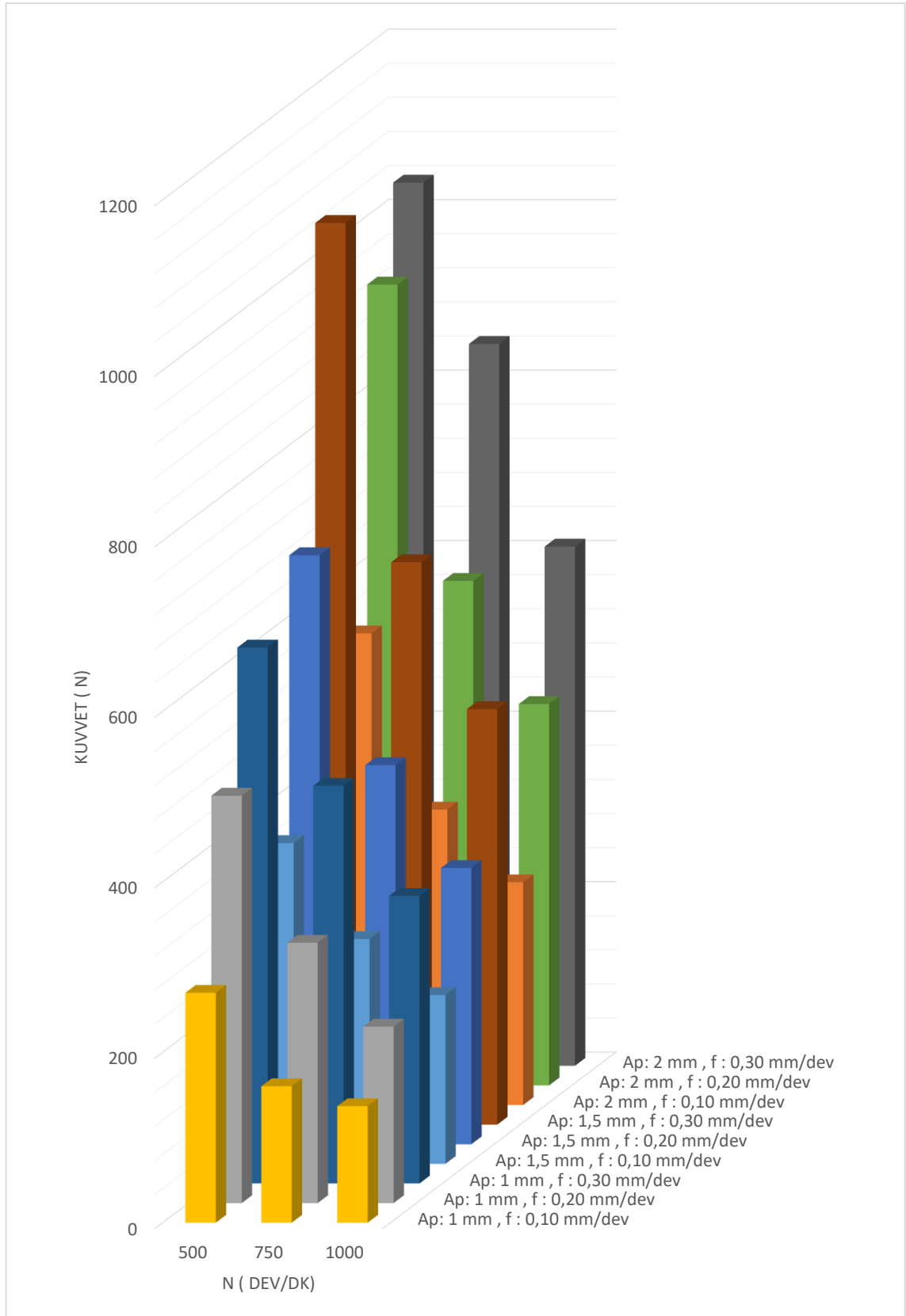
Düşük devirlerde (250 dev/dk) hem F_c hem F_f değerlerinin yüksek seyretmesi ve yüzey üzerinde belirgin izler bırakması nedeniyle R_a değerlerinin zayıf olduğu görülmüştür. Orta devir bölgesi olan **500 dev/dk**, kuvvetlerin azalması ve yüzey kalitesinin belirgin şekilde iyileşmesi sayesinde bir **denge noktası** gibi davranmış, tekrarlanabilir ve stabil sonuçlar üretmiştir. **750 dev/dk** seviyesinde kesme kuvvetlerinde kısmen düşüş eğilimi devam etmekle birlikte, yüzey kalitesinde kombinasyona bağlı düzensiz değişimler gözlenmiş; bu seviye bir **geçiş bölgesi** niteliği kazanmıştır.

En yüksek devir olan **1000 dev/dk**'da özellikle $f = 0,10$ mm/dev ve $a_p = 1,0$ mm koşulunda hem kuvvetlerde düşüş hem de R_a değerlerinde belirgin iyileşme elde edilmiştir. Bu durum, yüksek devirde **birleşmiş talaş oluşumunun azalması** ve **kesme izlerinin incilmesi** ile ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla bu kombinasyon, finiş işlemleri için **optimum sonuç** vermektedir.

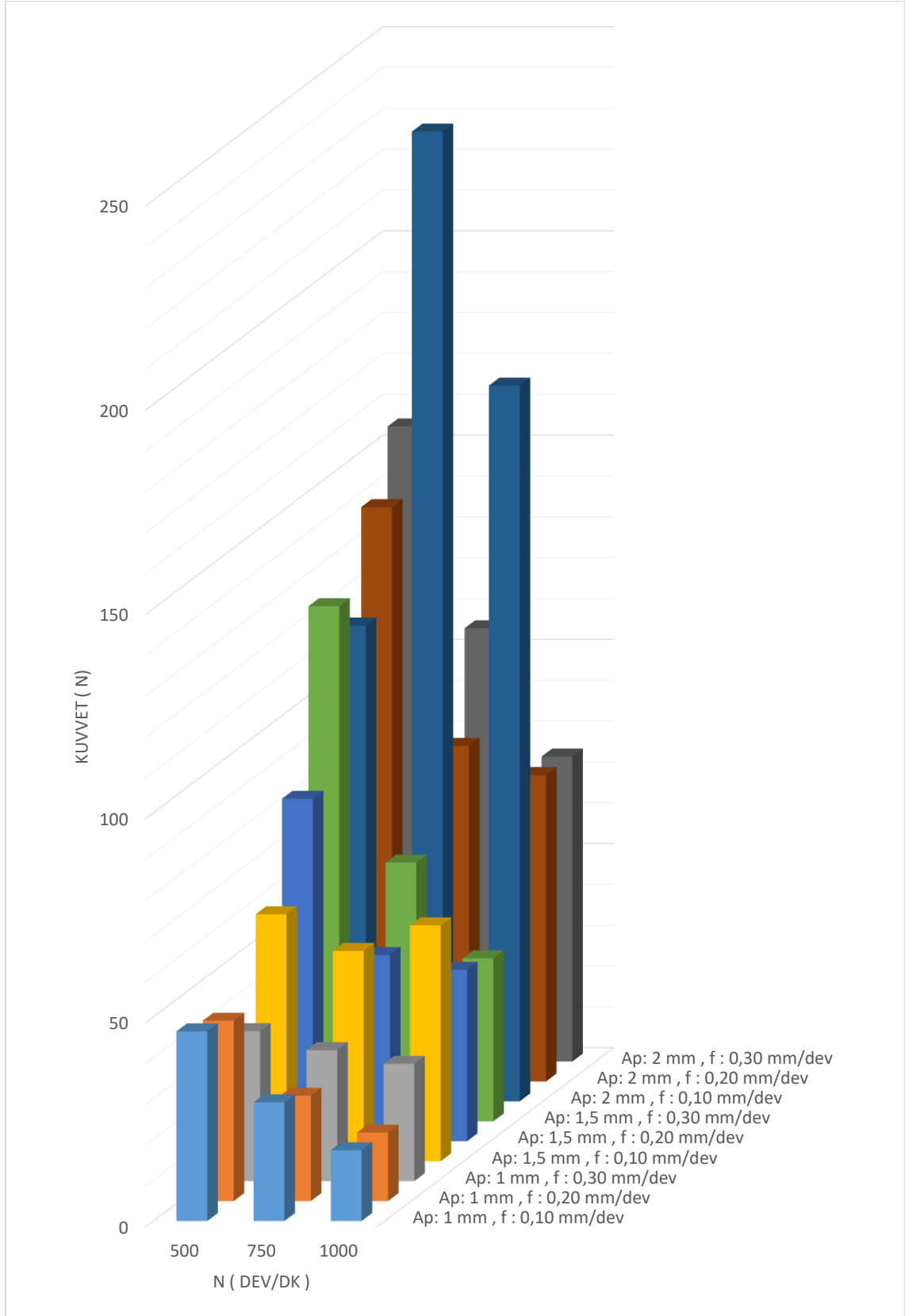
Genel olarak değerlendirildiğinde, yalnızca yüzey kalitesi ölçütü esas alındığında **1000 dev/dk – $f = 0,10$ mm/dev – $a_p = 1,0$ mm** en uygun koşul olarak belirlenmiştir. Ancak enerji tüketimi, takım ömrü ve proses stabilitesi gibi çoklu kriterler dikkate alındığında **750 dev/dk – $f = 0,10$ mm/dev – $a_p = 1,0$ mm** çalışma koşulu daha **dengeli** bir seçenek sunmaktadır.

Bu sonuçlar, “**devir arttıkça kuvvet artar ve yüzey kalitesi kötüleşir**” genellemesinin bu çalışma kapsamında geçerli olmadığını göstermektedir. Özellikle 1000 dev/dk'da hem yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği hem de kesme kuvvetlerinin daha düşük ve stabil olduğu tespit edilmiştir.

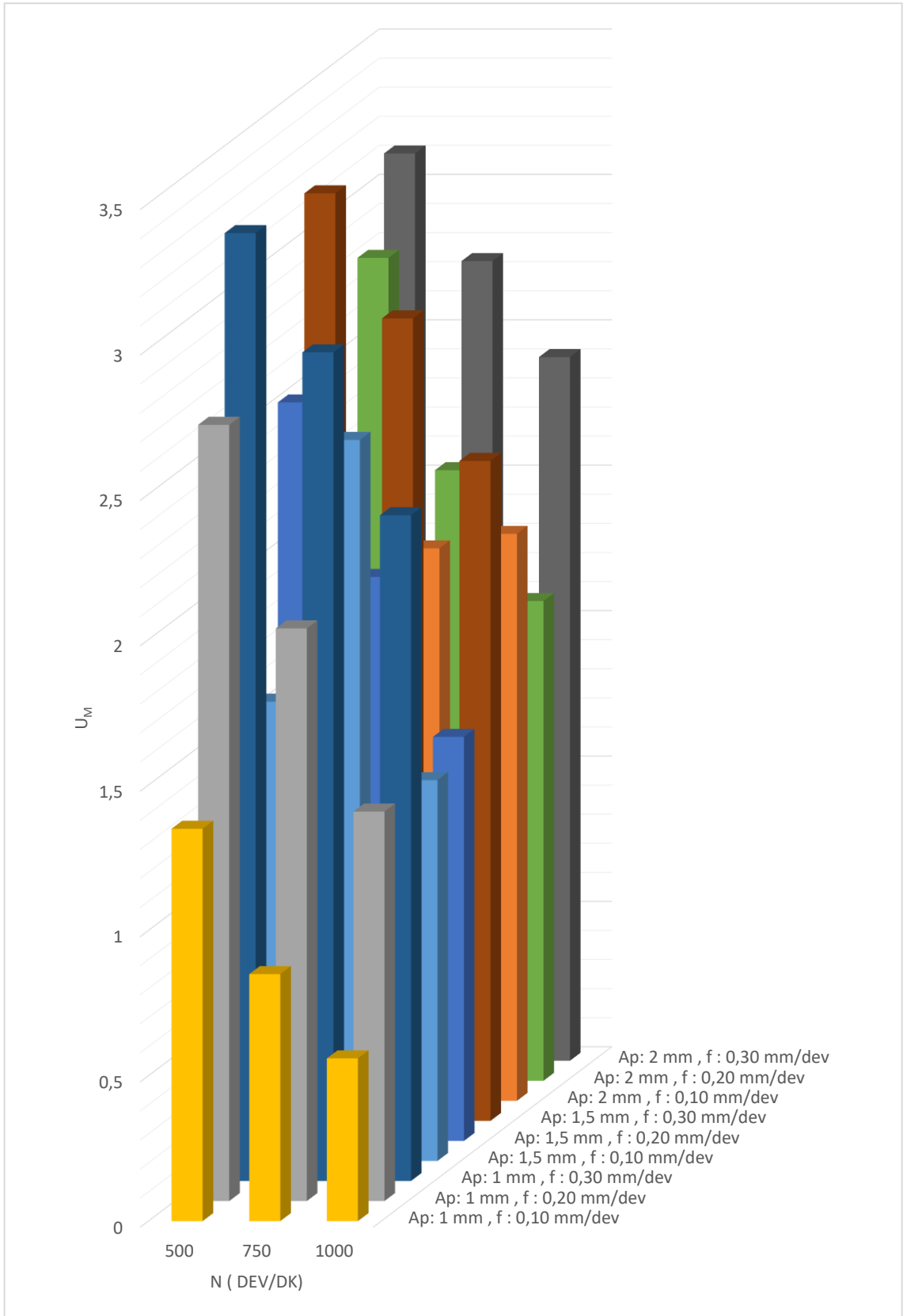
Aşağıda **Şekil 5.1.** te Değişken işleme parametrelerine göre kesme kuvveti (F_c) değişimi , **Şekil 5.2.** de Değişken işleme parametrelerine göre ilerleme kuvveti (F_f) değişimi , **Şekil 5.3.** Değişken işleme parametrelerine göre R_a değişimi ve **Şekil 5.4.**Değişken işleme parametrelerine göre R_z değişimi grafikleri detaylı bir şekilde verilmiştir.



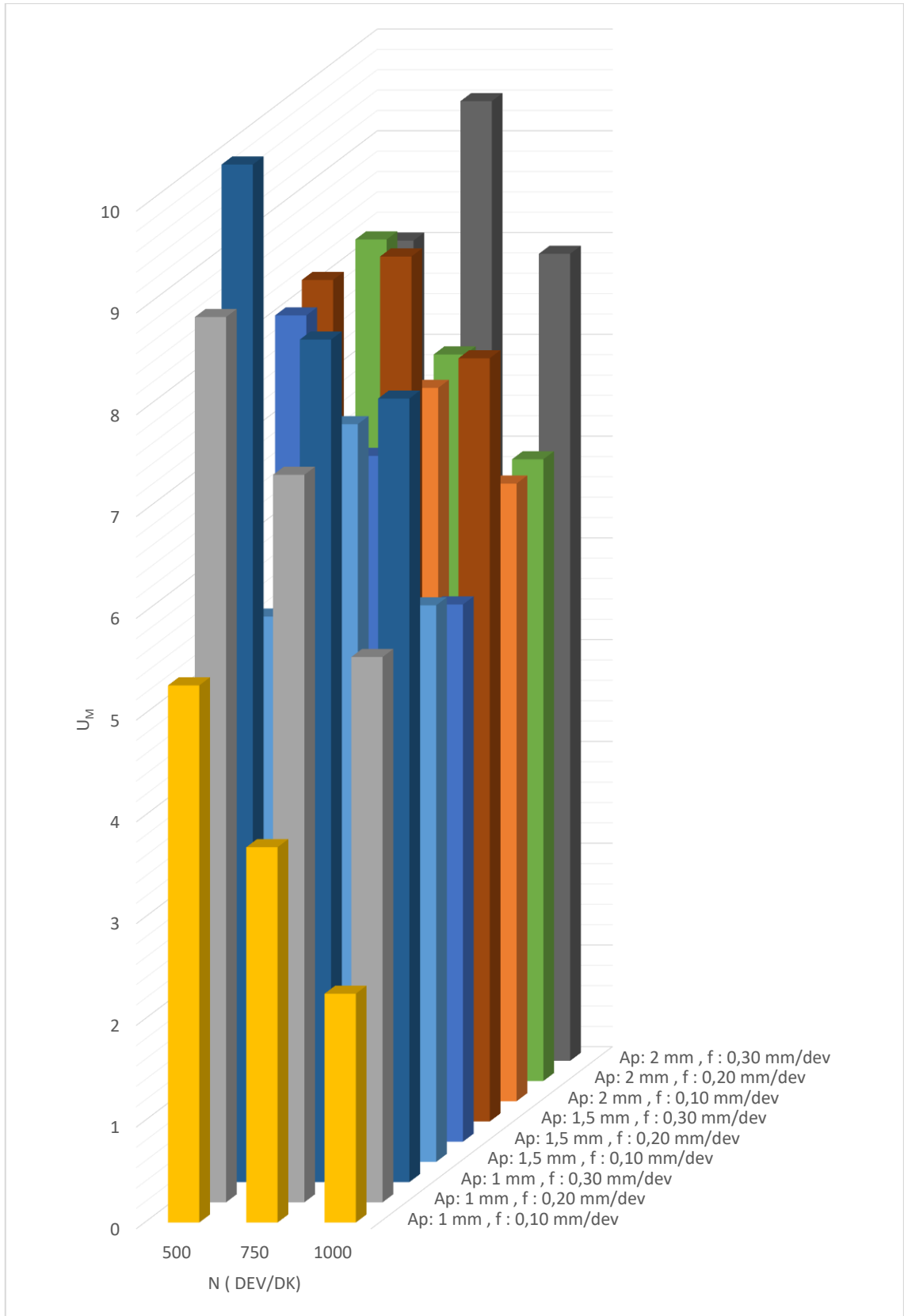
Şekil 5.1. Değişken işleme parametrelerine göre kesme kuvveti (F_c) değişimi



Şekil 5.2. Değişken işleme parametrelerine göre ilerleme kuvveti (Ff) değişimi



Şekil 5.3. Değişken işleme parametrelerine göre R_a değişimi



Şekil 5.4. Değişken işleme parametrelerine göre Rz değişimi

5.4. İlerlemenin (f) Kesme ve İlerleme Kuvvetlerine Etkisi

İlerleme miktarı (f), talaş kesitini ve takımın iş parçasıyla etkileşim şeklini doğrudan belirleyen temel parametrelerden biridir. Deney sonuçları, ilerlemenin artmasıyla birlikte hem kesme kuvveti (F_c) hem de ilerleme kuvvetinde (F_f) **belirgin artışlar** meydana geldiğini göstermektedir. Bu artış, büyüyen talaş hacminin takım üzerine aktardığı yükün yükselmesiyle ilişkilidir.

Düşük ilerleme değeri olan **0,10 mm/dev**, tüm deneysel kombinasyonlar içerisinde en düşük F_c ve F_f seviyelerini üretmiş; tekrar edilebilirliği yüksek, stabil kuvvet davranışı göstermiştir. Talaş kesitinin küçük olması nedeniyle takım üzerindeki yük sınırlı kalmış ve buna paralel olarak yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri en iyi seviyelere ulaşmıştır. Hem yüzey kalitesi hem kuvvet büyüklükleri açısından en dengeli performans bu ilerleme düzeyinde elde edilmiştir.

Orta ilerleme olan **0,20 mm/dev**, talaş hacminin artmasıyla birlikte F_c ve özellikle F_f 'de belirgin yükselişlere neden olmuştur. Yüzey pürüzlülüğü 0,10 mm/dev koşullarına göre kötüleşmiş; verimlilik artsa da **kalite-yük dengesinin bozulmaya başladığı** gözlenmiştir.

Yüksek ilerleme değeri **0,30 mm/dev** ise maksimum kuvvet değerlerinin oluşmasına yol açmış, özellikle F_c 'deki artış belirginleşmiştir. Buna karşın F_f 'de göreceli olarak daha düşük artış eğilimi görülmüştür. Bu seviyede yüzey pürüzlülüğü (R_a ve R_z) belirgin şekilde bozulmuş, talaş yüzeyi düzensiz ve dalgalı karakter kazanmıştır. Artan verimliliğe rağmen yüksek kuvvetler ve kalite kaybı nedeniyle bu ilerleme seviyesi **optimum kullanım** açısından uygun değildir.

Genel eğilim değerlendirildiğinde, ilerleme arttıkça F_c 'nin daha lineer bir yükseliş sergilediği; F_f 'nin ise artışa daha hassas tepki vererek daha keskin bir yükseliş eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Yüzey kalitesi düşük ilerleme seviyelerinde belirgin şekilde iyiyken, yüksek ilerlemelerde bozulmuş ve literatürdeki genel talaş oluşumu prensipleriyle uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, 0,10 mm/dev ilerleme değeri, kesme ve ilerleme kuvvetlerinin düşük olması, yüzey kalitesinin yüksek olması ve proses kararlılığı sağlaması nedeniyle **en uygun ilerleme miktarı** olarak belirlenmiştir. Orta ve yüksek ilerleme değerleri, kuvvet artışı ve yüzey kalitesi kaybı nedeniyle **sınırlı kullanım alanlarına** sahiptir.

5.5. Talaş Derinliğinin (ap) Kesme ve İlerleme Kuvvetlerine Etkisi

Talaş derinliği (ap), talaş kesitini doğrudan belirlediği için kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrelerden biridir. Talaş derinliğinin artması, talaş kesit alanının büyümesine ve takımın aynı anda daha fazla malzeme kaldırmasına neden olduğundan hem kesme kuvveti (F_c) hem de ilerleme kuvveti (F_f) üzerinde belirgin artışlar meydana getirmiştir.

Düşük talaş derinliği olan **1,0 mm**, deneylerde en düşük kuvvet değerlerinin elde edildiği koşuldur. Bu seviyede takım üzerindeki yük sınırlı kaldığından F_c ve F_f daha stabil bir eğilim sergilemiş, yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri de daha iyi sonuçlar vermiştir. Sistem genel olarak daha az zorlanmış ve hem yüzey kalitesi hem kuvvetler açısından **dengeli bir performans** ortaya çıkmıştır.

Orta talaş derinliği olan **1,5 mm**, talaş hacmindeki artışa bağlı olarak F_c 'de daha keskin bir yükselişe yol açmıştır. F_f 'de de artış gözlenmiş olmakla birlikte bu artış F_c 'ye kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Bu seviyede kuvvet büyüklükleri ile yüzey kalitesi arasında **orta düzeyde bir denge** sağlanmıştır.

Yüksek talaş derinliği **2,0 mm**, çalışmanın en yüksek kuvvet değerlerine ulaştığı seviyedir. F_c 'deki artış, düşük talaş derinliği olan 1,0 mm'ye kıyasla **%40–50 oranında** yükseliş göstermiştir. F_f 'de de paralel bir artış meydana gelmiş; ancak artış oranı F_c kadar belirgin olmamıştır. Yüzey pürüzlülüğünde (R_a) belirgin bir bozulma oluşmuş, yüksek yük nedeniyle yüzeyde dalgalı bir yapı ortaya çıkmıştır. Bu durumun takım aşınmasını hızlandırması da muhtemeldir.

Genel eğilim incelendiğinde, talaş derinliği arttıkça F_c 'nin yaklaşık doğrusal şekilde yükseldiği, F_f 'nin ise daha sınırlı bir hassasiyetle artış gösterdiği belirlenmiştir. Yüzey kalitesi düşük ap seviyelerinde daha iyi, yüksek ap seviyelerinde ise daha kötü değerler üretmiştir.

Sonuç olarak, talaş derinliği kesme kuvvetleri üzerinde en baskın etkilerden birine sahiptir. **ap = 2,0 mm** seviyesinde kuvvetler, **ap = 1,0 mm** koşuluna kıyasla neredeyse iki katına yaklaşmakta; bu durum hem yüzey kalitesini düşürmekte hem de takım yükünü ve aşınma riskini artırmaktadır. Bu nedenle talaş derinliği seçiminde **verimlilik–yük–kalite dengesi** göz önünde bulundurulmalıdır.

5.6. Bölge Faktörünün Kesme ve İlerleme Kuvvetlerine Etkisi

Deneylerde her mil **13 bölgeye** ayrılmış ve her bölgede **25 mm** talaş kaldırılmıştır. Elde edilen Excel verilerinde, bölge numarasına bağlı olarak kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme kuvveti (F_f) hakkında **tek yönlü ve net bir eğilim** ortaya koymak mümkün olmamıştır.

Bazı deneylerde bölge ilerledikçe kuvvetlerin arttığı, bazı deneylerde ise tam tersine kuvvetlerin azaldığı gözlenmiştir. Bunun başlıca nedenleri:

- Milin uzun olması ve puntalı konumda işlenmesi nedeniyle farklı bölgelerde farklı titreşim koşullarının oluşması,
- Malzeme yapısındaki lokal sertlik ve yapı değişimleri,
- İşleme süresi ilerledikçe takım aşınmasının bölgeler arasında farklı etki göstermesidir.

Bununla birlikte, özellikle **10–13. bölgelerde** F_c değerlerinde **%20–30’a varan artışlar** gözlenmiştir. Bu durum, bölge faktörünün aynı zamanda **takım aşınmasını yansıtan bir parametre** olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Deney sonuç verileri Şekil 5.14 verilmiştir bu verilerde farklı parametre değerlerinde elde edilen ortalama kesme , ortalama ilerleme kuvveti , yüzey pürüzlülük sonuçları kuvvet oranları vb. diğer detaylar sunulmuştur .

5.7. Kesme (F_c) ve İlerleme (F_f) Kuvvetlerinin Karşılaştırılması ve Ek Bulgular

Bu bölümde, kesme kuvveti (F_c) ile ilerleme kuvveti (F_f) arasındaki ilişki ve buna bağlı bazı ek değerlendirmeler ele alınmıştır. Analiz sırasında, boşta kesim anlarına karşılık gelen sıfır değerler ayıklanarak yalnızca talaşlı işleme anındaki gerçek kuvvetler değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular:

- F_c ve F_f arasında güçlü bir **pozitif korelasyon** vardır; tüm parametre setlerinde F_c arttığında F_f de artmıştır.
- Genel olarak **$F_c > F_f$** çıkmıştır. Ancak bazı özel koşullarda (örneğin 1000 dev/dk’da düşük ilerleme) F_f ’nin F_c ’ye yaklaştığı gözlenmiştir.
- Talaş sıkışması veya talaş kırılmasının yaşandığı anlarda her iki kuvvette de **eşzamanlı dalgalanmalar** meydana gelmiştir.

Deneyler boyunca **Fc/Ff oranı yaklaşık 1,5–17,5** aralığında değişmiştir. Düşük ilerleme miktarlarında veya yüksek devirlerde oran daha düşük gerçekleşmiş; buna karşın düşük hızlarda ya da yüksek talaş derinliği koşullarında Fc'nin baskınlığı artarak oran yükselmiştir. Özellikle **yüksek talaş derinliği + düşük devir** kombinasyonlarında Fc/Ff oranı en yüksek seviyelere çıkmıştır.

Parametre etkilerine bakıldığında:

- Bölge ilerledikçe, Fc artışı Ff'den daha hızlı olabilmekte ve **Fc/Ff oranı** yükselmektedir.
- İlerleme arttıkça Ff daha hassas ve belirgin şekilde artmakta, bu nedenle Fc/Ff oranı **düşme eğiliminde** olmaktadır.
- Talaş derinliği arttıkça Fc baskın şekilde artmakta ve oran tekrar yükselmektedir.

Tekrarlar açısından bakıldığında, çoğu kombinasyonda sapmalar **%10'un altında** kalmış ve Fc–Ff korelasyonu güçlü bulunmuştur. Ancak yüksek ilerleme ve yüksek talaş derinliği içeren bazı setlerde sapmalar **%20'nin üzerine** çıkmış; bu durumun talaş sıkışması, düzensiz talaş oluşumu veya lokal takım aşınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Enerji verimliliği açısından kuvvetlerin büyüklüğü doğrudan tezgâh motorunun harcadığı enerjiyi belirlemektedir.

- **f = 0,10 mm/dev, ap = 1,0 mm** (düşük yük koşulları): Fc ve Ff değerleri düşük seviyelerde kalmış, enerji ihtiyacı minimum düzeyde olmuştur. Bu kombinasyon, hem yüzey kalitesi hem de enerji verimliliği açısından **dengeli bir seçenek** sunmuştur.
- **f = 0,30 mm/dev, ap = 2,0 mm** (yüksek yük koşulları): Fc ve Ff maksimum seviyelere çıkmış, motor yüklenmesi artmış ve enerji tüketimi yükselmiştir. Özellikle düşük devirli koşullarda enerji ihtiyacı ciddi şekilde artmıştır.

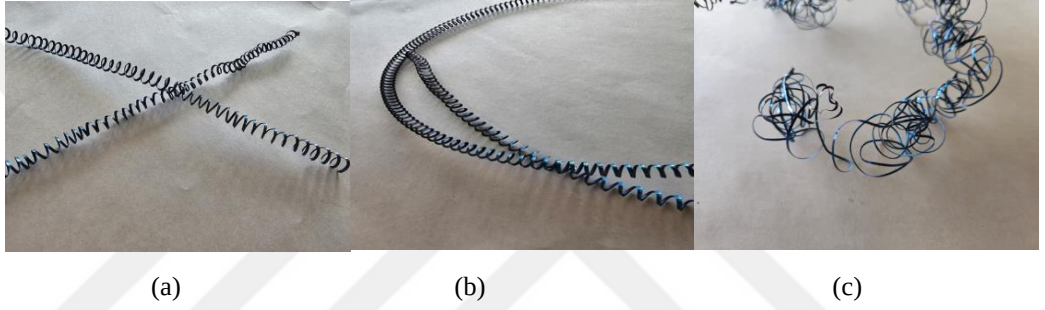
Talaş morfolojisi ile kuvvetler arasında da doğrudan bir ilişki gözlenmiştir:

- Uzun ve sürekli talaşlar, özellikle yüksek talaş derinliği (2,0 mm) ve yüksek ilerleme (0,30 mm/dev) koşullarında görülmüş; bu koşullarda Fc ve Ff değerleri yükselmiş, yüzey pürüzlülüğü bozulmuştur.
- Kısa kırık talaşlar, genellikle f = 0,10 mm/dev, ap = 1,0 mm kombinasyonunda ve orta devirlerde elde edilmiş; bu durumda Fc ve Ff daha düşük kalmış, yüzey kalitesi iyileşmiştir.

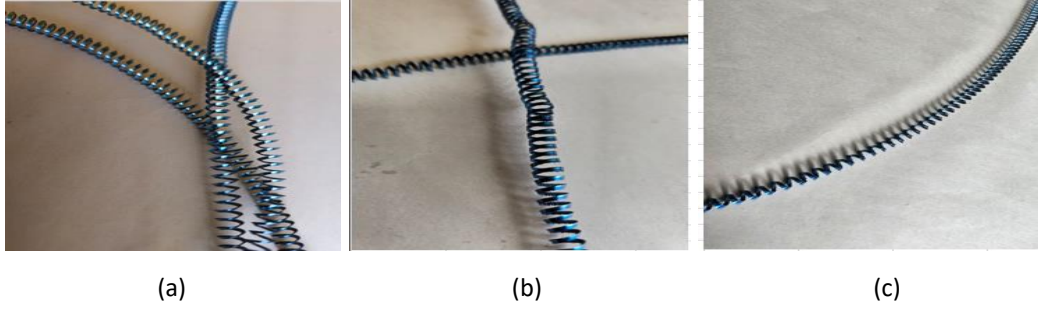
- Yığılma talaşı (BUE), özellikle 250 dev/dk düşük hız + yüksek ilerleme (0,30 mm/dev) koşullarında gözlenmiş; F_c 'de ani artışlara ve yüzey bozulmalarına neden olmuştur.

Tekrar edilebilirlik açısından bakıldığında, 81 deneyin yaklaşık **%70'inde** tekrarlar birbirine çok yakın çıkmış (sapma $< \%10$) ve ölçüm sisteminin güvenilirliğini kanıtlamıştır. Sapmalar genellikle **ağır kesme koşullarında** ($f = 0,30$ mm/dev, $a_p = 2,0$ mm, son bölgeler) ortaya çıkmış ve bu durum fiziksel etkilerle açıklanabilir bulunmuştur.

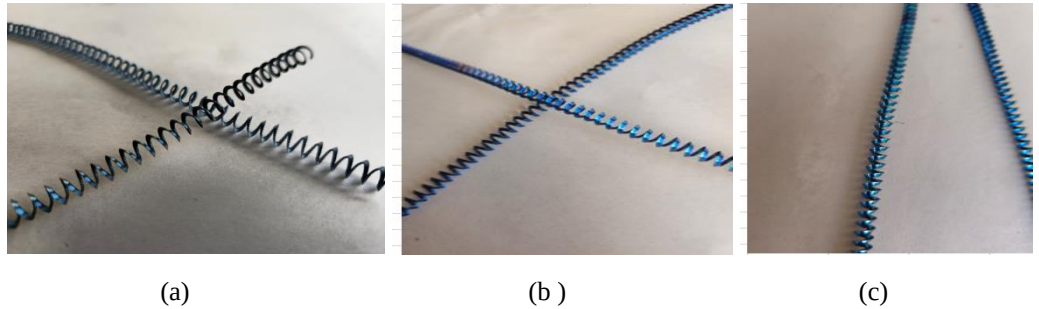
Genel olarak, F_c ve F_f 'nin birlikte izlenmesi talaş kaldırma sürecinin stabilitesine ilişkin önemli bilgiler sunmakta; **F_c/F_f oranı** ise sürecin sağlığını, takım aşınmasını ve olası talaş sıkışmalarını takip etmek için **güvenilir bir metrik** olarak öne çıkmaktadır.



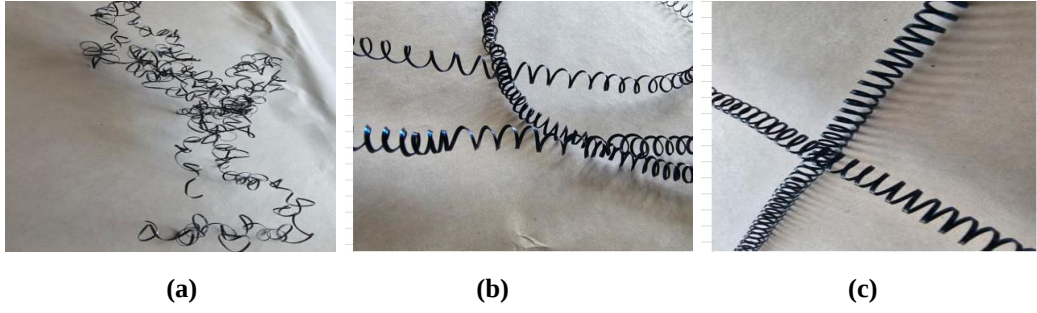
Şekil5.5. 500 dev/dk da $a_p = 1$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



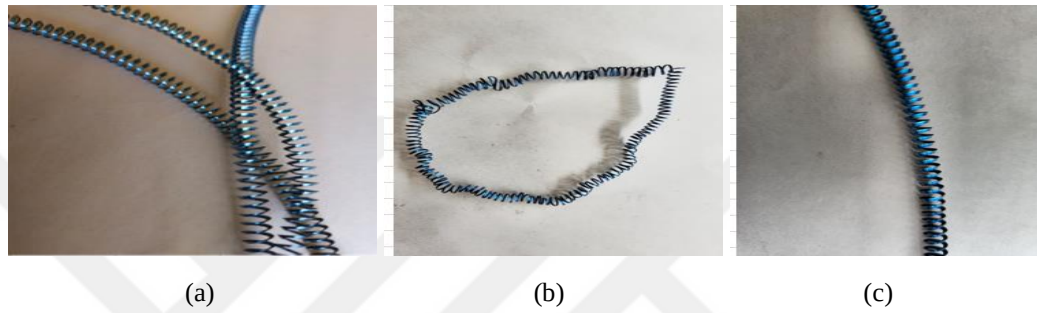
Şekil5.6. 500 dev/dk da $a_p = 1,5$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



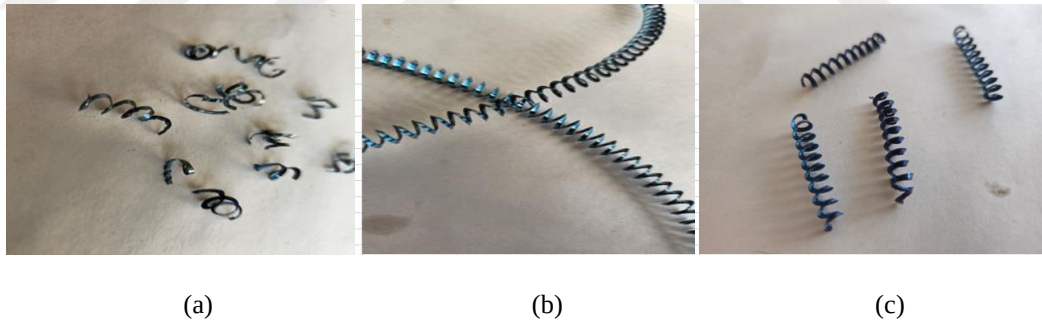
Şekil5.7. 500 dev/dk da $a_p = 2$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



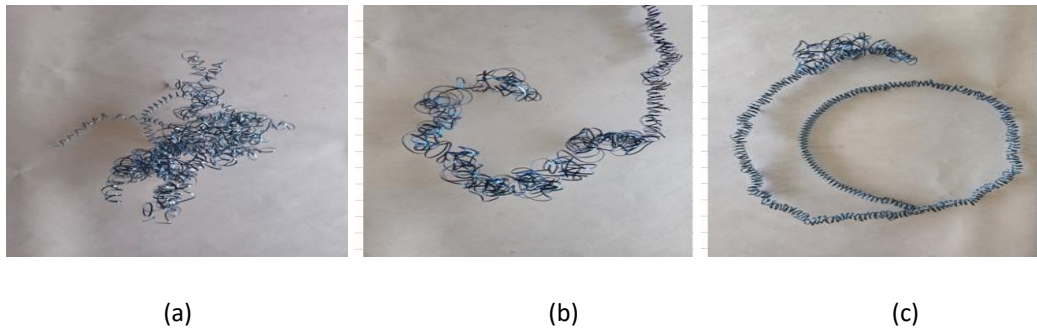
Şekil5.8. 750 dev/dk da $a_p=1$ mm (a) $f=0,10$ mm/dev (b) $f=0,20$ mm/dev (c) $f=0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



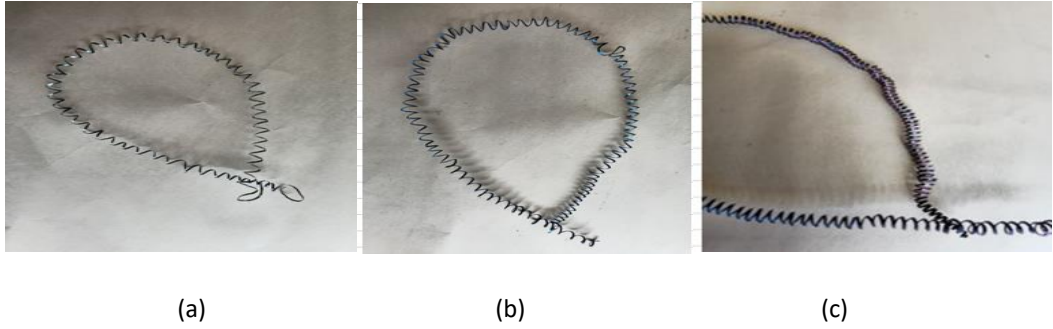
Şekil5.9. 750 dev/dk da $a_p=1,5$ mm (a) $f=0,10$ mm/dev (b) $f=0,20$ mm/dev (c) $f=0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



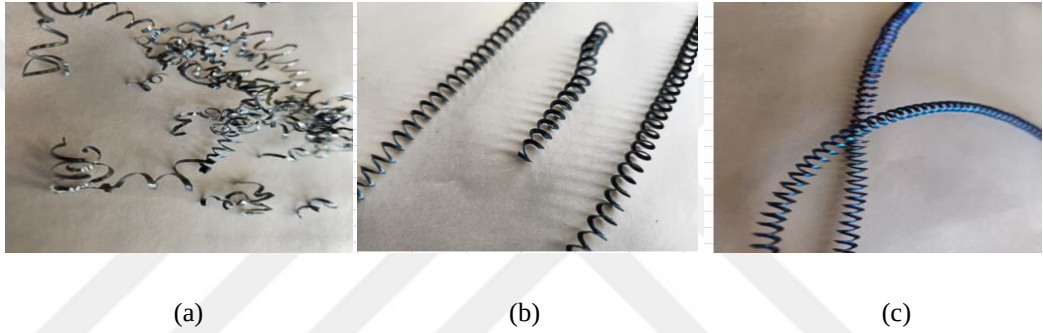
Şekil5.10. 750 dev/dk da $a_p=2$ mm (a) $f=0,10$ mm/dev (b) $f=0,20$ mm/dev (c) $f=0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



Şekil5.11. 1000 dev/dk da $a_p=1$ mm (a) $f=0,10$ mm/dev (b) $f=0,20$ mm/dev (c) $f=0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



Şekil5.12. 1000 dev/dk da $a_p = 1,5$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri



Şekil5.13. 1000 dev/dk da $a_p = 2$ mm (a) $f = 0,10$ mm/dev (b) $f = 0,20$ mm/dev (c) $f = 0,30$ mm/dev de talaş görüntüleri

Şekil 5.5. ile **Şekil 5.13.** arasında, farklı devir sayısı, ilerleme miktarı **ve** talaş derinliği değerlerinde gerçekleştirilen tornalama deneyleri sonucunda oluşan **talaşlara ait fotoğraflar** sunulmuştur. Bu şekiller, kesme parametrelerindeki değişimin talaş oluşumu üzerindeki etkisinin görsel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Deney No	Çubuk	Bölge	n (rpm)	f (mm/dev)	ap (mm)	Ra (µm)	Rz (µm)	Fc_ORTALAMA (N)	Ff_ORTALAMA (N)	Başlangıç Çapı	Bitiş Çapı	Fc/Ff oranı
1	A ÇUBUĞU	1	250	0,1	1	3,11	9,84	628,4695	94,598	56	55	6,643581
2	A ÇUBUĞU	2	500	0,1	1	1,35	5,28	269,88	46,47	56	55	5,807706
3	A ÇUBUĞU	3	750	0,1	1	0,85	3,69	160,1715	29,077	56	55	5,508529
4	A ÇUBUĞU	4	250	0,2	1			1278,09	94,518	56	55	13,52219
5	A ÇUBUĞU	5	500	0,2	1	2,9	8,98	533,137	54,086	56	55	9,857209
6	A ÇUBUĞU	6	750	0,2	1	2,01	6,71	338,958	29,935	56	55	11,32313
7	A ÇUBUĞU	7	250	0,3	1			3017,09	31,39142857	56	55	96,1119
8	A ÇUBUĞU	8	500	0,3	1	2,92	8,63	696,43	61,78428571	56	55	11,27196
9	A ÇUBUĞU	9	750	0,3	1	2,59	9,11	489,66	35,06666667	56	55	13,96369
10	A ÇUBUĞU	10	500	0,1	1	1,65	6,45	305,6652632	47,92052632	56	55	6,378587
11	A ÇUBUĞU	11	750	0,1	1	0,78	3,51	205,2442105	39,51578947	56	55	5,19398
12	A ÇUBUĞU	12	1000	0,1	1	0,56	2,25	136,7884211	17,33578947	56	55	7,890522
13	A ÇUBUĞU	13	500	0,2	1	2,67	8,7	478,071	44,19	56	55	10,81853
14	B ÇUBUĞU	1	750	0,2	1	1,97	7,15	305,5533333	25,80777778	54	53	11,83958
15	B ÇUBUĞU	2	1000	0,2	1	1,34	5,36	207,144	16,789	54	53	12,33808
16	B ÇUBUĞU	3	500	0,3	1	3,26	10	628,82	36,76	54	53	17,10609
17	B ÇUBUĞU	4	750	0,3	1	2,85	8,28	466,5957143	32,09571429	54	53	14,53763
18	B ÇUBUĞU	5	1000	0,3	1	2,29	7,7	337,5328571	28,74142857	54	53	11,74377
19	B ÇUBUĞU	6	500	0,1	1	1,43	5,34	304,3110526	47,74315789	54	53	6,37392
20	B ÇUBUĞU	7	750	0,1	1	0,85	3,47	204,7326316	39,54526316	54	53	5,177172
21	B ÇUBUĞU	8	1000	0,1	1	0,56	2,55	145,85	25,40368421	54	53	5,741293
22	B ÇUBUĞU	9	500	0,2	1	2,8	7,96	498,86	47,997	54	53	10,39357
23	B ÇUBUĞU	10	750	0,2	1	1,97	6,46	338,074	34,365	54	53	9,837742
24	B ÇUBUĞU	11	1000	0,2	1	1,29	5	214,592	20,751	54	53	10,34128
25	B ÇUBUĞU	12	500	0,3	1	2,83	8,05	679,4057143	52,96	54	53	12,82866
26	B ÇUBUĞU	13	750	0,3	1	2,73	8,55	459,0742857	32,79428571	54	53	13,99861
27	C ÇUBUĞU	4	1000	0,3	1	2,39	8,18	277,4466667	13,27	47	46	20,90781
28	A ÇUBUĞU	1	500	0,1	1,5	1,58	5,36	376,4373684	60,50789474	55	53,5	6,221293
29	A ÇUBUĞU	2	750	0,1	1,5	2,48	7,25	263,8515789	51,51947368	55	53,5	5,121395
30	A ÇUBUĞU	3	1000	0,1	1,5	1,31	5,47	198,11	57,79052632	55	53,5	3,428071
31	A ÇUBUĞU	4	500	0,2	1,5	2,54	8,12	691,089	83,904	55	53,5	8,236663
32	A ÇUBUĞU	5	750	0,2	1,5	1,94	6,74	444,816	45,628	55	53,5	9,748751
33	A ÇUBUĞU	6	1000	0,2	1,5	1,39	5,28	324,2427273	42,00909091	55	53,5	7,718394
34	A ÇUBUĞU	7	500	0,3	1,5	3,19	8,27	1057,758333	126,165	55	53,5	8,383928
35	A ÇUBUĞU	8	750	0,3	1,5	2,76	8,5	659,81	63,39285714	55	53,5	10,40825
36	A ÇUBUĞU	9	1000	0,3	1,5	2,27	7,5	487,5216667	39,97333333	55	53,5	12,19617
37	A ÇUBUĞU	10	500	0,1	1,5	1,67	6,59	379,5484211	61,34684211	55	53,5	6,186927
38	A ÇUBUĞU	11	750	0,1	1,5	1,1	3,99	278,36	52,68052632	55	53,5	5,283926
39	A ÇUBUĞU	12	1000	0,1	1,5	1,36	5,16	214,198	47,56	55	53,5	4,504121
40	A ÇUBUĞU	13	500	0,2	1,5	2,92	8,82	645,395	72,573	55	53,5	8,893046
41	B ÇUBUĞU	1	750	0,2	1,5	2,05	7,09	412,6218182	37,56818182	53,5	52	10,98328
42	B ÇUBUĞU	2	1000	0,2	1,5	1,46	5,62	328,51	34,324	53,5	52	9,570854
43	B ÇUBUĞU	3	500	0,3	1,5	3,08	8,69	856,7142857	76,32142857	53,5	52	11,22508
44	B ÇUBUĞU	4	750	0,3	1,5	2,78	8,67	599,2885714	52,18571429	53,5	52	11,48377
45	B ÇUBUĞU	5	1000	0,3	1,5	2,32	7,79	465,8366667	42,56333333	53,5	52	10,94455
46	B ÇUBUĞU	6	500	0,1	1,5	1,51	5,66	381,1989474	60,18684211	53,5	52	6,333593
47	B ÇUBUĞU	7	750	0,1	1,5	1,16	4,76	274,0368421	47,25157895	53,5	52	5,799528
48	B ÇUBUĞU	8	1000	0,1	1,5	1,26	5,5	210,59	40,89947368	53,5	52	5,148966
49	B ÇUBUĞU	9	500	0,2	1,5	2,66	8,49	642,2733333	68,18777778	53,5	52	9,419186
50	B ÇUBUĞU	10	750	0,2	1,5	2,01	7,69	439,2066667	47,06333333	53,5	52	9,332247
51	B ÇUBUĞU	11	1000	0,2	1,5	1,44	5,48	336,724	40,014	53,5	52	8,415155
52	B ÇUBUĞU	12	500	0,3	1,5	3,02	8,61	942,8083333	84,65666667	53,5	52	11,13685
53	B ÇUBUĞU	13	750	0,3	1,5	2,67	8,77	645,4733333	52,76	53,5	52	12,23414
54	C ÇUBUĞU	3	1000	0,3	1,5	1,99	6,69	434,3116667	39,27666667	47	45,5	11,05775
55	A ÇUBUĞU	1	500	0,1	2	1,63	6,23	553,2715	116,5447368	52	50	4,747289
56	A ÇUBUĞU	3	750	0,1	2	1,9	7,01	346,6768421	237,4810526	52	50	1,459808
57	A ÇUBUĞU	4	1000	0,1	2	1,95	6,07	261,373	175,2855	52	50	1,491127
58	A ÇUBUĞU	5	500	0,2	2	2,83	8,27	939,394	140,66	52	50	6,678473
59	A ÇUBUĞU	6	750	0,2	2	2,1	7,14	591,875	82,195	52	50	7,200864
60	A ÇUBUĞU	7	1000	0,2	2	1,65	6,11	447,417	75,067	52	50	5,960236
61	A ÇUBUĞU	8	500	0,3	2	3,12	8,06	1035,913333	155,5216667	52	50	6,660894
62	A ÇUBUĞU	9	750	0,3	2	2,75	9,43	846,7266667	106,1133333	52	50	7,979456
63	A ÇUBUĞU	10	1000	0,3	2	2,42	7,93	609,1071429	74,7	52	50	8,154045
64	A ÇUBUĞU	11	500	0,1	2	1,59	5,73	547,46	95,54631579	52	50	5,729787
65	A ÇUBUĞU	12	750	0,1	2	1,47	4,78	362,0633333	83,06888889	52	50	4,358591
66	A ÇUBUĞU	13	1000	0,1	2	1,73	6,46	255,479	85,064	52	50	3,003374
67	B ÇUBUĞU	1	500	0,2	2	2,86	8,93	810,872	131,62	53	51	6,160705
68	B ÇUBUĞU	2	750	0,2	2	2,31	7,45	594,845	85,982	53	51	6,91825
69	B ÇUBUĞU	3	1000	0,2	2	1,79	6,27	470,604	87,118	53	51	5,401915
70	B ÇUBUĞU	4	500	0,3	2	3,18	8,73	1066,255714	167,1914286	53	51	6,377454
71	B ÇUBUĞU	5	750	0,3	2	3,02	8,7	826,6957143	108,8342857	53	51	7,595913
72	B ÇUBUĞU	6	1000	0,3	2	2,35	7,96	618,4157143	85,57142857	53	51	7,226895
73	B ÇUBUĞU	7	500	0,1	2	2,02	6,92	523,2663158	279,0552632	53	51	1,875135
74	B ÇUBUĞU	8	750	0,1	2	1,8	6,44	334,1726316	70,21263158	53	51	4,759437
75	B ÇUBUĞU	9	1000	0,1	2	1,55	5,79	258,5378947	89,78210526	53	51	2,879615
76	B ÇUBUĞU	10	500	0,2	2	2,66	8,49	754,7409091	129,2145455	53	51	5,84099
77	B ÇUBUĞU	11	750	0,2	2	2,01	6,95	597,437	86,282	53	51	6,924237
78	B ÇUBUĞU	12	1000	0,2	2	1,78	6,12	464,118	81,184	53	51	5,716865
79	B ÇUBUĞU	13	500	0,3	2	3,03	9,5	1078,601429	155,36	53	51	6,942594
80	C ÇUBUĞU	1	750	0,3	2	3,09	9,14	834,6028571	112,6242857	47	45	7,410505
81	C ÇUBUĞU	2	1000	0,3	2	2,17	7,65	600,9657143	82,13285714	47	45	7,316995

Şekil 5.14. Deney sonuç verileri

6. TARTIŞMA, GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Tartışma

Bu çalışmada, torna tezgâhında gerçekleştirilen 81 deney sonucunda elde edilen veriler, kesme kuvvetlerinin (F_c), ilerleme kuvvetlerinin (F_f) ve yüzey pürüzlülüğünün (R_a , R_z) **çok faktörlü ve etkileşimli** bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Devir sayısı (n), ilerleme miktarı (f), talaş derinliği (a_p) ve bölge faktörü hem tek tek hem de birlikte incelenmiş; bu parametrelerin sürece etkisi detaylı olarak ortaya konmuştur.

6.1.1. Devir sayısının (n) etkisi

Deney sonuçları göstermiştir ki **250 dev/dk**'da kuvvetler yüksek çıkmış ve yüzey kalitesi bozulmuştur. Bunun nedeni, düşük hızda takımın talaşla daha uzun süre temas etmesi ve talaşın kırılmamasıdır.

500 dev/dk'da kuvvetler dengelenmiş, yüzey pürüzlülüğü değerleri kabul edilebilir seviyelere ulaşmıştır. **750–1000 dev/dk** aralığında devir arttıkça kuvvetler genel olarak azalma eğilimi göstermiştir. Özellikle **1000 dev/dk**'da F_c bazı setlerde oldukça düşük seviyelere gerilemiştir. Belirli kombinasyonlarda (ör. $f = 0,10$ mm/dev, $a_p = 1,0$ mm) yüzey kalitesi de iyileşmiş ve düşük R_a değerlerine ulaşılmıştır.

Yorum: Devir sayısı, kuvvetler üzerinde genel olarak **azaltıcı ve dengeleyici** bir etki göstermiş; verimlilik ve yüzey kalitesi birlikte değerlendirildiğinde 750–1000 dev/dk aralığı öne çıkmıştır.

6.1.2. İlerlemenin (f) etkisi

- **$f = 0,10$ mm/dev:** F_c ve F_f düşük seviyelerde kalmış, yüzey kalitesi en iyi seviyede elde edilmiştir.
- **$f = 0,30$ mm/dev:** Özellikle F_f 'de ciddi artış görülmüş, F_f F_c 'ye göre daha hassas bir şekilde yükselmiştir. Yüzey pürüzlülüğü de bu koşullarda belirgin şekilde bozulmuştur.

Yorum: İlerleme, **yüzey kalitesini en çok etkileyen** parametre olmuştur. Düşük ilerleme daha iyi yüzey ve daha stabil kuvvetler sağlarken, yüksek ilerleme verimliliği artırmasına rağmen yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir.

6.1.3. Talaş derinliğinin (ap) etkisi

- **ap = 1,0 mm:** Kuvvetler orta düzeyde kalmış, yüzey kalitesi kabul edilebilir seviyede olmuştur.
- **ap = 2,0 mm:** Fc'de yaklaşık **%40–50 artış** görülmüş, yüksek talaş hacmi Fc'nin baskın şekilde yükselmesine neden olmuştur.

Yorum: Talaş derinliği, **kuvvetleri en çok artıran** parametre olarak öne çıkmıştır.

6.1.4. Genel değerlendirme

- **En çok kuvveti etkileyen parametre:** Talaş derinliği (ap)
- **En çok yüzey kalitesini etkileyen parametre:** İlerleme (f)
- **Dengeleyici parametre:** Devir sayısı (n)
- **Zaman/bölge etkisi:** Takım aşınmasını ve süreç boyunca kuvvet artışını ortaya koyan parametre

Bu sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir. Pek çok çalışmada ilerlemenin yüzey kalitesini, talaş derinliğinin kuvvetleri, devir sayısının ise her iki etkiyi dengelediği belirtilmektedir. Bu tez çalışmasında da aynı eğilimler **deneysel olarak doğrulanmıştır**.

6.2. Genel Sonuçlar Ve Katkıları

Bu tez çalışmasında, torna tezgâhında gerçekleştirilen **81 deney** sonucunda kesme kuvvetleri (Fc), ilerleme kuvvetleri (Ff) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz) detaylı olarak incelenmiştir. Deney tasarımı devir sayısı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve bölge faktörü sistematik biçimde ele alınmış; her parametrenin hem tek başına hem de diğerleriyle etkileşim içindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Elde edilen başlıca genel sonuçlar şunlardır:

1-) **Fc ve Ff arasında güçlü pozitif bir ilişki** vardır. Genel olarak $F_c > F_f$ çıkmış, ancak bazı özel koşullarda (ör. yüksek devir ve düşük ilerleme) F_f 'nin F_c 'ye yaklaştığı görülmüştür.

2-) En düşük kuvvetler, **f = 0,10 mm/dev** ve **ap = 1,0 mm** koşullarında elde edilmiştir. Bu kombinasyon, hem enerji tüketimi hem de takım ömrü açısından avantaj sağlamıştır.

3-) En iyi yüzey kalitesi, genellikle **n = 1000 dev/dk – f = 0,10 mm/dev – ap = 1,0 mm** kombinasyonunda ölçülmüştür. Bu koşullar, kuvvetler ve yüzey kalitesi açısından **optimum dengeyi** sunmuştur.

4-) En kötü yüzey kalitesi, **f = 0,30 mm/dev** ve **ap = 2,0 mm** kombinasyonlarında ortaya çıkmıştır. Bu durumda talaş sürekli hâle gelmiş, yüzeyde bozulmalar gözlenmiştir.

5-) Bölge faktörü, kuvvetlerde **%20–30 artışa** yol açmıştır. Özellikle 10–13. bölgelerde F_c 'nin keskin şekilde yükselmesi, takım aşınmasının işleme sürecini sınırladığını göstermektedir.

6-) Optimum parametre kombinasyonu olarak:

- n = 1000 dev/dk
- f = 0,10 mm/dev
- ap = 1,0 mm belirlenmiştir.

Bu koşullarda kuvvetler düşük, yüzey kalitesi iyi ve tekrar edilebilirlik yüksek bulunmuştur.

7-) Enerji verimliliği açısından, kuvvetlerin düşük olduğu kombinasyonlar aynı zamanda enerji tüketimini de minimize etmiştir. Bu nedenle optimum parametreler, hem **kalite** hem de **maliyet** açısından avantaj sağlamaktadır.

8-) Talaş morfolojisi açısından, **kısa ve kırık talaşlar** düşük kuvvetler ve iyi yüzey kalitesiyle birlikte görülmüş; **uzun ve sürekli talaşlar** ise yüksek kuvvetler ve bozulmuş yüzey kalitesiyle ilişkilendirilmiştir. Bu durum, kuvvet ölçümlerinin talaş davranışını öngörmede güvenilir bir gösterge olduğunu göstermektedir.

9-) Tekrar edilebilirlik analizi sonucunda, 81 deneyin yaklaşık **%70'inde** tekrarlar birbirine çok yakın çıkmış (sapma $< \%10$) ve ölçüm sisteminin güvenilirliği ortaya konmuştur. Sapmalar genellikle ağır kesme koşullarında ($f = 0,30$ mm/dev; $ap = 2,0$ mm) ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmanın **akademik katkıları**:

- Bölge faktörünü ve tekrar analizlerini sistematik biçimde ele alarak, literatürdeki birçok çalışmaya göre daha detaylı bir analiz sunmuştur.
- Deneysel veri tabanı, ileride yapılacak yapay zekâ tabanlı optimizasyon, modelleme ve kestirim çalışmalarına **referans** teşkil edecek niteliktedir.

Bu çalışmanın **endüstriyel katkıları**:

- Kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi ilişkisini, enerji tüketimi, takım ömrü ve proses optimizasyonu ile ilişkilendirerek **uygulamaya dönük öneriler** sunmuştur.
- Bölgesel kuvvet artışlarının takım ömrü planlamasında kullanılabileceğini göstermiş; optimum parametrelerle enerji ve maliyet tasarrufuna yönelik somut öneriler geliştirmiştir.

6.3. Öneriler

6.3.1. Endüstriyel uygulamalar için

- **ANOVA ve istatistiksel analiz:** Endüstriyel üretim hatlarında parametrelerin anlamlılık düzeylerini belirlemek için ANOVA uygulanabilir. Böylece kaliteyi en çok etkileyen parametreler net olarak ortaya konabilir.
- **Modelleme ve optimizasyon:** Elde edilen F_c , F_f ve R_a verileri; regresyon, bulanık mantık veya yapay zekâ tabanlı modellerle işlenerek optimum parametreler tahmin edilebilir. Bu yaklaşım, özellikle seri üretimde zaman ve maliyet tasarrufu sağlayacaktır.
- **Takım malzemeleri:** Farklı takım kaplamaları (TiN , $TiAlN$ vb.) veya seramik/elmas takımlar kullanılarak aynı analizler tekrarlanabilir, takım ömrü ve maliyet açısından karşılaştırmalar yapılabilir.
- **Titreşim ölçümleri:** Kesme kuvvetleriyle titreşim arasındaki ilişki, üretim hattında kalite kontrol amaçlı kullanılabilir. Kuvvet sensörleri titreşim sensörleriyle eşleştirilirse takım aşınması daha erken tespit edilebilir.
- **Gerçek zamanlı izleme:** Bu çalışmada kullanılan F_c - F_f ölçüm sistemi, endüstride gerçek zamanlı kontrol panellerine entegre edilerek operatöre anlık bilgi sağlayabilir; ani artışlarda alarm sistemleri devreye sokulabilir.

- **Enerji verimliliği:** Optimum parametrelerin (ör. $n = 1000$ dev/dk, $f = 0,10$ mm/dev, $a_p = 1,0$ mm) endüstride uygulanması, enerji tasarrufu sağlayarak işletme maliyetlerini düşürebilir.

6.3.2. Akademik / gelecek çalışmalar için

- **Titreşim (vibrasyon) analizi:** F_c ve F_f verileri, hızlanma sensörleri ile birlikte değerlendirilerek titreşim–kuvvet ilişkisi araştırılabilir. Bu, dinamik kesme modellerine katkı sağlayacaktır.
- **Takım aşınma görüntüleme:** SEM veya optik mikroskop ile takım kenarındaki aşınmalar ayrıntılı olarak incelenebilir; böylece bölge faktörü ile kuvvet artışı doğrudan ilişkilendirilebilir.
- **Farklı takım malzemeleri/kaplamalar:** Bu çalışma çelik kesici ile yapılmıştır; gelecekte farklı kaplama ve malzemeler denenerek karşılaştırmalı analizler yapılabilir.
- **Yapay zekâ tabanlı optimizasyon:** Yapay sinir ağları, genetik algoritmalar veya destek vektör makineleri gibi yöntemlerle **en uygun parametre kombinasyonu** otomatik olarak seçilebilir.
- **Enerji–kalite optimizasyonu:** Yalnızca kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü değil, enerji tüketimi de modele dahil edilerek çok amaçlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.
- **Malzeme çeşitliliği:** Farklı malzemeler (ör. alüminyum, titanyum alaşımları vb.) üzerinde aynı deneylerin tekrarı ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü davranışları karşılaştırılabilir.
- **IoT ve akıllı üretim:** Kuvvet ölçüm sistemleri kablosuz sensörlerle donatılarak IoT tabanlı akıllı fabrika ortamlarında test edilebilir.

6.4. Ek Tartışmalar

6.4.1. Enerji tüketimi açısından yorum

Kesme kuvvetleri (F_c , F_f) doğrudan enerji tüketimine yansımaktadır. Kuvvetlerin yüksek olduğu kombinasyonlarda motor yüklenmesi artmakta; bu da hem enerji maliyetini yükseltmekte hem de tezgâh bileşenlerinde ısıl zorlanmalara yol açmaktadır.

Optimum parametrelerin seçimi, yalnızca yüzey kalitesi değil, **enerji verimliliği** açısından da kritik öneme sahiptir.

6.4.2. Talaş oluşumunun rolü

Talaş morfolojisi ile kuvvetler arasında doğrudan bir ilişki gözlenmiştir:

- Düşük devir + yüksek ilerleme → Uzun, kıvrılan talaşlar, yüksek F_c ve daha pürüzlü yüzey,
- Yüksek devir + düşük ilerleme → Kısa, kolay kırılan talaşlar, düşük F_c – F_f ve daha kaliteli yüzey.

Bu gözlemler, talaş şeklinin kesme mekanizmasını açıklayan pratik bir gösterge olduğunu, kuvvet ölçümlerinin ise talaş davranışıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

6.4.3. Yüzey kalitesinin fonksiyonel önemi

Yüzey pürüzlülüğü (R_a , R_z) yalnızca estetik bir kriter değildir; fonksiyonel performansla doğrudan bağlantılıdır. Düşük R_a değerleri:

- Daha yüksek aşınma direnci,
- Daha düşük sürtünme katsayısı,
- Kaplama ve yağlama performansının artması gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle optimum parametre seçimi, yalnızca işlem süreci sırasında değil, ürünün **servis ömrü** açısından da belirleyici bir faktördür.

6.4.4. İstatistiksel analiz ve optimizasyon

Bu çalışmada elde edilen **81 deneylik veri seti**, zengin bir istatistiksel analiz imkânı sunmaktadır. Bu veri seti üzerinde:

- ANOVA uygulanarak parametrelerin istatistiksel anlamlılığı belirlenebilir,
- Regresyon modelleri kurularak F_c , F_f ve R_a değerleri yüksek doğrulukla tahmin edilebilir,
- Çok kriterli optimizasyon yöntemleri (Taguchi, yapay zekâ algoritmaları vb.) ile “en düşük kuvvet + en iyi yüzey kalitesi + minimum enerji tüketimi” gibi çok amaçlı hedefler birlikte sağlanabilir.

Bu tür çalışmalar, akademik literatüre katkı sağlayacağı gibi endüstride de **karar destek sistemi** olarak kullanılabilir.

6.4.5. Endüstriyel uygulamalara katkı

- **Proses kontrolü:** F_c/F_f oranı veya R_a değeri üretim hattında eşik değer olarak tanımlanabilir; eşik aşıldığında operatöre uyarı verilebilir.
- **Maliyet analizi:** Kuvvetler ile enerji tüketimi ilişkilendirilerek, birim parça başına enerji maliyeti hesaplanabilir ve rekabetçi üretim stratejileri geliştirilebilir.
- **Akıllı fabrikalar:** Kuvvet sensörlerinin IoT tabanlı sistemlere entegrasyonu ile kestirimci bakım ve otomatik optimizasyon senaryoları uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Melayim, H. (2019). *Torna tezgahlarında kesme kuvvetlerinin ölçümü için dinamometre tasarımı ve imalatı* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Veri Tabanı.
- Korkmaz, M. (2019). *Metal kesme işlemlerinde kullanılmak amacıyla, kablosuz çok eksenli bir dinamometrenin geliştirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi]. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Veri Tabanı.
- Özdemir, H. (2006). *Tornalama işleminde kesme kuvveti ölçümünde kullanılacak dinamometre tasarımı ve üretimi* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Veri Tabanı.
- Bharilya, R. K., Malgaya, R., Patidar, L., Gurjar, R. K., ve Jha, A. K. (2015a). Study of Optimised Process Parameters in Turning Operation Through Force Dynamometer on CNC Machine. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2300-2305. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.268>
- Bharilya, R. K., Malgaya, R., Patidar, L., Gurjar, R. K., ve Jha, A. K. (2015b). Study of Optimised Process Parameters in Turning Operation Through Force Dynamometer on CNC Machine. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2300-2305. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.268>
- Bioanalytical Method Validation Guidance for Industry*. (2018).
- Bourdim, M., Bourdim, A., ve Benamar, A. (2012). Conception of universal extensometric cutting dynamometer. *Advances in Production Engineering and Management*, 7(2), 93-100. <https://doi.org/10.14743/apem2012.2.133>
- Cheng, Y., Wu, W., Liu, L., He, Z., ve Song, D. (2022). Structural design and optimization of a turning tool embedded with thin-film strain sensors for in-process cutting force measurement. *AIP Advances*, 12(1), 015126. <https://doi.org/10.1063/5.0079837>

- Gunay, M., Seker, U., ve Sur, G. (2006a). Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. *Materials & Design*, 27(10), 1097-1101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.003>
- Gunay, M., Seker, U., ve Sur, G. (2006b). Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. *Materials and Design*, 27(10), 1097-1101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.003>
- Hanif, M. I., Aamir, M., Muhammad, R., Ahmed, N., ve Maqsood, S. (2016a). *Design and Development of Low Cost Compact Force Dynamometer for Cutting Forces Measurements and Process Parameters Optimization in Turning Applications*. 3(9).
- Hanif, M. I., Aamir, M., Muhammad, R., Ahmed, N., ve Maqsood, S. (2016b). *Design and Development of Low Cost Compact Force Dynamometer for Cutting Forces Measurements and Process Parameters Optimization in Turning Applications*. 3(9).
- Horváth, R., Pálincás, T., Mátyási, G., ve Drégelyi-Kiss, Á. (t.y.). *The design, calibration and adaption of a dynamometer for fine turning*.
- Karabay, S. (2007). Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process. *Materials and Design*, 28(2), 673-685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.008>
- Kasprzak, M., ve Pyzalski, M. (2021). Testing of Force Sensors for the Active Measurement and Limitation of Axial Loads in Heavy Turning. *Journal of Machine Engineering*, 21(4), 106-117. <https://doi.org/10.36897/jme/144597>
- Kazmi, S. W. H. (t.y.). *To Design, Develop and Test Strain Gauge Based Dynamometer for Measuring Cutting Forces in Turning*.

- Ke, F., Ni, J., ve Stephenson, D. A. (2005). Continuous chip formation in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(15), 1652-1658. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.011>
- Khammongkhon, N., Niropas, P., Pomusa, C., ve Suksawat, B. (2025a). Development and Implementation of Modular Turning Dynamometer with Miniature Load Cell. *The 8th Mechanical Engineering, Science and Technology International Conference*, 43. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084043>
- Khammongkhon, N., Niropas, P., Pomusa, C., ve Suksawat, B. (2025b). Development and Implementation of Modular Turning Dynamometer with Miniature Load Cell. *The 8th Mechanical Engineering, Science and Technology International Conference*, 43. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084043>
- Korkut, İ. (2003). A dynamometer design and its construction for milling operation. *Materials and Design*, 24(8), 631-637. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00122-5)
- Kumar, P., ve Yadav, S. K. S. (2023a). Measurement and analysis of cutting forces using dynamometer in turning of EN-8 steel. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323036155. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.222>
- Kumar, P., ve Yadav, S. K. S. (2023b). Measurement and analysis of cutting forces using dynamometer in turning of EN-8 steel. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323036155. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.222>
- Lad, Y. A., ve Patel, A. A. (t.y.). *Development of Strain Gauge Dynamometer for Lathe*. 5(8).
- Mohanraj, T., Uddin, M., ve Thangarasu, S. K. (2023). Review on sensor design for cutting force measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 237(2), 455-466.

<https://doi.org/10.1177/09544089221106264>

Othman, W. Z., Ramli, A. F., Mamat, N. H., ve Abd Aziz, M. R. (2022). Cutting Force Measurement using Strain Gauge and Arduino for Monitoring of Turning Tool Post. *Journal of Physics: Conference Series*, 2319(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2319/1/012018>

Öztürk, E., ve Yıldızlı, K. (2018). Measured Cutting Forces in the Turning of Prismatic Parts at Different Spindle Speeds and Side Cutting Edge Angles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(9), 4635-4647. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-3002-4>

Panzer, T. H., Souza, P. R., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., ve Mansur, T. R. (2012a). Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>

Panzer, T. H., Souza, P. R., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., ve Mansur, T. R. (2012b). Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>

Panzer, T. H., Souza, P. R., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., ve Mansur, T. R. (2012c). Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>

Parida, B., Vishwakarma, S. D., ve Pal, S. (2015). Design and development of fixture and force measuring system for friction stir welding process using strain gauges.

Journal of Mechanical Science and Technology, 29(2), 739-749.

<https://doi.org/10.1007/s12206-015-0134-x>

Projoth, T. N., Victor, D. P. M., ve Nanthakumar, P. (2021a). Analysis and prediction of cutting force through lathe tool dynamometer in CNC turning process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4174-4179. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.681>

Projoth, T. N., Victor, D. P. M., ve Nanthakumar, P. (2021b). Analysis and prediction of cutting force through lathe tool dynamometer in CNC turning process. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4174-4179. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.681>

Reyes Uquillas, D. A. ve Syh-Shiuh Yeh. (2015). Tool holder sensor design for measuring the cutting force in CNC turning machines. *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 1218-1223. <https://doi.org/10.1109/AIM.2015.7222705>

Rizal, M., Ghani, J. A., . H., ve . H. (2018a). Design and construction of a strain gauge-based dynamometer for a 3-axis cutting force measurement in turning process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 12(4), 4072-4087. <https://doi.org/10.15282/jmes.12.4.2018.07.0353>

Rizal, M., Ghani, J. A., . H., ve . H. (2018b). Design and construction of a strain gauge-based dynamometer for a 3-axis cutting force measurement in turning process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 12(4), 4072-4087. <https://doi.org/10.15282/jmes.12.4.2018.07.0353>

Rizal, M., Ghani, J. A., ve Mubarak, A. Z. (2022a). Design and Development of a Tri-Axial Turning Dynamometer Utilizing Cross-Beam Type Force Transducer for Fine-Turning Cutting Force Measurement. *Sensors*, 22(22), 8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>

- Rizal, M., Ghani, J. A., ve Mubarak, A. Z. (2022b). Design and Development of a Tri-Axial Turning Dynamometer Utilizing Cross-Beam Type Force Transducer for Fine-Turning Cutting Force Measurement. *Sensors*, 22(22), 8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>
- Rizal, M., Ghani, J. A., Nuawi, M. Z., ve Che Haron, C. H. (2015). Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52-53, 559-576. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.017>
- Sahu, S. K., Burak Ozdoganlar, O., DeVor, R. E., ve Kapoor, S. G. (2003). Effect of groove-type chip breakers on twist drill performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(6), 617-627. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00303-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00303-6)
- Sandwell, A., Park, C., ve Park, S. (2016). Development of Multi-degrees of Freedom Optical Table Dynamometer. *Procedia Manufacturing*, 5, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.009>
- Saruulbold S. ve Oyunbat G. (2022). RESEARCH WORK OF RESOURCE FOR USING STRAIN GAGE TO DO CUTTING FORCE MEASURING TOOL. *World Science*, 6(78). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122022/7901
- Sharma, S., Singh, R., ve Jindal, S. (t.y.). ANALYSIS OF CUTTING FORCES OF THE LATHE TOOL DYNAMOMETER. 2(11).
- Strenkowski, J. S., Hsieh, C. C., ve Shih, A. J. (2004). An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(12-13), 1413-1421. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.01.005>

- Subasi, O., Yazgi, S. G., ve Lazoglu, I. (2018). A novel triaxial optoelectronic based dynamometer for machining processes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 279, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.019>
- Şeker, U., Kurt, A., ve Çiftçi, İ. (2002a). Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion. *Materials & Design*, 23(4), 355-360. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00013-4)
- Şeker, U., Kurt, A., ve Çiftçi, İ. (2002b). Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion. *Materials & Design*, 23(4), 355-360. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(02)00013-4)
- Thangarasu, S. K., Shankar, S., Tony Thomas, A., ve Sridhar, G. (2018). Prediction of Cutting Force in Turning Process-an Experimental Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310, 012119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012119>
- Totis, G., Bortoluzzi, D., ve Sortino, M. (2024). Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 198, 104151. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104151>
- Totis, G., ve Sortino, M. (2011). Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(1), 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.10.001>
- Uddin, M. S., ve Songyi, D. (2016). On the design and analysis of an octagonal–ellipse ring based cutting force measuring transducer. *Measurement*, 90, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.055>
- Umurani, K., ve Siregar, R. A. (2019a). Development of Dynamometer for Cutting Force Measurement in Turning Operation. *IOP Conference Series: Materials Science*

and Engineering, 705(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/705/1/012051>

Umurani, K., ve Siregar, R. A. (2019b). Development of Dynamometer for Cutting Force Measurement in Turning Operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 705(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/705/1/012051>

Uquillas, D. A. R., ve Hsiao, T. (2016). Wireless tool holder sensor design for cutting force measurement applied to chatter detection. *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 1845-1848. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848340>

Vadgeri, S. S., Patil, S. R., ve T.Chavan, S. (2018). Static and Fatigue Analysis of Lathe spindle for Maximum Cutting Force. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4438-4444. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.012>

Vásquez Céspedes, H. (2011). MEASURING CUTTING FORCES IN MACHINING PROCESSES. *Revista Ingeniería*, 11(1-2). <https://doi.org/10.15517/ring.v11i1-2.613>

Yaldız, S., ve Ünsaçar, F. (2006a). A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning. *Measurement*, 39(1), 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.07.008>

Yaldız, S., ve Ünsaçar, F. (2006b). A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning. *Measurement*, 39(1), 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.07.008>

Yaldız, S., ve Ünsaçar, F. (2006c). Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials and Design*, 27(10), 839-846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>

- Yaldız, S., ve Ünsaçar, F. (2006d). Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials & Design*, 27(10), 839-846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>
- Yaldız, S., Ünsaçar, F., Sağlam, H., ve Işık, H. (2007). Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(3), 1499-1511. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.06.005>
- Yaldiz, S., Unsacar, F., ve Saglam, H. (2006). Comparison of experimental results obtained by designed dynamometer to fuzzy model for predicting cutting forces in turning. *Materials and Design*, 27(10), 1139-1147. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.010>
- Zameroski, R., Ramsauer, C., Habersohn, C., Bleicher, F., ve Schmitz, T. (2024). Flexure-based torque and thrust force drilling dynamometer with Hall effect sensor displacement measurement. *CIRP Annals*, 73(1), 281-284. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.086>
- Zhang, Y., Wu, W., Han, Y., Wen, H., Cheng, Y., ve Liu, L. (2019). Design and Analysis of a Turning Dynamometer Embedded in Thin-Film Sensor. *Micromachines*, 10(3), 210. <https://doi.org/10.3390/mi10030210>
- Zhao, Y., Zhao, Y., ve Ge, X. (2018). The Development of a Triaxial Cutting Force Sensor Based on a MEMS Strain Gauge. *Micromachines*, 9(1), 30. <https://doi.org/10.3390/mi9010030>
- Zhao, Y., Zhao, Y. L., Shao, Y., Hu, T. J., Zhang, Q., ve Ge, X. H. (2018). Research of a smart cutting tool based on MEMS strain gauge. *Journal of Physics: Conference Series*, 986, 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/986/1/012016>

Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, S., ve Zhou, G. (2015). A High Performance Sensor for Triaxial Cutting Force Measurement in Turning. *Sensors*, 15(4), 7969-7984.
<https://doi.org/10.3390/s150407969>

Zhao, Y., Zhao, Y., Wang, C., Liang, S., Cheng, R., Qin, Y., Wang, P., Li, Y., Li, X., ve Hu, T. (2016). Design and development of a cutting force sensor based on semi-conductive strain gauge. *Sensors and Actuators A: Physical*, 237, 119-127.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.017>

