



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CK45 ÇELİĞİNDEN HASSAS PARÇA ÜRETİMİ İÇİN CNC DİKEY
İŞLEME MERKEZLERİNDE HATALARIN İŞ ESASINA GÖRE
ANALİZ EDİLMESİ VE DÜZELTİLMESİ**

GÖKHAN ÖNER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ SITKI AKINCIOĞLU**

**EŞ DANIŞMAN
DOÇ. DR. TANFER YANDAYAN**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CK45 ÇELİĞİNDEN HASSAS PARÇA ÜRETİMİ İÇİN CNC DİKEY
İŞLEME MERKEZLERİNDE HATALARIN İŞ ESASINA GÖRE
ANALİZ EDİLMESİ VE DÜZELTİLMESİ

Gökhan Öner tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKINCIOĞLU

Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Tanfer YANDAYAN

TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKINCIOĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Tanfer YANDAYAN

TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü

Doç. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 07/05/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

7 Mayıs 2021

Gökhan Öner

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı Akıncıoğlu'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması boyunca eş danışman ve ayrıca kurum danışmanım olan Doç. Dr. Tanfer Yandayan'a kıymetli yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda, TÜBİTAK-UME'de çalışmaların yapılmasına izin veren ve destekleyen Enstitü Müdürü ve Müdür yardımcısına, CNC dik işleme tezgâhının kullanımında desteğini esirgemeyen iş arkadaşlarıma, CMM ölçümleri için yardımcı olan TÜBİTAK-UME Boyutsal Laboratuvarına teşekkür ederim.

7 Mayıs 2021

Gökhan Öner

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	i
1. GİRİŞ	1
2. TAKIM TEZGÂHLARI VE PERFORMANSI.....	5
2.1. TAKIM TEZGÂHLARI.....	5
2.1.1. Optik Lineer Cetvel.....	7
2.1.2. CAD/CAM	9
2.1.3. Kapalı Çevrim İmalatı.....	10
2.1.4. Tezgâh Üzerindeki Ölçüm Sistemleri.....	10
2.2. TEZGÂH HATALARI	11
2.2.1. Üç Eksenli Hareket Mekanizmalarında Geometrik Hatalar	11
2.2.1.1. Üç Eksenli Dik İşleme Merkezindeki Geometrik Hatalar.....	12
2.2.1.2. Pozisyonlama Hatası	13
2.2.1.3. Boşluk (Backlash) Hatası.....	15
2.2.1.4. Abbe Hatası.....	16
2.2.1.5. Açısal Hataları Pozisyon Hatasına Etkisi	18
2.2.2. Diğer Hatalar	19
2.2.2.1. Termal Hatalar	19
2.2.2.2. Yük Kaynaklı Hatalar	24
2.2.3. Hata Tespiti ve Telafisi	24
2.2.3.1. Lazer İnterferometre (1 Boyut).....	27
2.2.3.2. Master Blokları (1 Boyut), Adım Masterları	27
2.2.3.3. Küreli Çubuk Masterlar.....	28
2.2.3.4. Halka, Tampon ve Küre Masterlar.....	29
2.2.3.5. Kompleks (karmaşık) Yapılar	29
2.2.3.6. Altın Standart Yapı.....	30
3. LİTERATÜR.....	31
3.1. GEOMETRİK HATALARIN TESPİTİ VE TELAFİSİ	31
3.2. TERMAL HATALARIN TESPİTİ VE TELAFİSİ.....	34
4. DENEYSEL MATERYAL METOD	37
4.1. YÖNTEM	37
4.2. İŞ PARÇASI	37
4.3. DELİK DELME	39
4.3.1. Kullanılan Tezgâh	39
4.3.2. Deney Düzenegi	40

4.3.3. Deneylerde Kullanılan Takımlar	42
4.3.4. Deneylerde Kullanılan Parametreler	43
4.3.5. Deney Prosedürleri.....	44
4.4. HATA ÖLÇÜMLERİ	49
4.4.1. Master Blokları	51
4.4.2. Halka Masterlar	52
4.4.3. Kinematik Fikstür	53
4.4.4. Pozisyon ve Açısız Hata Ölçümleri.....	56
5. DENEYSEL SONUÇ VE TARTIŞMA.....	58
5.1. PROB KONTROL SONUÇLARI	58
5.1.1. Kinematik Ölçme Aparatının Kontrolü.....	60
5.1.2. Isının Vidalı Mile Etkisi.....	62
5.1.3. Isıya Bağlı Olarak Pozisyon Hatası Değerleri	66
5.2. KOMPANZASYON METODUNUN DEğERLENDİRİLMESİ	68
5.2.1. Ölçüm Sonuçları ve Analizleri	68
5.2.2. Entegre Prob Ölçüm Sisteminin Hataları ve Telafisi	72
5.3. POZİSYON VE AÇISAL HATA SONUÇLARI	73
5.3.1. X Eksenı Pozisyon ve Açısız Hataları.....	74
5.3.2. Y Eksenı Pozisyon ve Açısız Hataları.....	76
5.3.3. Z Eksenı Pozisyon Hataları.....	78
5.4. SONUÇLARIN GENEL DEğERLENDİRİLMESİ.....	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
7. KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Üç eksenli freze takım tezgâhı koordinat sistemi.....	6
Şekil 2.2. Vidalı miller üzerinde kayıt kızak sistemi.....	6
Şekil 2.3. Vidalı mil gösterimi.....	7
Şekil 2.4. Optik lineer cetvel.....	8
Şekil 2.5. Takım tezgâhı tablasının pozisyon ve hız kontrolleri.....	9
Şekil 2.6. Döngü modları a) Yarı kapalı b) Kapalı.....	9
Şekil 2.7. Kapalı çevrim imalat süreci.....	10
Şekil 2.8. Renishaw ölçüm cihazının çalışma prensibi.....	11
Şekil 2.9. Takım tezgâhı tablası yörüngesindeki geometrik hatalar.....	12
Şekil 2.10. Tezgâh hatalarının gösterimi.....	13
Şekil 2.11. Mil ve somun hataları a) Vidalı mil ve somun pozisyon hatası b) Vidalı mil imalat hatası.....	14
Şekil 2.12. Vidalı mil imalat hatası sebebiyle oluşan pozisyon hatası.....	15
Şekil 2.13. Dişli boşluğu gösterimi.....	16
Şekil 2.14. Telafili ve telafisiz dişli boşluğu.....	16
Şekil 2.15. Abbe hatasının optik yer değiştirmesine etkisi.....	17
Şekil 2.16. Abbe hatasının tezgâh üzerinde gösterimi.....	18
Şekil 2.17. Tezgâh pozisyon hataları a) Kompanzasyonsuz pozisyon hatası b) Kompanzasyonlu pozisyon hatası.....	19
Şekil 2.18. Tezgâhın soğuk çalışması a) Sıcaklıktan etkilenmemiş vidalı mil b) Sıcaklıktan etkilenmemiş vidalı mil hareket sistemi c) Sıcaklık etkisi olmadan delik delme.....	21
Şekil 2.19. Tezgâhın sıcak çalışması a) Sıcaklıktan etkilenmiş vidalı mil b) Sıcaklıktan etkilenmiş vidalı mil hareket sistemi c) Sıcaklığın etkisi ile delik delme.....	22
Şekil 2.20. Sıvı soğutmalı vidalı takım tezgâhının X eksenini.....	23
Şekil 2.21. Parça işlemede takım tezgâhı tahrik doğruluğunun etkisi.....	23
Şekil 2.22. Takım tezgâhları ve boyut ölçme ekipmanlarının izlenebilirliği.....	26
Şekil 2.23. Lazer interferometre çalışma prensibi.....	27
Şekil 2.24. Master blokları.....	28
Şekil 2.25. Farklı tip masterlar a) Adım mastarı b) Uzun kontrol mastarı c) Bilyalı giriş mastarı.....	28
Şekil 2.26. Farklı tasarım ve boyutlardaki bilyalı çubuklar a) İki küre bilyalı çubuk b) Çoklu bilyeli çubuklar.....	29
Şekil 2.27. Kalibrasyon ve ölçüm aparatları a) CMM ölçüm kontrol aparatı b) Prob kalibrasyon küpü aparatı c) Karmaşık kalibrasyon aparatı.....	30
Şekil 2.28. Altın standart yapı mastarı.....	30
Şekil 4.1. İş parçasının tezgâh tablasına bağlantısı.....	38
Şekil 4.2. OKUMA M seri tezgâh yapısı.....	39
Şekil 4.3. Tezgâh eksen hareketleri ve işleme kapasitesi.....	40
Şekil 4.4. İş parçası ve master bloklarının tezgâh tablasına bağlantısı.....	41
Şekil 4.5. Bessel noktalarından desteklenen girişin deformasyonu.....	42
Şekil 4.6. Deneyi yapılacak iş parçasının X ve Y yönündeki Bessel noktaları.....	42
Şekil 4.7. Deneylerde kullanılan modüler takma uçlu matkap.....	43
Şekil 4.8. Prosedür A akış şeması.....	44
Şekil 4.9. İş parçası delik eksen ölçüleri.....	45

Şekil 4.10. İlk delme deneyleri için NC kodları.	45
Şekil 4.11. Prosedür B akış şeması.	46
Şekil 4.12. Prob ile mastar merkez noktasından uzunluk ölçümü.	47
Şekil 4.13. Kompanzasyon ile delik yerlerinin düzeltilmesi.	47
Şekil 4.14. İkinci delme deneyleri için NC kodları.	48
Şekil 4.15. Prosedür C akış şeması.	49
Şekil 4.16. Renishaw OMP60 optik iletişimli parça ölçme probu.	50
Şekil 4.17. OMP60 optik prob sistemi ve OMM-2 haberleşme şeması.	50
Şekil 4.18. Dikdörtgen kesitli mastar blok.	51
Şekil 4.19. Deneylerde kullanılan kinematik fikstür ve mastar blokları.	52
Şekil 4.20. Prob çapı bulunması için probun hareketleri.	53
Şekil 4.21. Tezgâh üzerinde mastar ile uygulamalı prob çapı tayini.	53
Şekil 4.22. Kinematik Kelvin kelepçesinin üst ve açılı olarak yan görünüşü.	54
Şekil 4.23. Küresel formlu cıvata ve düz yüzey teması.	55
Şekil 4.24. Ayar cıvatalarının temas yüzeyleri.	55
Şekil 4.25. Kinematik fikstürün tezgâh tablasına bağlantısı.	56
Şekil 4.26. Lazer interferometre yardımı ile tezgâh eksen pozisyonlarının incelenmesi.	56
Şekil 5.1. Mastar birinci ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	58
Şekil 5.2. Mastar ikinci ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	59
Şekil 5.3. Mastar üçüncü ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	60
Şekil 5.4. Mastar dördüncü ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	61
Şekil 5.5. Mastar beşinci ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	61
Şekil 5.6. Mastar altıncı ölçümler a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	62
Şekil 5.7. 25 dakika çalışma sonrası mastar ölçümleri a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	63
Şekil 5.8. 40 dakika çalışma sonrası mastar ölçümleri a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.	64
Şekil 5.9. Isınma ve soğuma sonrası mastar blok ölçümleri.	65
Şekil 5.10. X ekseni pozisyon hatası değerleri a) 25 dakika takım tezgâhı çalışması b) 40 dakika takım tezgâhı çalışması.	65
Şekil 5.11. Farklı sıcaklıklarda tutulan vidalı milin pozisyon hata değerleri.	66
Şekil 5.12. Vidalı milin kompanzasyonsuz pozisyon hata değerleri.	67
Şekil 5.13. Farklı sıcaklıklarda tutulan vidalı milin kompanzasyonson değerleri.	68
Şekil 5.14. Delikleri delinen parçanın delikler arası mesafe ölçümü.	69
Şekil 5.15. İş parçasının Prosedür A, B ve C'ye göre delik pozisyon değerleri.	69
Şekil 5.16. Sıcaklık etkisi ile pozisyon hatası a) Kompanzasyonsuz pozisyon hatası b) Kompanzasyonlu pozisyon hatası.	70
Şekil 5.17. İş parçasının deliklerinin pozisyon hatası ve belirsizlik değerleri.	71
Şekil 5.18. İş parçasının alt plakaya montajlı ve montajsız olduğundaki delik pozisyonu ölçümleri.	72
Şekil 5.19. Mastar bloklarının ölçümleri.	73
Şekil 5.20. X ekseni doğrusal pozisyon hatası.	74
Şekil 5.21. X ekseni pozisyon hatası.	75

Şekil 5.22. X eksenî açısâl hatası.....	76
Şekil 5.23. Y eksenî pozisyon hatası.	77
Şekil 5.24. Y eksenî açısâl hatası.....	78
Şekil 5.25. Z eksenî pozisyon hatası.....	79



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1. Ck45 çeliğinin normlara göre tanımı.....	38
Çizelge 4.2. Ck45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	38
Çizelge 4.3. Ck45 çeliğinin doğrusal termal genleşme katsayısı.	38
Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri	39
Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri.	43
Çizelge 4.6. Uzun master blokları kalibrasyonu maksimum ve minimum belirsizlik formülleri.	51
Çizelge 4.7. Kullanılan masterların belirsizlik değerleri.	52



KISALTMALAR

AFNOR	Fransa Standart Komitesi
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
BS	İngiliz Standardı
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)
CAM	Bilgisayar Destekli İmalat (Computer-Aided Manufacturing)
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numeric Control)
CLM	Kapalı Çevrim İmalatı (Closed Loop Manufacturing)
DD	Direk Sürücülü (Direct Drive)
dev/dak	Devir/Dakika
DIN	Alman Endüstri Normu
DOF	Serbestlik Derecesi (Degree of Freedom)
EN	European Norm (Avrupa Standartları)
ISO	Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
JIS	Japon Endüstri Normu
NC	Sayısal Kontrol (Numeric Control)
SI	Uluslararası Birimler Sistemi

SİMGELER

arc	Açısal Saniye
C	Karbon
°C	Celsius Sıcaklık Birimi
Cr	Krom
Fe	Demir
fn	Devir başı ilerleme
<i>h</i>	Abbe ofseti
kW	Kilowatt
L	Boy
M	Metrik
m	Metre
mm	Milimetre
Mn	Manganez
N	Satır kodu
n	Devir sayısı
Ni	Nikel
P	Fosfor
R	Makine Koordinat Düzlemi
Si	Silisyum
U	Belirsizlik
V _c	Kesme hızı
V _f	Tabla ilerlemesi
X	Koordinat Düzlemi Ekseni
Y	Koordinat Düzlemi Ekseni
Z	Koordinat Düzlemi Ekseni
Ø	Çap
µm	Mikron
ΔL	Boydaki uzama miktarı
ΔT	Sıcaklık Değişimi
α	Malzemenin sıcaklıkla uzama katsayısı
δ	Abbe hatası miktarı
θ	Açısal hata
tan	Tanjant

ÖZET

CK45 ÇELİĞİNDEN HASSAS PARÇA ÜRETİMİ İÇİN CNC DİKEY İŞLEME MERKEZLERİNDE HATALARIN İŞ ESASINA GÖRE ANALİZ EDİLMESİ VE DÜZELTİLMESİ

Gökhan ÖNER

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKINCIOĞLU

Eş Danışman: Doç. Dr. Tanfer YANDAYAN

Mayıs 2021, 87 sayfa

Kalibrasyon, metrolojik izlenebilirliği olan ölçüm sonuçlarına göre, cihazların hata değerlerinin belirlenip, düzeltilmesine imkân tanıyarak, endüstriyel ihtiyaca göre arzu edilen toleranslarda cihazların çalışmasını sağlar. Bu çalışmada, endüstri 4.0 uygulamalarında öne çıkan sıfır hata konseptine göre Ck45 çeliğinin delinmesi sırasında, tezgah ilerleme mekanizmalarındaki sıcaklık artışına bağlı olarak delik eksenleri arasındaki mesafelerde meydana gelen sapma değerlerini azaltarak hassas işleme için düşük maliyetli kompanzasyon (telafi) metodu geliştirilmiştir. İlk olarak CNC takım tezgâhı, OKUMA marka Genos Seri M560R-V model 3 eksen CNC dik işleme merkezinin mevcut durumunu tespit etmek için performans testleri ISO-230 serisi standartlarına göre Lazer interferometre (HP5529A) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tezgahın yoğun çalışması sırasında, eksen hareket mekanizmalarında oluşan sıcaklık artışı ile hareket milinin uzaması sonucu meydana gelen eksen pozisyon hataları master blokları ve tezgaha entegre ölçme probu yardımıyla ölçülmüştür. Master bloklarının tezgâh tablasına bağlantısında kinematik fikstür kullanılmıştır. Yeni yöntem sayesinde, delik delme esnasında oluşan pozisyon hataları tespit edilmiş ve referans master blokları yardımıyla doğrulama faktörü bulunmuştur. Bu faktör kullanılarak, hata miktarı oranında nümerik kontrol (NC) kodları güncellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu yöntemin düşük maliyet ile hassas parça imalatında kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca eş zamanlı olarak yapılan işlem ile kompanzasyon yapılabileceği tespit edilmiştir. Delik mesafesi 500 mm için 55 µm olan tezgâhtan kaynaklanan pozisyon hatasının, yeni yöntemle ±10 µm tolerans aralığında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Yeni metod kullanarak ve kullanmadan delinen delikler arası mesafe ZEISS PRISMO-7 S-ACC marka koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılarak ölçülmüştür. Deneylerde Ø17 mm çapında Kennametal marka karbür takma uçlu matkap kullanılmıştır. Uygulanan yeni kompanzasyon yöntemi yardımıyla eksen sapma değerleri %81 oranında iyileştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Endüstri 4.0, Eş zamanlı kompanzasyon, Hassas imalat, Kalibrasyon, Tezgâh hataları.

ABSTRACT

ANALYSIS AND CORRECTION OF ERRORS IN VERTICAL CNC MACHINE CENTERS FOR PRECISE MACHINING OF CK45 STEEL PRODUCTS USING TASK SPECIFIC CALIBRATION APPROACH

Gökhan ÖNER

Düzce University

Institute Of Science And Technology , Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Sıtkı AKINCIOĞLU

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tanfer YANDAYAN

May 2021, 87 pages

Calibration provides the devices with operation in the required tolerances by determining error compensation values using the metrologically traceable measurement results. In this experimental research, a low cost compensation method was developed for drilling of holes on a steel Ck45 work piece with better precision by reducing the distance error between the hole axes caused by thermal issues in the axis moving mechanisms of the machine tool. Initially, performance tests of the machine tool, (3 axis CNC Vertical Milling Machine - OKUMA Genos M560R-V) was carried out according ISO-230 series standard using a laser interferometer (HP5529A). The position error of the machine tool axis resulting from thermal expansion of lead screw due to temperature variations (occurring in intensive use) was measured using reference long gauge blocks and machine integrated Renishaw probing system. With application of the new method, the gauge blocks were arranged in line to the machine tool axis with specially designed kinematic fixture and provided us with reference distance values to determine the position errors of machine tool axis occurred during drilling operation. On-line correction factor was determined and used to revise the part dimensions in the CAD file. Two set of holes were drilled with original part dimensions and revised dimensions using a Kennametal Ø17 mm diameter carbide drilling tool. Both results were evaluated by measuring the distance of the holes using a precise coordinate measurement machine (CMM - ZEISS PRISMO-7 S-ACC) in the laboratory. Measurement results of the manufactured part produced using the original part programme and corrected part programme were compared to each other. Improvement was achieved reducing the 55 µm error value (per 500 mm) down to be within ± 10 µm. It was evaluated that the new method provided very practical and low cost solution for precise drilling of the holes as well as giving information for improving the integrated probing system measurements.

Keywords: Calibration, Industry 4.0, Machine errors, On-line compensation, Precise machining.

1. GİRİŞ

Tüm dünyada imalat sanayisi büyük önem arz etmektedir. Talaşlı imalat sanayisinde de universal tip takım tezgâhları ve bilgisayarlı sayısal kontrol makineler (CNC) bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ve istenilen kalitedeki ürünler sebebiyle, talepleri yeteri kadar karşılayamayan universal tip takım tezgâhları sanayideki yerlerini CNC işleme merkezine devretmeye başlamışlardır. CNC işleme merkezi ile birlikte hızlı, hassas ve kaliteli ürünlerin ortaya çıkması hem de işletmeler ve ürünlerin alıcıları için zaman verimliliği de sağlamıştır [1]. CNC işleme merkezi bazıları pozisyonlama bilgilerini vidalı millerden gelen verilerden alırken, bazı CNC işleme merkezi pozisyon kontrollerini optik cam cetvel ile sağlayarak vidalı millerden kaynaklı oluşabilecek hataları kompanse etmektedirler. Talaşlı imalat süreçlerinde tezgâhlarda kinematik hatalar, termal hatalar, kesme kuvveti kaynaklı hatalar, servo motor hataları ve takım aşınması gibi işleme hassasiyetini etkileyen faktörler mevcuttur [2]. Bu sebeple; bazı takım tezgâhi üreticileri Aerostatik/Hidrostatik mil ve kızaklar gibi sürtünmesiz hareketler sağlamaya çalışarak ya da invar çeliği gibi düşük ısıl genleşmeli malzemeler kullanarak ısı kaynaklı hataları azaltmaya çalışmışlardır. Birçok takım tezgâhi çalışma esnasında ısınmaktadır. Çalışma süresine bağlı olarak ısının etkisi ile tezgâhin hareketini sağlayan vidalı millerde genleşme olmaktadır. Bu genleşme, pozisyonlamalarını vidalı millerden alan CNC işleme merkezi için işleme esnasında hatalara sebebiyet vermektedir [3]. Sıcaklık etkisinden oluşabilecek hataları önlemek amacı ile farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu hataların en aza indirilmesi için bazı çalışmalar yapılmıştır.

[1]'deki çalışmada araştırmacılar tarafından CNC işleme merkezinde meydana gelen yalnızca ısı hata telafisi yaklaşımını belirtilmiştir. Takım tezgâhındaki ısıl hassas bölgenin tanımlanması, ısı hata telafisinin en zorlu görevidir. Isıl görüntüleme, şu anda takım tezgâhında termal hassas bölgeyi tanımlamak için kullanılan deneysel bir yöntemdir. Ancak bu yöntem daha fazla zaman, insan çabası ve yüksek maliyetle ilişkilidir. Bu nedenle, çalışmalarında, ısı duyarlı bölgeyi belirlemek için ısı hataya duyarlı yöntem ve ısı modal analiz yöntemi gibi iki sayısal yöntem kullandılar. Her iki yöntem kullanılarak türetilen matematiksel modeller, sonlu elemanlar metodu (FEA)

sonuçlarıyla karşılaştırıldığında % 85-95 doğrulukla termal deformasyonu öngördüler. Böylelikle, daha fazla zaman, daha fazla insan çabası ve yüksek maliyetle ilişkilendirilen ısı görüntüleme tekniği yerine, bu iki sayısal yöntem gelecekte takım tezgâhındaki ısı noktalarının seçimi için kullanılabileceğini vurguladılar.

[4]'de yapılan çalışmada diğer araştırmacılar geometrik hataları modellemek ve takım tezgâhı hatalarını Z eksen üzerinde ince hareket mekanizması ile telafi etmek için bir matematik yöntemi kullanarak frekans alanından hata analizi tanımladıklarını belirtmişlerdir.

[5]'de yapılan çalışmada genetik algoritmaya dayalı geri yayılım yapay sinir ağı kullanan beş kritik sıcaklık noktasına dayalı bir modeli araştırmacılar önerdiler.

[6]'da yapılan çalışmada çok eksenli bir makinenin geliştirilmiş bir hata modelini oluşturmak için bir yöntem sunmuştur. Bu yöntem katı cisim hareketleri varsayımına dayanır ve homojen dönüşüm matrislerini kullanır. Geliştirilen hata modeli, makinenin yapısal elemanlarının geometrisindeki ve karşılıklı ilişkilerindeki yanlışlıklardan ve bu elemanlar arasındaki göreceli hareketten kaynaklanan hataları hesaba katar. Model, özellikle makinenin çalışma hacmi içindeki genel hatanın sebeplerini belirlemek için kullanışlı olduğu sonucuna ulaştılar.

[7]'de yapılan çalışmada termal hata modellemesi için bulanık mantık kullanan bir strateji tasarladı. Geliştirilen modelleme tekniği, iyi doğruluk ve sağlamlık için hata modeli parametreleri hesaplanarak CNC işleme merkezine uyguladılar.

[8]'de yapılan çalışmada uzun vadeli termal hata telafisi için model bazlı kompanzasyon değerlerini hesaplamak için diferansiyel denklem sistemi kullandılar. Uzun vadeli ölçümler ile termal hatalarda ve yönelim hatalarında önemli bir azalma olduğunu gösteren deney belirtilmiştir.

[9]'da yapılan çalışmada, beş eksenli bir takım tezgâhının döner ve döner eksen birimini hareket ettirmenin yanı sıra ana iş milini çalıştırmanın neden olduğu termal hataları telafi etmeyi araştırmışlardır. Telafi yaklaşımı, bir diferansiyel denklem sisteminden oluşan dinamik bir gri kutu modeline dayanmaktadır. Üretilen ısı ile ilgili girdi parametreleri araştırdılar. Ortaya çıkan termal konum hataları ile model giriş parametresi arasındaki en iyi ilişki, takım tezgâhı eksenlerinin ve ana iş milinin soğutma gücünün ayarlanması için tespit ettiler. Ölçümlere dayanarak, tüm baskın termal konum hatalarının önemli ölçüde azaltılabileceği ifade edilmiştir.

[10]'da yapılan çalışmada CNC tornalama tezgâhında daha iyi doğrulukla hassas bileşenler üretmeye yönelik çalışmışlardır. Hassas takım tezgâhları için gerçek zamanlı bir termal hata modeli kullanmışlardır. İleri beslemeli geri yayılım sinir ağı kullanarak termal hata telafisi modelinin geliştirilmesi ve ayrıca regresyon analizi tekniği kullanarak basitleştirilmiş model ortaya çıkarmışlardır. Koordinat ölçme merkezi (Coordinate Measuring Machine – CMM) ölçüm desteği olmadan termal hata telafi modülü kullanarak 50 bileşen için 1 µm'den daha düşük doğrulukta yarıçap ölçümünde tekrarlanabilirlik ile üretim gerçekleştirmişlerdir.

[11]'de yapılan çalışmada karmaşık haldeki termal hata modellerini basitleştirmek için yeni bir hata modeli sunulmuştur. Bu hata modelinde yapay sinir ağı sistemini ve köpek balığı kokusu optimizasyonu algoritmasını kullanarak sistemi geliştirmiştir. Test sonuçlarında işleme hatasında % 32'lik bir azalmanın telafi sonrasında elde edildiğini göstermişlerdir.

[12]'de yapılan çalışmada takım tezgâhında oluşabilecek termal hatalar için Python programlama dili kullanılarak gerçek zamanlı termal hataları telafi etmek için transfer fonksiyonlarını kullanan bir matematiksel model doğrudan bir CNC işleme merkezi kontrol sistemine uygulandığı ifade edilmiştir.

[13]'te yapılan çalışmada takım tezgâhı iş mili sisteminin termal hatasını değerlendirmek için 3 eksenli CNC işleme merkezinde deneyler yapmışlardır. Bulanık kümeleme ve gri korelasyon algoritmaları deneylerinde kullanmışlardır. Uyarlanabilir parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasına dayanarak, iş mili sistemi için aksenal ve radyal yönlerde termal hata modellerini oluşturdular ve kompanzasyon etkilerini iş parçası işleme doğruluğu ile değerlendirmişlerdir.

Termal hatalar genellikle işlem aralarında belli periyotlarda gerçekleştirilir. Böylece hatalar oluşma aşamasındayken kontrol edilebilir. İşlem sırasında ölçüm ve kontrol sayesinde parça işleme planında modifikasyon yapılabilir. Üretim sırasında kontrol üç farklı yolla yapılabilir. Bunlar parçanın tezgâh dışına alınıp ölçme cihazı ile ölçümü, parçanın tezgâh üzerinde ölçümü ve tezgâhta oluşabilecek hataların modelleme ile tahmini ve düzeltilmesidir. Bu şekilde yapılan işlemler sonucu uygulanan imalat yöntemine, kapalı çevrim imalatı adı verilir. Kapalı çevrim imalatı, (Closed Loop Manufacturing- CLM) firmaların ürün tasarımı, ürün planlaması, üretim yürütmesi, otomasyon ve sahadaki tüketici kullanımından gelen geri bildirimler ile üretimi

senkronize etmesini ve optimize etmesini sağlayan endüstri 4.0 için üretimin önemli kavramlarından. İşbirliğine dayalı, bağlantılı bir bilgi döngüsü yaratan CLM, ürünlerin en uygun kalitede imalatını sonlandırmak için, üretim sürecinin maliyetini, süresini ve kalitesini sürekli olarak iyileştiren metroloji entegrasyonu tabanlı çok fonksiyonlu bir bütündür [14]. Parçanın tezgâh üzerinde son pasodan önce ölçümü en verimli yöntemdir [15]. Çünkü kötü giden bir durum olduğunda müdahale ederek düzeltmek söz konusudur. Bunu gerçekleştirebilmek için, tezgâh hatalarından bağımsız ölçüm yapabilen ve tezgâh içinde çalışan bir ölçüm cihazına ihtiyaç vardır. Hala bu özellikleri taşıyan, arzu edilen doğrulukta çalışan uygun cihazlar tam anlamıyla geliştirilmemiştir. Daha ziyade, tezgâha entegreli prob ölçme sistemleri vardır ve kullanımı çok geniştir. Örneğin Renishaw ölçme problemleri. Bu problemlerin kullanımındaki en büyük sorun tezgâh eksenlerinde oluşan hataların, bu prob ile yapılan ölçümlerde etkili olması ve tezgâhın mevcut performans durumuna göre hatalı ölçüm sonuçları vermesidir. Bu durum endüstriyel uygulamalarda çoğu zaman bilinmez ve bu problemler ile yapılan ölçümlerin hatasız olduğu düşünülür. Ölçüm verilerini tezgâh eksenlerinden gelen verilere göre oluşturan ölçme problemleri ile yapılan ölçümlerin doğruluğunu arttırarak işlem sırasında ölçüm yapmak mümkündür. Bu amaçla işlem sırasında prob sistemini kullanarak bir izlenebilir referans standart ölçümü yapılarak, sistemin eksenlerinden ve prob sisteminden gelen hataları tespit edilebilir. Bu hataları analiz edilip gerekli düzeltme faktörleri çıkarılırsa daha sağlıklı ve doğruluğu yüksek ölçüm yapmak mümkün olur. Yine aynı faktörü kullanarak, tezgâh kompanzasyon dosyasında düzeltme yapmak yerine, bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design – CAD) dosyasında bulunan ölçüler faktör ile işleme sokulup yeni ölçü değerleri bulunabilir. Bu ölçü değerleri ile parça işlendiği zaman mevcut hataları minimize etmek mümkündür. Fakat bu konuda yapılan fazla bir çalışma bulunmamaktadır. Bu yöntemin kullanılabilirliğinin saptanması bu nedenle önemlidir.

Bu çalışmada endüstri 4.0 uygulamalarında öne çıkan sıfır hata konseptine göre CNC işleme merkezi ile düşük maliyetli hassas parça imalatın için termal hataları en aza indiren yeni bir yöntem sunulmuştur. Tezgâh hataları imalat esnasında referans bir standardın ölçümü yapılarak tespit edilmiş ve gerekli düzeltmenin yapılabilmesi için hata faktörü hesaplanmıştır. Kompanzasyon dosyasına ulaşmak yerine, müdahalesi daha kolay olan CAD dosyası üzerindeki ölçüler değiştirilmiştir. İşleme aralarında iş parçası tezgâhtan sökülüp CMM ölçümleri gerçekleştirilerek hata miktarları değerlendirilmiştir.

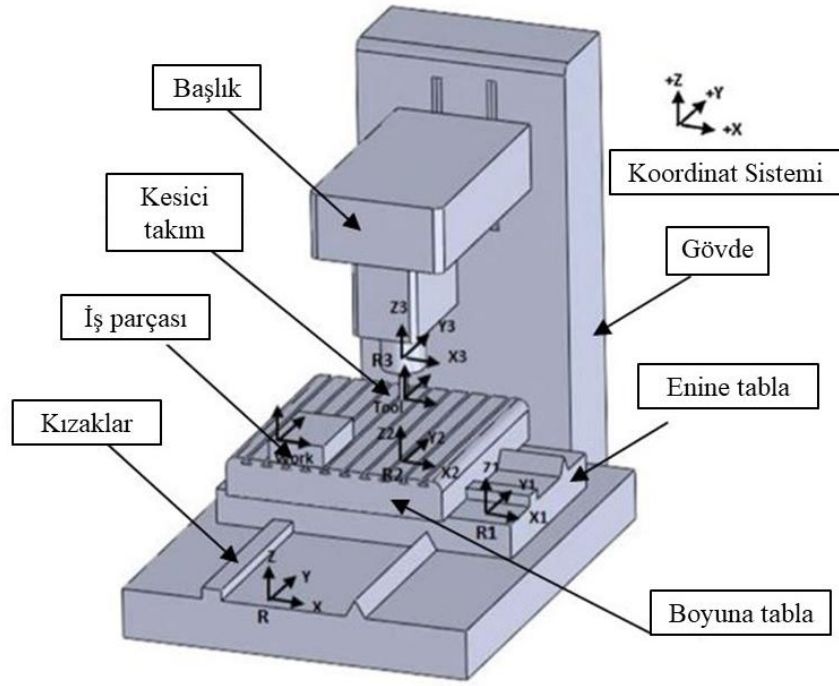
2. TAKIM TEZGÂHLARI VE PERFORMANSI

Bu başlık altında takım tezgâhları, takım tezgâhları teçhizatları, takım tezgâhının performansı, geometrik hataları ve bu hataların tespiti için kullanılan referans standartlar hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. TAKIM TEZGÂHLARI

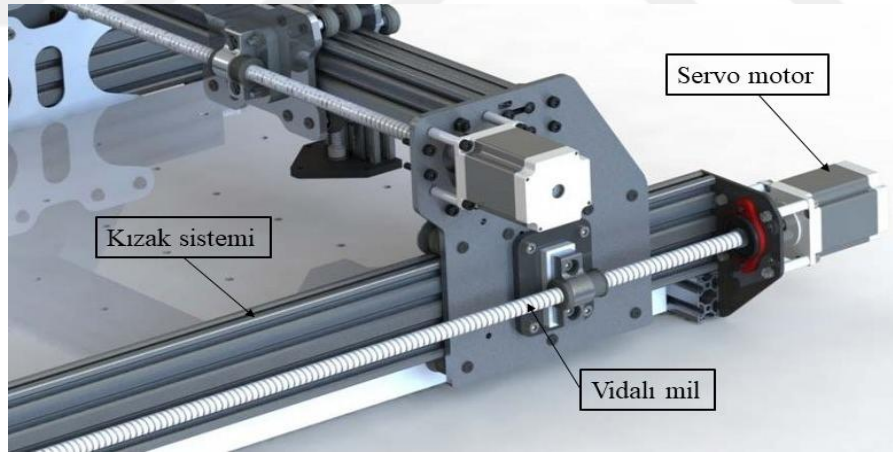
Teknolojinin gelişmesi ile birlikte karmaşık parçaların, daha seri ve yüksek hassasiyette işlenebilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. CNC takım tezgâhları bilgisayarlı bir kontrol ünitesi yardımıyla otomatik olarak kontrol edilir ve aynı hassasiyetle seri üretime imkân sağlar.

CNC takım tezgâhları, metal, plastik ve ahşap gibi sanayide yaygın kullanılan malzemeleri kesici takımlar vasıtası ile kesme, delme gibi talaş kaldırma yöntemleri ile işleyen tezgâhlardır. Nümerik (sayısal) program esaslı çalışan tip takım tezgâhlarına NC (Numeric Control/Sayısal kontrol) takım tezgâhı denir. NC tezgâhlara bilgisayar kontrolü eklenmesi ile CNC takım tezgâhları oluşmuştur. CNC takım tezgâhları üniversal tip tezgâhlarda olduğu gibi torna ve freze olarak ayrılırlar. CNC dik işleme merkezi (freze) tezgâhlarında genelde X, Y ve Z olmak üzere 3 temel eksen vardır. İşleme kapasiteleri daha hacimli olan takım tezgâhlarında eksen sayıları 4 ya da daha fazla olabilir. Bu tip takım tezgâhlarında tabla eksenleri hareket ettikleri doğrultu boyunca hassas bir şekilde otomatik pozisyonlandırılırlar. Şekil 2.1’de üç eksenli freze takım tezgâhının tabla ve koordinat sistemi gösterilmiştir.



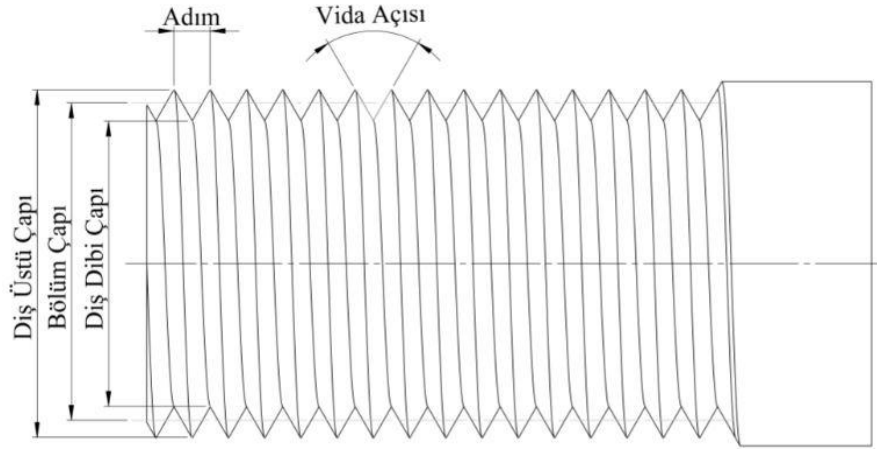
Şekil 2.1. Üç eksenli freze takım tezgâhı koordinat sistemi [16].

CNC takım tezgâhları vidalı miller üzerinde kabiliyetleri doğrultusunda hareket etmektedirler. Şekil 2.2’de vidalı miller ve kayıt kızak sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Vidalı miller üzerinde kayıt kızak sistemi.

Takım tezgâhlarının yapılarında bulunan vidalı millerin adım ölçüleri, üretici firma tarafından takım tezgâhı işletim sistemine tanımlanmıştır. Takım tezgâhı kızaklarının pozisyon bilgisi, tanımlanan vidalı mil adım ölçüsü ile ilişkilidir. Takım tezgâhı kızaklarının, vidalı milin 1 tur dönüşü ile adım ölçüsü kadar hareket ettiğini tezgâhın işletim sistemine aktarılır. Şekil 2.3’de vidalı mil teknik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Vidalı mil gösterimi.

Bazı CNC tezgâhlarında motordan kayış-kasnak ile millere hareket sağlanırken bazı tezgâhlarda doğrusal bir motorla doğrudan tahrik (Direct Drive) ile hareket sağlanır. CNC takım tezgâhlarında güçlü ve yüksek hızda besleme gerçekleştirmek için doğrusal bir motorla doğrudan tahrik, yüksek hızlı takım tezgâhlarında özel bir sürücü tarzıdır. Tezgâh bileşenlerinden mekanik aktarma elemanlarını ortadan kaldırır. Doğrudan tahrik ile beslenen yüksek hızlı CNC tezgâhları, geleneksel bilyalı vidalı şanzıman ile kıyaslandıklarında, yüksek konumlandırma hassasiyetine, mükemmel hızlanma ve yavaşlama performansına, kompakt yapıya, geniş hız aralığına sahiptir [17].

Vidalı miller üzerinde hareket eden CNC takım tezgâhlarının hareket esnalarındaki hassasiyetlerini daha iyi bir hale getirmek için optik lineer cetveller kullanılır.

2.1.1. Optik Lineer Cetvel

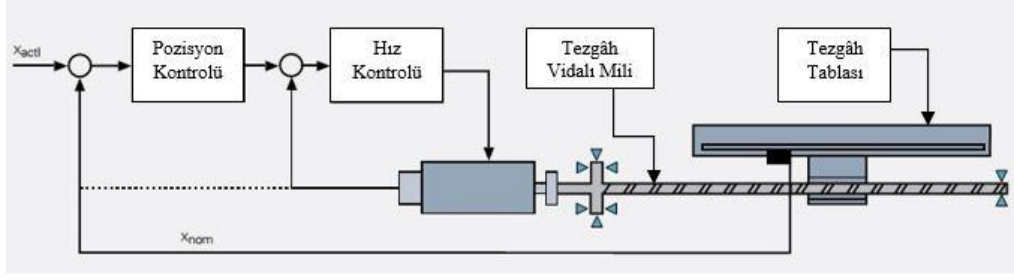
Optik kodlayıcılar, bir ışık kaynağı ve bir fotodedektör kullanarak ölçek çizgilerini sayarak çalışır. Genellikle ışık dağılımını, bir tarama kafası ve bir doğrusal ölçek arasındaki göreceli konumu belirlemek için kullanılan iki sinüzoidal elektrik sinyaline dönüştürürler. Ölçeklerin ızgara aralığı (çözünürlük) 1 μm 'den az ile birkaç yüz mikrometre arasında değişir. İnterferometrelerde olduğu gibi, nanometre altı çözünürlük üretmek için sinyallerin elektronik enterpolasyonu kullanılabilir ve daha gelişmiş optik kodlayıcıların bazıları bu seviyede doğruluklara sahip olabilir [18]. CNC takım tezgâhları için doğrusal kodlayıcılar, sızdırmaz ve temassız ölçüm cihazlarıdır. Optik lineer cetveller alüminyum bir muhafaza ile teraziye, tarayıcı arabasını ve kılavuzunu talaşlardan, tozdan ve sıçrayan sudan korur vaziyette tasarlanmıştır. Okuyucu sensör

ünitesi alüminyum profil boyunca cam cetvel üzerinde rulmanlar vasıtası ile yataklanmıştır [19]. Şekil 2.4'te optik lineer cetvel gösterilmiştir.



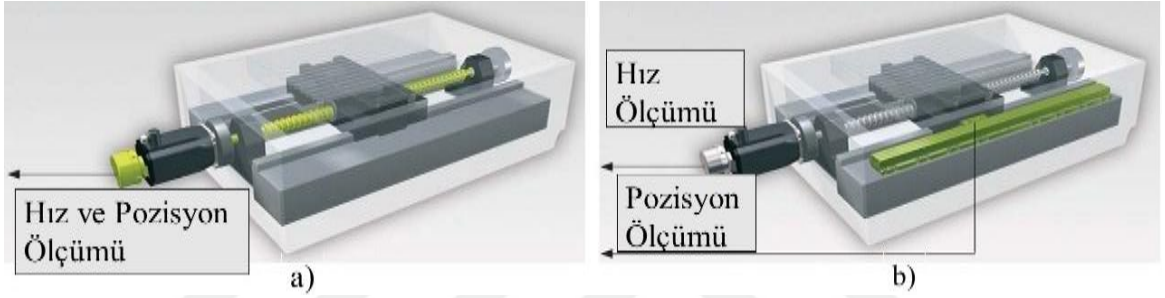
Şekil 2.4. Optik lineer cetvel [19].

Optik lineer cetveller mekanik pozisyon hataların önüne geçerek mikron mertebesinde hassasiyet sağlamakla birlikte termal (ısı) değişimleri telafi ederek takım tezgâhlarındaki X, Y ve Z eksenleri doğrultusunda mutlak konumlama hassasiyeti sağlarlar. Geniş sistemlerin ısı değişikliklerine kolayca tepki veren birçok uzun ve büyük bileşeni vardır. Optik lineer cetveller, bu bileşenlerin düzeltilmesine yardımcı olmakla beraber takım tezgâhlarının tekrarlanabilirliğini sağlarlar. Optik lineer cetvellerin olmadığı takım tezgâhlarında hız ve pozisyon ölçümleri tezgâh tablasının altında bulunan servo motorlar ile tezgâha aktarılırlar. Optik lineer cetvellerin olduğu sistemlerde ise hız ve pozisyon kontrolü ayrıştırılırlar. Pozisyon kontrolü optik lineer cetveller vasıtası ile tezgâha doğrudan aktarılır. Böylelikle tezgâh pozisyon hareketini optik lineer cetvelden gelen verilere göre yapar. Direkt olarak takım tezgâhına gelen veriler sayesinde, ısınmadan kaynaklı uzama hatası ve aşınmadan kaynaklı vidalı mil adım hatası ortadan kalkar. Şekil 2.5'te kızak üzerinde pozisyon ve hız kontrolleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Takım tezgâhı tablasının pozisyon ve hız kontrolleri.

Şekil 2.5'te döner kodlayıcı ve bilyeli vidalı konum geri besleme kontrolünün aksine, doğrusal bir kodlayıcı ve kontrol döngüsünde besleme sürücü mekanizmasını içerir [20]. Şekil 2.6'da yarı kapalı ve kapalı döngü modları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Döngü modları a) Yarı kapalı b) Kapalı [21].

Takım tezgâhı konum geri bildiriminin dolaylı olarak elde edildiği tezgâhlarda vidalı mil dönme açısını ölçmek için mil ucuna veya tahrik motoruna bir açıölçer yerleştirilir. Bu tip CNC takım tezgâhları yarı kapalı döngü modlu tezgâhlardır. Hız kontrolünün ve pozisyon kontrolünün ayrıştırılarak ölçülmesi ile çalışan CNC takım tezgâhları sistemine ise kapalı döngü modu adı verilmektedir.

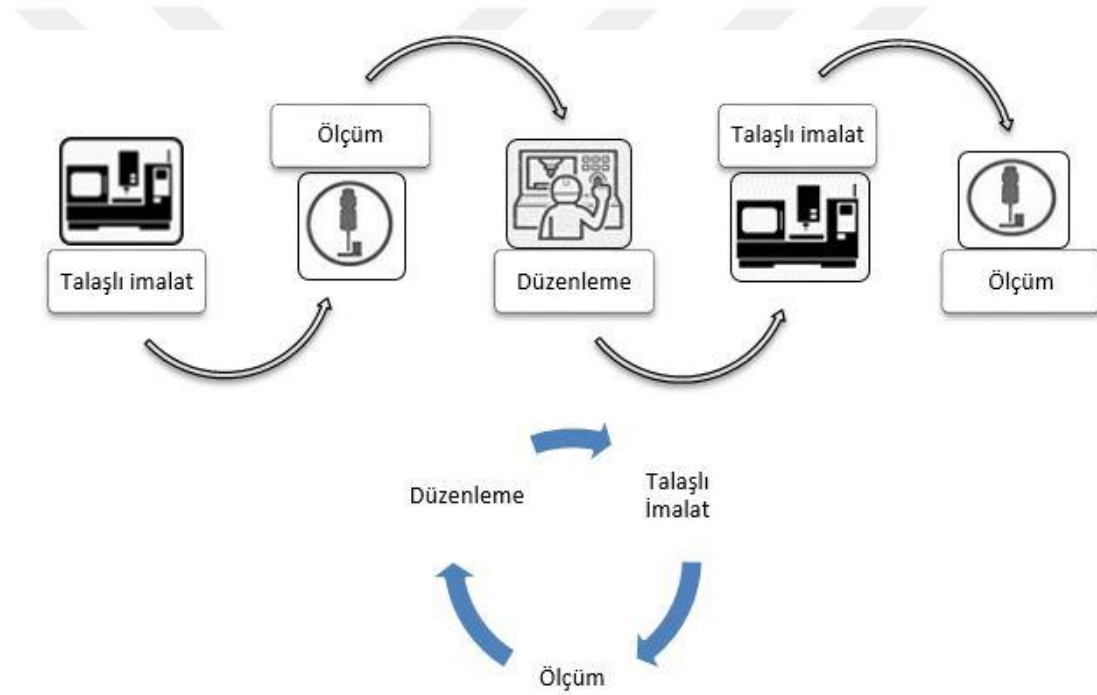
2.1.2. CAD/CAM

CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli imalat anlamına gelmektedir. CAD, bilgisayar teknolojisinin tasarım ve tasarım dokümantasyonu için kullanımıdır. CAD/CAM uygulamaları imalat sanayinde önemli bir alana hizmet vermektedir. CAM programları, CAD ortamında hazırlanan tasarımların takım tezgâhlarında işlenmesi için gerekli takım yolları üretmek için kullanılırlar [22]. CAD ortamında hazırlanan tasarımın CAM programları ile takım yolları çıkarıldıktan sonra tezgâhlara aktarılmasıyla imalat süreci başlar. CAM yazılımında takım yolları belirlenirken imalatı gerçekleştirilecek ürünün

malzemesine göre, takımlar belirlenir ve seçilen takıma göre kesme parametreleri CAM programının kendi kütüphanesinden ya da kullanıcı tarafından manuel olarak verilebilir.

2.1.3. Kapalı Çevrim İmalatı

Kapalı çevrim imalatı, firmaların ürün tasarımı, ürün planlaması, üretim yürütmesi, otomasyon, sahadaki tüketici kullanımından gelen geri bildirimler ile üretimi senkronize etmesini ve optimize etmesini sağlar. Endüstri 4.0 uygulamaları açısından önem arz etmektedirler. İşbirliğine dayalı, bağlantılı bir bilgi döngüsü yaratan CLM, ürünlerin en uygun kalitede imalatını sonlandırmak için, üretim sürecinin maliyetini, süresini ve kalitesini sürekli olarak iyileştiren metroloji uyum tabanlı çok fonksiyonlu bir bütündür. Şekil 2.7’de kapalı çevrim imalat süreci gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kapalı çevrim imalat süreci.

Son yıllarda CLM sistemleri imalat endüstrisinde giderek önemini artırmıştır [23].

2.1.4. Tezgâh Üzerindeki Ölçüm Sistemleri

CNC işleme merkezlerindeki ve torna tezgâhlarındaki ölçme problama sistemleri, işleme merkezlerinde iş miline ve tornalama merkezlerinde tarete (turret) monte edilirler. Problama sistemleri, iş parçalarını tanımlamak, ayarlamak, iş parçası yüzey durumunu izlemek, bitmiş iş parçası boyutlarını ölçmek ve doğrulamak için kullanılırlar. Şekil 2.8’de Renishaw ölçüm cihazının çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Renishaw ölçüm cihazının çalışma prensibi [24].

Probun çalışma prensibinde, tezgâha entegre kablosuz arayüz cihazı probtan gelen ölçüm sinyallerini kızılötesi yöntem ve enkoder desteği ile tezgâh işletim sistemine gönderir. Problama, pahalı fikstür ihtiyacını ve ibrelî göstergelerle manuel ayarlamayı ortadan kaldırır. Problar, manuel ayar hatalarını ortadan kaldırdıkları gibi zaman açısından tasarruf sağlayarak endüstriye hız kazandırmışlardır.

2.2. TEZGÂH HATALARI

2.2.1. Üç Eksenli Hareket Mekanizmalarında Geometrik Hatalar

İşlenmiş parça boyutlarının doğruluğu, kesici takımın işlenen parçaya göre konumsal doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle kullanılan takım tezgâhının doğruluğu parçayı üretmek için genellikle en yüksek doğruluk ve parça kalitesini elde etmek için sınırlı bir durumdur. Takım tezgâhının doğruluğu,

- Geometrik kusur kaynaklı hatalara,
- Yatay eksen, dikey eksen, yuvarlanma eksenî açısal hataları ile kayıt ve kızakların doğrusallık ile diklik hatalarına,
- Sıcaklık değişiminde takım tezgâhı yapısının termal genişlemesi kaynaklı hatalara,
- Statik/Dinamik yüklerden kaynaklı hatalara (örn. Çok ağır iş parçaları),

- Yanlış hizalamalardan ya da bağlantı elemanlarındaki aşınmadan kaynaklı geometrik hatalara bağlıdır [25].

Daha iyi tasarım ve üretim ile takım tezgâhının yapısal iyileştirmeleri hataları azaltabilir. Ancak fiziksel sınırlamalar sebebi ile yalnızca tasarım ve üretim teknikleri bu doğruluğu iyileştiremez. Bu hata kaynaklarının tanımlanması ve telafisi takım tezgâhını iyileştirmek için gereklidir [3]. Takım tezgâhlarında, doğruluğu belirleyen üç ana hata kaynağı vardır.

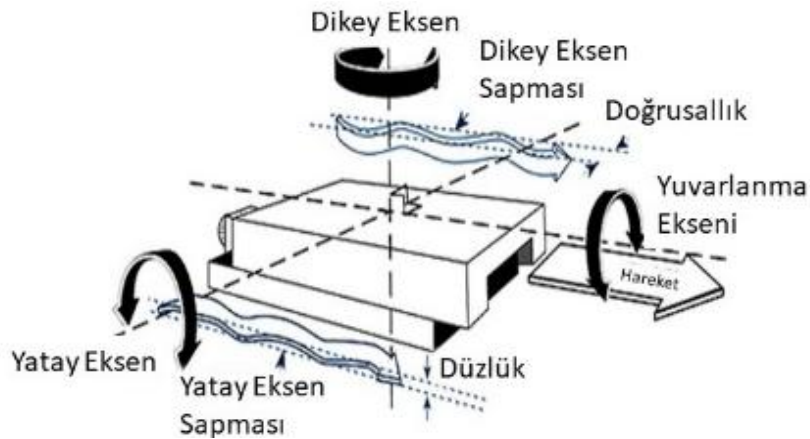
Bunlar:

1. Geometrik yanlışlıklardan kaynaklanan hatalar
2. Termal hatalar
3. Yük kaynaklı hatalar

Bu tür hataların doğrudukları sonuç üretilen parçanın boyutsal ve geometrik hatasıdır.

2.2.1.1. Üç Eksenli Dik İşleme Merkezindeki Geometrik Hatalar

Geometrik hatalar tezgâhın imalatı sırasında mekanik işlevselliği oluşan hatalardır. Takım tezgâhlarının yapısal elemanlarının yanlış tasarlanmaları ve tezgâh yapısının mekanik kusurları bu hatalara sebebiyet verir. Örnek olarak kayıt-kızak sistemlerinin düzgün işlenmemiş olması, doğrusalılık hatalarına ve açısal hatalara sebep olur. Üç boyutlu uzayda, hareket eden bir cisim, 6 adet serbestlik derecesine (6 Degrees of Freedom, 6 DOF) sahiptir [26], [27]. Bunu tek eksende hareket eden dikey işleme tezgâhı tablasına uyarlırsak, 6 adet potansiyel hata beklenmektedir. Şekil 2.9'da takım tezgâhı tablasındaki geometrik hatalar gösterilmiştir.

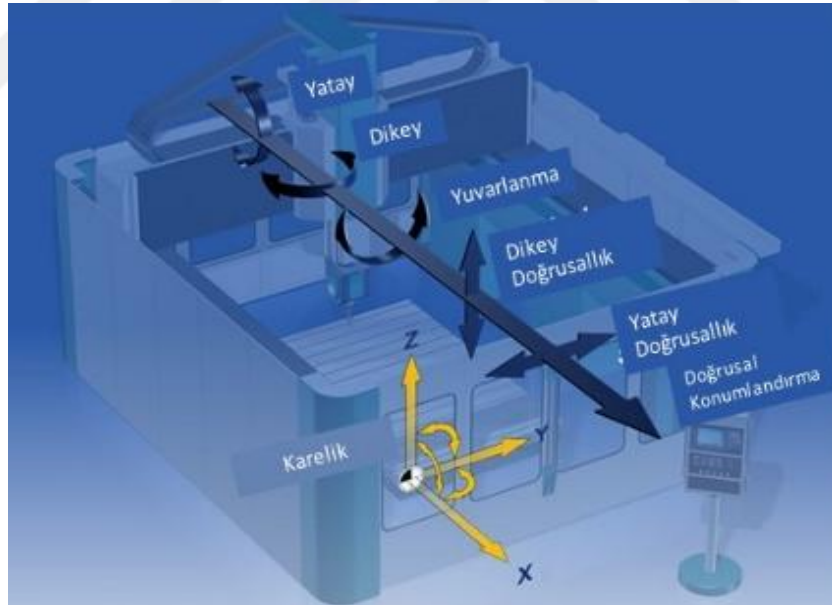


Şekil 2.9. Takım tezgâhı tablası yörüngesindeki geometrik hatalar [28].

Bu hatalar;

1. Lineer pozisyon hataları
2. Doğrusallık hatası dikey yönde
3. Düzlük hatası yatay yönde
4. Yatay eksen hatası
5. Dikey eksen hatası
6. Yuvarlanma eksen hatası

3 Eksenli bir dikey işleme tezgâhı için bu hatalar; $6 \text{ hata} \times 3 \text{ eksen} = 18 \text{ hata}$. Ortogonal olması beklenen 3 adet takım tezgâhı eksenlerinin birbirine diklik hatalarında 3 adet olacağından, 3 eksenli bir dik işleme tezgâhında iş parçasını taşıyan tablanın toplamda, $18 \text{ hata} + 3 \text{ hata} = 21 \text{ adet hataya}$ maruz kalacağı bulunur [29], [30]. Diğer iki ekseninde, bu hatalar Lineer pozisyon hataları (3), Doğrusallık hataları (6), Açısal hatalar (9), Ortogonal takım tezgâhı eksenlerinin birbirine diklik hataları (3) olmak üzere toplamda 21 adet hata bileşeni mevcuttur [31]. Şekil 2.10'da 21 adet hata bileşeni gösterilmiştir. Bunların tamamı tezgâhın genel pozisyonlandırma hassasiyetinde ve dolayısıyla işlenmiş parçaların hassasiyetinde olumsuz bir etkiye neden olabilir.



Şekil 2.10. Tezgâh hatalarının gösterimi [31].

2.2.1.2. Pozisyonlama Hatası

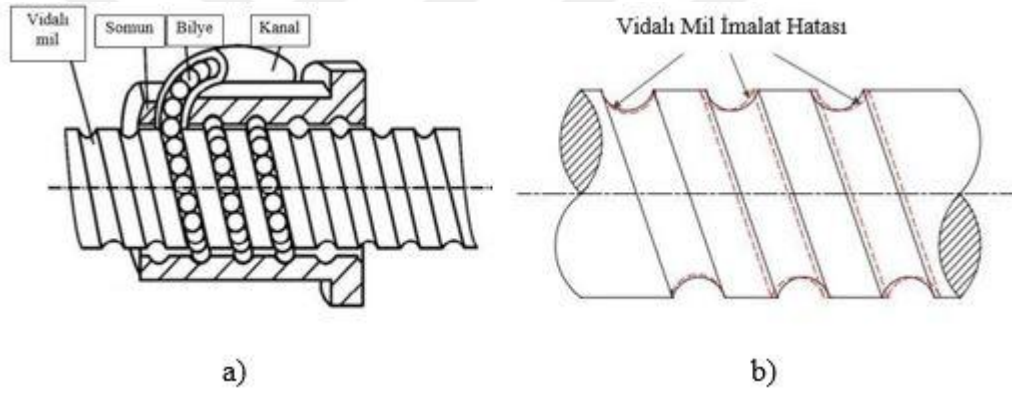
Pozisyonlama hatası, klasik tezgâhlarda vidalı milden, cetveli tezgâhlarda ise cetvelden, ayrıca sıcaklık etkisinden kaynaklanmaktadır.

Vidalı mil kaynaklı pozisyonlama hatası için, hatve hatasına neden olan birkaç faktör

vardır:

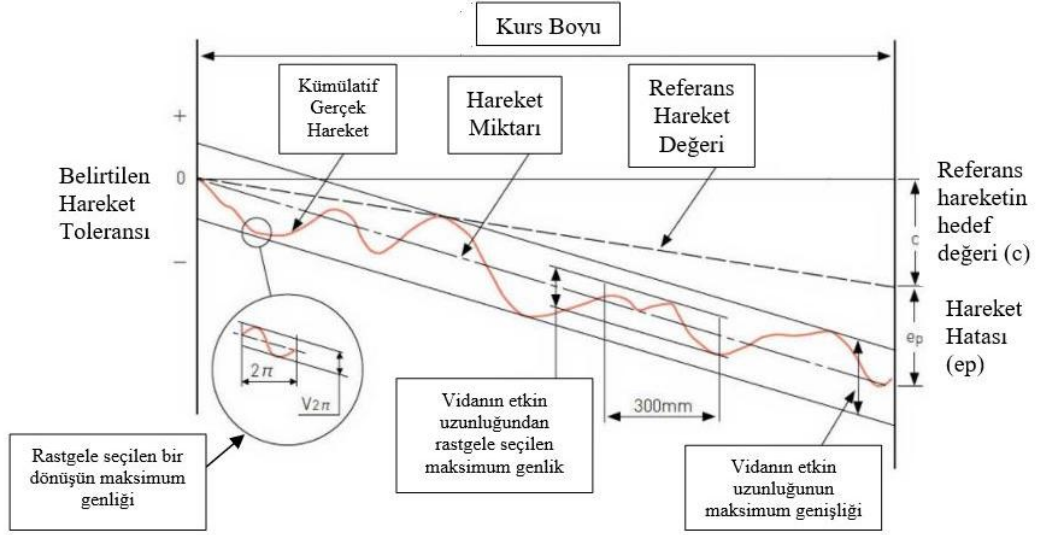
1. Bilyalı vidalı mil çifti, besleme sisteminin iletim zincirinin sonundadır. Kılavuz vida ile somun arasında diş yuvarlanma yolu profili hatası, kümülatif adım hatası çap boyutu hatası vb. gibi birçok türde hata vardır. En önemlilerinden biri kılavuz vidanın kümülatif adım hatasından kaynaklanan takım tezgâhı hedef sapmasıdır.
2. Vidalı milin montaj işlemi sırasında, çift destek yapısı sayesinde vidalı mil aksenel olarak uzar. Böylece vidalı milin adım hatası artar ve takım tezgâhı hedef sapmasına neden olur.
3. Takım tezgâhının montaj işlemi sırasında, vida eksenini ile takım tezgâhı kızağı arasındaki paralellik hatası, takım tezgâhının hedef sapmasına neden olur [32].

Şekil 2.11'de pozisyonlama hatalarına sebep olan vidalı mil somun çifti hataları gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Mil ve somun hataları a) Vidalı mil ve somun pozisyon hatası b) Vidalı mil imalat hatası [32].

Şekil 2.11-a'da vidalı mil adımlarının, üzerinde çalışan somun adımları ile eş çalışmamasından kaynaklanan hatalardır. Şekil 2.11-b'de ise vidalı milin imalatı esnasında oluşabilecek adım hataları gösterilmiştir. Şekil 2.12'de vidalı mil hatalarının incelenmesi gösterilmiştir.

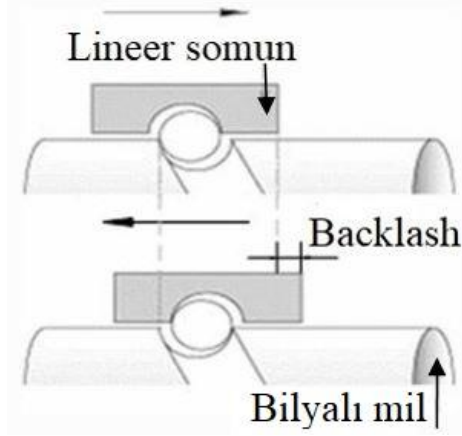


Şekil 2.12. Vidalı mil imalat hatası sebebiyle oluşan pozisyon hatası [33].

Şekil 2.12 incelendiğinde, tezgâh vidalı milinin imalatı sonrasında 300 mm kurs boyunca ISO 3408 standardına göre pozisyon hataları ölçülmüş, belirlenen toleranslarının dışında olduğu saptanmıştır. Bu imalat kaynaklı hatalar takım tezgâhlarında geometrik hatalara sebebiyet verirler.

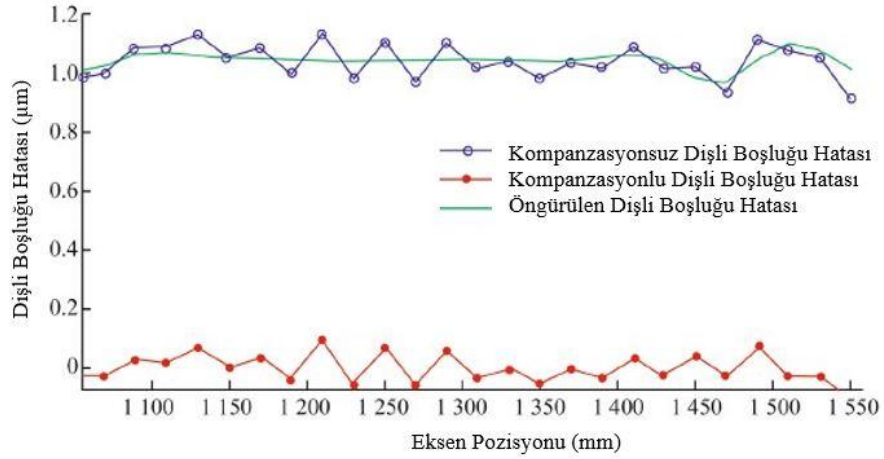
2.2.1.3. Boşluk (Backlash) Hatası

Takım tezgâhlarında görülen bir başka hata ise boşluk (Backlash) hatasıdır. Bu hatalar dişli millerde, bilyalı vidalı sistemlerde oluşurlar. Temel olarak boşluk hatası, iki mekanik eleman arasında açıklık olması nedeniyle doğrusal olmayan konuma bağlı bir hatadır [34]. Boşluk hataları CNC takım tezgâhlarında bir eksende hareketin başladığı ya da yön değiştirdiği anda oluşan hareketsizliktir. Şekil 2.13’de gösterildiği gibi bilyalı vidayla, lineer somun arasında hareket yönü ters çevrildiğinde, boşluk ters yönde alınana kadar hareket olmayacaktır. Bu oluşan boşluk takım tezgâhlarının geometrik hataları arasındadır. Genel olarak tahrik mekanizmasındaki gevşek bağlantı ya da imalat hatası ile montajı yapılan takım tezgâhı elemanları, tahrik mekanizmasında boşluğu oluşturur [35].



Şekil 2.13. Dişli boşluğu gösterimi [35].

Ancak bu boşluk hataları telafi edilebilirler. Şekil 2.14’de pozisyona bağlı oluşan vidalı mildeki boşluk hatası telafili (kompanzasyonlu) ve telafisiz (kompanzasyonsuz) olmak üzere gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Telafili ve telafisiz dişli boşluğu [36].

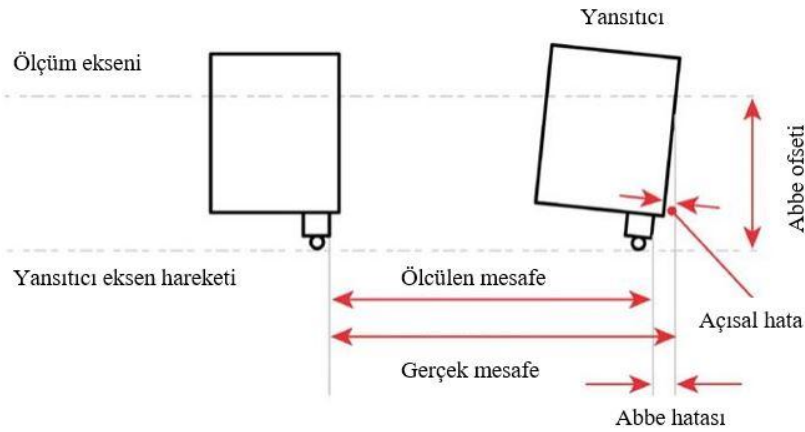
Şekil 2.14 incelendiğinde, eksen boyunca telafisiz bir şekilde çalışan takım tezgâhının ortaya çıkardığı kabul edilebilir bir değer aralığında olan 1 μm ve 1,2 μm arasındaki dişli boşluğu hataları, telafi edildikten sonra vidalı milin 0 μm ’ye yakın bir şekilde hata ile çalışmıştır.

2.2.1.4. Abbe Hatası

Abbe ilkesi ilk olarak Zeiss’li Ernst Abbe (1890) tarafından tanımlanmış ve Abbe ilkesini şöyle tanımlamıştır.

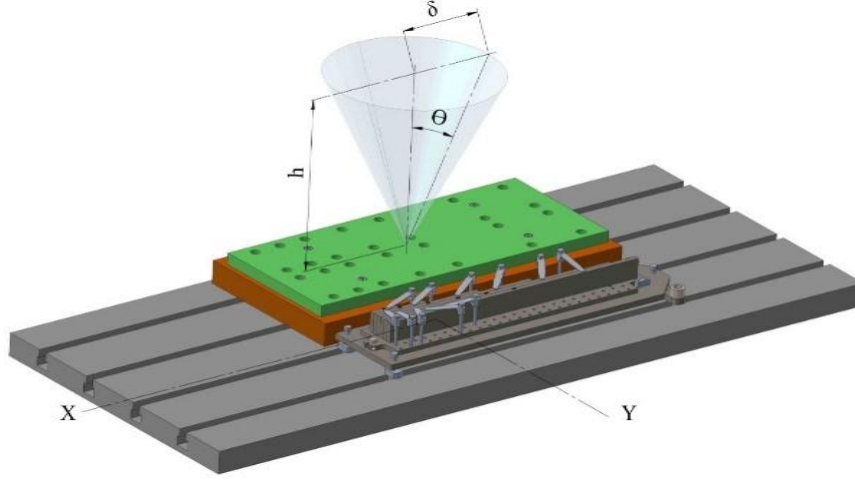
Abbe hatalarından kaçınılacaksa, ölçüm sistemi hat ile eş eksenli olarak (aynı hizada) yerleştirilmelidir. İş parçası üzerinde yer değiştirmenin (uzunluk veren) ölçülecek olan

hatta eş eksenli olarak yerleştirilmelidir. Abbe hatası, ilgili ölçüm noktası gerçek ölçüm ölçeği konumundan yanal olarak ayrıldığında (referans çizgisi veya ölçüm eksenini) ve konumlandırma sisteminde açısal hata hareketleri mevcut olduğunda oluşur. Abbe hatası, açısal hareketin yönüne bağlı olarak ölçülen yer değiştirmenin gerçek yer değiştirmeden daha uzun veya daha kısa görünmesine neden olur. Ölçülen nokta ile referans çizgisi arasındaki uzamsal ayırım, Abbe hatası olarak bilinir. Şekil 2.15 Abbe hatasının bir interferometrik uzunluk ölçümü üzerindeki etkisini göstermektedir. Sıfır Abbe hatası sağlamak için, reflektör hareket eksenini ölçüm eksenini ile aynı doğrultuda olmalıdır. Bir belirsizlik analizinde Abbe hatasını hesaba katmak, Abbe hatasının büyüklüğünün ve konumlandırma sisteminin hareketindeki açısal hataların büyüklüğünün (örn. düzlük) bilinmesine dayanır [37]. Abbe hataları, nanometrelik ölçüm belirsizliklerini hedefleyen boyutsal metroloji uygulamalarındaki en önemli belirsizlik kaynaklarıdır [38].



Şekil 2.15. Abbe hatasının optik yer değiştirmesine etkisi [37].

Abbe hatasının tezgâh üzerinde gösterimi Şekil 2.16'da verilmiştir.



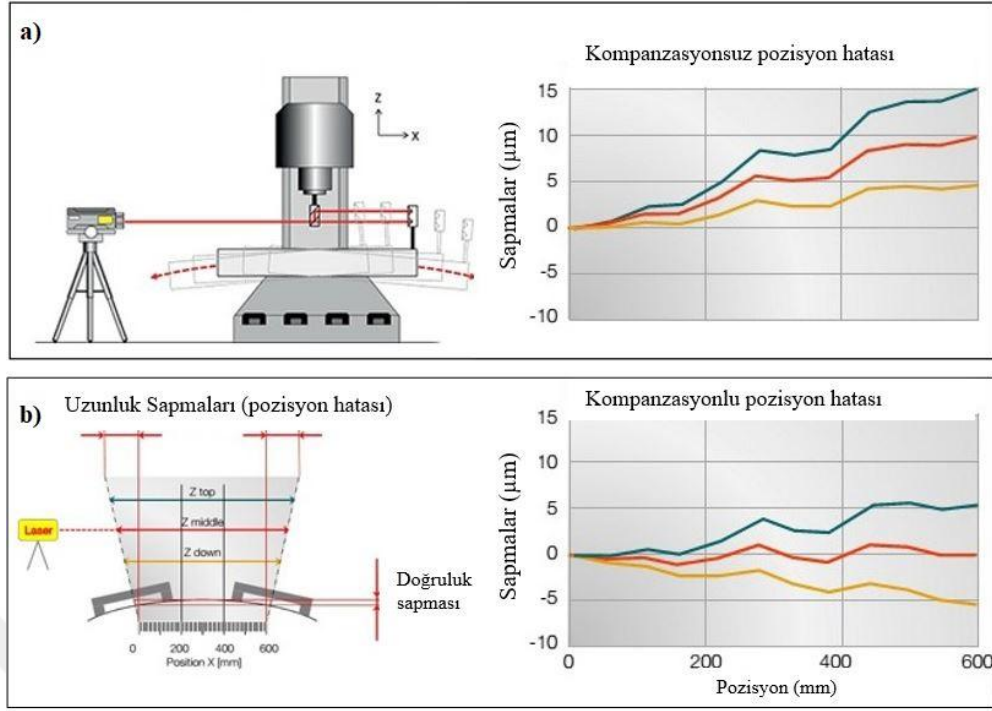
Şekil 2.16. Abbe hatasının tezgâh üzerinde gösterimi.

Şekil 2.16’da Abbe hatası tezgâh üzerinde gösterilmiştir. Abbe hatası h , Abbe hatası miktarı δ ve açısal hata olarak θ gösterilmiştir. Abbe eşitliği (2.1) ise şu şekildedir;

$$\delta = h \times \tan\theta \quad (2.1)$$

2.2.1.5. Açısal Hataları Pozisyon Hatasına Etkisi

Vidalı mil kaynaklı veya cetvel kaynaklı pozisyon hataları telafi edilse bile, açısal hatalar pozisyon hatasına sebep olabilir. Açısal hatalar, açı optikleri kullanılarak ölçülür. Açı optikleri, açısal hatalar sebebiyle oluşan küçük mesafe değişimlerini ölçerek iki optik arasındaki mesafe ile işleme koyup açısal hataları hesaplar. Yöntem sinüs çubuğu ile yapılan işleme benzerdir. Burada iki mesnet noktaları yerine aralarındaki mesafe bilinen optik yansıtıcı yerleştirilir. Açısal hata sebebiyle açı interferometresi ve optik yansıtıcı arasında oluşan göreceli mesafe farkları lazer ile ölçülüp, trigonometrik işleme tabii tutulup, 0,05 arc saniye çözünürlükle bulunabilir. Şekil 2.17’de açısal hatanın, Abbe hatası sebebiyle, pozisyonlama hatasına sebep olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi, farklı dikey konumlarında (Z eksenini boyunca) Abbe hatası değişeceği için, açısal hata kaynaklı pozisyon hatası iş parçasının farklı yükseklikleri boyunca değişecektir.



Şekil 2.17. Tezgâh pozisyon hataları a) Kompanzasyonsuz pozisyon hatası b) Kompanzasyonlu pozisyon hatası.

Şekil 2.17-a'da kompanzasyonsuz (telafisiz) bir şekilde Abbe hatasının interferometre ile ölçümü sonrasında pozisyon hatalarının 15 μm seviyesine çıktığı görülmektedir. Şekil 2.17-b'de ise pozisyon hatalarının 600 mm uzunlukta telafi edildikten sonra ± 5 μm seviyelerine indirildiği gösterilmiştir [39].

2.2.2. Diğer Hatalar

Takım tezgâhlarında meydana gelen diğer ise hatalar çevresel şartlardaki hatalar, işlenmesi gereken parçanın ağırlığı, talaş kaldırma işlemlerindeki ortaya çıkan kuvvetler ve işleme esnasında kütle değişiminden kaynaklanan hatalar olarak bahsedilebilir.

2.2.2.1. Termal Hatalar

Takım tezgâhlarına etki eden termal hataların temelini çevresel şartlardaki değişimler, motorlardan, yataklardan, dişli takımlarından gelen yerel ısı kaynakları, sürtünme ve kesme işlemi esnasında oluşan ısı oluşturmaktadır.

Bu termal hatalar, takım tezgâhının yapısının genleşmesine ve deformasyonuna neden olarak kesici takım ile iş parçası arasında göreceli konum hataları oluştururlar. Takım tezgâhlarının doğruluğu hem dâhili ısı kaynaklarından hem de zamanla değişen ortam sıcaklığından etkilenir [40]. Takım tezgâhlarının termal kaynaklı hataları, iş

parçalarındaki geometrik hataların % 75'ine sebebiyet verir [41]. Tezgâhın çalıştırılması ile termal hatadan etkilenip genişleyen takım tezgâhı elemanları, miller ve vidalı millerdir [3], [11], [42]. Bu genişmelere bağlı olarak talaşlı imalat esnasında işlenen parça tolerans değerleri dışına çıkabilir. Şekil 2.18'de sıcaklığın takım tezgâhlarının kızaklarına etkisi gösterilmiştir. Şekil 2.18'deki görsellerde görüleceği üzere vidalı miller henüz soğuk iken ya da dolaylı yoldan soğutulmuş olduğunda iş parçasının üzerine açılan delikler tam merkezinde imalatı gerçekleştirilirken, Şekil 2.19'da ısınan vidalı milin genişmesi sonucu bu işlemde delik merkezlerinde pozisyon hataları görülmektedir. Bu pozisyon hatalarının doğru ölçümü için sıcaklık ölçümleri önemli etkilerden biridir ve sıcaklık ölçümüyle direkt alakası olan sıcaklıkla uzama katsayısı değeridir [43]. Sıcaklık değişimiyle oluşabilecek boy değişikliği, aşağıda verilen temel denklem eşitlik (2.2) ile tespit edilir:

$$\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L \quad (2.2)$$

Burada,

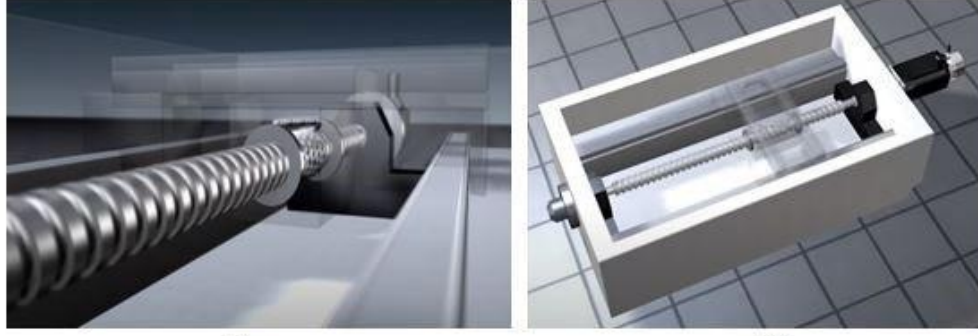
ΔL : Boydaki uzama miktarı (örn. mm)

α : Malzemenin sıcaklıkla uzama katsayısı (1/°C, bazen ppm kullanılır-parts per million-milyonda bir)

ΔT : Sıcaklık değişimi °C

L: Nominal boy değeri (örn. mm)

İlk denklemde L boyu sabit olmakla birlikte ΔT ve α değerleri ise sıcaklık sensörlerinin kabiliyetine, çevresel şartlara, uzama katsayısına ve bilinme durumuna göre değişkenlik gösterebilir. Kısacası bu parametrelerdeki değişimlerden dolayı bazı belirsizlikler ortaya çıkacaktır [43].



a)

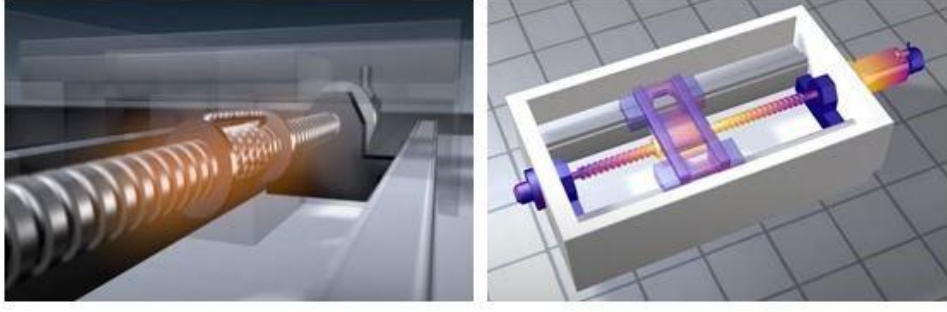
b)



c)

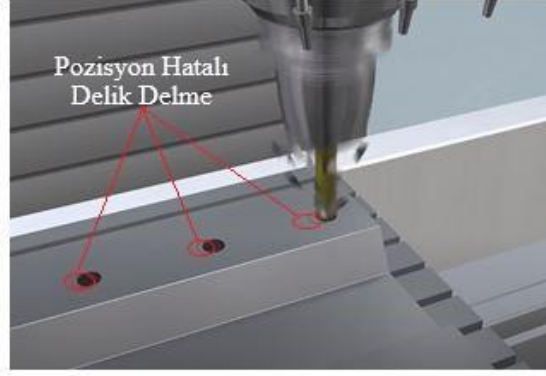
Şekil 2.18. Tezgâhın soğuk çalışması a) Sıcaklıktan etkilenmemiş vidalı mil b) Sıcaklıktan etkilenmemiş servo motorlu vidalı mil hareket sistemi c) Sıcaklık etkisi olmadan delik delme [44].

Şekil 2.18’de sıcaklık etkisi olmayan imalat ile delik delme işlemleri anlatılmaktadır. Şekil 2.18-a’da sıcaklıktan etkilenmemiş tezgâh vidalı mil sistemi gösterilmiştir. Şekil 2.18-b’de sıcaklıktan etkilenmemiş servo motorlu vidalı mil hareket sistemi gösterilmiştir. Şekil 2.18-c’de ise sıcaklıktan etkilenmemiş sistemin imalat esnasında delikleri istenilen pozisyonda deldiği gösterilmiştir.



a)

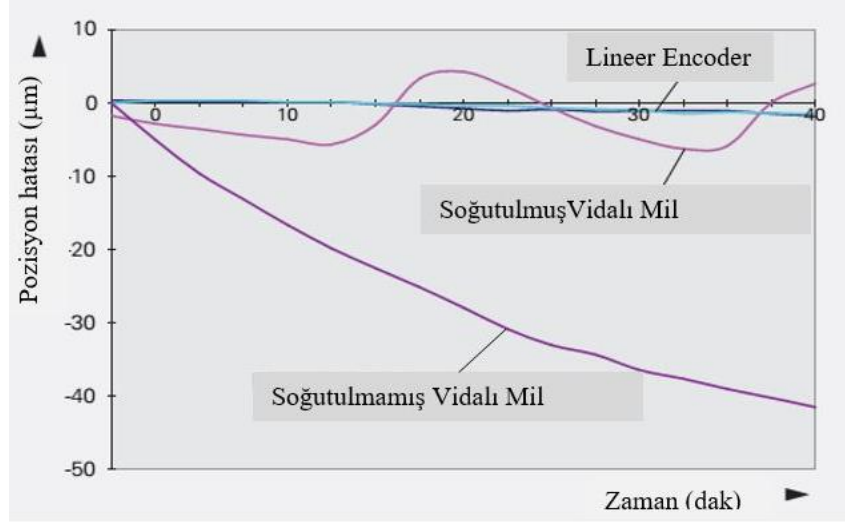
b)



c)

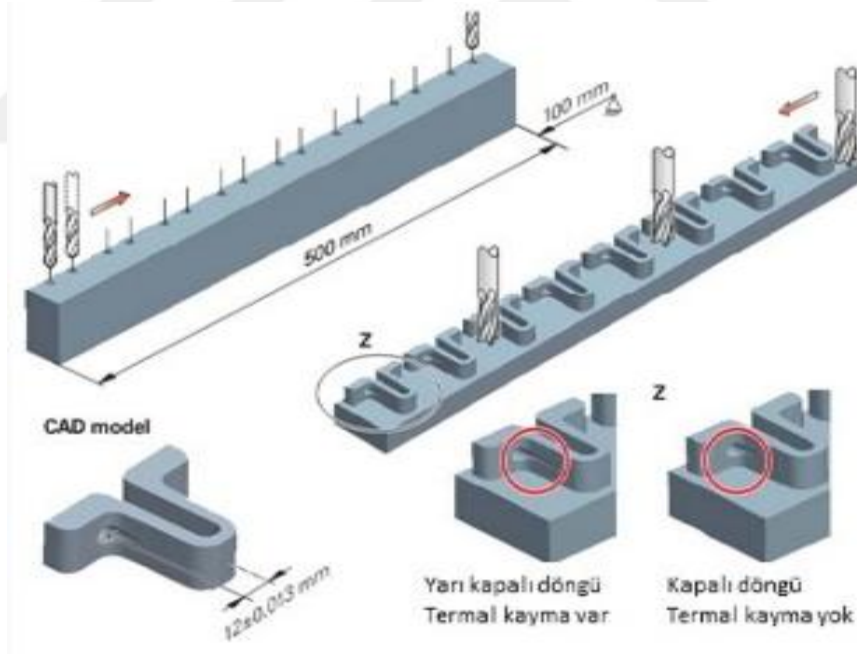
Şekil 2.19. Tezgâhın sıcak çalışması a) Sıcaklıktan etkilenmiş vidalı mil b) Sıcaklıktan etkilenmiş vidalı mil hareket sistemi c) Sıcaklığın etkisi ile delik delme [44].

Şekil 2.19’da sıcaklık etkisinin oluşması ile delik delme işlemleri anlatılmaktadır. Şekil 2.18-a’da sıcaklıktan etkilenmiş tezgâh vidalı mil sistemi gösterilmiştir. Burada mil çalışmaya bağlı olarak ısınmıştır. Şekil 2.18-b’de sıcaklıktan etkilenmiş servo motorlu vidalı mil hareket sistemi gösterilmiştir. Tüm sistem çalışmanın etkisi ile ısınmış ve vidalı mil de uzama yaparak tezgâh sistemine servo motordan hatalı veri aktarımı olmuştur. Şekil 2.18-c’de ısınma kaynaklı vidalı mil uzaması ve hatalı veri aktarımı sonrasında delik delme işleminde delik pozisyonlarının saptığı gösterilmiştir. Şekil 2.20’de 2,5 m/dakika da 500 mm’lik bir mesafede kesici takımın ileri geri hareketi esnasında sabit rulmandan en uzaktaki konumun kaymasını göstermektedir.



Şekil 2.20. Sıvı soğutmalı vidalı takım tezgâhının X eksenini [20].

Soğutmalı vidalı mil tasarımı, soğutmasız yarı kapalı döngü tasarımıyla karşılaştırıldığında konum kayması önemli ölçüde azalmıştır [20]. Şekil 2.21’de küçük parçaların üretimi üzerindeki tahrik doğruluğunun etkisi verilmiştir.



Şekil 2.21. Parça işlemede takım tezgâhı tahrik doğruluğunun etkisi [21].

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi 500 mm uzunluğundaki ham bir alüminyum parçası delinir ve ardından raybalanır. İki işleme operasyonu esnasında ilerleme oranları düşüktür, bu nedenle vidalı millerde ısı oluşumu ihmal edilebilir seviyededir. Bir sonraki adımda kontur frezeleme ile ilerleme hızı önemli düzeyde artırılmıştır. Bu işlem vidalı millerde önemli ölçüde ısı oluşumuna neden olmuştur. Freze takım tezgâhı yarı kapalı döngü

modunda çalıştırılırsa vidalı millerdeki ısıl genleşme kaynaklı delme modeli ile freze modeli arasında sapmalara neden olur. Kapalı döngü işlemlerinde bu hatalar tamamen önlenemez. Kapalı döngü sisteminde termal kaymalar olmazken, yarı kapalı döngü sistemde termal kaymalar gerçekleşmiştir [21].

2.2.2.2. Yük Kaynaklı Hatalar

Yük kaynaklı hatalar takım tezgâhları yapısında elastik gerilmeye neden olurlar. İş parçasının ağırlığı, kesme işlemi esnasında ortaya çıkan kuvvetler, takım tezgâhı bileşenlerinin kütlelerinin yer değiştirmesi ile oluşan kuvvetler yük kaynaklı hatalara sebebiyet verirler [45].

2.2.3. Hata Tespiti ve Telafisi

Takım tezgâhlarının fabrika çıkışları sonrasında performanslarını, oluşturdukları 21 adet hatayı kontrol etmek için bazı muayene ve kabul yöntemleri mevcuttur. Takım tezgâhlarının hem üretici hem de alıcı tarafından muayenesi ve kabulü için ilgili yöntemler aşağıda verilen uluslararası standartlar ile belirtilmiştir:

ISO 230: Takım tezgâhlarının muayene ve deney esasları

ISO 230-1 Bölüm 1: Makinelerin yüksüz çalışırken veya işleme şartlarında geometrik doğruluğu

ISO 230-2 Bölüm 2: Nümerik kontrollü eksenlerin konumlanma doğruluğu ve tekrarlanabilirliğinin tayini

ISO 230-3 Bölüm 3: Termal etkilerin tayini

ISO 230-4 Bölüm 4: Nümerik kontrollü takım tezgâhları için dairesel testler

ISO 230-5 Bölüm 5: Gürültü emisyonu tayini

ISO 230-6 Bölüm 6: Gövde ve yüz köşegenlerinde konumlandırma doğruluğunun belirlenmesi (Köşegen yer değiştirme testleri)

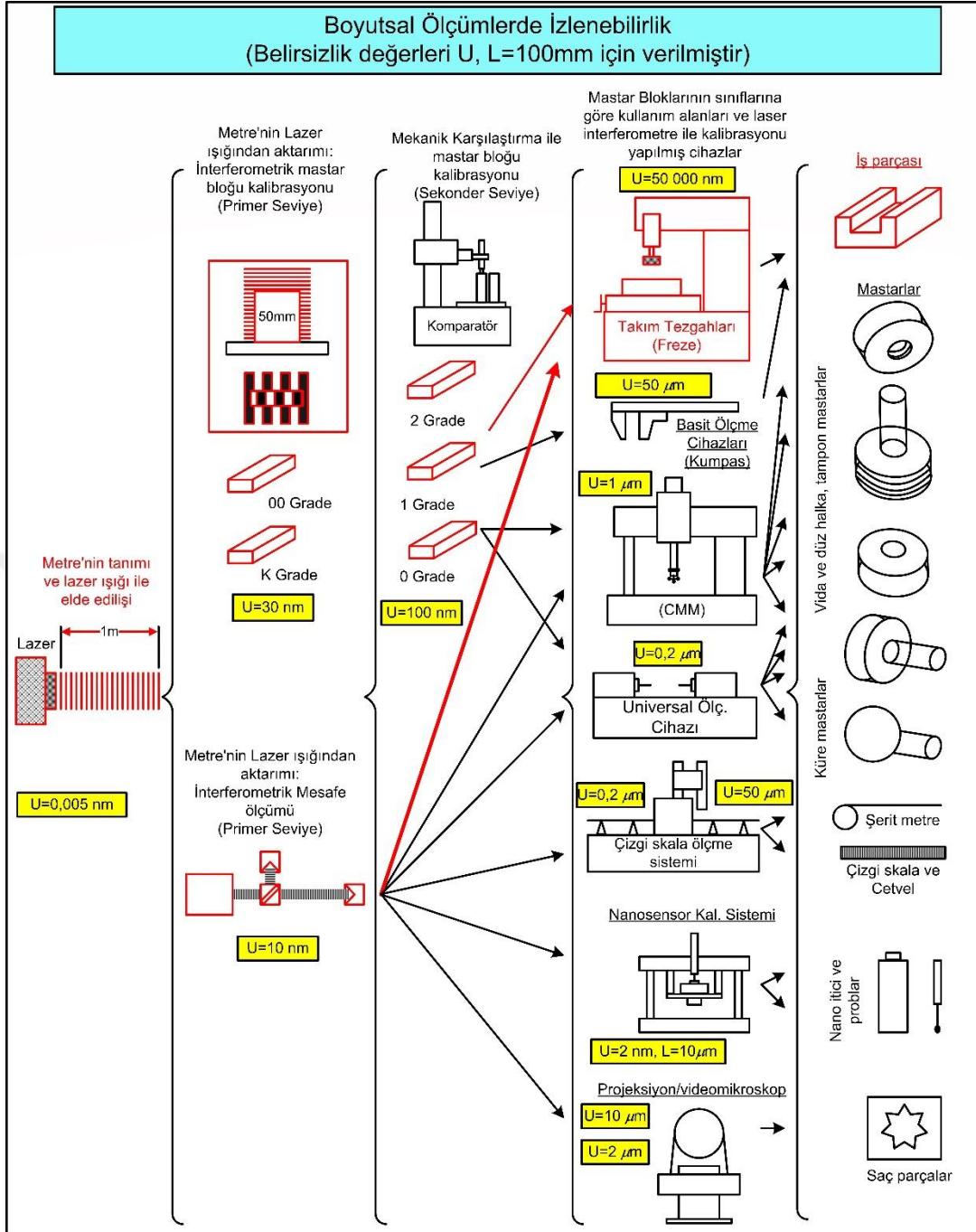
TÜBİTAK-UME’de bu standartlar dikkate alınarak bünyesinde bulunan OKUMA marka GENOS serisi M560R-V CNC takım tezgâhının satın alımından sonra kabulü için lazer interferometre ile kontroller gerçekleştirilmiştir. Tüm bu yapılan kontrollerde kalibrasyon, referans standart ve metrolojik izlenebilirlik bilgilerinden yararlanılmıştır.

“Kalibrasyon, belirli koşullarda, ilk aşamada ölçüm standartları tarafından sağlanan büyüklük değerleri ve ölçüm belirsizlikleri ile bunlara karşılık gelen gösterge değerleri ve ilgili ölçüm belirsizlikleri arasında bir ilişkinin oluşturulduğu, ikinci aşamada ise bu bilginin ölçüm sonucunun göstergeden elde edilmesinde kullanıldığı işlemler dizisidir. Bir kalibrasyonu ifade etmek için, bir ibare, kalibrasyon fonksiyonu, kalibrasyon şeması, kalibrasyon eğrisi veya kalibrasyon tablosu kullanılabilir. Bazı durumlarda, kalibrasyon, göstergelerin toplamsal ya da çarpımsal bir düzeltilmesi ve ilgili ölçüm belirsizliğinden ibaret olabilir. Referans standart,

belirli bir kurum ya da mekânda bulunan belirli tür büyüklüklere ilişkin diğer ölçüm standartlarının kalibrasyonu için belirlenmiş ölçüm standardı. Bir ölçüm sonucunun, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan belgelendirilmiş kesintisiz bir zincir aracılığı ile belirli bir referansa ilişkilendirilebilme özelliğine metrolojik izlenebilirlik denir. Tanımda geçen 'referans', bir ölçüm biriminin uygulamada gerçekleştirilmesi yoluyla tanımı, sıralı olmayan bir büyüklük için ölçüm birimi de dâhil bir ölçüm prosedürü veya ölçüm standardı olabilir. Metrolojik izlenebilirlik tanımlanmış bir kalibrasyon hiyerarşisi gerektirir. Bir referansa ait özellikler belirtilirken, kalibrasyon hiyerarşisinin oluşturulmasında bu referansın kullanıldığı tarih ve kalibrasyon hiyerarşisi içinde ilk kalibrasyonun ne zaman yapıldığı gibi referans ile ilgili diğer metrolojik bilgiler verilmelidir [46]."

Hata tespiti için kullanılan standartlar aracılığı ile SI birim sistemi metreye izlenebilirlik sağlanır. Şekilde 2.22'de izlenebilirlik şemasında dik işlem freze tezgâhı için, ölçü aletleri için, CMM (koordinat ölçüm tezgâhı) ve bazı takım tezgâhları için izlenebilirliğin sağlanma durumu gösterilmektedir [36].



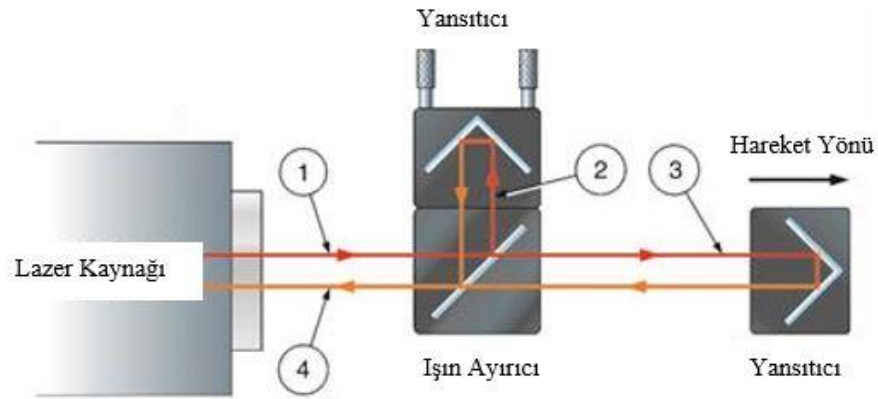


Şekil 2.22. Takım tezgâhları ve boyut ölçme ekipmanlarının izlenebilirliği [36].

Burada lazer ışığı ile elde edilmiş metre dalga boyu ile masterların, takım tezgâhlarının, ölçüm aletlerinin, ölçüm tezgâhlarının kalibrasyonları sonrasında iş parçası, şerit metre, küre master, saç parçaların, problemlerin kontrolü ve üretiminin izlenebilirliği gösterilmiştir. Lazer ışığı ile kalibrasyonu gerçekleştirilmiş tezgâhlar ile üretilen ya da kontrol edilen malzemelerin metreye metrolojik izlenebilirliği sağlanmış olur.

2.2.3.1. Lazer İnterferometre (1 Boyut)

Lazer interferometreler imalat metrolojisinde ışık kaynağı kullanılarak boyut ölçümlerinde kullanılırlar. Hata ölçümü ve cihaz kalibrasyonu gibi hassas inceleme alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [47]. Primer (birincil) seviye ölçümler için kullanılan lazer interferometreler ile çok uzun mesafede tek seferde metre standardı elde edilebilir. Uzun mesafelerde kaynağın eş fazda yayılabilmesi ve dalga boyunun kararlılığı lazer ışığının en önemli üstünlükleri arasında yer alır. Ayrıca zaman alıcı mekanik ölçme yöntemlerinin lazer interferometreler ile önüne geçilerek zaman kaybı da önlenmiştir. Lazer interferometreler ile ölçülen değerler direkt olarak bilgisayar ortamına aktarılabilir eş zamanlı olarak ölçüm değerleri görüntülenebilir. Lazer interferometreli ölçümlerde ışığın dalga boyu esas alınır ya da ışığın yer değiştirme miktarı ve yayılma özellikleri ile ölçülen mesafe arası ilişki kurulur [48]. Şekil 2.23' de lazer interferometre çalışma prensibi gösterilmiştir.



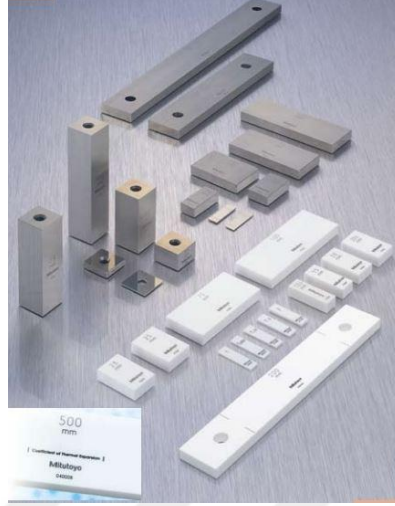
Şekil 2.23. Lazer interferometre çalışma prensibi [49], [50].

Lazer kaynağından çıkan (tek dalga boyu) lazer ışını (1), ışın ayırıcıdan iki ışına (2,3) ayrılır. Ayrılan bu ışınlar yansıtıcıdan geriye yansır ve lazer kaynağına ulaşmadan önce interferometrede tekrar birleşirler [49], [50].

2.2.3.2. Mastar Blokları (1 Boyut), Adım Mastarları

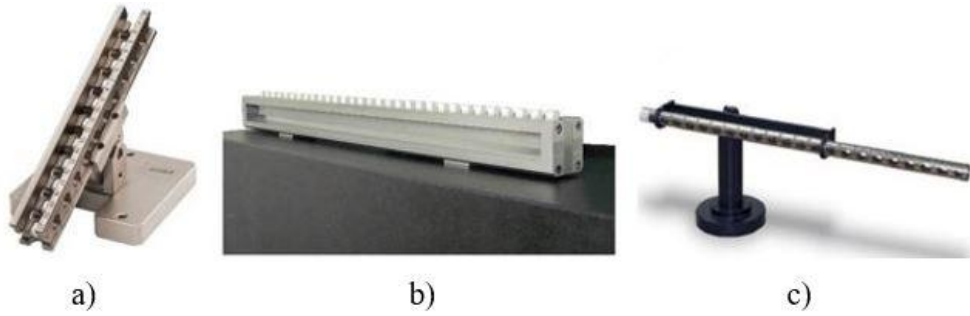
Belirli standartlara uygun olarak üretimi yapılan, birbirine paralel iki düz ölçme yüzeyi arasında SI uzunluk birimi metreyi taşıyan 100-1000 mm nominal boydaki transfer ölçme elemanlarına uzun mastar blok denir [51]. Şekil 2.24'te mastar blok örnekleri gösterilmiştir. Mastar bloklarının yüzeyleri 0,1 μm düzlemsellik ve 0,2 μm paralellik değerlerine sahip olup, boyları 0,0005 mm'den daha düşük bir belirsizlikle tespit

edilebilmektedir. Master blokları, hem ekonomik hem de direk SI birim metreye metrolojik izlenebilirlik sağlayan, en hassas boyut ölçüm standardı vasfını korumaktadır.



Şekil 2.24. Master blokları [52].

Adım masterları bir dizi paralel düz yüzey sağlar. Referans noktaları, yüzlerin nominal olarak dikey düz bir çizgi ile kesişimleridir. Adım masterlarının çoğu, bir çelik destek kirişinden ve adım blokları veya referans silindirler gibi bir dizi çelik veya seramik referans elemanından oluşan montajlardır [53]. Şekil 2.25'te farklı tip adım masterları verilmiştir.

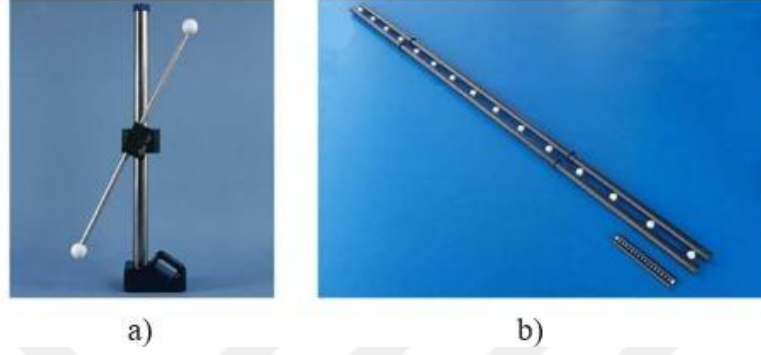


Şekil 2.25. Farklı tip masterlar a) Adım mastarı b) Uzun kontrol mastarı c) Bilyalı giriş mastarı [53].

2.2.3.3. Küreli Çubuk Masterlar

Küreli çubuklar, bir çubukla veya çoklu bilyeli çubuklar olarak da adlandırılan bir dizi hizalanmış küreyle aralıklı iki küreden oluşur. Referans noktaları, çapları göz ardı edilerek genellikle küre merkezleri olarak tanımlanır. İki küreye sahip bilyeli çubukların

referans noktaları, zıt kutuplar olarak da tanımlanabilir. İki farklı tanıma bağı olarak, ortaya çıkan iki ölçülen büyüklük, iki topun ortalama çapına göre farklılık gösterir. ISO 10360-2'ye göre, önceki tanım, problama hatalarına karşı sırasıyla duyarsız veya hassas olan tek yönlü ve ikinci çift yönlü ölçümleri destekler [53]. Şekil 2.26'da farklı tasarım ve boyutlarda küreli çubuk masterlar gösterilmiştir.



Şekil 2.26. Farklı tasarım ve boyutlardaki bilyalı çubuklar a) İki küre bilyalı çubuk b) Çoklu bilyeli çubuklar [53].

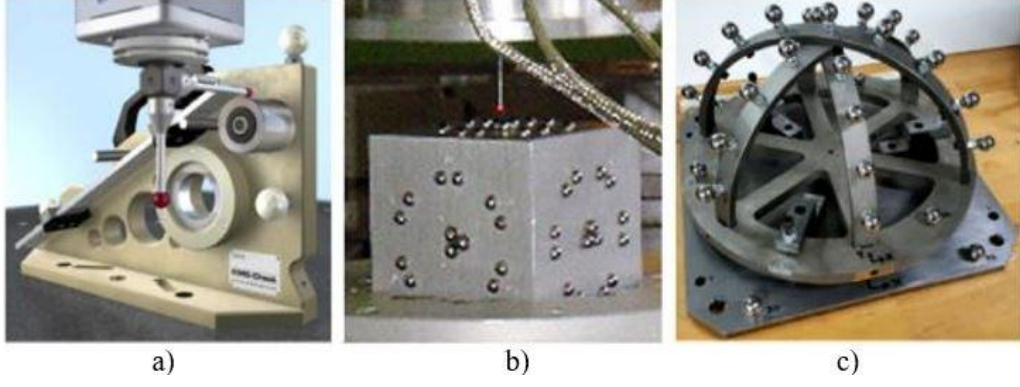
Küresel çubuklar takım tezgâhlarının geometrik hatalarını değerlendirmek veya telafi etmek için kullanılırlar. Bilyalar kinematik olarak masaya ve dövme işlemi yapan makineye (şahmerdan) sıkıştırılmış şekilde teleskopik tasarlanmıştır [53].

2.2.3.4. Halka, Tampon ve Küre Masterlar

Tampon master delik ve vidaların kontrolünde kullanılır. Geçer taraf kendi ağırlığı ile delik içine girmelidir. Geçmez tarafın ise sadece ağız kısmı girer. Geçer ve geçmez halka master millerin çap toleranslarına uygunluğunun kontrolünde kullanılırlar. Ayar halka masterlar, CMM cihazlarının problemlerinin performans ya da prob çaplarını bulmak içinde kullanılırlar. İzlenebilirlikleri olan bu halka masterların iç ve dış çapları taşlanmış, yuvarlaklıkları, silindiriklikleri yüksek toleranslarda imal edilmiştir. Üretimleri sonrasında kalibreleri yapıp sertifikalandırılırlar. Küre masterlar CMM cihazlarının problemlerinin üç eksen kontrolünde kullanılırlar.

2.2.3.5. Kompleks (karmaşık) Yapılar

Kompleks yapılu bu sistemler 3 boyutta tezgâh performanslarının incelenmesinde kullanılırlar. Tezgâhın 3 ekseninde performans tespiti, 21 adet hataların kontrolü ve aksenal performanslar için kullanılırlar. Şekil 2.27'de üç boyut ölçümlerinde kullanılan karmaşık yapılar verilmiştir.



Şekil 2.27. Kalibrasyon ve ölçüm aparatları a) CMM ölçüm kontrol aparatı b) Prob kalibrasyon küpü aparatı c) Karmaşık kalibrasyon aparatı [53].

Şekil 2.27-a görselinde ürün üzerinde bulunan ölçüm kontrol aparatlarının ölçümleri ile CMM ölçüm kontrolleri sağlanmaktadır. Şekil 2.27-b görselinde ise CMM cihazlarında prob paralellik kalibrasyonu için kullanılan kalibrasyon küpü aparatı gösterilmektedir. Şekil 2.27-c görselinde 5 eksenli CNC ve CMM cihazlarında 3 boyutlu ölçüm kontrolü için kullanılan karmaşık kubbe şeklindeki aparat gösterilmektedir.

2.2.3.6. Altın Standart Yapı

Altın standart yapı bu master, takım tezgâhlarında, bir parçanın üretimi veya ölçümü kontrolünde kullanılır. Komparatörlü ölçüm cihazlarının sıfır ayarı için kullanılan kalibreli masterlardır. Şekil 2.28’de altın standart yapı mastarı gösterilmiştir.



Şekil 2.28. Altın standart yapı mastarı [53].

3. LİTERATÜR

Takım tezgâhlarında oluşabilecek hataların tespiti ve bu hataların düzeltilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Takım tezgâhlarında meydana gelen geometrik ve termal hatalardan dolayı, işleme esnasında takımın gerçek son konumu ve yönü, nominal değerlerinden farklı olur. Bu farklılık, elde edilen üründe kalitesizliğe sebebiyet vermektedir. Tezgâhlardaki geometrik hatalar ve termal hatalar üretime direkt olarak etki ettiklerinden dolayı araştırma konuları haline gelmiştir.

3.1. GEOMETRİK HATALARIN TESPİTİ VE TELAFİSİ

[54]'te yapılan çalışmada araştırmacılar, çok eksenli bir takım tezgâhı için geliştirilmiş geometrik hata modeli üzerinde çalışmışlardır. Araştırmalarında çok eksenli takım tezgâhlarının geliştirilmiş bir hata modelinin analitik temellerini belirlemek için girişimlerde bulunmuşlardır. Genel matematiksel hata formülasyonlarını kullanmışlardır. Takım tezgâhları telafi modelini oluşturmadan önce, ideal modeli tanımlamak için sistematik bir yöntem gerekli olduğunu bildirmişlerdir. Bu amaca ulaşmak için, bazı matrislerin homojen dönüşümlerinin kullanılmasıyla oluşacağını belirtmişlerdir. Bu yöntemin uygulanmasını, katı cisim kinematiği varsayımına dayandırmaktadırlar. Çalıştıkları yöntem sayesinde bir bağlantı elemanının ilişkisinin minimum sayıda parametre ile formüle edilmesini sağlamışlardır. Bu çalışma sonucunda rastgele birçok eksenli takım tezgâhının geometrik hata modelini oluşturmak için genel bir yöntem sunmuşlardır. Geliştirdikleri bu yöntemin dönme ve çevirme serbestlik derecelerinin sahip herhangi bir takım tezgâhına uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Tüm serbestlik derecelerinde hem bağlantı hem de hareketle ilgili hatayı açıklamışlardır.

[55]'te yapılan çalışmada araştırmacılar, tezgâh hatalarını en aza indirmek için bir yöntem üzerine çalışmışlardır. Bu yöntemde, kesici takımın pozisyon hatasını, takım tezgâhı yapısındaki münferit elemanların hatalarıyla ilişkilendirmişlerdir. Takım tezgâhı kızaklarının geometrik ve termal olarak indüklenen hatalarını tahmin etmek için bir prosedür açıklamışlardır. Lineer hataların testlerinde lazer interferometre kullanmışlardır. Kalibrasyon verilerine dayanarak, hata bileşenleri için deneysel

modeller oluşturmuşlardır. Bu modellerdeki parametreleri, en küçük kareler eğri uydurma tekniklerini kullanarak elde etmişlerdir. Takım tezgâhı ile yapısal elemanları arasındaki uzamsal ilişkilerin tanımlanması için katı gövde kinematiği varsayımları ve homojen dönüşüm matrisi yönlendirmelerini kullanarak bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Matematiksel modellemelerinde 4x4 homojen matris kullanmışlardır. Bu çalışmada tornalama merkezi kullanmışlardır. Tornalama merkezi yapısına dayalı matematiksel model uyarlamışlardır. Sonrasında kalibrasyon ölçümleri yapılmış, doğrusal olmayan en küçük kareler eğri uydurma teknikleri kullanılarak takım tezgâhının geometrik ve ısıl nedenli hatalarının tahmini için ilişkiler kurmuşlardır. Gerçek zamanlı hata telafisi için yazılım geliştirerek bu yazılımı bir mikro bilgisayarda uygulamışlardır. Hata telafi sisteminin doğruluğunu göstermek için takım tezgâhının hata telafili ve hata telafisiz kesme testlerini yapmışlardır. Bu testlerin sonucunda 20 kata kadar doğruluk artışının elde etmişlerdir. Maliyetli takım tezgâhı ısınma sürelerinin ortadan kaldırılmasının, ucuz bir hata telafi sistemi ile birlikte mümkün olduğunu açıklamışlardır.

[32]'de yapılan çalışmada araştırmacılar, açık sayısal kontrollü sistemlerde açılmal hataların telafisi yöntemi üzerine çalışmışlardır. CNC takım tezgâhlarında işleme doğruluğunu daha da iyileştirmek için işleme sürecinde vida adımı hatası telafisi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda en etkili ve yaygın olarak kullanılan lazer interferometre cihazını kullanmışlardır. Lazer interferometre ile her noktada adım hatasını kayıt ederek ölçümleri tekrarlayarak ortalama değer bulmuşlardır. Vida adım hatalarını kurs boyunca eşit olarak dağıtmışlardır. Telafi simülasyonu sırasında üç eksenli işleme merkezinin Y eksenini kullanmışlardır. Araştırmalarında yarı kapalı döngü CNC tezgâhlarını hedefleyerek, hatve hatalarının ölçüm yöntemi ile ölçülen sıralı verilerin sapma hesaplamalarını yapmak için kübik spline interpolasyon algoritmasını kullanmışlardır. Simülasyon sonuçlarında bu yöntem ile adım hatası telafisinin doğruluğunu büyük ölçüde artırabileceğini belirtmişlerdir. Araştırdıkları yöntem ile takım tezgâhı vidalı milinin konumlandırma hassasiyetini geliştirebilecekleri belirtilmiştir.

[56]'da yapılan çalışmada araştırmacılar, 3 eksenli bir CNC işleme merkezinde geometrik ve kesme kuvveti kaynaklı hataları hesaba katarak asenkron hata telafi modeli üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında ARD-TB400 CNC freze tezgâhını ve geometrik hataların tespiti için lazer interferometre kullanmışlardır. Lazer

interferometre x-y düzleminde aynı anda hem ileri hem de geri yönde hareket eden iki düz çizginin telafi edilmiş sonuçlarını ölçmek için kullanılmıştır. Geri yayılım (Back-propagation) sinir ağı tarafından çalışma esnasında geometrik hatanın tahminini ayrı ayrı bulmuşlardır. Telafi algoritması ile beklenen hatayı nominal konumdan çıkartarak CNC takım yolu komutlarını değiştirmişlerdir. Deney sonuçlarında, kurs boyunca ileri ve geri yöndeki hatayı 237 μm 'den 8 μm 'ye düşürerek, takım tezgâhı doğruluğunun önemli ölçüde arttığını göstermişlerdir.

[57]'de yapılan çalışmada araştırmacılar, pozisyon ve geometrik hataların telafisini üç regresyon yöntemi ile araştırmışlardır. Bu yöntemde sinir ağları ve bulanık mantık kullanmışlardır. Araştırmalarında Emco VMC600 üç eksenli CNC işleme merkezi kullanmışlardır. Renishaw ML10 lazer interferometre yardımı ile hata ölçümlerini tespit etmişlerdir. 4x4 matris ile pozisyon vektör ölçekleme denklemleri kullanarak hata modellemeleri belirlemişlerdir. Hacimsel hata elde etmek için bilinmeyen fonksiyonlar türetilmesine ve konumsal hataların modellenmesine değinmişlerdir. Araştırmalarında bu modelleme için çoklu doğrusal regresyon, sinir ağları ve bulanık mantıktan oluşan üç deneysel modelleme yöntemi kullanmışlardır. Lazer interferometre ile hata tespitini tüm ölçümlerinde vidalı mil ileri ve geri hareket ettirilmiş ve ortalamaları modele aktarmışlardır. Sıcaklıktaki artış nedeniyle konum hatalarının 35 μm 'ye kadar değiştiği test esnasında saptamışlardır. NC kodunu içeri aktaran ve işleme yolunu oluşturan bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Bu bilgisayar programı ile işleme esnasında modelden dönen hacimsel hataları, oluşturulan denklemler ile uygulanarak termal, konumsal ve geometrik hataları telafi etmesi sağlanmıştır. Telafi prosedürünü, özyinelemeli algoritma ile yapmışlardır. Mevcut yazılımlarında geliştirdikleri yöntem ile nöro-bulanık model ve hacimsel hataların kombinasyonuna göre yazılım, sürekli takım yolunu değiştirerek hataları telafi etmiştir. Araştırmalarında uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sisteminin, yapay sinir ağları ve çoklu doğal regresyonlara göre daha doğru bir modelleme yöntemi olduğunu belirtmişlerdir. Sundukları yeni tekniği bazı serbest biçimli yüzeylerin işlenmesiyle doğrulayarak hatalarda ortalama % 41 seviyelerinde bir iyileşme sağladıklarını belirtmişlerdir.

[4]'te yapılan çalışmada araştırmacılar, takım tezgâhlarındaki geometrik hataları modellemek ve telafi etmek için sistematik bir yöntem açıklamışlardır. Açıkladıkları yöntemde göre, geometrik hataları diğer hatalardan ayırmak için ölçtükleri hataları matematik modelleme kullanarak frekans alanında analiz etmişlerdir. Sonrasında

geometrik hatalar karşılık gelen frekans bileşenlerini dalga boyların tekrarlanabilirliğine göre seçmişlerdir. 3 eksen bir CNC takım tezgâhını deneylerinde kullanarak X ve Y eksenlerindeki pozisyon kaymalarını lazer yer değiştirme sensörleri ile ölçmüşlerdir. Z yönündeki hata bileşenlerini telafi etmek için Z ekseninde ince hareket mekanizmasına sahip olan ek sistemleri CNC takım tezgâhı ile bütünleştirerek geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri CNC takım tezgâhı ile düz yüzey talaş kaldırma işlemi yaparak tezgâhlarındaki göreceli yer değiştirme dalgalanmalarını 1,3 µm'den 0,5 µm seviyelerine düşürmüşlerdir. Yaptıkları deney sonuçlarında takım tezgâhı kolonlarındaki geometrik hataların, oluşan titreşim hatalarından ayrı olarak telafi edildiğini göstermişlerdir.

[58]'de yapılmış olan çalışmada araştırmacılar, takım tezgâhı geometrik hatalarını, diğer hatalarını ayrı ayrı belirlemek ve telafi etmek için matematik modellemeleri üzerine çalışmışlardır. Yöntemlerinde, takım tezgâhlarının geometrik hataları, kesme kuvveti kaynaklı hataları ve termal kaynaklı hataları çevrimdışı olarak belirleyerek telafi etmişlerdir. Çalışmalarından 10'dan fazla farklı türde takım tezgâhı kullanmışlardır. Bu yaklaşımın temel sorunu, özellikle kılavuzlar, yataklar ve tahrik vidaları gibi mekanik bileşenlerin neden olduğu karmaşık hareket hataları ihmal edilebilir olmadığında, makinenin geometrik hatalarının doğru bir şekilde tanımlanmasındaki zorluktur.

[59]'da yapılan çalışmada araştırmacılar, takım tezgâhının hassas bir işleme yapabilmesi amacıyla interpolasyon algoritmasından oluşan etkili bir statik, yarı statik hata telafi sistemi ve öz yinelemeli bir yazılım kullanarak telafi prosedürü geliştirmişlerdir. Kesme kuvvetlerinden gelen konum ve yönelim hatasını telafi edebilmek amacıyla yinelemeli çevrimiçi yazılım geliştirmişlerdir. Hata telafi sistemini kullanarak takım tezgâhı doğrusallığını X eksenini için % 91 ve Y eksenini için % 85 oranında iyileştirmişlerdir.

3.2. TERMAL HATALARIN TESPİTİ VE TELAFİSİ

[42]'de yapılan incelemelerde araştırmacılar, takım tezgâhlarının uzun kullanımından kaynaklanan termal hataları analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, takım tezgâhının sürekli kullanımı sonrasında hareketli elemanlarında ısı oluşumundan ve bu ısı oluşumlarının takım tezgâhındaki çeşitli yapısal elemanlarında genleşme olduğunu belirtmişlerdir. Kesici takımın konumlandırılmasında yanlışlığa sebebiyet veren bu genleşmeyi termal hata olarak nitelendirmişlerdir. Takım tezgâhında oluşabilecek ısı kaynaklarını

aşağıdaki gibi belirtmişlerdir;

- Yataklar
- Dişli ve hidrolik yağ
- Tahrikler ve kavramalar
- Pompalar ve motorlar
- Kızaklar
- Kesme hareketi ve talaş
- Harici ısı kaynakları

Bu hataların telafi edilmesinde ise takım tezgâhı yapısının davranışını deneye dayalı modeller kullanarak tespit etmişlerdir. Hata tahminleri için kullanılan hata matrisleri yönteminin normal bir imalat ortamında uygulanabilmesi için çok fazla zaman gerektiğine değinmişlerdir. Her takım tezgâhı elemanına ayrı ayrı hata matrisleri uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu hata matrislerinin bir bilgisayar ile tezgâha bütünleştirilip çalıştırılarak hata telafilerinin gerçekleştirilebileceğini vurgulamışlardır.

[11]'de yapılan çalışmada araştırmacılar, takım tezgâhlarında oluşan termal hataları incelerken, karmaşık termal hata modelini basitleştirmek için yeni bir modelleme yöntemi sunmuşlardır. Takım tezgâhı performansını değerlendirmek amacıyla yapay sinir ağı ve köpekbalığı kokusu algoritmasını kullanarak, termal hata telafi yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemi deney üzerinde uygulayarak doğrulamışlardır. Torna iş mili ve C eksenli sıcaklık dağılımını kaydetmek için termal görüntüleme cihazı ile temassız bir sıcaklık ölçüm yöntemi kullanmışlardır. Topladıkları termal karakteristik verileri yeni modelleme yöntemlerine uyarlamışlardır. Termal görüntüleme cihazını, sıcaklık ölçümü için en uygun yeri bulmak ve bir termal hata modeli tasarlarırken sıcaklık sensörlerinin sayısını en aza indirmek için kullanmışlardır. Termal görüntüleme cihazı ile termal konumlama hatalarını azaltmışlar ve modellemenin tahmin doğruluğunu iyileştirmişlerdir. Çalışmalarında torna tezgâhının C eksenini çalışma ile ısıtmışlar, mil ısıtma testi ve kombine hareket testi uygulayarak kendi geliştirdikleri modellemenin diğer modellemelere göre daha iyi doğrulukta çalıştığını belirtmişlerdir.

[60]'da yapılan çalışmada araştırmacılar, takım tezgâhlarında oluşan termal hataları incelemek için 5 eksenli bir dik işleme merkezinde deneyler uygulamışlardır. Python programlama dili kullanarak gerçek zamanlı termal hataları telafi etmek üzerine çalışmışlardır. Transfer fonksiyonlarını kullanan bir matematiksel modeli doğrudan

işleme merkezinin kontrol sistemine uygulamışlardır. 60 saatten fazla tezgâh üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Termal modelleme yapmak için kullandıkları sıcaklık sensörlerini, tezgâh üreticisi tarafından hazırlanmış olan sensör bölgelerine yerleştirmişlerdir. Doğrusal olarak işleme ve alınan sıcaklık ölçümlerine göre matematiksel modelleme yaparak, bu yöntemin termal telafi için uygun bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir. Deneylelerinin sonuçlarında termal hataları, X yönünde % 62, Y yönünde % 56 ve Z yönünde % 73 azaltmışlardır.

[61]'de yapılan çalışmada araştırmacılar, takım tezgâhlarının termal indüklenen konumlandırma hatasını azaltmak için Bayes sinir ağına dayalı termal hata modelleme yaklaşımı önermişlerdir. CNC takım tezgâhının sıcaklık alanı ve konumlandırma hatasını içeren termal özelliklerin eşzamanlı ölçülmesi ile araştırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Bulanık kümeleme sistemlerini ve korelasyon analizini takım tezgâhı üzerindeki sıcaklığa duyarlı noktaları bulmak için kullanmışlardır. Deneylelerde kullandıkları 3 eksen CNC işleme merkezindeki termal hataları, Bayes sinir ağı sistemi ile 18,2 μm 'den 5,14 μm 'ye düşürerek çoklu doğrusal regresyon yönteminde önemli ölçüde daha iyi performans elde etmişlerdir. Bayes sinir ağı sistemini kullanarak termal hataları % 71 oranında iyileştirmişlerdir.

[8]'de yapılan çalışmada araştırmacılar, 5 eksenli bir takım tezgâhının uzun vadeli bir termal hata telafisi için uyarlanabilir bir yaklaşımdan bahsetmişlerdir. Model tabanlı telafi değerlerini hesaplamak için bir diferansiyel denklem sistemi kullanmışlardır. Çalışmalarında herhangi bir modelin imalatında çevre sıcaklığındaki değişikliklere ve yüke bağlı değişikliklere dayalı olarak takım merkez noktasının termal yer değiştirmelerinin tahmin edilebileceğini vurgulamışlardır. 96 saatlik uzun vadeli bir ölçümde gerçek bir takım tezgâhının termal pozisyonunda ve yönelim hatalarında önemli bir azalma gösteren deney uygulamışlardır.

Yapılan çalışmalardaki araştırmaların büyük bir bölümünde takım tezgâhında oluşabilecek önemli hataların iyileştirildiği saptanmıştır. Literatür çalışmalarında matematiksel modeller kullanılarak hata tahminlerine göre tezgâha doğrudan ya da dolaylı yoldan müdahale ile tezgâhta oluşabilecek hataları düşürmüşlerdir. Çalışmaların birçoğunda lazer interferometreden yararlanılmıştır. Anlık sıcaklık ölçümleri yaparak takım tezgâhında oluşabilecek hataları yine tahminler doğrultusunda matematiksel modelleme yaparak termal hataları da düşük seviyelere çekmişlerdir.

4. DENEYSEL MATERYAL METOD

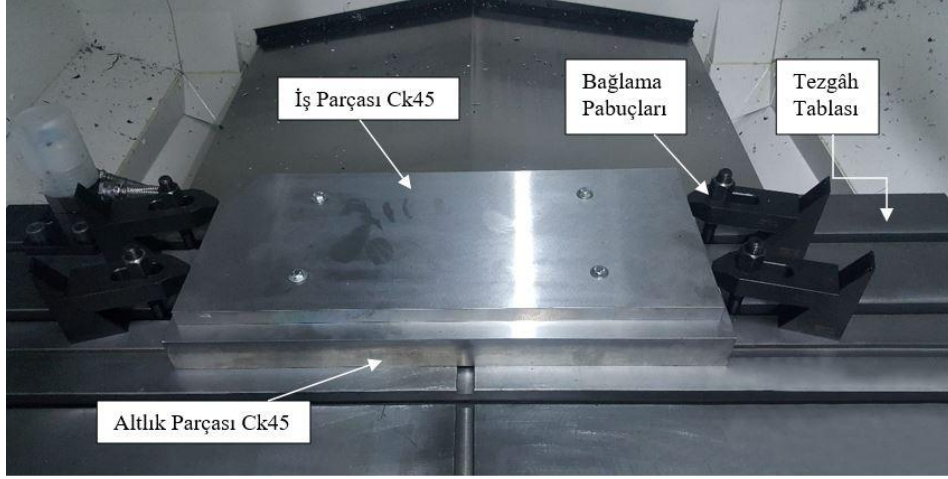
Bu başlık altında deneyler esnasında kullanılan yöntemlerden ve hangi ekipmanların nasıl kullanıldığından bahsedilmiştir.

4.1. YÖNTEM

Tezgâhta oluşabilecek hataların, CNC kontrol sistemine entegre edilmiş, genelde üretici firma yetkilileri tarafından değiştirilebilen telafi dosyasına müdahale etmeden düzeltilmesi esas alınmıştır. Bunun için oluşturulan CAD dosyasındaki delikler arası koordinat noktaları tespit edilip bir katsayı ile düzeltilmiştir. Bu düzeltme sonucu elde edilen değerler ile CAD dosyası revize edilip parça işlemesi tekrar yapılırsa veya son pasoda (finish cut) bu düzeltme yapılırsa arzu edilen toleranslara ulaşmak istenmiştir. Yapılan ölçümlere göre CAD dosyasındaki ölçü değerleri değiştirilerek, CNC programındaki koordinat noktaları değiştirilmiştir. Bu hata azaltma metoduna “işlem sırasında kompanzasyon / eş zamanlı kompanzasyon” adı verilmiştir. Bu işlemin yapılabilmesi için, CAD dosyasındaki veriler ile işleme girecek bir kompanzasyon faktörüne ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için mevcut durumdaki ilgili eksenin pozisyon hatası tespit edilip, hata miktarı üzerinden kompanzasyon faktörü hesaplanmıştır. Bu faktör ile CAD dosyası ölçü verileri işleme sokulup, yeni koordinat değerleri bulunmuştur. Düzeltme faktörünü belirlemek için 1 µm'nin altında bir doğrulukta SI birimi metreye metrolojik izlenebilirliği olan referans değer sunabilecek master blokları, kinematik prensiplere göre tasarlanmış özel aparatlarla tezgâh tablasına bağlanmıştır.

4.2. İŞ PARÇASI

Deneylerde iş parçası olarak Ck45 çeliği kullanılmıştır. Ck45 çeliği imalatta yaygın olarak kullanıldığı için tercih edilmiştir. Ayrıca iş parçasının ve diğer tüm aparatların Ck45 çeliğinden imal edilmesinin ana sebebi, termal uzamalardan ötürü tezgâh tablası ile yakın uzama göstermesidir. Şekil 4.1'de deneylerde kullanılan iş parçası ve iş parçasının tablaya bağlantısı verilmiştir.



Şekil 4.1. İş parçasının tezgâh tablasına bağlantısı.

Ck45 çeliğinin çeşitli standartlara göre adlandırılmaları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ck45 çeliğinin normlara göre tanımı.

Normlar	Tanımı
EN, Avrupa Normu	C45E
AISI, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü	1045
DIN, Alman Endüstri Normu	Ck45
JIS, Japon Endüstri Normu	S45C
BS, İngiliz Standardı	080M36 CFS8
AFNOR, Fransa Standart Komitesi	XC45 XC48H1

Çizelge 4.2’te deneylerde kullanılan iş parçasının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 4.2. Ck45 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.

Ck45	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
%	Diğer	0,47	0,29	0,71	0,18	0,03	0,02	0,04

Çizelge 4.3’de iş parçası olarak kullanılan Ck45 çeliğinin doğrusal termal genişleme katsayısı verilmiştir.

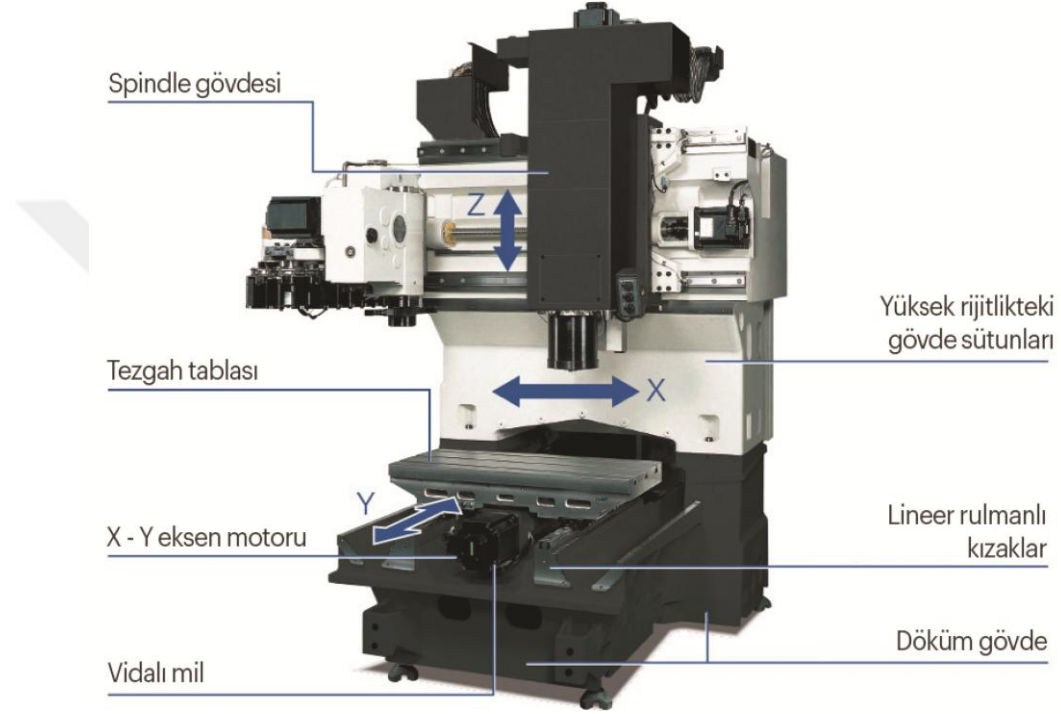
Çizelge 4.3. Ck45 çeliğinin doğrusal termal genişleme katsayısı.

Termal Genleşme Katsayısı $10^{-6} (°C^{-1})$						
20-100°C	20-200°C	20-300°C	20-400°C	20-500°C	20-600°C	20-700°C
11.6	12.3	13.1	13.7	14.2	14.7	15.1

4.3. DELİK DELME

4.3.1. Kullanılan Tezgâh

Deneyler TÜBİTAK-UME kurum bünyesinde bulunan Japonya Menşei OKUMA marka Genos Seri M560R-V 3 eksen dik işleme merkezinde yapılmıştır. Deneylerde kullanılan OKUMA marka CNC dik işleme merkezine ait tanımlar Şekil 4.2’de verilmiştir.



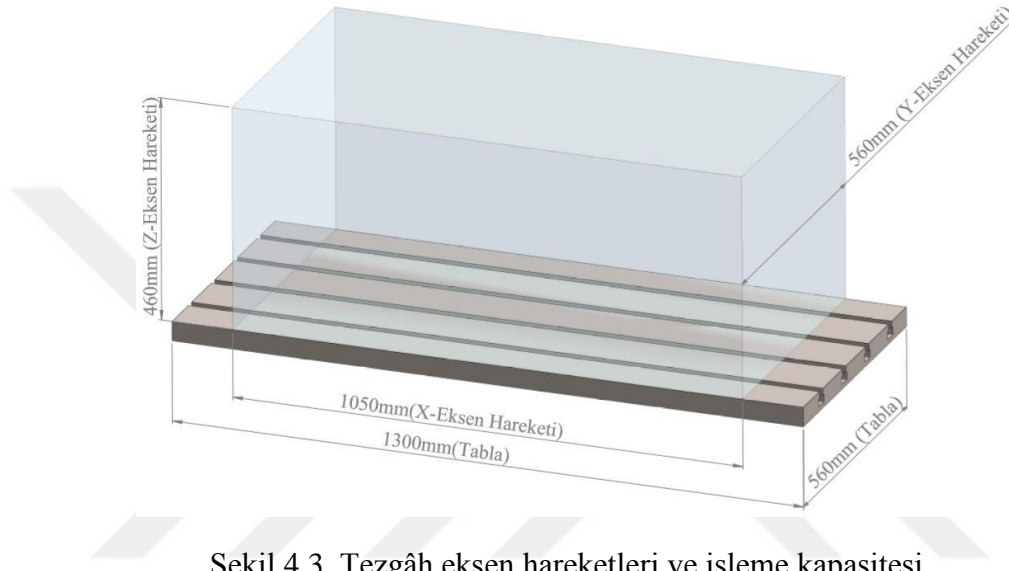
Şekil 4.2. OKUMA M seri tezgâh yapısı [62].

Deneylerde kullanılan OKUMA marka CNC dik işleme merkezine ait teknik özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan tezgâhın teknik özellikleri

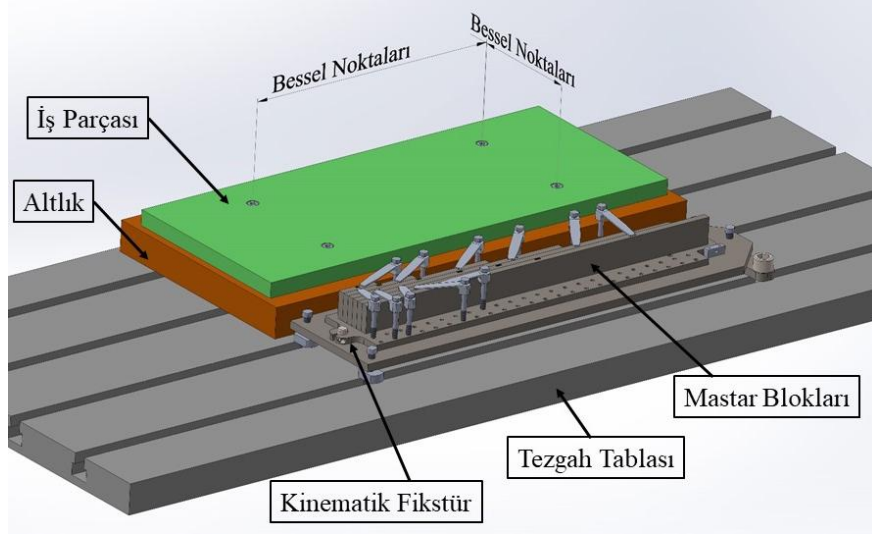
OKUMA M 560R-V	
Tezgâhın Gücü (kW)	32
En Yüksek Devir Sayısı (dev/dak)	15000
Sırasıyla x, y, z, ekseninde kurs (mm)	1050, 560, 460
Ölçü Hassasiyeti (mm)	0,001
Takım Sayısı	32
Maksimum Takım Çapı (mm)	Ø125
Üretim Yılı	2015

ATC kollu tip tezgâh olup 32 takımlı magazin kapasitesine sahiptir. Otomatik iş ölçme, parça sıfırlama probu (Renishaw OMP60), otomatik takım boyu ölçme ve kırılması tayini de tezgâhın ek özelliklerindedir. Tezgâh hareketleri vidalı miller vasıtası ile lineer cetvel kullanılmamıştır. Motor tahrikleri kayış kasnak ile değil direkt sürüçülü (DD) olarak sağlanmaktadır. Takım içi içten su verme sistemi sayesinde derin delik işlemede talaş sıkışma problemi oluşturmaz. Şekil 4.3’de tezgâh tabla hareketleri ve iş parçası kapasitesi gösterilmiştir.



4.3.2. Deney Düzeneği

CK45 çeliğinden hazırlanan test parçası, Bessel noktalarından tezgâh tablasına bağlama pabuçları ile konumlandırılmış altlık görevi yapan CK45 çeliğine bağlanmıştır. Delik delme esnasında tezgâh tablasına zarar verilmemesi ve giriş hasarını en aza indirmek için Ck45 çeliğinden altlık kullanılmıştır. Deney düzeneği tasarlanırken, iş parçasının ve çektirme parçasının merkez hatlarından maksimum sapma alanını en aza indirmek için destek noktaları olarak Bessel noktaları kullanılmıştır. İş parçası ve mastar bloklarının bağlantısı Şekil 4.4’te verilmiştir.



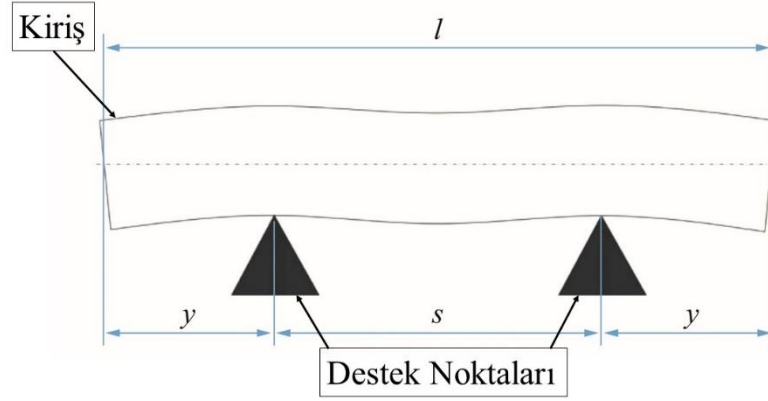
Şekil 4.4. İş parçası ve mastar bloklarının tezgâh tablasına bağlantısı.

Kirişlerin tasarımında merkez hattından maksimum sapma alanını en aza indirmek için destek noktaları olarak Bessel noktaları kullanılır. Bessel noktaları hesaplanırken eşitlik 4.1'den yararlanılarak hesaplanır.

$$y = 0,2203 \times l \quad (4.1)$$

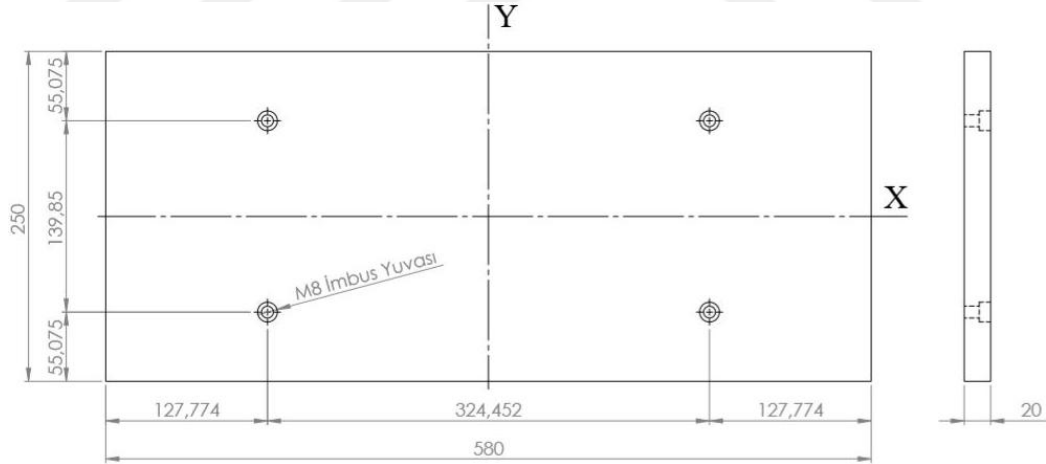
Kiriş boyu olarak l kabul edildiğinde, eşitlik 4.1 formülü doğrultusunda hesaplama yapılarak, Bessel noktaları (y) her bir uçtan olacak şekilde mesafeleri bulunur [63]. Ya da iki destek noktasının merkezden birbirlerine olan uzaklıkları (s) bulunmak istenirse, eşitlik 4.2 kullanılabilir. Şekil 4.5'te Bessel noktalarından desteklenen kirişin deformasyonu verilmiştir.

$$s = l - (2 \times (0,2203 \times l)) \quad (4.2)$$



Şekil 4.5. Bessel noktalarından desteklenen kirişin deformasyonu.

İmalatını gerçekleştirdiğimiz test parçası boyu 580x250x20 mm boyutlarında olacak şekilde frezelenmiştir ve her iki yüzeyi taşlanmıştır. Bu plakayı destek noktalarından bağlamak için Bessel formülü kullanılarak X yönündeki s mesafesi 324,452 mm ve Y yönündeki s mesafesi 139,85 mm bulunmuş olup bu değerler doğrultusunda bağlama delikleri açılmıştır. Şekil 4.6’da test parçasının Bessel bağlantı noktaları gösterilmiştir. Tezgâh tablasına bağlanan plakanın da tüm yüzeyleri frezelenmiş ve tezgâh tablasını öpen yüzeyi ve iş parçasının bağlanacağı yüzey taşlanmıştır.

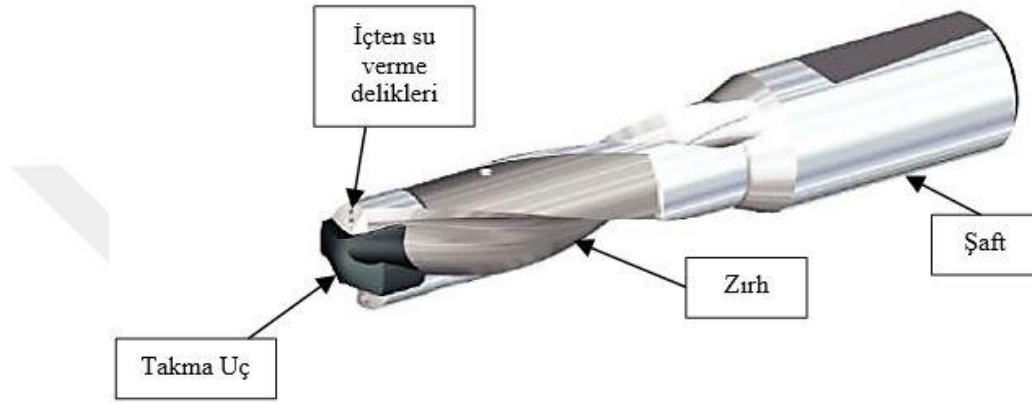


Şekil 4.6. Deneyi yapılacak iş parçasının X ve Y yönündeki Bessel noktaları.

4.3.3. Deneylerde Kullanılan Takımlar

Bu deneyde tezgâh hatalarının bulunması ve telafi edilmesi için 580 mm boyunca Ø17 mm matkap ile sırasıyla 50, 100, 175, 250, 400 ve 500 mm aralıklarla delikler delinmiştir. Delme deneyleri Y eksen yönünde 3 kez tekrarlanmıştır. Bu araştırmada delme işlemi esnasında Ø17 mm takma uçlu 50 mm boyda delik debilecek içten su

vermeli 140° kesme açısı olan modüler takma uçlu matkap kullanılmıştır. Modüler takma uçlu matkap Kennametal marka olup zırh katalog kodu KSEM170R5WN20M olup kesici ucunun katalog kodu ise KSEM1700HPGM'dir. Kesici ucun malzemesi karbürdür ayrıca derin delik ve hassas yüzeylerin çıkması istendiğinde kullanılan bir matkap türüdür. CMM ile delik çaplarının ölçümü esnasında daha iyi sonuç vermesi açısından delici matkabın çapı büyük seçilmiştir. Şekil 4.7'de deneylerde kullanılan modüler takma uçlu matkap verilmiştir.



Şekil 4.7. Deneylerde kullanılan modüler takma uçlu matkap [64].

4.3.4. Deneylerde Kullanılan Parametreler

Talaş kaldırma öncesi CAM programı hazırlanırken kesici takım üreticisinin devir ve ilerleme kataloğundan Ck45 çeliğine göre kesme parametreleri seçilip veriler CAM programına girilmiştir. Katalogdan seçilen bu parametreler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri.

	Kesme Parametreleri	Kısaltma ve birim	Parametre değerleri
1	Devir sayısı	n, dev/dak	1400
2	Kesme hızı	Vc, m/dak	75
3	Tabla ilerlemesi	Vf, mm/dak	245
4	Devir başına ilerleme	fn, mm/dev	0,175

Delme işlemi boyunca takım ve iş parçasını soğutma amaçlı Houghton marka Sitala E 403 modeli bor yağı kullanılmıştır. Genel imalata uygun olarak bor yağı ve su karışımı yapılmıştır. Bu karışımda % 95 temiz su ve % 5 oranında bor yağı karıştırılarak tezgâh soğutma sıvısı tanklarına koyulmuştur.

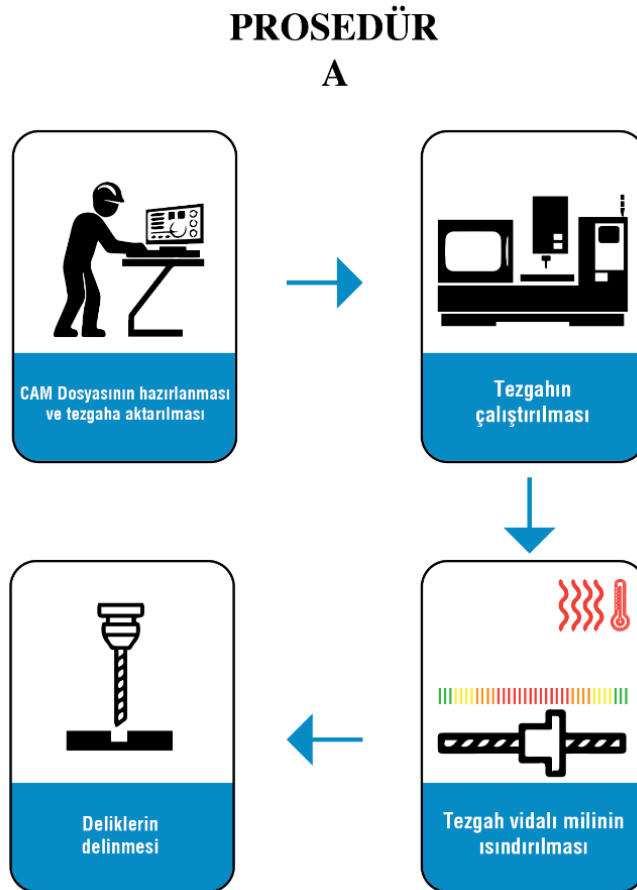
4.3.5. Deney Prosedürleri

Bu bölümde belirlenen takım ve parametreler kullanılarak delikler delinmiştir. Delik delme prosedürleri aşağıda belirtilmiştir. Delinen deliklerin ölçülerinin kontrolü ise ISO 230-2 standardına göre yapılmıştır [65].

Uygulanan prosedür;

- Tezgâh millerinin ısıtılması, CAM dosyasını yükleme, Delik delme (Prosedür A)
- Tezgâh millerinin ısıtılması, Master ölçümü, Faktör bulma, CAD dosyasında faktör ile eş zamanlı (on-line) düzeltme, CAM dosyasını yükleme, Delik delme (Prosedür B)
- CAM dosyasını yükleme, tezgâh milleri ısıtılmadan delik delme (Prosedür C)

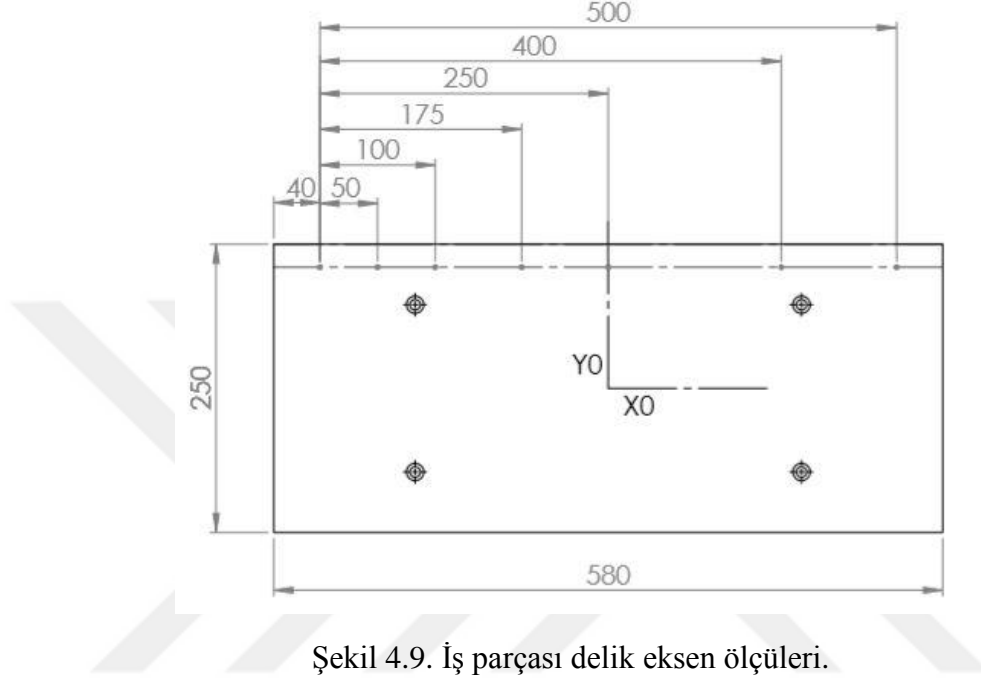
Prosedür A'ya ait akış şeması Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Prosedür A akış şeması.

Prosedür A'ya göre testi yapılacak parçadan talaş kaldırılmadan önce tezgâh milleri

boşta çalışma yaparak ısıtılmıştır. Hazırlanan CAD dosyasındaki veriler CAM dosyası olarak tezgâha aktarılmıştır. Ø 17 mm takma uçlu modüler matkap ile X ekseninde önce başlangıç deliği ve sonrasında sırasıyla 50, 100, 175, 250, 400 ve 500 mm aralıklı ölçülerde olmak üzere toplamda 7 adet 15 mm derinliğinde delik delinmiştir. Şekil 4.9’da test delikleri çizimi gösterilmiştir.



Şekil 4.9. İş parçası delik eksen ölçüleri.

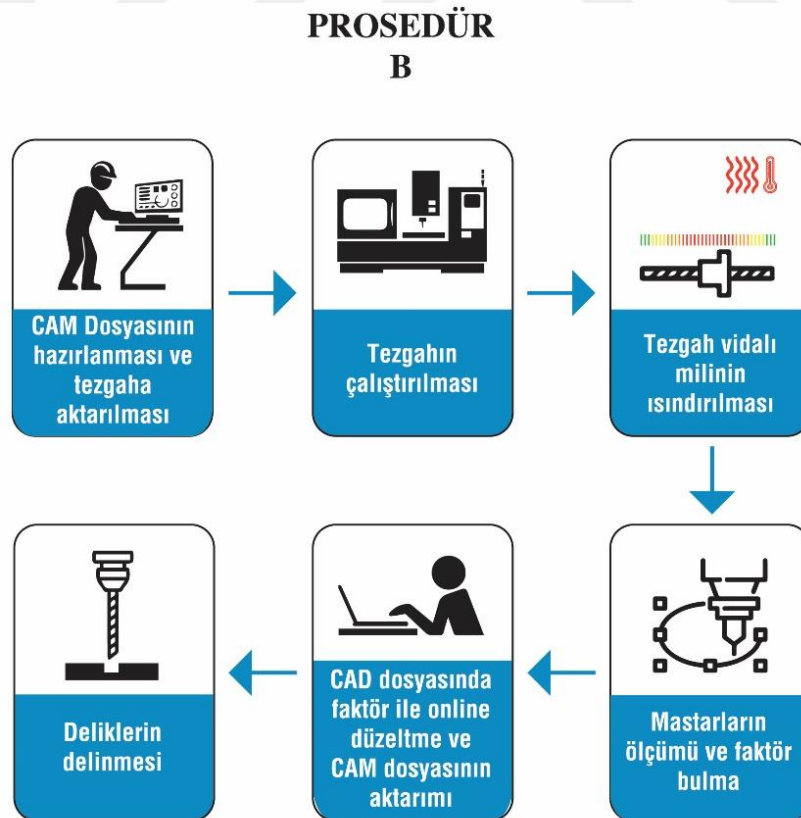
Bu uygulama için CAM programında hazırlanan NC kodlar Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu CAM dosyası tezgâha aktarıldıktan sonra talaş kaldırma işlemlerine geçilmiştir.

```
00001
N1DRAW
N2 (17mm JOBBER DRILL)
N3 G30 P1
N4 T29 M06
N5 G15 H1
N6 S1400 M03
N7 M50
N8 M03
N9 G90 G00 X-250. Y105.
N10 X-250. Y105.
N11 G56 Z5. H29 M50
N12 G83 R5. Z-15. Q2. F245.
N13 X-200.
N14 X-150.
N15 X-75.
N16 X0
N17 X150.
N18 X250.
N19 G80 Z5. M09
N20 G30 P1
N21 M30
```

Şekil 4.10. İlk delme deneyleri için NC kodları.

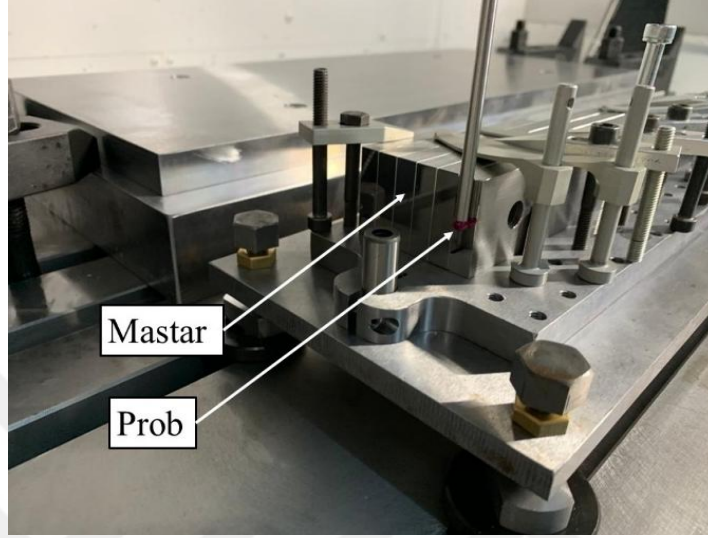
Şekil 4.10’da görüldüğü üzere tezgâh N10 satırında X-250 konumuna hızlı hareket ile gittikten sonra başlangıçtaki ilk test deliğini delmiştir. N13 satırı ile X-200’e doğru gelip başlangıçtan X boyunca 50 mm hareket ile ikinci test deliğini delmiştir. Sonrasında N14 X-150 satırı ile X boyunca 100 mm hareket ederek üçüncü test deliğini delmiştir. N15 X-75 satırı ile X boyunca 175 mm hareket ederek dördüncü test deliğini delmiştir. N16 X0 satırı ile X boyunca 250 mm ilerlemiş olup beşinci test deliğini delmiştir. N17 X150 satırı ile X boyunca 400 mm ilerleyerek altıncı deliği delmiştir. Son olarak N18 X250 satırı ile X boyunca 500 mm ilerleyip yedinci deliği delerek test delik prosedürünü tamamlamıştır.

Bir sonraki uygulama olan Prosedür B’ye göre testi yapılacak parçanın CAM verisi tezgâha aktarılmış ve ardından talaş kaldırma işlemine geçmeden önce tezgâh boşa çalıştırılarak tezgâh vidalı millerin ısınması sağlanmıştır. Sonrasında tezgâh üzerinde bulunan optik prob ile masterlar ölçülmüş, bu ölçümler sonucunda bulunan düzeltme faktörü değeri eş zamanlı olarak CAD ortamında girilerek, düzeltilmiş CAM verisi olarak tezgâha aktarılıp delikler delinmiştir. Şekil 4.11’de prosedür B akış şeması gösterilmiştir.



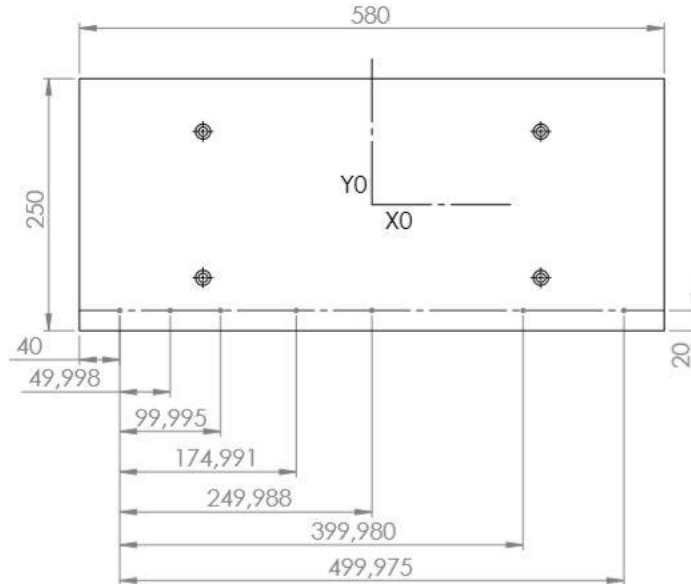
Şekil 4.11. Prosedür B akış şeması.

Düzeltilme işlemlerinde düzeltme faktörünün hesaplanması ve takım tezgâhına aktarımı hızlı bir şekilde yapılmalıdır. Bunun temel nedeni takım tezgâhı durdurulduğunda soğumaya başlar ve anlık olarak hesaplanan düzeltme faktörü geciken zaman içinde hassasiyetini kaybeder. Şekil 4.12’de prob ile mastar ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Prob ile mastar merkez noktasından uzunluk ölçümü.

Şekil 4.12’de prob ucu uzun mastar blokların sol tarafına temas ettikten sonra mastarın diğer tarafına temas ederek uzunluk ölçümünü gerçekleştirmiştir. Şekil 4.13’te kompanzasyon ile delik yerlerinin CAD ortamında eş zamanlı olarak düzeltilmesi sonucu delik yerlerinin ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Kompanzasyon ile delik yerlerinin düzeltilmesi.

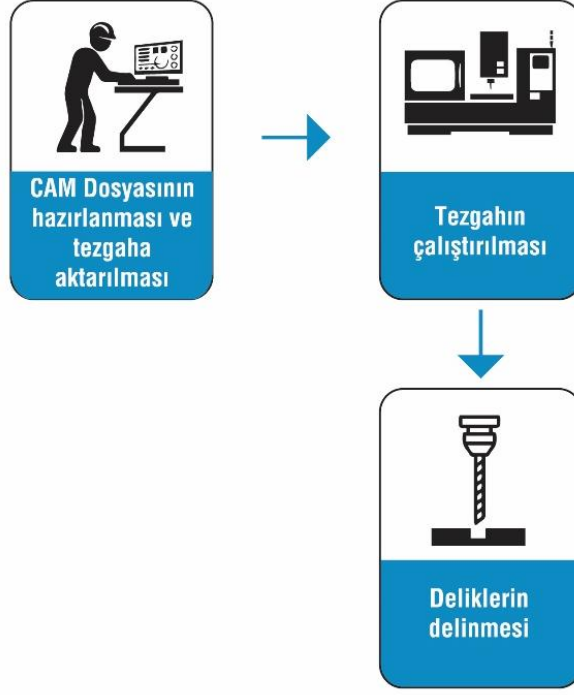
Şekil 4.14'te telafili talaşlı imalat için CAM programında hazırlanan NC kodları gösterilmiştir.

```
O0002  
N1DRAW  
N2 (17mm JOBBER DRILL)  
N3 G30 P1  
N4 T29 M06  
N5 G15 H1  
N6 S1400 M03  
N7 M50  
N8 M03  
N9 G90 G00 X-250. Y-105.  
N10 X-250. Y-105.  
N11 G56 Z5. H29 M50  
N12 G83 R5. Z-15. Q2. F245.  
N13 X-200.002  
N14 X-150.005  
N15 X-75.009  
N16 X-.012  
N17 X149.98  
N18 X249.975  
N19 G80 Z5. M09
```

Şekil 4.14. İkinci delme deneyleri için NC kodları.

Şekil 4.14'teki CAM dosyası tezgâha aktarıldıktan sonra talaş kaldırma işlemlerine geçilmiştir. Şekil 4.14'teki kodlarda görüldüğü üzere tezgâh N10 satırında X-250 konumuna hızlı hareket ile gittikten sonra başlangıçtaki ilk test deliğini delmiştir. N13 satırı ile X-200,002'ye doğru gelip başlangıçtan X boyunca 49,998 mm hareket ile ikinci test deliğini delmiştir. Sonrasında N14 X-150,005 satırı ile X boyunca 99,995 mm hareket ederek üçüncü test deliğini delmiştir. N15 X-75,009 satırı ile X boyunca 174,991 mm hareket ederek dördüncü test deliğini delmiştir. N16 X-.012 satırı ile X boyunca 249,988 mm ilerlemiş olup beşinci test deliğini delmiştir. N17 X149,98 satırı ile X boyunca 399,980 mm ilerleyerek altıncı test deliğini delmiştir. Son olarak N18 X249,975 satırı ile X boyunca 499,975 mm ilerleyerek yedinci test deliğini delerek test delik prosedürünü tamamlamıştır. Şekil 4.15'te Prosedür C akış şeması gösterilmiştir.

PROSEDÜR C



Şekil 4.15. Prosedür C akış şeması.

Prosedür C’de takım tezgâhı daha önce herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan ilk çalıştırılma ile birlikte Prosedür A’daki NC kodları kullanılarak test delikleri delinmiştir.

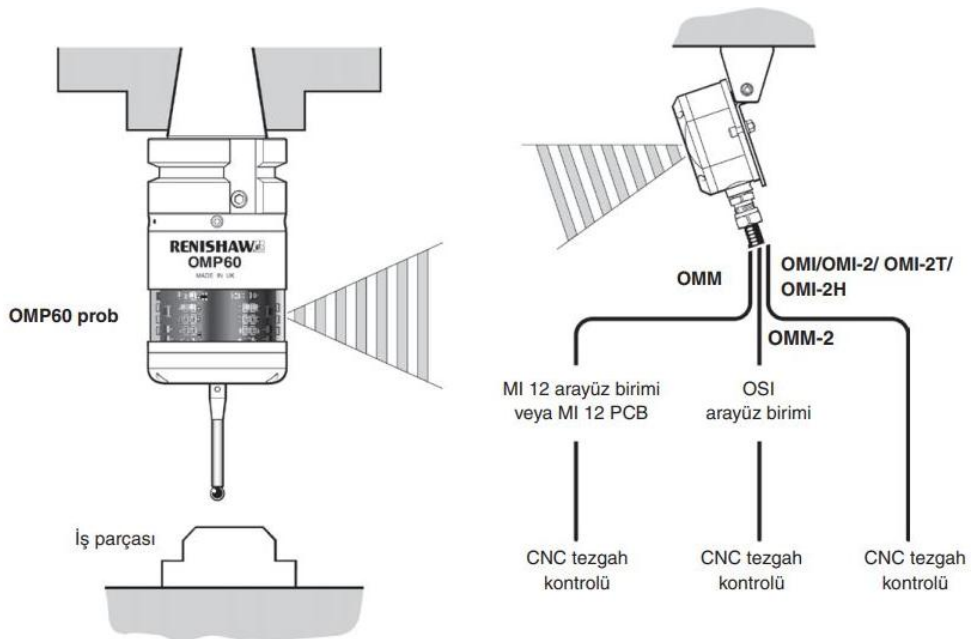
4.4. HATA ÖLÇÜMLERİ

Bu bölümde tezgâhta delik delme işlemlerinde meydana gelen hataların ölçüm yöntemleri verilmiştir. Bu ölçüm yöntemlerinde tezgâhta bütünleşik çalışan Renishaw marka prob ile kinematik fikstürün performansı, kinematik fikstür üzerinde bulunan master blokların ölçümü ve halka master kullanılarak prob çapı tayini yapılmıştır. Şekil 4.16’da Renishaw OMP60 optik iletişimli parça ölçme probu gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Renishaw OMP60 optik iletişimli parça ölçme probu [66].

Ayrıca bir lazer interferometre vasıtası ile tezgâh pozisyon ve açısal hatalarının ölçümü yapılmıştır. Tezgâh ile entegre çalışan Renishaw probu, modülasyonlu optik teknolojisi kodlu sinyalleri kullanır ve başka ışık kaynakları bulunan alanlar içerisinde çalışmak üzere üretici firma tarafından optimize edilmiştir. Bu sistem güvenli optik iletim sağlamanın yanı sıra, OMM-2 ve OSI model çok problu arayüze entegre edilmiş olan, bir OMP60 modelin iki Renishaw optik takım ölçme probu ile birlikte kullanılmasına imkân vererek, daha fazla esneklik ve performans avantajı sağlar [67]. Şekil 4.17'de OMP60 optik prob sistemi ve OMM-2 haberleşme şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.17. OMP60 optik prob sistemi ve OMM-2 haberleşme şeması [67].

4.4.1. Master Blokları

Bu deneyde boyut ölçü değerleri $\pm 0,0003$ mm'den daha küçük belirsizlikle bilinen 50 mm, 100 mm, 175 mm, 250 mm, 400 mm ve 500 mm nominal boylara sahip master blokları kullanılmıştır. Şekil 4.18'de dikdörtgen kesitli master blok gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Dikdörtgen kesitli master blok [43].

Bu masterlar TÜBİTAK UME Boyutsal Laboratuvarı'nda bulunan, Boyutsal Laboratuvarı tarafından düşük belirsizlikle kalibrasyonu yapılmış master bloklarıdır. TÜBİTAK UME tarafından bu master blokları kalibrasyonu için verilen ölçüm belirsizliği maksimum 500 mm boy için 0,0003 mm'dir. Benzer hizmeti veren TÜRKAK'tan akredite laboratuvarlarda vardır. Her bir laboratuvar kendi ortam şartlarına ve ölçüm sistemine göre farklı belirsizlikler vermektedir. Çizelge 4.6'da TÜRKAK tarafından akredite edilmiş laboratuvarların verdiği belirsizlik formülleri gösterilmektedir [51].

Çizelge 4.6. Uzun master blokları kalibrasyonu maksimum ve minimum belirsizlik formülleri [51].

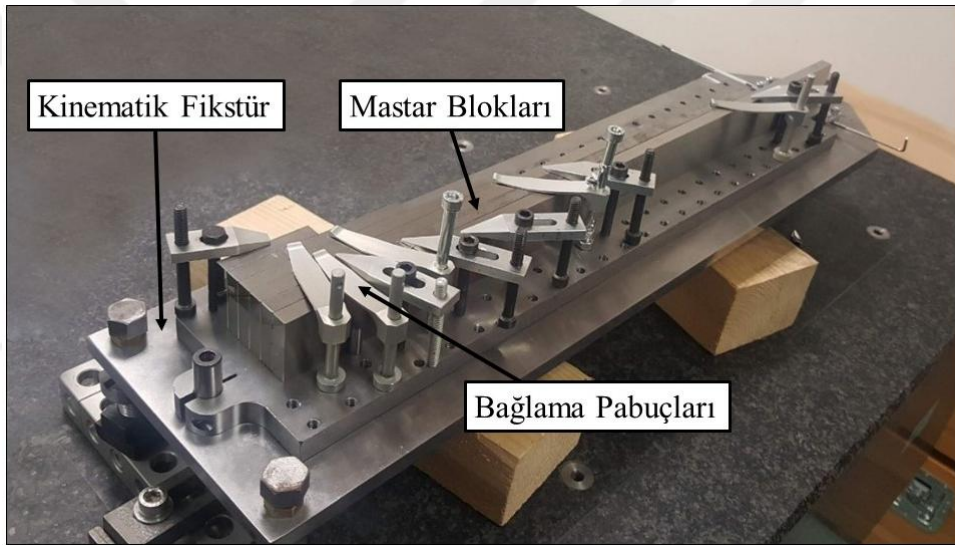
TÜRKAK Laboratuvarları (U: μm , L: mm)	TÜBİTAK UME (U: μm , L: mm)
<u>Maksimum Belirsizlik</u> $U = (0,9 + 0,010 \times L)$	<u>UME Belirsizliği</u>
<u>Minimum Belirsizlik</u> $U = (0,3 + 0,002 \times L)$	$U = \sqrt{0,056^2 + (0,0004 \times L)^2}$

Deneylerde kullanılan masterların belirsizlikleri UME belirsizlik formülü kullanılarak Çizelge 4.7'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7. Kullanılan masterların belirsizlik değerleri.

No	Master Boyları (L: mm)	Belirsizlik (U: μm)
1	50	0,059
2	100	0,068
3	175	0,089
4	250	0,114
5	400	0,169
6	500	0,207

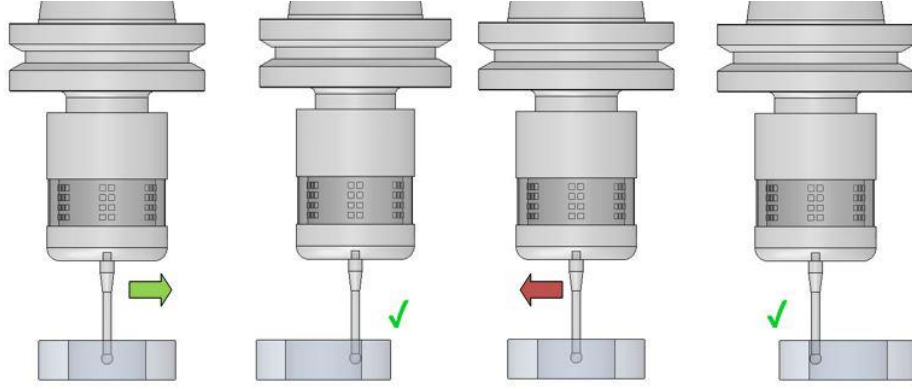
Şekil 4.19’da deneylerde kullanılan kinematik fikstür ve master blokları gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Deneylerde kullanılan kinematik fikstür ve master blokları.

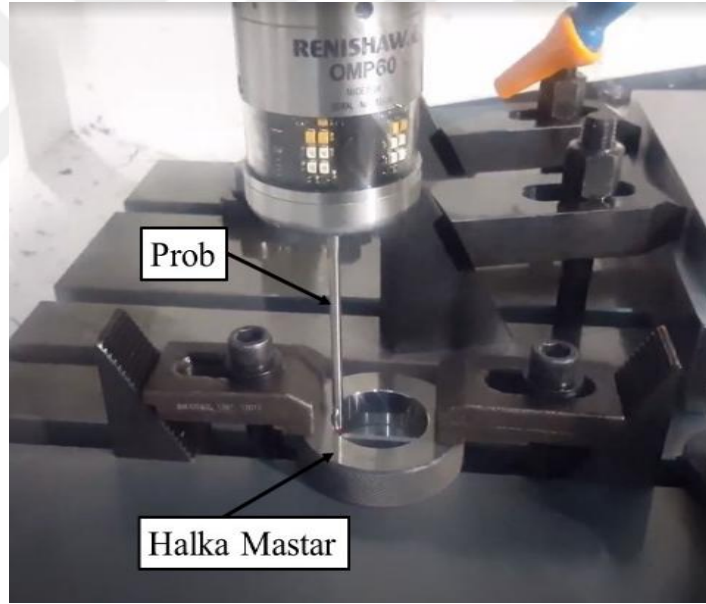
4.4.2. Halka Masterlar

Prob çapını belirlemek için kalibreli halka masterları kullanılmıştır. Halka masterlarını referans olarak prob okuma hatalarının belirlenmesi için 10 adet ölçüm alınmıştır. Alınan bu ölçüm değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Bu ortalama hata oranları tezgâhta prob çapını belirlemede kullanılmıştır. Prob ile halka mastarda ölçülen hata oranı hesaba katılarak tezgâha prob çapı $\text{Ø}4,9$ mm olarak girilmiştir. Prob hatalarının tespiti için iki adet sertifikalı $\text{Ø}39,999$ mm ve $\text{Ø}13,999$ mm çapında halka masterları kullanılmıştır. Bunlar referans alınarak prob çapı belirlenmiştir. Şekil 4.20’de prob çapının bulunması için halka yüzeylerine temas etme durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Prob çapı bulunması için probun hareketleri.

Tezgâh ile entegre çalışan bu ölçüm probu halka mastara X ve Y yönünde ikişer kez olmak kaydıyla temas ederek otomatik olarak ölçüm sonuçlarını tezgâh, işletim sistemine aktarır ve prob çapını tayin eder. Şekil 4.21’de tezgâh üzerinde çapı $\varnothing 39,999$ mm olan halka master ile ölçüm probunun çapının ölçülmesi gösterilmiştir.

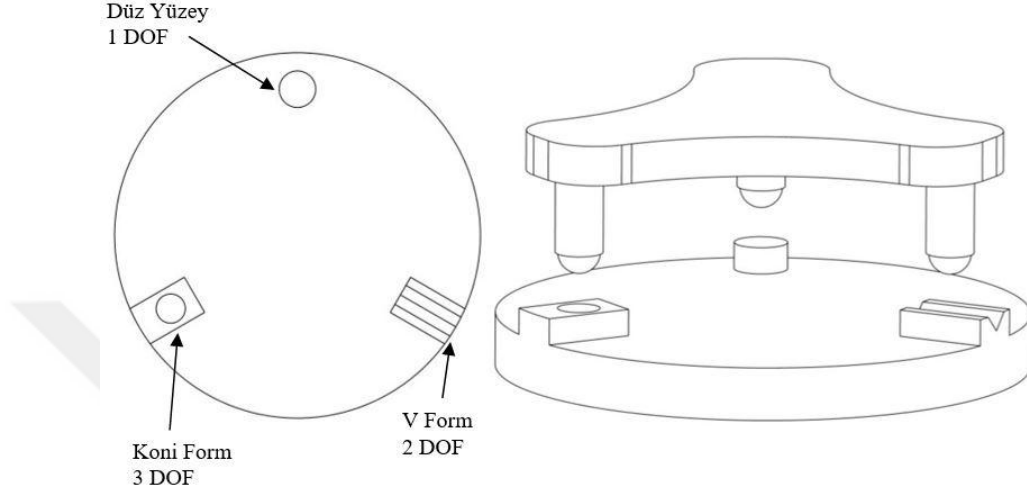


Şekil 4.21. Tezgâh üzerinde master ile uygulamalı prob çapı tayini.

4.4.3. Kinematik Fikstür

Mastar bloklarını yerleştirebilmek için Ck45 çeliğinden bağlama aparatı kullanılmıştır. Bu aparatlar kinematik prensip üzerine tasarlanıp imal edilmişlerdir. Kinematik fikstürler mastarların bağlantısı için kullanılmıştır. Fikstür sayesinde her defasında aynı hassasiyette bağlama sağlanmaktadır. Böylece hassas ve daha hızlı bağlama sağlanmıştır. Bu kinematik prensipte ideal olarak bir bileşeni diğerine göre konumlandırmak için bilinen altı temas noktasını kullandıklarından kesin kısıtlayıcı

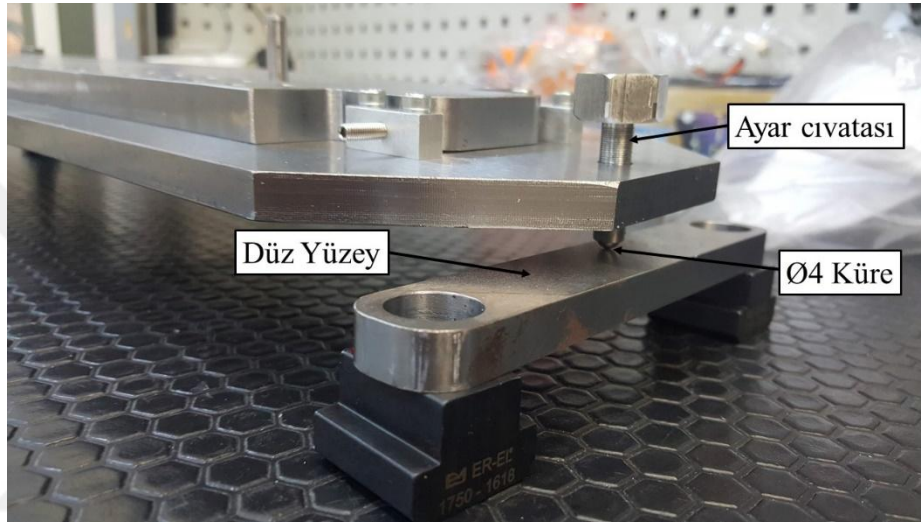
kinematik fikstürlerdir. Bir parçadaki küresel bir yüzey, başka bir parçadaki iç büküye yüzeyde durduğunda, bir diğere küresel yüzey, başka bir parçadaki V formlu olukta durduğunda ve diğere bir küresel yüzey üçüncü bir düz plaka üzerinde durduğunda bağlantı Kelvin Bağlantısı veya Kelvin Kelepçesi olarak adlandırılır [68]. Şekil 4.22’de Kinematik Kelvin kelepçesinin görünüşü verilmiştir.



Şekil 4.22. Kinematik Kelvin kelepçesinin üst ve açılı olarak yan görünüşü.

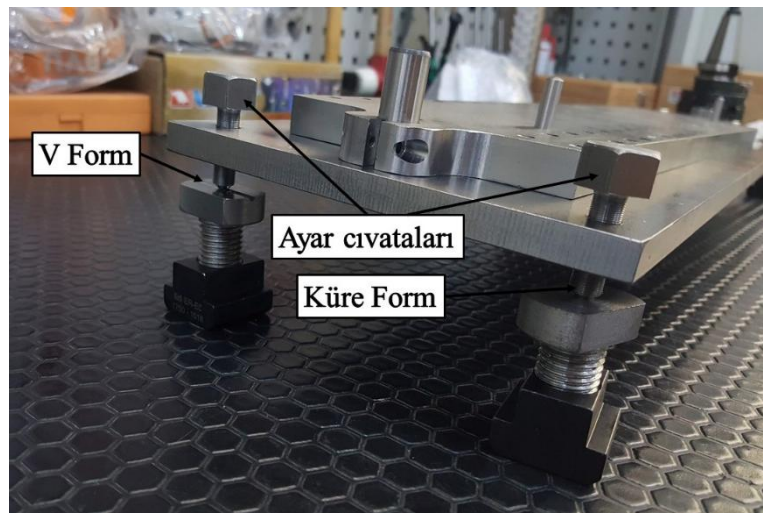
Bir kinematik bağlantının tekrarlanabilirliği ve hassasiyeti, kesin kısıtlama tasarımı fikrinden gelir. Kesin kısıtlama tasarımının ilkesi, kısıtlama noktalarının sayısının, sınırlandırılacak serbestlik derecesi sayısına eşit olmasıdır. Daha önce de aktarıldığı gibi mekanik bir sistemde altı potansiyel serbestlik derecesi vardır. Üç doğrusal serbestlik derecesi vardır. Bunlar, X, Y ve Z eksenleridir. Ayrıca her eksen etrafında üç dönme serbestlik derecesi vardır. Bir sistem kısıtlanmışsa, iki parça serbestlik derecelerinden birinde hareket etmekte serbesttir. Sistem aşırı kısıtlanmışsa, sistemin deformasyon altında bozulmasına neden olabilir, aşırı kısıtlı bir sistem tasarlarken ekstra özen gösterilmesi gerekir. Kinematik bağlantı tasarımları, yalnızca sınırlandırılacak olan ve bu nedenle öngörülebilir olan serbestlik derecesi sayısına eşit noktaların sayısı ile temas kurar. Ayrıca Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de görüldüğü gibi temas noktasındaki civataların ön taraflarına Ø 4 bilye gömülerek diğere parça ile temas sağlanmış olup döndürüldükleri takdirde üzerindeki hatve boyunca yukarı ve aşağı hareket ile kinematik fikstür 3 ayaktan teraziye getirilebilir vaziyette imal edilmiştir. Aparat yerçekimi yönünde açısız hareket (teraziye alma) işlemi yapabilirken, yatay ekseninde de açısız hareket yapabilmektedir. Bu sayede, tezgâha yerleşim yapıldığında, master blokları tezgâh eksenlerine hassas bir şekilde paralel olarak ayarlanabilmektedir.

Ayar sonrası cıvatalar somun ile kilitlenip, mevcut konumları bozulmadan aparat kullanılmıştır. Kinematik prensip ile üretilen fikstürün esas amacı ise, her kullanımda, yerinden alındıktan sonra hassas ayar yapılmasına gerek duyulmamasıdır. Yerinden kaldırılıp tekrar koyulduğunda küre cıvatalar önceden açılmış V, Küre ve Düz formlu yüzeylere oturduğu için montaj kolaylığı sağlamanın yanında, master blokları ilk ayarlandığı konuma (tezgâh eksenlerine paralel konum) çok düşük bir hata ile yerleştirilmektedir. Aparatın bu performansı, testler sırasında doğrulanmıştır. Şekil 4.23’de ayar cıvatası ve düz yüzey teması gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Küresel formlu cıvata ve düz yüzey teması.

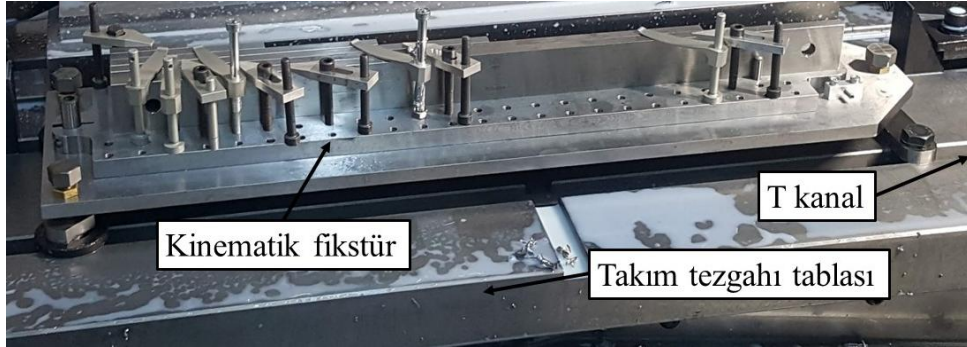
Şekil 4.24’te ayar cıvatalarının temasları gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Ayar cıvatalarının temas yüzeyleri.

Takım tezgâhının tablasının T kanallarına M16 T somun yerleştirildikten sonra, M16 diş

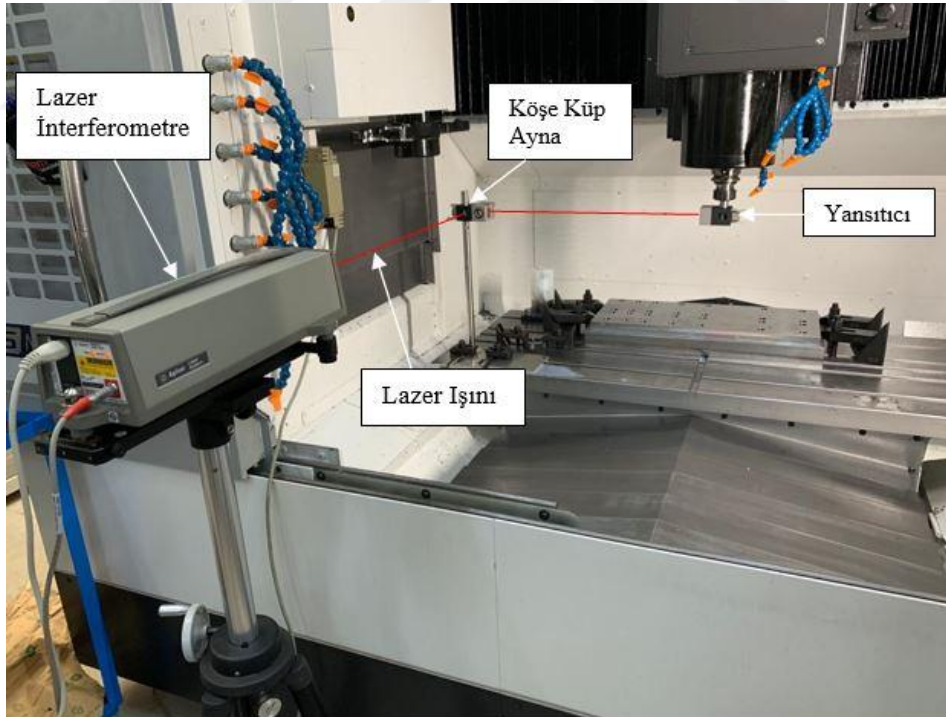
açılmış ve üst yüzeyinde iç bükey küre formu, V formu ve düz yüzey olmak üzere imal edilmiş civatalar tezgâh T somununa bağlanır. Şekil 4.25'te kinematik fikstürün takım tezgâhına bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Kinematik fikstürün tezgâh tablasına bağlantısı.

4.4.4. Pozisyon ve Açıl Hata Ölçümleri

Bu çalışmada, takım tezgâhının X, Y ve Z eksenlerinin lazer interferometre ile pozisyon incelemeleri yapılmıştır. Pozisyon hatası ölçümleri Şekil 4.26'da gösterilmektedir.



Şekil 4.26. Lazer interferometre yardımı ile tezgâh eksen pozisyonlarının incelenmesi.

Tezgâhın oda sıcaklığında yani takım tezgâhı ısıtılmadan önce eksenlerde meydana gelen pozisyon hataları belirlenmek istenmiştir. Pozisyon (mesafe) hatası ölçümleri, lazer interferometre lineer mesafe optikleri kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm sırasında

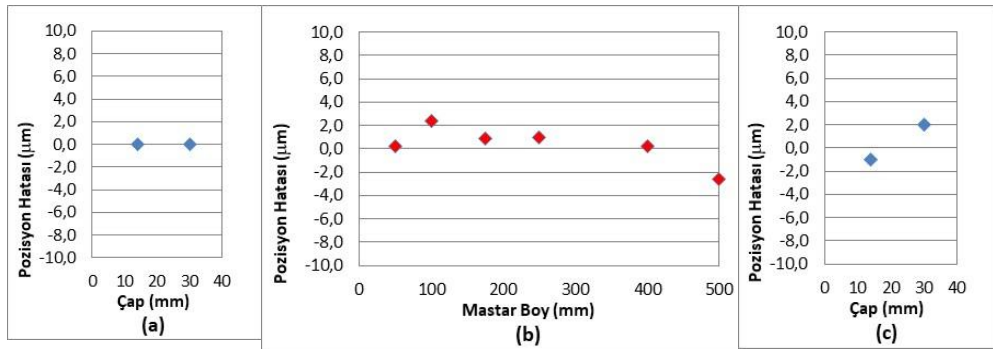
eksen millerine yakın yerlere 3 adet Pt100 sıcaklık sensörleri yerleştirilerek, sıcaklık menşeli pozisyon hataları için sıcaklık uzama kompanzasyon otomatik olarak lazer interferometre siteminde yapılmıştır. X eksenini kurs boyunca boşta çalıştırılarak $Z=0$ ve $Z=318$ mm değerleri için X eksenini 200, 400, 600, 800 ve 1000 mm mesafelerinde sırasıyla lazer interferometre tarafından adım adım ölçümler alınmıştır. Ayrıca $Z=318$ mm'de iken açısal hata incelenmiştir. Yine açısal hız ölçümlerinde X eksenini 200, 400, 600, 800 ve 1000 mm mesafelerinde sırasıyla lazer interferometre tarafından adım adım ölçümler alınmıştır. Y eksenini kurs boyunca boşta çalıştırılarak $Z=0$ ve $Z=318$ mm değerleri için Y eksenini 100, 200, 300, 400 ve 500 mm mesafelerinde sırasıyla lazer interferometre tarafından adım adım ölçümler alınmıştır. Y ekseninde mesafe ölçümleri tezgâhın hareket limitlerine göre belirlenmiştir. Ayrıca $Z=318$ mm'de iken açısal hata incelenmiştir. Yine açısal hız ölçümlerinde Y eksenini 100, 200, 300, 400 ve 5000 mm mesafelerinde sırasıyla lazer interferometre tarafından adım adım ölçümler alınmıştır. Z eksenini için takım tezgâhı $X=782$ mm ve $Y=185$ mm bölgesinde iken Z eksen hareketi boyunca her 100 mm de bir tezgâh durdurularak daha önceki X ve Y eksenlerinde olduğu gibi ölçümler alınmıştır. Z ekseninde delik delme işlemine etkisi olmadığı için açısal olarak eksen ölçümü yapılmamıştır. Tezgâh tablasına bağlanan reflektöre lazer interferometre tarafından gelen ışık, yönlendirilerek tezgâh tutucusuna bağlı olan aynaya çarptırılıp aynı şekilde ışığın geri lazer interferometreye dönmesiyle ölçüm tayini yapılmıştır. Tezgâh eksen kabiliyetleri doğrultusunda ileri ve geri hareket ile kurs boyunca lazerin dalga boyu ile karşılaştırılıp ölçülerek pozisyon bilgisine ulaşılmıştır. Her eksen için bu işlem yapılarak ölçüm sonuçları alınmıştır. Bu ölçüm metrenin tanımına uygun lazer dalga boyu kullanılarak yapıldığı için birincil (primer) seviye ölçüm olarak nitelendirilir [69].

5. DENEYSEL SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneylerde kullandığımız probun, kinematik fikstürün, tezgâh eksenlerinin ve iş parçasının ölçüm sonuçları açıklanmıştır.

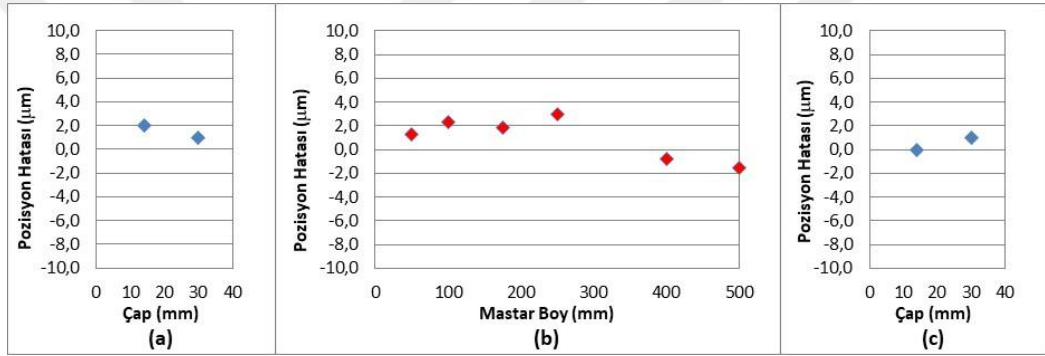
5.1. PROB KONTROL SONUÇLARI

Deneyler esnasında ve sonrasında doğru bir ölçüm alabilmek için tezgâha entegre olarak çalışan probun kontrol sonuçları verilmiştir. Master blokları taşıyan ölçme aparatı, tezgâh tablasına bağlı küre, V formlu ve düz yüzeye oturtulup, yerinden alınmadan prob ile 3 seri ölçüm alınmıştır. 3 seri ölçüm yapılmasındaki amaç, ölçüm doğruluğunu artırmaktır [70]. Ölçümler, kinematik fikstür tezgâh eksenlerine ayarlanıp, ayar vidaları sıkma yapıldıktan sonra alınmıştır. Ölçümler sırasında, ilk olarak X eksen ilerleme tablası üzerine yerleştirilen Ø13,999 mm ve Ø39,999 mm çapındaki halka masterlar ölçülmüş. Daha sonra 50-500 mm arası master blokları ölçülmüş. Oluşabilecek kaymaları, probleme hatalarını tespit etmek için halka masterlar tekrar ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümler, tezgâhın Renishaw OMP60 prob ile ölçüm yaparken kabiliyeti hakkında bilgi vermektedir. Takım tezgâhı üzerine konumlanmış ölçüm sistemi (Renishaw prob ve tezgâh ilerleme mili birlikte) $\pm 3 \mu\text{m}$ doğrulukta performans göstermektedir. Sonuçlar, tezgâhtan okunan sonuçların ve referans master bloklarının değerlerinden farkı alınarak bulunmuştur. Her bir referansın ölçüm belirsizliği $\pm 1 \mu\text{m}$ 'den daha düşüktür. Şekil 5.1'de master ölçümleri gösterilmiştir.



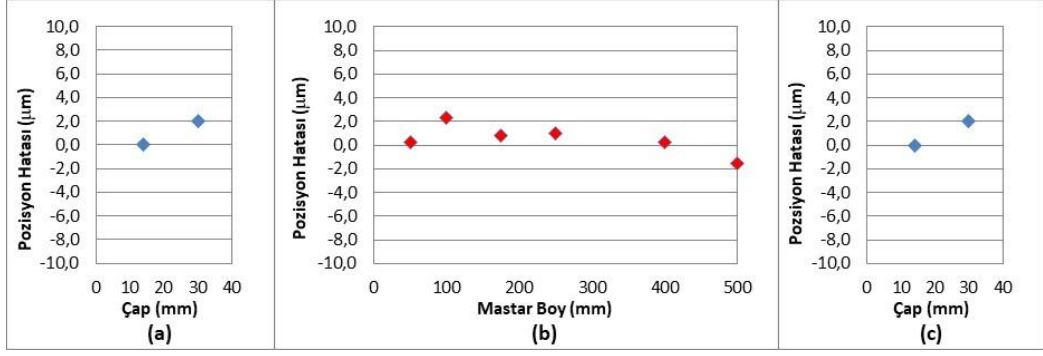
Şekil 5.1. Master birinci ölçüm a) Halka master çap ölçümü b) Master blok ölçümü c) Halka master çap ölçümü.

Şekil 5.1-a grafiğinde $\text{Ø}13,999$ mm ve $\text{Ø}39,999$ mm ölçülerindeki sertifikalı ölçü değerleri bilinen halka mastarın prob ile ölçümü sonucunda halka mastarın gerçek ölçüsü ile ölçülen değerinin farkı grafikte pozisyon hata değerini vermektedir. Alınan bu ölçüm sonucunda hata değerleri $0 \mu\text{m}$ ölçülmüştür. Şekil 5.1-b grafiğinde ise kinematik fikstür üzerinde bulunan 50 mm, 100 mm, 175 mm, 250 mm, 400 mm ve 500 mm boylarında olan mastar bloklar ölçülerek $\pm 3 \mu\text{m}$ aralığında pozisyon hatası değerleri görülmüştür. Bu ölçüm sonrası tekrar halka mastarlar ölçülmüş Şekil 5.1-c grafiğinde hata değerleri $\pm 2 \mu\text{m}$ aralığında bulunmuştur. Şekil 5.1 grafikleri neticesinde takım tezgâhının ölçüm probu ile $\pm 3 \mu\text{m}$ doğrulukta performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ölçüm doğruluğunu artırmak için aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Şekil 5.2’de mastar ölçümleri gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Mastar ikinci ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.

Şekil 5.2-a grafiğinde halka mastarların $\text{Ø}13,999$ mm delik çapı ölçümünde tezgâhın pozisyon hata değeri $+2 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. $\text{Ø}39,999$ mm delik çapı ölçümünde ise hata değeri $+1 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Burada mastar blogun iç çapı arttkça sapma değerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 5.2-b grafiğinde 6 adet mastar bloklarının hata değerleri $\pm 3 \mu\text{m}$ aralığında ölçülmüştür. Şekil 5.2-c grafiğinde ise halka mastarlar tekrardan ölçülmüş ve hata değeri $+1 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3’de mastar ölçümleri gösterilmiştir.

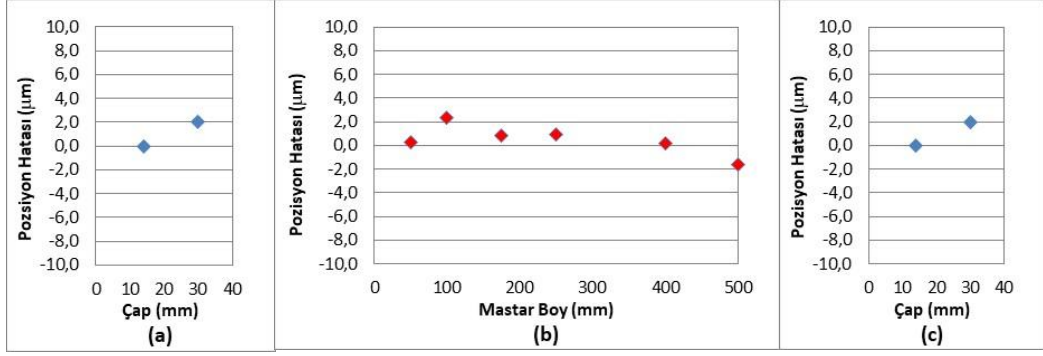


Şekil 5.3. Mastar üçüncü ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.

Şekil 5.3-a grafiğinde halka mastarların Ø13,999 mm ve Ø39,999 mm halka mastar iç çap ölçümlerinde tezgâh pozisyon hatalarının ilk ölçümlere göre (Şekil 5.1-a) farklı çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi tezgâhın çalışma esnasında ısı farkı ile açıklanabilir. Şekil 5.3-b grafiğinde ise kinematik fikstüre bağlı ölçülen mastar blokların hata değerleri ± 2 µm aralığında ölçülmüştür. Mastar bloklarının boyları değişikçe tezgâh tablasının pozisyon hata değerleri değişiklik göstermiştir. Bu değişimlerde anlamlı bir bağıntı görülmemektedir. Pozisyon hatası değerleri ölçüm probleminin ölçüm aralığındadır. Farklı her ölçümde pozisyon hata değerleri değişebilmektedir. Şekil 5.3-c grafiğinde halka mastarlar tekrar ölçülmüş ve Şekil 5.3-a grafiği ile aynı sonucu vermiştir.

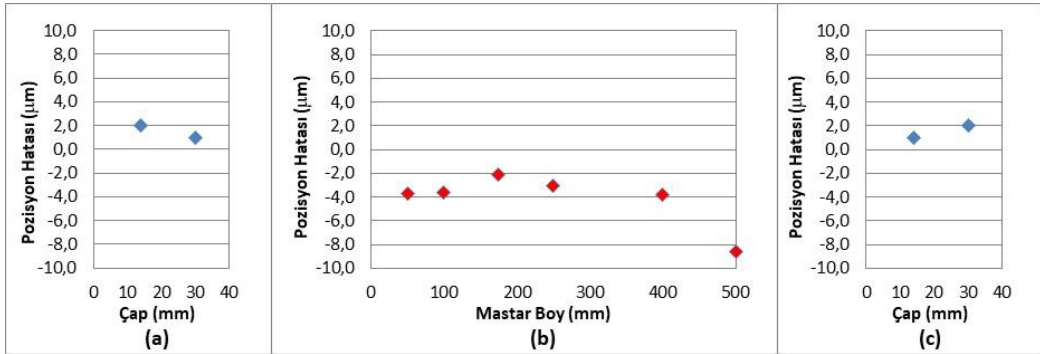
5.1.1. Kinematik Ölçme Aparatının Kontrolü

Kinematik ölçüm aparatının kontrolü için ölçüm aparatı ayarlandıktan sonra, yerinden alınıp, herhangi bir ayar yapılmadan tekrar kinematik ayaklara yerleştirilmiştir. Tasarımda uygulanan kinematik prensip sayesinde tekrar bir ayar yapılmasına gerek yoktur. Kinematik ölçüm aparatı yerleştirildikten sonra herhangi bir ayar yapılmadan alınan 3 seri mastar ölçüm sonuçları grafiklerde verilmiştir. Sonuçlar bir önceki başlıktaki Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de alınan ölçümlere çok benzerdir. Bu sonuçlar yapılan kinematik aparatın istenilen sapma değeri aralığında çalıştığını göstermektedir. Şekil 5.4'de kinematik fikstür yerinden alınıp tekrardan serbestçe yerine bırakıldıktan sonraki mastar ölçümü ile tezgâh pozisyon hatası değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Mastar dördüncü ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.

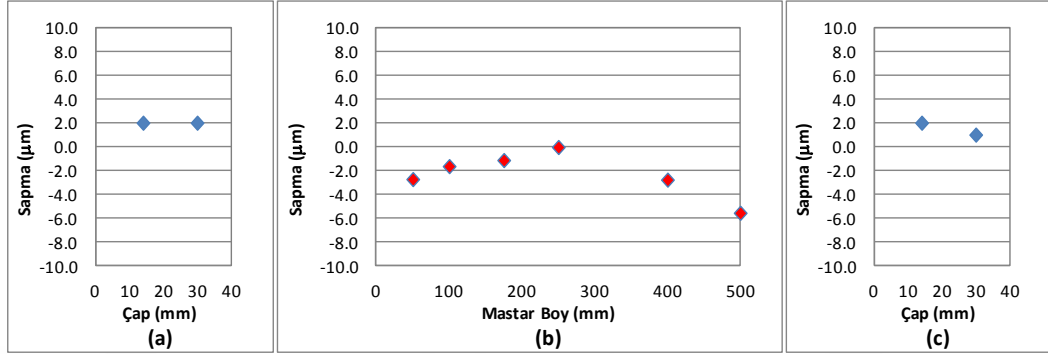
Şekil 5.4-a grafiğinde $\text{Ø}13,999$ mm'lik halka mastarın delik çapı ölçümünde tezgâh pozisyon hatası $0 \mu\text{m}$ ölçülmüş, $\text{Ø}39,999$ mm'lik halka mastarın delik çapı ölçümünde hata değeri ise $+2 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 5.4-b grafiğinde 6 adet mastar bloklarının ölçümü sonrası tezgâh pozisyon hatası değerleri $\pm 2 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 5.4-c grafiğinde ise halka mastarların iç çapları tekrar ölçülerek $\text{Ø}13,999$ mm'lik halka mastar için $0 \mu\text{m}$ bulunan hata değeri $\text{Ø}39,999$ mm'lik halka mastar için $+2 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur. Şekil 5.5'de kinematik fikstür yerinden alınıp tekrardan serbestçe yerine bırakıldıktan sonraki mastar ölçümü ile tezgâh pozisyon hatası değerleri gösterilmiştir



Şekil 5.5. Mastar beşinci ölçüm a) Halka mastar çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka mastar çap ölçümü.

Şekil 5.5-a grafiği bir önceki Şekil 5.4-a grafiği ile benzer sonuç vermiştir. Halka mastarlar tezgâh tablasına sabitlendiği için sapma değerlerinin her ölçümde farklılık vermesi tezgâh vidalı mil ısınması ile bağıntılıdır. Şekil 5.5-b grafiği incelendiğinde Şekil 5.4-b grafiğinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçların farklı çıkması ölçümden önce kinematik fikstürün kaldırılıp yerine serbestçe bırakılması sonucunda

kinematik prensipteki sapmalardan kaynaklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.5-c grafiği Şekil 5.4-c grafiği ile benzer sonuç vermiştir. Şekil 5.6'da kinematik fikstür yerinden alınıp tekrardan serbestçe yerine bırakıldıktan sonraki master ölçümü ile tezgâh pozisyon hatası değerleri gösterilmiştir

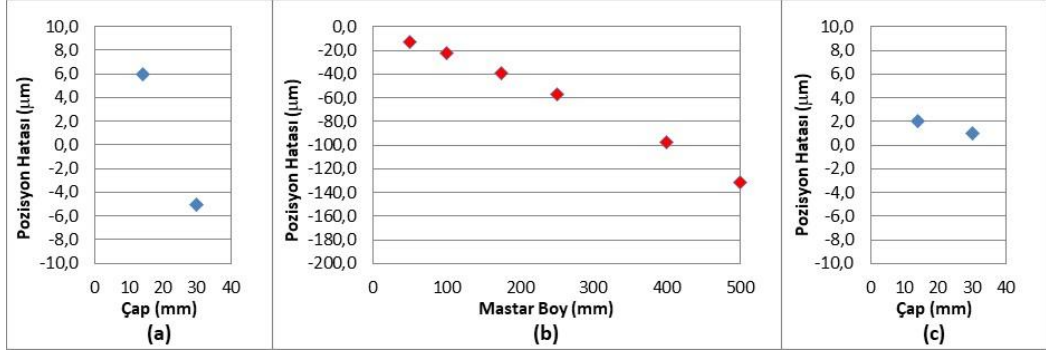


Şekil 5.6. Master altıncı ölçümler a) Halka master çap ölçümü b) Master blok ölçümü c) Halka master çap ölçümü.

Şekil 5.6 grafiğinde masterlar altıncı defa ölçülmüştür. Şekil 5.6-a grafiğinde her iki halka master ölçümünde +2 µm hata görülmüştür. Şekil 5.6-b grafiğinde hata değerleri değişkenlik göstermiştir. Bu hata değerlerinin değişkenlik göstermesinin temel nedeni, kinematik fikstür yerinden alınıp tekrar yerleştirildiğindedir. Şekil 5.6-c grafiği daha önce alınan halka master ölçümlerine benzerdir. Bu grafiklerin neticesinde kinematik aparatın yerinden alınıp tekrar yerleştirildiğinde sapma değeri ± 9 µm toleransta çalıştığı sonucuna ulaşılmıştır.

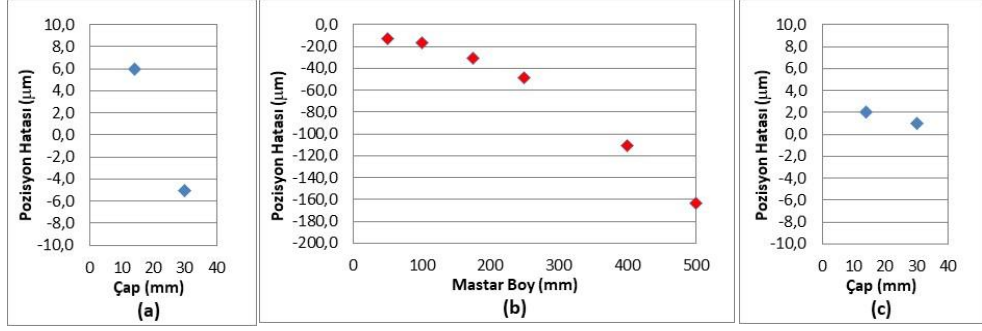
5.1.2. Isının Vidalı Mile Etkisi

Pozisyon hatası değerleri için yapılan ölçümler, X eksenli vidalı mili 1 saat beklenip 25 dakika çalıştırma ile ısıtıldıktan sonra tekrarlanmıştır. Şekil 5.7'de takım tezgâhı ısıtıldıktan sonra masterların ölçümü ile tezgâh pozisyon hatası değerleri gösterilmiştir.



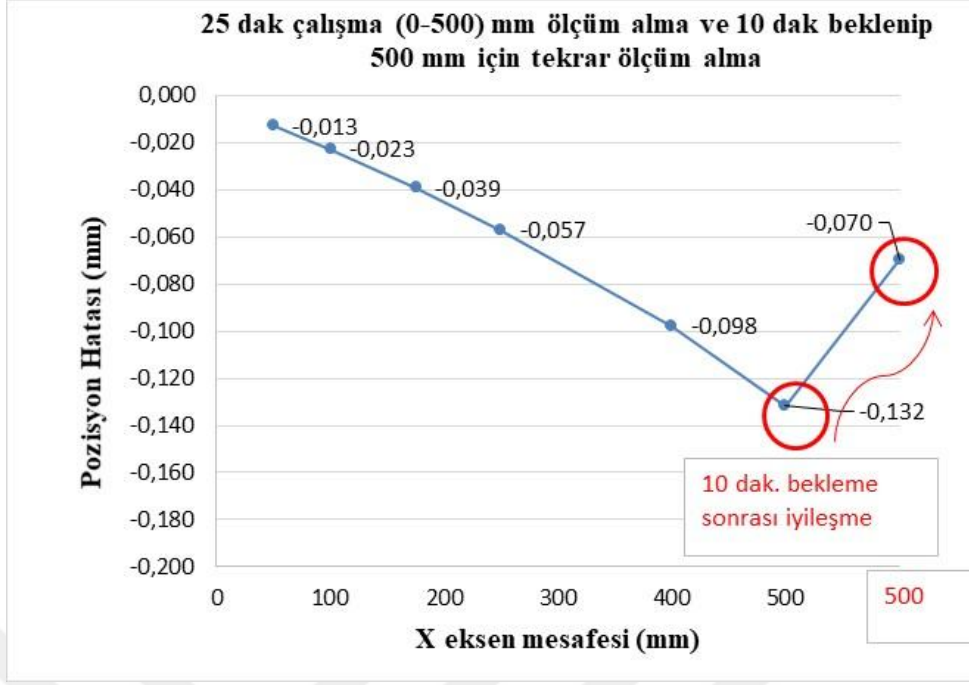
Şekil 5.7. 25 dakika çalışma sonrası master ölçümleri a) Halka master çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka master çap ölçümü.

İlk olarak 25 dakika boyunca tezgâh X eksenini kurs boyunca (1100 mm) çalıştırılarak ısıtma yapılmış sonrasında ölçümler alınmıştır. Şekil 5.7-a grafiğinde halka masterların iç çap ölçümlerinde tezgâh pozisyon hata değerleri Ø13,999 mm'lik halka master için +6 µm ölçülürken Ø39,999 mm'lik master da -5 µm ölçülmüştür. Bu ölçüme göre takım tezgâhı ısınmaya bağlı uzamadan kaynaklı olarak küçük mastarı sertifikalı ölçüsünden 6 µm büyük ölçerken, büyük mastarı ise 5 µm küçük ölçmüştür. Şekil 5.7-b grafiğinde 500 mm boyundaki olan master blokların ölçümünde tezgâh pozisyon hata değeri -130 µm olarak ölçülmüştür. Uzunluk arttıkça master blokları ölçümündeki tezgâh pozisyon hataları lineer bir şekilde artmıştır. Şekil 5.7-c grafiğinde ise halka masterlar tekrar ölçülmüş Ø13,999 mm'lik halka master ölçümünde hata değeri +2 µm, Ø39,999 mm'lik halka master +1 µm ölçülmüştür. Şekil 5.7-c grafiğinde hata değerlerinin azalmasının nedeni ölçümler anında tezgâhın her geçen sürede soğuması ve daha kabiliyetli çalışmasıdır. 20 dakika beklendikten sonra, 40 dakika daha X eksenini kurs boyunca ısıtma yapılmış ve ölçüm alınmıştır. Şekil 5.8'de 40 dakika ısıtılma sonrası master ölçümleri gösterilmiştir.



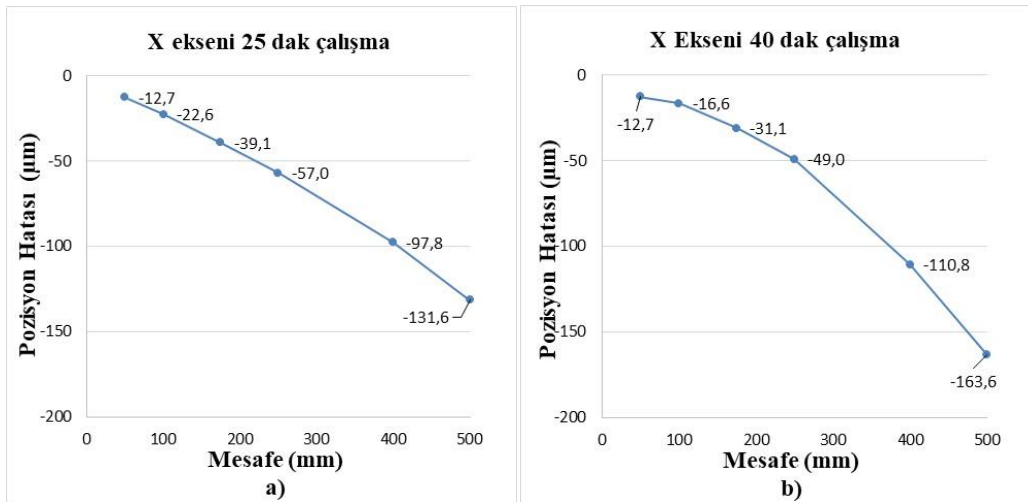
Şekil 5.8. 40 dakika çalışma sonrası master ölçümleri a) Halka master çap ölçümü b) Mastar blok ölçümü c) Halka master çap ölçümü.

Takım tezgâhının 40 dakika çalışması sonucu Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 grafiği benzerlik göstermiştir. Şekil 5.8-a grafiğinde halka masterların iç çap ölçümlerinde tezgâh pozisyon hatası değerleri Şekil 5.7-a grafiği ile aynı çıkmıştır. Şekil 5.8-b grafiğinde 500 mm'lik master blok ölçümünde tezgâh pozisyon hatası değeri -160 µm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.7-b grafiği ile Şekil 5.8-b grafiği ölçümleri sonucunda takım tezgâhının ısınmaya bağlı olarak pozisyon hatası yaptığı ve çalışma süresinin de bu hataların büyümesine etki ettiği anlaşılmıştır. Şekil 5.8-c grafiğinde ise halka masterlar tekrar ölçülerek hata değerleri Ø13,999 mm'lik master için +2 µm, Ø39,999 mm'lik master için +1 µm olarak bulunmuştur. Şekil 5.8-c grafiğinde hata değerlerinin azalmasının nedeni ölçümler anında takım tezgâhının her geçen sürede soğuması ve daha kabiliyetli çalışmasıdır. Bu ölçümlerde Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6'da yapılan ölçümlerden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Kısa mesafe ölçümlerinde (çap ölçümleri) ±6 µm civarında değişen ölçüm sonuçları, 0-500 mm arasındaki master blokların ölçümlerinde 20 dakika ısınma için 130 µm, 40 dakika ısınma için 160 µm sapma gözlemlenmiştir. Tekrarlanan halka master çap ölçümlerinde ise pozisyon hata miktarında azalma vardır. Bunun sebebi, 6 master ölçümü 10 dakika sürdüğünden dolayı takım tezgâhı soğumaya başlamış ve tekrar yapılan ölçüm sonuçlarında hata değerleri ±2 µm tespit edilmiştir. Soğuma sebebi ile tezgâhın normal halindeki faktörlere yaklaşması neticesiyle master boy ölçümlerinde iyileşme görülmüştür. Bu iyileşmeyi göstermek için, 25 dakika tezgâh ısıtılması sonrası, 500 mm'lik master boyu ölçülmüştür. Daha sonra 10 dakika hiçbir işlem yapmadan beklenip, sadece 500 mm master boyu tekrar ölçülmüştür. 500 mm'lik master boyunun ölçülmesinin sebebi en fazla pozisyon hatası değerinin bu master boyunda oluşacağındandır. 500 mm'lik mastarda ölçülen tezgâh pozisyon hatası değerleri Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Isınma ve soğuma sonrası master blok ölçümleri.

Şekil 5.9’da takım tezgâhı ısıdırılıp bekleme sonrası, 500 mm boyundaki master ölçümü sonucundaki iyileşme net bir şekilde grafikte görülmektedir. Tezgâh ısıdıktan sonra 132 μm olan master blok ölçümündeki hata değeri, 10 dakika sonrasında soğuma sebebiyle hata miktarı 70 μm değerine gerilemiştir. Şekil 5.10’da farklı sürelerde ısıdırma sonrası X eksenindeki pozisyon hataları gösterilmiştir.



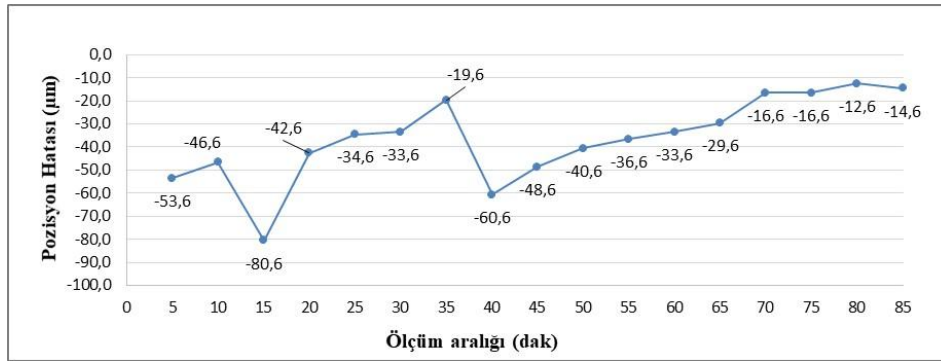
Şekil 5.10. X eksenini pozisyon hatası değerleri a) 25 dakika takım tezgâhı çalışması b) 40 dakika takım tezgâhı çalışması.

Şekil 5.10-a grafiğinde takım tezgâhının 25 dakika çalıştırılması sonrasında alınan

mastar ölçümleri neticesinde sıcaklığın etkisiyle boy, mesafe ve süreye bağlı olarak 131,6 µm pozisyon hatası yaptığı görülmüştür. Şekil 5.10-b grafiğinde ise takım tezgâhının 40 dakika X eksenini boyunca çalıştırılması ile sıcaklık etkisi incelenmiş olup boy, mesafe ve süreye bağlı olarak ölçüm sonuçlarında 163,6 µm pozisyon hatası ile karşılaşmıştır. Her iki grafikte incelendiğinde çalışma süresine bağlı olarak oluşan ısı nedeniyle hata miktarları lineer olarak artmıştır.

5.1.3. Isıya Bağlı Olarak Pozisyon Hatası Değerleri

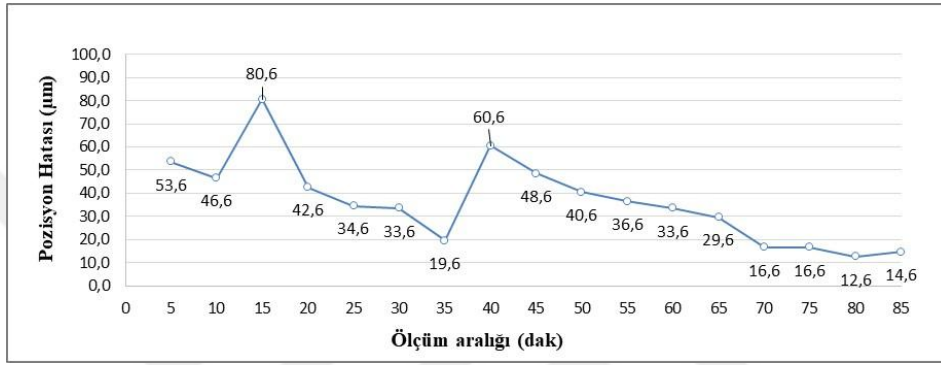
Bir önceki bölümdeki sonuçlar incelendiğinde, talaş kaldırma işlemi öncesi hataların telafi edilmesine, ısınma ve bekleme süresine göre değişecektir. Bunu incelemek amacı ile tezgâh ısıtılması yapılmış ve en belirgin pozisyon hatası sonucunu verecek 500 mm boyundaki mastar blok ölçülerek incelenmiştir. Isıtma/ölçüm alma, bekleme/ölçüm alma şeklinde yapılan çalışma sonucunda 500 mm mesafe için elde edilen mastar bloklarının ölçümü sonucu pozisyon hatası değerleri, işleme esnasındaki pozisyon hata değerleri ve göreceli olarak boya bağlı kullanılması mümkün olan kompanzasyon değerlerinin grafikleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13) gösterilmiştir. Bu grafiklerde – yönde artışların sebebi tezgâh ısındırılması sonucu alınan ölçümlerdir. Soğumaya bağlı olarak pozisyon hata değerleri her geçen sürede 0 çizgisine yaklaşmıştır. Şekil 5.13’de farklı sıcaklıklarda tutulan ilerleme milinin pozisyon hata değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Farklı sıcaklıklarda tutulan vidalı milin pozisyon hata değerleri.

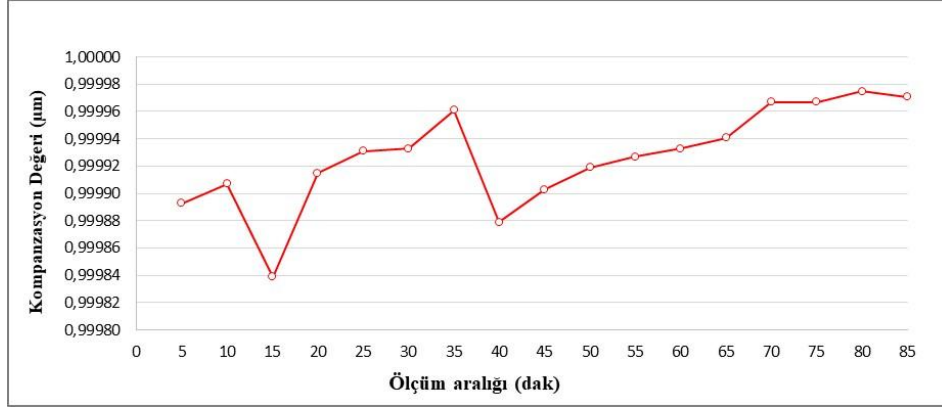
Şekil 5.11’de prob ile 500 mm boyundaki mastarın, tezgâhın ısıtılması ile ölçümü ve soğuması ile ölçümü sonrasında alınan sonuçların gerçek mastar ölçüsünden sapması gösterilmiştir. Takım tezgâhı çalışırken vidalı millerin genleşmesinden kaynaklı vida hatvesi büyür ve tezgâh gidilmesi gereken değerden daha fazla bir değere gider, ancak bu grafikte gidilen mesafe olması gerekenden kısa çıkmıştır. Bunun temel nedeni, prob

ölçüm esnasında ölçülecek nesneye dokunduğu anda sinyali tezgâha gönderir ve tezgâhta 1 tur dönüşünde 1 hatve ilerlerken burada ısınmadan kaynaklı hatve boyu uzadığı için aynı mesafeyi daha az tur dönüşle gittiğini prob ile tayin ederek – yönde ölçüm sonuçlarını kendi işletim sisteminde göstermiştir. Şekil 5.11’de 15, 40 ve 85. dakikadaki ölçüm değerleri takım tezgâhının ısıtıldıktan sonra alınan ölçümlerdir. Diğer ölçümlerin tamamında takım tezgâhı soğumaya bırakılıp alınmış ölçümlerdir. Şekil 5.12’de farklı sıcaklıklarda tutulan vidalı milin kompanzasyonsuz pozisyon hatası değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Vidalı milin kompanzasyonsuz pozisyon hata değerleri.

Şekil 5.12’de prob ile ölçüm yapılmadan ve telafi edilmeden tezgâhta delik delme işlemi yapıldığında, 500 mm de oluşacak tezgâh pozisyon hata değerleri gösterilmiştir. Isınma ve soğumaya bağlı olarak tezgâh her ısıtılıp delik delindiğinde sapma değerleri büyümüştür. Isınmadan kaynaklı olarak 15, 40 ve 85. dakikadaki ölçüm noktalarında tezgâh nominal değere aksinel olarak gitmesi gereken mesafeden hata değeri kadar uzaklaşmıştır. Şekil 5.13’de farklı sıcaklıklarda tutulan vidalı milin kompanzasyon değerleri gösterilmiştir



Şekil 5.13. Farklı sıcaklıklarda tutulan vidalı milin kompanzasyon değerleri.

Şekil 5.13’ de ısınmaya bağlı olarak alınan ölçümlerde 500 mm boyundaki referans mastar blok ölçüsünün, işleme esnasındaki ölçülen değere bölünmesiyle düzeltme faktörleri bulunmuştur. Bu düzeltme faktör değerleri kompanzasyon için CAD ortamında kullanılarak NC verisi olarak tezgâha aktarılabilirler. Böylelikle takım tezgâhının aksenal hata telafisi önlenir.

5.2. KOMPANZASYON METODUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deneylerde uygulanana kompanzasyon yöntemi ile delinen deliklerde meydana gelen hata miktarları değerlendirilmiştir.

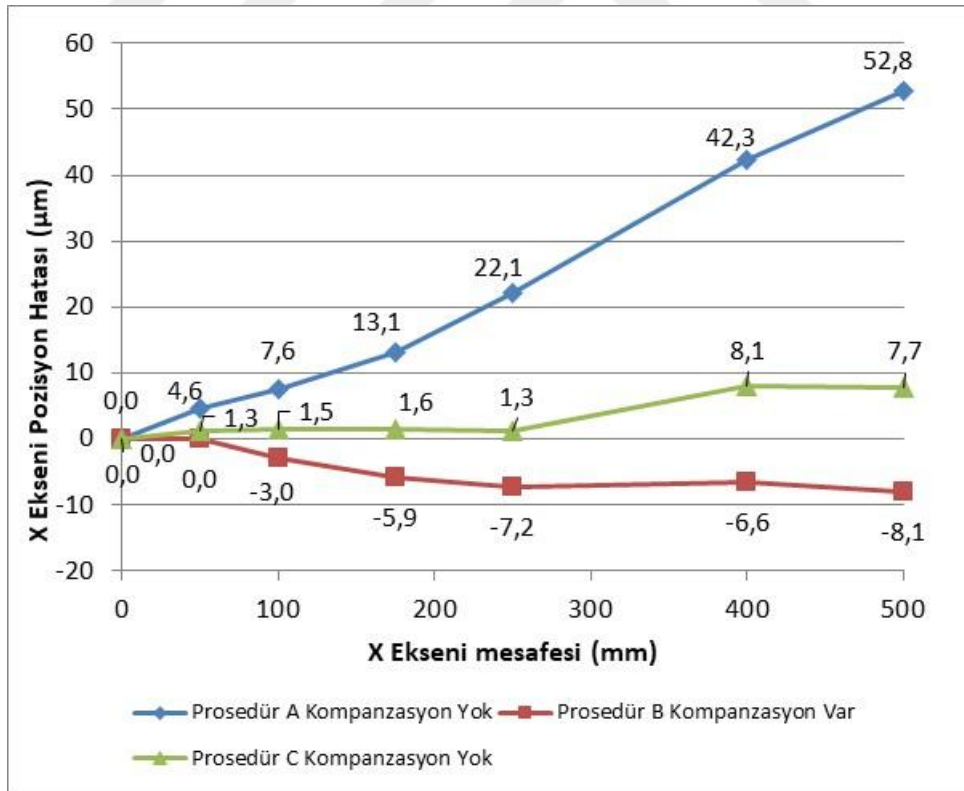
5.2.1. Ölçüm Sonuçları ve Analizleri

Yukarıdaki bölümde anlatıldığı şekilde, işlenen parçanın delikler arası mesafesi, TÜBİTAK-UME Boyutsal Laboratuvarı’nda bulunan ZEISS PRISMO-7 S-ACC üç boyutlu ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 5.14’ de test parçasının ölçümü gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları sertifikalandırılmıştır. Ölçüm sırasındaki ortam şartları, $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ olup, ölçüm belirsizliği (U) L=50-500 mm aralığı için, U=1,5-1,8 µm arasında değişmektedir.



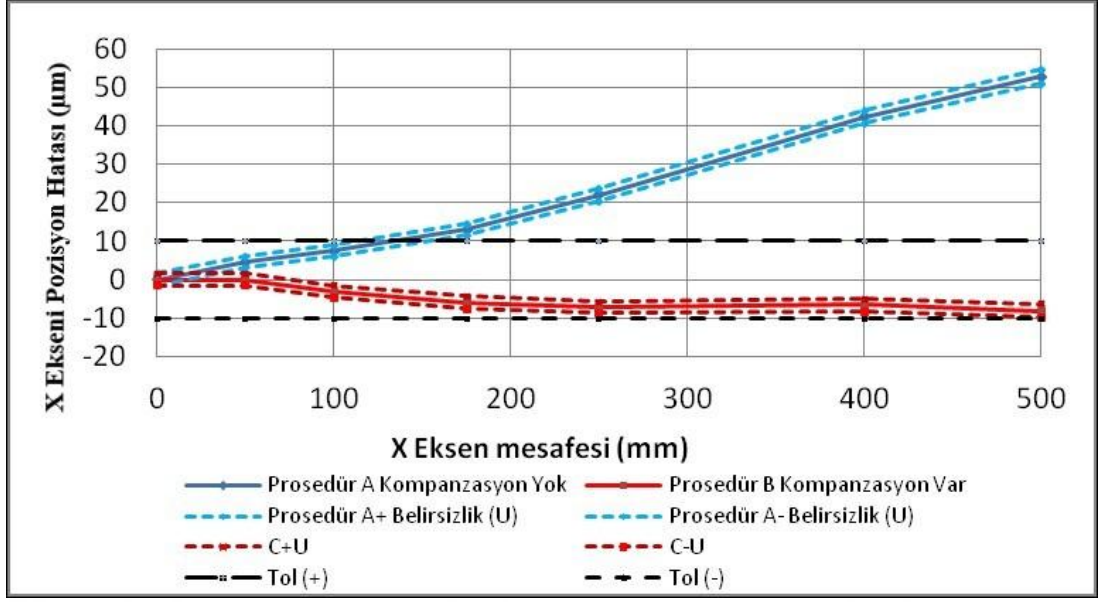
Şekil 5.14. Delikleri delinen parçanın delikler arası mesafe ölçümü.

% 95 güvenirlik seviyesinde, maksimum 1,8 μm olan ölçüm belirsizliği 60 μm seviyesine çıkan hataların, $\pm 10 \mu\text{m}$ toleransın içine alınmasının belirlenmesi için son derece uygun bir değerdir. Şekil 5.15’de işlem sırasında monteli olduğu alt destek parçası çıkarılmadan alınan ölçüm sonuçları gösterilmektedir.



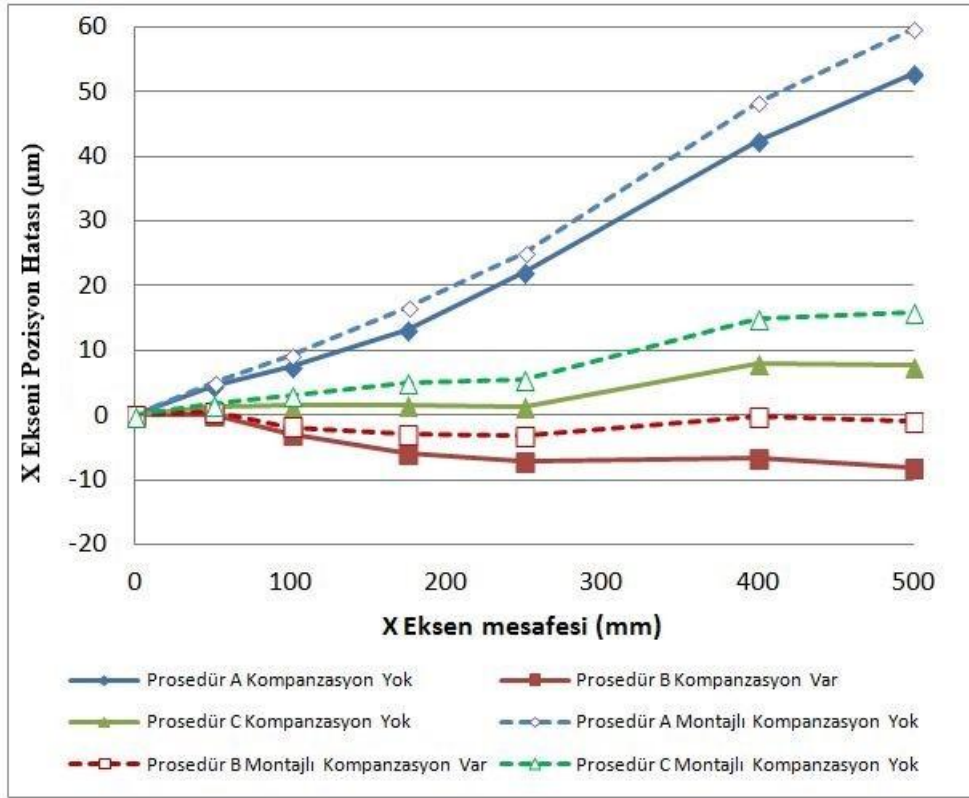
Şekil 5.15. İş parçasının Prosedür A, B ve C’ye göre delik pozisyon değerleri.

Grafikte Prosedür A eğrisi, tezgâh ısıtılınca, ilerleme milinin fazla çalışması sonrası



Şekil 5.17. İş parçasının deliklerinin pozisyon hatası ve belirsizlik değerleri.

Şekil 5.17'deki grafik, Şekil 5.15'de gösterilen grafikteki Prosedür A (Kompanzasyonsuz) ve Prosedür B (Kompanzasyonlu) imal edilmiş parçanın delikler arası mesafe ölçüm sonuçlarının tolerans içinde olup olmadığını kontrol ederken, ölçüm belirsizliğinin dikkate alınma durumunu göstermektedir. Bu ölçümler yapılırken belirsizlik değeri daha önce de belirtildiği gibi maksimum 1,8 µm olarak saptanmıştır. Ölçüm belirsizliği dikkate alındığı durumda da, kompanzasyon yapılarak işlenen deliklerden alınan ölçümler ± 10 µm tolerans içindedir. Şekil 5.18'de test parçasının, alt plakaya montajlı ve montajsız halde olduğundaki ölçümleri göstermektedir.



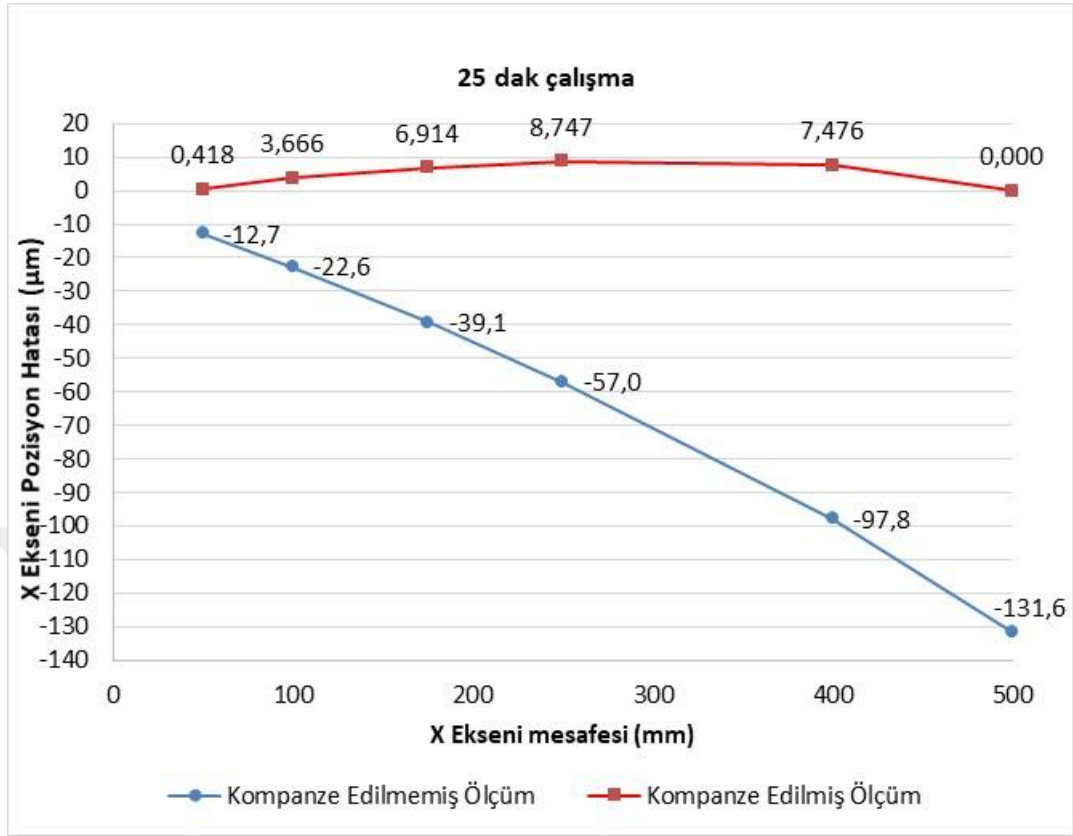
Şekil 5.18. İş parçasının alt plakaya montajlı ve montajsız olduğundaki delik pozisyonu ölçümleri.

İş parçası deney düzeneğinde altlıklı şekilde bağlanmıştır. Deliklerin pozisyonları CMM cihazında ise altlıkla ve altlıksız olarak iki farklı şekilde ölçülmüştür. Böylece altlığın ölçüm esnasında iş parçasıyla birlikte sökülmesinin delik eksenine sapma miktarına etkisi araştırılmıştır. Altlıkla ve altlıksız yapılan CMM ölçümlerine göre delik eksenine pozisyon hata değerleri 0,4 µm ile 7 µm arasında değişmektedir. Yani CMM ölçümleri için altlıkla birlikte veya altlıksız iş parçasının delik eksenine pozisyon hata değerlerine önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

5.2.2. Entegre Prob Ölçüm Sisteminin Hataları ve Telafisi

Renishaw ölçme probunun hata analizi yukarıda anlatılmıştır. Görüldüğü gibi, mesafe ölçümlerinde prob ile alınan ölçüm değerleri, ilerleme milinin hata değerlerinden etkilendiği için benzer durumlarda sağlıklı bir ölçüm yapmak söz konusu değildir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 bunu net bir şekilde anlatmaktadır. Çözüm için deneysel olarak uygulanan eş zamanlı düzeltme işlemi Renishaw prob ile yapılan ölçüme de uygulanabilir. Bu durumda Renishaw prob sistemi ile ölçüm sırasında yapılabilecek hatalar minimize edilir. Şekil 5.19'da 25 dakika tezgâhın çalışması sonucu master

bloklarının kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Master bloklarının ölçümleri.

Şekil 5.19’da görüldüğü gibi kompanzasyon uygulama halinde, 131,6 µm olan maksimum ölçme hatası, 10 µm toleransı içine alınabilmektedir. Burada kompanzasyon yaparken sadece 500 mm master blok ölçüm ile hesaplanan kompanzasyon değeri kullanılmıştır.

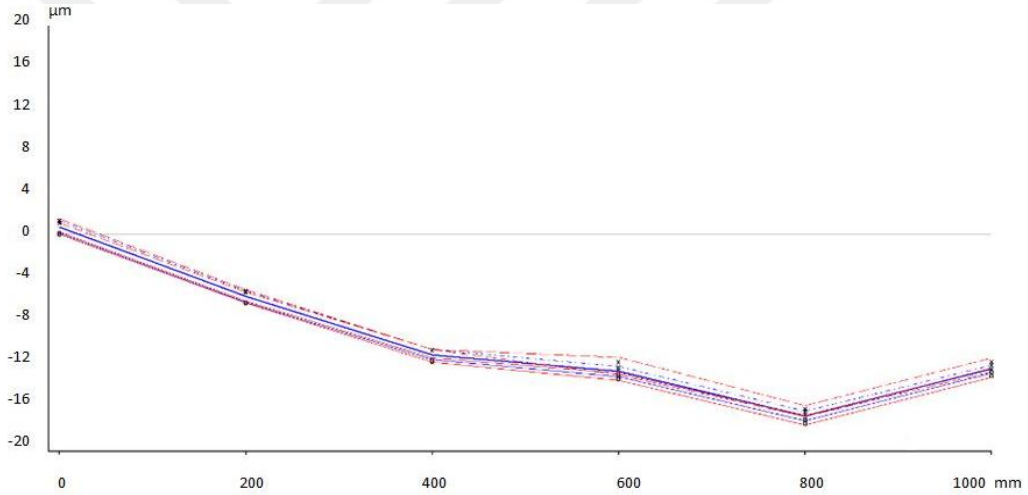
5.3. POZİSYON VE AÇISAL HATA SONUÇLARI

Deneylerde kullandığımız takım tezgâhının pozisyon ve açısal hatalarının tayini için, takım tezgâhları üretici firmaların ürettikleri tezgâhlar için kullandıkları standartlardan olan ISO 230-2 Nümerik kontrollü eksenlerin konumlanma doğruluğu ve tekrarlanabilirliğinin tayini isimli standarttan faydalanılmıştır. ISO 230-2 sayısal olarak kontrol edilen takım tezgâhlarının eksenlerinin konumlandırılmasının doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini belirlemek için test prosedürlerini belirtir [65]. Bu standartta testlerin nasıl yapıldığı tekrarlanabilirlik ve doğruluk parametrelerinin açıklaması ayrıca mevcuttur. Bu prosedürlerden yola çıkarak lazer interferometre ile takım tezgâhının X

ve Y eksenlerinin pozisyon ve açısal hataları incelenmiş, Z ekseninin de pozisyon hatası tespit edilmiştir. Açısal hatalar, açı optikleri kullanılarak ölçülür. Açı optikleri, açısal hatalar sebebiyle oluşan küçük mesafe değişimlerini ölçerek iki optik arasındaki mesafe ile işleme koyup açısal hataları hesaplar. Yöntem sinüs çubuğu ile yapılan işleme benzerdir. Burada iki mesnet noktaları yerine aralarındaki mesafe bilinen optik yansıtıcı yerleştirilir. Açısal hata sebebiyle açı interferometresi ve optik yansıtıcı arasında oluşan göreceli mesafe farkları lazer ile ölçülüp, trigonometrik işleme tabii tutulup, 0,05 arc saniye çözünürlükle bulunabilir.

5.3.1. X eksen Pozisyon ve Açısal Hataları

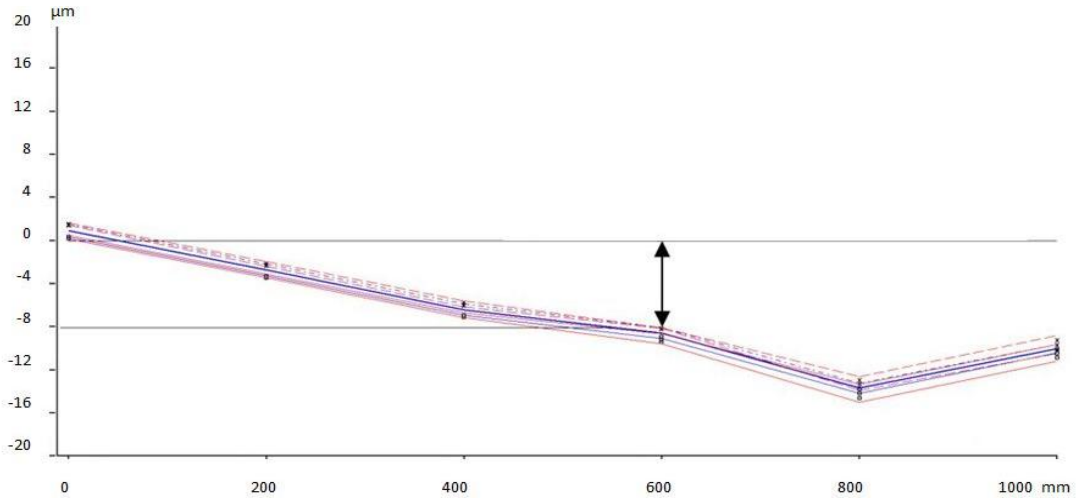
Takım tezgâhının X eksen kurs boyunca pozisyon ve açısal hataları incelenmiştir. Şekil 5.20'de X eksen Z=0 iken doğrusal pozisyon hataları gösterilmiştir.



Şekil 5.20. X eksen doğrusal pozisyon hatası.

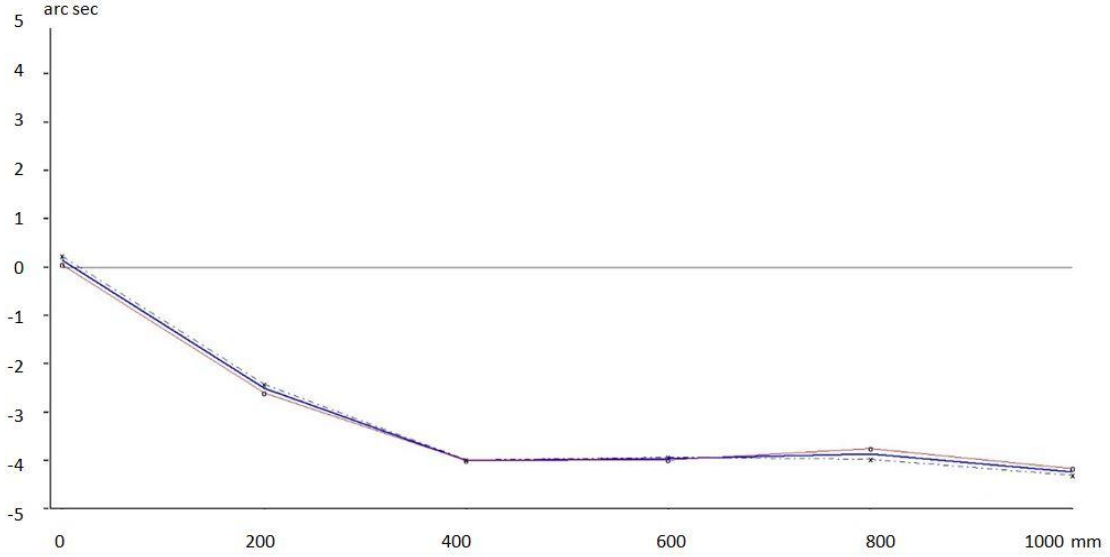
X eksen kurs boyunca boşa çalıştırılarak (Z=0) ileri ve geri gidiş hareketi sonucunda başlangıç konumundan 200, 400, 600, 800 ve 1000 mm mesafelerinde sırasıyla tezgâh tutucusu durdurularak lazer interferometre tarafından adım adım ölçümler alınmıştır. X eksen 200 mm pozisyonundayken 7 µm hata vermiştir. Aynı eksen 400 mm pozisyonunda 12 µm hata değeri ile çalışmıştır. 600 mm pozisyonunda ise 400 mm pozisyonunda ki hataya çok yakın hata değeri vermiştir. 800 mm pozisyona geldiğinde en büyük pozisyon hatasının olduğu bölgededir, burada hata değeri 16 µm ölçülmüştür. 1000 mm mesafede ise hatanın iyileştiği görülmüştür. Bu durumun vidalı milin rulmanlı yataklama bölgesinde olduğundan iyileştiği düşünülmektedir. Bu ölçümler sonucunda pozisyon hatalarının boya bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. [71]'de araştırmacılar

benzer bir çalışmayı lazer interferometre ile DMC 105V takım tezgâhına uygulamışlar ve X eksen pozisyon hatalarını 200 mm pozisyonunda 43 μm , 400 mm pozisyonunda 36 μm , 600 mm pozisyonunda 22 μm , 800 mm pozisyonunda 12 μm ve 1000 mm pozisyonunda ise 5 μm ölçmüşlerdir. Her iki deney de incelendiğinde sonuçların farklı çıkması ölçümü uygulanan takım tezgâhlarının imalat teknolojisi, kullanım süreleri ve kaliteleri farklılığından kaynaklanmaktadır. Her iki deney de takım tezgâhı vidalı milin son pozisyonuna yaklaştığında hatalarda iyileşme görülmüştür. Aynı ölçüm farklı Z yüksekliği seçilerek tekrarlanmıştır. Test parçasının deliklerinin delindiği ve master blokların ölçümünün yapıldığı (Z=318 mm) bölgedeki pozisyon ölçülmüştür. Şekil 5.21’de Z=318 bölgesindeki X eksen pozisyon hatası gösterilmiştir.



Şekil 5.21. X eksen pozisyon hatası.

Şekil 5.21’de test parçasının deliklerinin delindiği ve master ölçümün yapıldığı bölge incelenmiştir. Bu ölçümde X eksen 200 mm pozisyonunda hata değeri 4 μm ölçülmüştür. Sonrasında 400 mm pozisyonu ölçülerek hata değeri 6 μm ölçülmüştür. 600 mm pozisyonu deney işlemlerinin gerçekleştiği pozisyonudur. Bu pozisyonunda takım tezgâhının 8 μm hata yaptığı gözlemlenmiştir. 800 mm pozisyonunda ise en büyük hata değerini verdiği bölgedir, burada hata değeri 14 μm ölçülmüştür. Son pozisyona geldiğinde iyileşme görülmüştür. Bu iyileşme vidalı milin rulmanlı yataklama bölgesinde olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Alınan ölçümler neticesinde, boya bağlı olarak hata miktarının lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.22’de X eksen için Z eksen 318 mm’de olduğunda takım tezgâhının açılma hatası incelenmiştir.

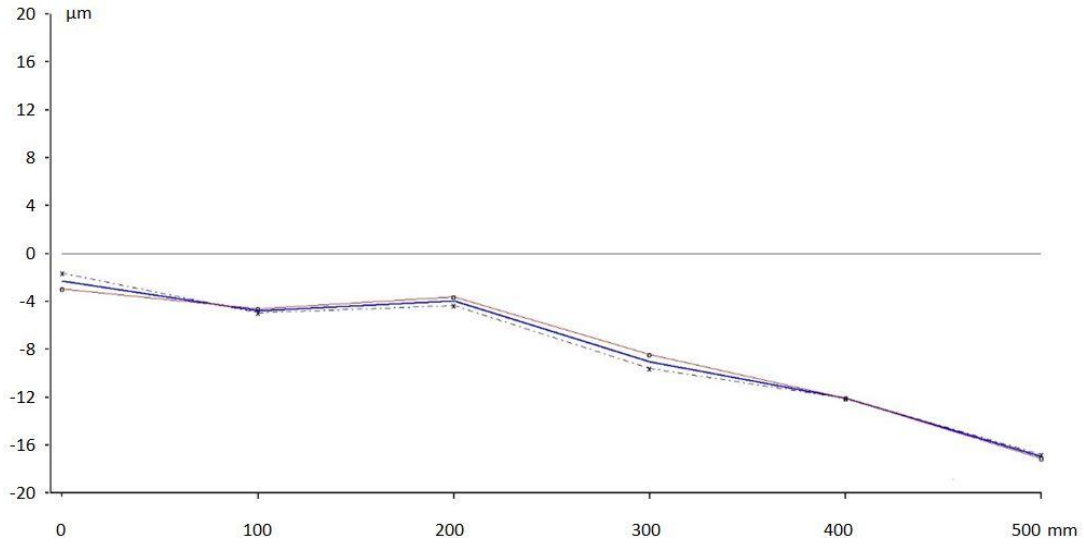


Şekil 5.22. X eksenı açısıl hatası.

Lazer interferometre ile alınan ölçümlerde X eksenı açısıl hatası 200 mm pozisyonunda 2,5 μm ölçülmüştür. Aynı eksende 400 mm pozisyonunda açısıl hata 4 arc-saniye ölçülmüştür. 600 mm pozisyonunda 3,8 arc-saniye ölçülmüş, 800 mm pozisyonunda ise 3,5 arc-saniye ölçülmüştür. 1000 mm pozisyonunda en büyük hata ölçüm değeri 4,2 arc-saniye ölçülmüştür. X eksenı açısıl hatalarının boya bağılı olarak arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ölçülen bu hata hassas işlemede parçada önemli miktarda hataya sebebiyet verir. [72]' de ki çalışmada, lazer interferometre ile TRIAC VMC marka dik işlem freze tezgâhında X eksenı açısıl hatalarını incelemiştir. Ölçümlerinde açısıl hataların lineer bir şekilde arttığı ve en büyük açısıl hata değeri olarak 300 mm boyda 18 arc-saniye bulmuştur. Çalışmamızda ise en büyük hata değeri ise 4,2 arc-saniye olarak ölçülmüştür. Her iki çalışma da incelendiğinde hata değerlerinin farklı çıkmasının temel nedeni deneylerin uygulandığı takım tezgâhlarının farklı oluşlarından dolayıdır.

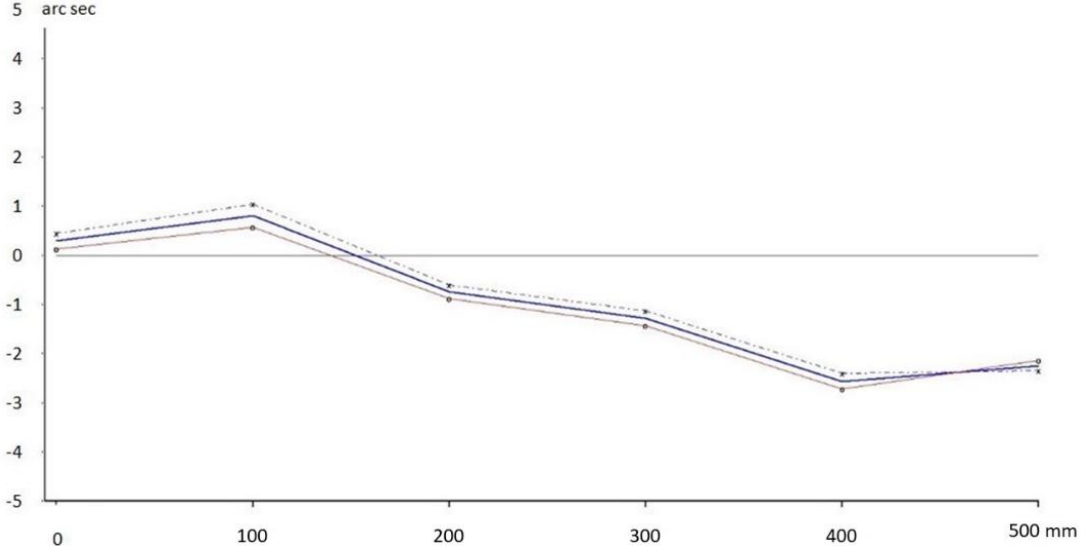
5.3.2. Y eksenı Pozisyon ve Açısıl Hataları

Takım tezgâhı Y eksenı kursu boyunca başlangıç konumundan her 100 mm de bir ölçüm alınarak eksen pozisyon hatası bulunmuştur. Şekil 5.23'de Y eksenı pozisyon hatası gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Y eksen pozisyon hatası.

Y eksen pozisyon hataları lazer interferometre ile incelendiğinde, 100mm pozisyonunda 4 µm hata ölçülmüştür. Aynı işlem 200 mm pozisyonuna uygulandığında 3 µm ölçülmüştür. 300 mm pozisyon hatası ise 7 µm ölçülmüştür. 400 mm pozisyon hatası 12 µm ölçülmüş ve en yüksek hata değerinin olduğu 500 mm pozisyonunda 16 µm hata ölçülmüştür. Y eksen pozisyon hatalarının boya bağlı olarak arttığı grafiklerde tespit edilmiştir. [71]'deki çalışmada Y eksen pozisyon hatalarını incelemişlerdir. Deneylelerinin sonuçlarında 50 mm pozisyonunda 52 µm, 100 mm pozisyonunda 49 µm, 200 mm pozisyonunda 33 µm, 300 mm pozisyonunda 13 µm, 400 mm pozisyonunda 5 µm, 500mm pozisyonunda 6 µm hata ölçmüşlerdir. En yüksek hata değerini 50 mm pozisyonunda 52 µm olarak ölçmüşlerdir. Çalışmamızda ise en yüksek hata değeri 500 mm pozisyonunda 16 µm olarak ölçülmüştür. Bu çalışmalarda ölçüm sonuçlarının farklı çıkmasının temel sebebi deneylelerin farklı takım tezgâhlarında uygulanmasından kaynaklıdır. Y eksen pozisyon hatasının incelenmesinden sonra, Y eksen açısal hataları incelenmiştir. Şekil 5.24'de Y eksen açısal hataları gösterilmiştir.

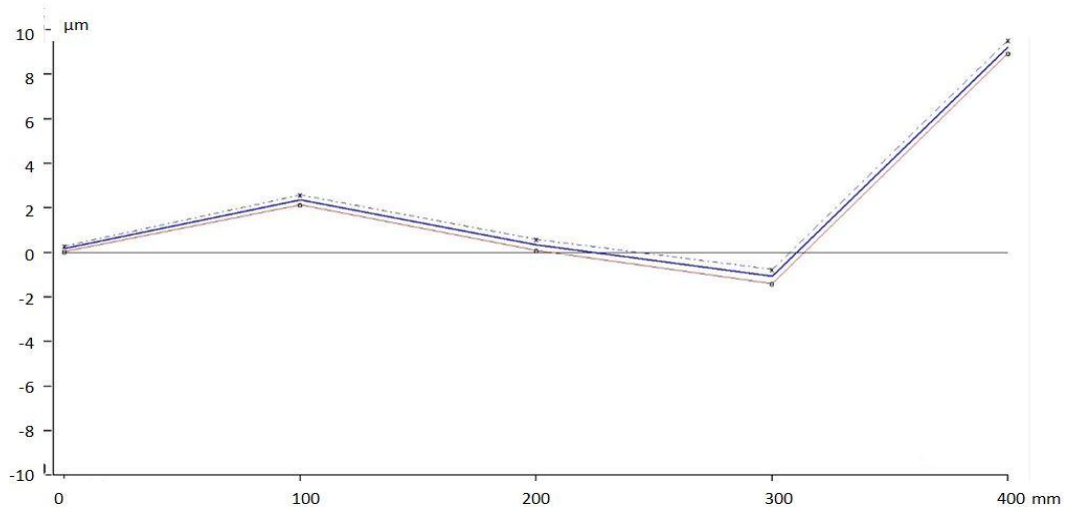


Şekil 5.24. Y eksenini açışal hatası.

Lazer interferometre ile takım tezgâhı tablası Y eksenini açışal hataları ölçülmüştür. Bu ölçümlerde 100 mm pozisyonunda 1 arc-saniye, 200 mm pozisyonunda 1 arc saniye, 300 mm pozisyonunda 1,5 arc-saniye, 400 mm pozisyonunda en yüksek hata değeri 2,5 arc-saniye ölçülmüştür. 500 mm pozisyonunda ise 2 arc-saniye ölçülmüştür. [73]'de araştırmacılar, benzer bir çalışmada lazer interferometre ile FANUC sistemli dik işlemler freze takım tezgâhının Y eksenini açışal hatalarını incelemişlerdir. İncelemelerinde 100mm pozisyonunda 2 arc-saniye, 200mm pozisyonunda 2,5 arc-saniye, 300 mm pozisyonunda 4 arc-saniye 400 mm pozisyonunda 7 arc-saniye ve en yüksek açışal hata değerine ulaştıkları 500 mm pozisyonunda ise 9 arc-saniye hata ölçmüşlerdir. Her iki çalışmada incelendiğinde Y eksenini açışal hatalarının boya bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

5.3.3. Z Eksenini Pozisyon Hataları

Takım tezgâhı X=782 mm ve Y=185 mm bölgesinde iken Z eksen hareketi boyunca her 100 mm de bir tezgâh durdurularak daha önceki X ve Y eksenlerinde olduğu gibi ölçümler alınmıştır. Şekil 5.25'de Z eksenini pozisyon hatası gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Z eksenini pozisyon hatası.

Z eksenini pozisyon hataları lazer interferometre ile ölçülmüştür. Bu ölçümler neticesinde 100 mm pozisyonunda 2 µm, 200 mm pozisyonunda 1 µm, 300 mm pozisyonunda 1 µm ve en yüksek hata değeri ulaşılan 400 mm pozisyonunda ise 10 µm hata ölçülmüştür. Z eksenini pozisyon hatasının, yataklama bölgesinden uzaklaştıkça arttığı grafikte gösterilmiştir. [71]'de araştırmacılar çalışmalarında Z eksenini pozisyon hatalarını incelemişlerdir. Bu incelemelerde 100 mm pozisyonunda 23 µm, 200mm pozisyonunda 20 µm, 300 mm pozisyonunda 16 µm ve 400 mm pozisyonunda ise 5 µm ölçmüşlerdir. Hata değeri lineer bir şekilde azalmasının sebebi, takım tezgâhlarının Z eksenlerinin negatif çalışmasından kaynaklanmaktadır. Pozisyon değeri büyüdükçe deneydikleri takım tezgâhının Z eksenlerinin negatif yönde çalışmasından kaynaklı en yüksek hata değeri başlangıç pozisyonları olan en uzak kurs bölgelerinde almışlardır. Her iki çalışma da incelendiğinde hataların lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Vidalı mil bölgesinden uzaklaştıkça hataların büyümesini Abbe hataları net bir şekilde anlatmıştır. Z eksenini açısal hatası deney sonuçlarımıza etki etmediği için incelenmemiştir.

5.4. SONUÇLARIN GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Tezgâhın performansı izlenebilir metroloji ekipmanları kullanılarak kontrol edilmiş ve mevcut durumu tespit edilmiştir. Bu verilere göre tezgâh üzerine entegreli ölçme probunun performansı ayrıca kontrol edilmiş ve uygulanan yöntem ile yapılabilecek ölçümlerin ± 5 µm doğrulukta performans gösterdiği bulunmuştur. Kısacası tezgâh

üzerinde ölçme probu ile yapılabilecek ölçümlerin performansı önceden tespit edilmiştir. Ayrıca cihaz üzerine master bloklarının hızlı bir şekilde monte edilip talaşlı imalat sırasında alınması için kinematik prensiplere göre hazırlanmış aparatın performansı da değerlendirilmiştir. Tüm bu çalışmalardan sonra tezgâhın eksenlerinin normal çalışma şartlarındaki performansı ve yoğun kullanımdaki performansı araştırılmıştır. Yoğun kullanımda sıcaklık değişimlerinin tezgâh eksenlerinin performansını nasıl etkilediği gösterilmiştir. 40 dakika boyunca sürekli kullanımda tezgâh pozisyon hataları 163 µm değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda bizim çalışmamızla benzerlik göstermektedir. Yani işleme süresine bağlı olarak pozisyon hatalarının arttığı gözlemlenmiştir [8], [60]. Bu veriler ışığında tezgâh ile normal kullanım şartlarında herhangi bir kompanzasyon uygulamadan, yoğun kullanım şartlarında kompanzasyon uygulamadan ve uygulayarak parça imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan parçanın boyutları, tezgâh üzerinden söküldükten sonra CMM ile ölçülmüş ve önerilen kompanzasyon uygulamasının performansı kontrol edilmiştir. Buna göre 500 mm mesafede 52,8 µm olarak tespit edilen üretim hatası, 10 µm altına çekilmiştir. Bu deneysel sonuçlara göre 500 mm imalat işleminde 5 kat oranında pozisyon iyileşmesi gerçekleşmiştir. Hata telafileri ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda telafi yöntemleri olarak matematiksel modellemeler ve sinir ağları kullanılmıştır [8], [11], [42], [60]. Araştırmacılar, sıcaklık kaynaklı termal uzamaları telafi etmek için vidalı milde tahmini sıcaklık belirlemeleri ile telafi yaptıkları görülmektedir. Çalışmamızda tezgâhın çalışma süresine bağlı olarak oluşan sıcaklığın etkisi ile oluşan pozisyon hataları master blokları referans alınarak anlık telafi yöntemi kullandık. Bu yöntemde vidalı mil sıcaklığı doğrudan ölçülmemiştir. Sıcaklıktan etkilenmemiş sertifika değerleri bilinen master bloklar ölçülerek takım tezgâhındaki hata miktarları yüksek doğrulukta bulunmuş ve düzeltilmiştir. Sıcaklık tahmin modellemelerine göre daha hassas ve pratik bir yaklaşım benimsenmiştir. İmalatı yapılan parçalardaki iyileştirmenin yanında, önerilen kompanzasyon metodu entegreli ölçüm probunun performansını artırmak içinde kullanılabilir. Özellikle tezgâhın yoğun kullanımlarından sonra gösterilen yüksek pozisyon hata değerleri prob ile yapılan ölçümlerde de ortaya çıkacaktır. Bu hatalardan operatörler haberdar olmayacağı için durumun farkında bile olmadan tezgâh çalışmaya devam edecek ve hatalı parça üretimi artacaktır. Önerilen yöntem ile CNC takım tezgâhlarla entegreli kullanılan ölçme probunun hatalarının düzeltilmesi mümkün olacaktır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ck45 çeliğinden hassas parça üretimi için CNC işleme merkezi takım tezgâhında hassas imalat esnasında oluşabilecek hatalar ve hataları önleme üzerine yapmış olduğumuz çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tezgâhın ısınmasıyla pozisyonlama hatasının 100 µm'nin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Tezgâh soğuduğunda ise hata miktarının azaldığı görülmüştür.
- Isınmadan kaynaklanan pozisyon hatalarının hassas işlemeye olumsuz etki ettiği anlaşılmıştır.
- Prosedür A'ya göre tezgâh ısıdıktan sonra 500 mm mesafede 52,8 µm olarak tespit edilen üretim hatası, yapılan kompanzasyon işlemi ile sapma miktarı 10 µm altına çekilerek yaklaşık %81 iyileşme sağlanmıştır. Bu sonuç özellikle yoğun kullanım sonucu sıcaklığın artmasından kaynaklanan sapma değerlerinin kompanzasyon işlemi ile başarılı şekilde azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Yöntem izlenebilir metroloji standartları ile çok düşük maliyetle gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır.
- Kullanılan bu yöntemin tezgâh çalışırken, anlık hataları tespit etme ve kompanze etme özelliği olması (on-line compensation) sebebiyle endüstri 4.0 uygulamalarında önemli kullanımı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Delik delme işleminde uygulanacak kompanzasyon işlemi ile daha hassas delik delme işlemi daha düşük maliyete yapmak mümkün olabileceği anlaşılmıştır.
- Gelecekteki çalışmalarda kompanzasyon değerinin bulunması, CAD dosyalarının revizyonu tam otomatik olarak Endüstri 4.0 uyarlanabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] P. Katageri, B. S. Suresh ve A. P. Taj, “An approach to identify and select optimal temperature-sensitive measuring points for thermal error compensation modeling in CNC machines: A case study using cantilever beam”, *Materials Today-Proceedings*, c. 45, ss. 264-269, 2021.
- [2] R. Ramesh, M. A. Mannan ve A. N. Poo, “Error compensation in machine tools - a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 40, sayı 9, ss. 1235-1256, 2000.
- [3] A. C. Okafor ve Y. M. Ertekin, “Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 40, sayı 8, ss. 1199-1213, 2000.
- [4] D. Kono, A. Matsubara, I. Yamaji ve T. Fujita, “High-precision machining by measurement and compensation of motion error”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 48, sayı 10, ss. 1103-1110, 2008.
- [5] C. Ma, L. Zhao, X. S. Mei, H. Shi ve J. Yang, “Thermal error compensation of high-speed spindle system based on a modified BP neural network”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 89, sayı 9-12, ss. 3071-3085, 2017.
- [6] K. F. Emann, B. T. Wu ve M. F. Devries, “A generalized geometric error model for multi-axis machines”, *CIRP Annals*, c. 36, sayı 1, ss. 253-256, 1987.
- [7] J.H. Lee, J.H. Lee ve S.H. Yang, “Thermal error modeling of a horizontal machining center using fuzzy logic strategy”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 3, sayı 2, ss. 120-127, 2001.
- [8] P. Blaser, F. Pavlicek, K. Mori, J. Mayr, S. Weikert ve K. Wegener, “Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools”, *Journal of Manufacturing Systems*, c. 44, ss. 302-309, 2017.
- [9] J. Mayr, M. Egeter, S. Weikert ve K. Wegener, “Thermal error compensation of rotary axes and main spindles using cooling power as input parameter”, *Journal of Manufacturing Systems*, c. 37, ss. 542-549, 2015.
- [10] T. N. Reddy, V. Shanmugaraj, P. Vinod ve S. G. Krishna, “Real-time thermal error compensation strategy for precision machine tools”, *Materials Today-Proceedings*, c. 22, ss. 2386-2396, 2020.
- [11] Z. Huang, Y. C. Liu, L. Du ve H. Yang, “Thermal error analysis, modeling and compensation of five-axis machine tools”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, c. 34, sayı 10, ss. 4295-4305, 2020.
- [12] M. Mareš, O. Horejš ve L. Havlík, “Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece”, *Precision Engineering*, c. 66, ss. 21-

30, 2020.

- [13] H. T. Yue, C. G. Guo, Q. Li, L. J. Zhao ve G. B. Hao, “Thermal error modeling of CNC milling machining spindle based on an adaptive chaos particle swarm optimization algorithm”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 42, sayı 8, ss. 456, 2020.
- [14] C. Danjoua, J. L. Duigoua ve B. Eynarda, “Closed-loop manufacturing, a STEP-NC process for data feedback: a case study”, *48th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, İtalya, 2016, c. 41, ss. 852-857.
- [15] T. Yandayan, R. Karadayı ve İ. Teke, “İmalat işlemi sırasında ölçüm ve ölçüm verilerinin imalat için kullanımı”, *8.Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 2013, c. 55, sayı 654, ss. 4.
- [16] M. Soori, B. Arezoo ve M. Habibi, “Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in, three-axis CNC milling machines”, *Journal of Manufacturing Systems*, c. 33, sayı 4, ss. 498-507, 2014.
- [17] S. Xiao, G. Zheng ve S. Chen, “ Intelligent control of the linear motor direct drive feed system for CNC machine tools”, *2008 International Conference on Computational Intelligence and Security*, Çin, 2008, ss. 111-116.
- [18] J. Wilson, “Position and Motion Sensors”, *Sensor Technology Handbook*, Oxford, İngiltere: Newnes, 2005, böl. 15, ss. 321-401.
- [19] Heidenhain. (2019, 06 Haziran). *Linear Encoders* [Online]. Erişim: https://www.heidenhain.com.tr/fileadmin/pdb/media/img/571470-2C_Linear_Encoders_For_Numerically_Controlled_Machine_Tools.pdf
- [20] Heidenhain. (2006, 03 Mart). *Accuracy of Feed Axes* [Online]. Erişim: https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Technische_Dokumentation/TI_Accuracy_of_Feed_Axes_ID394843_en.pdf
- [21] Heidenhain. (2011, 01 Eylül). *Machining Accuracy of Machine Tools* [Online]. Erişim: https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdf/en/01_Products/Technische_Dokumentation/TI_Machining_Accuracy_of_Machine_Tools_ID635399_en.pdf
- [22] J. Duda ve J. Pobożniak, “The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming”, *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Faim, 2017, ss. 501-508.
- [23] A. Loffredo, M. Zhang, Z. Lin ve A. Matta, “Throughput sensitivity analysis in closed loop manufacturing Systems for Hairpin Stator Production”, *Procedia Manufacturing*, c. 51, ss. 1515-1522, 2020.
- [24] Renishaw. (2015, 01 Kasım). *CNC takım tezgahları için prob ile ölçüm sistemleri* [Online]. Erişim: <https://www.renishaw.com.tr/media/pdf/tr/63497c46253444da9504c7a37291b7c0.pdf>
- [25] K. C. Fan ve M. J. Chen, “A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages”, *Precision Engineering-Journal of the American Society for Precision Engineering*, c. 24, sayı 1, ss. 15-23, 2000.
- [26] C. S. Liu, H. C. Hsu ve Y. X. Lin, “Design of a six-degree-of-freedom geometric errors measurement system for a rotary axis of a machine tool”, *Optics and*

Lasers in Engineering, c. 127, 2020.

- [27] C. X. Cui, Q. B. Feng, B. Zhang ve Y. Q. Zhao, “System for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors using a polarization maintaining fiber-coupled dual-frequency laser”, *Optics Express*, c. 24, sayı 6, ss. 6735-6748, 2016.
- [28] W. D. Leite, J. C. C. Rubio, J. G. Duduch ve P. E. M. de Almeida, “Correcting geometric deviations of CNC Machine-Tools: An approach with Artificial Neural Networks”, *Applied Soft Computing*, c. 36, ss. 114-124, 2015.
- [29] A. W. Khan ve W. Y. Chen, “A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 53, sayı 5-8, ss. 615-628, 2011.
- [30] J. H. Jung, J. P. Choi ve S. J. Lee, “Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 174, sayı 1-3, ss. 56-66, 2006.
- [31] F. Y. Pan, Y. W. Bai, L. Ni, X. G. Wang ve K. Liu, “The measurement of 5-axis TTTRR structure machine tools”, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, c. 113, ss. 70-78, 2016.
- [32] Y. Ding, T. Wang, Q. Liu, J. Dong, B. Li ve Z. Liu, “A method of pitch error compensation for the open numerical control system”. *Key Engineering Materials*, c. 693, ss. 1711-1717, 2015.
- [33] THK. (2020, 24 Eylül). *Accuracy of the Ball Screw* [Online]. Erişim: https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_b15_019.pdf
- [34] J. Y. Kao, Z. M. Yeh, Y. S. Tarng ve Y. S. Lin, “A study of backlash on the motion accuracy of CNC lathes”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 36, sayı 5, ss. 539-550, 1996.
- [35] Z. Li, Y. Wang ve K. S. Wang, “A data-driven method based on deep belief networks for backlash error prediction in machining centers”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, c. 31, sayı 7, ss. 1693-1705, 2020.
- [36] T. Yandayan, *Manufacturing Metrology, Ders Notları*, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, 2019.
- [37] R. Leach, L. Laperrière ve R. Eds. “Abbe Error/Offset”, *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Berlin, Almanya: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [38] R. Koning, J. Flugge ve H. Bosse, “A method for the in situ determination of Abbe errors and their correction”, *Measurement Science and Technology*, c. 18, sayı 2, ss. 476-481, 2007.
- [39] T. Yandayan, “Takım Tezgâhları Çalıştayı”, *TMMOB Ölçüm Bilim Kongresi*, İzmir, Türkiye, 2019.
- [40] C. X. Zhang, F. Gao ve Y. Li, “Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature”, *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, c. 47, ss. 231-238, 2017.
- [41] M. Gebhardt, J. Mayr, N. Furrer, T. Widmer, S. Weikert ve W. Knapp, “High precision grey-box model for compensation of thermal errors on five-axis

- machines”, *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, c. 63, sayı 1, ss. 509-512, 2014.
- [42] R. Ramesh, M. A. Mannan ve A. N. Poo, “Error compensation in machine tools - a review Part II: thermal errors”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 40, sayı 9, ss. 1257-1284, 2000.
- [43] T. Yandayan ve S. A. Akgöz, “Mekanik karşılaştırma yöntemi ile uzun master bloklarının yüksek hassasiyette kalibrasyonu ve Türkiye’nin dünyadaki yeri”, *Ölçümbilim Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 2019.
- [44] Heidenhaintv. (2013, 20 Ağustos). *Direct position measurement with linear encoders* [Online]. Erişim: https://www.youtube.com/watch?v=IZxeJ6sPaOw&ab_channel=heidenhaintv
- [45] P. Schellekens, N. Rosielle, H. Vermeulen, M. Vermeulen, S. Wetzels ve W. Pril, “Design for Precision: Current Status and Trends”, *CIRP Annals*, c. 47, sayı 2, ss. 554-586, 1998.
- [46] Metroloji Kılavuzları Hazırlama Ortak Komitesi 2. Çalışma Grubu. (2008, 01 Eylül). *Uluslararası Metroloji Sözlüğü Temel ve Genel Kavramlar İlgili Terimler (VIM)* [Online]. Erişim: https://www.ume.tubitak.gov.tr/sites/images/uluslararasi_metroloji_sozlugu.pdf
- [47] X. G. Jiang, T. F. Meng, L. Wang ve C. Liu, “Rapid calibration method for measuring linear axis optical paths of computer numerical control machine tools with a laser interferometer”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 110, sayı 11-12, ss. 3347-3364, 2020.
- [48] T. Yandayan, “İmalat metrolojisinde laser kullanarak yapılan ölçme teknikleri”, *2. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 1997.
- [49] Renishaw. (2020, 01 Eylül). *İnterferometrik sistemler nasıl çalışır?* [Online]. Erişim: <https://www.renishaw.com.tr/tr/interferometrik-sistemler-nasil-calisir--38612>
- [50] S. Barman ve R. Sen, “Performance evaluation of multi-axis CNC machine tools by interferometry principle using laser calibration system”, *Journal of The Institution of Engineers*, c. 93, sayı 2, ss. 151-155, 2012.
- [51] S. A. Akgöz ve T. Yandayan, “Uzun master bloklarının metroloji ve imalattaki önemi, TÜRKAK tarafından akredite laboratuvarların uzun master blok kalibrasyonu için durum analizi”, *VIII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 2013.
- [52] Mitutoyo. (2013, 01 Eylül), *Lenght Standard Gauge Blocks* [Online]. Erişim: <https://www.mitutoyo.co.jp/eng/support/service/catalog/09/E12014.pdf>
- [53] S. Carmignato, L. De Chiffre, H. Bosse, R. K. Leach, A. Balsamo ve W. T. Estler, “Dimensional artefacts to achieve metrological traceability in advanced manufacturing”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, c. 69, sayı 2, ss. 693-716, 2020.
- [54] K.F.Emann, B.T.Wu ve M.F.Devries, “A generalized geometric error model for multi-axis machines”, *CIRP Annals*, c. 36, sayı 1, ss. 253-256, 1987.
- [55] M. A. Donmez, D. S. Blomquist, R. J. Hocken, C. R. Liu ve M. M. Barash, “A general methodology for machine-tool accuracy enhancement by error

- compensation”, *Precision Engineering-Journal of the American Society for Precision Engineering*, c. 8, sayı 4, ss. 187-196, 1986.
- [56] C. Raksiri ve M. Parnichkun, “Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 44, sayı 12-13, ss. 1283-1291, 2004.
- [57] S. Eskandari, B. Arezoo ve A. Abdullah, “Positional, geometrical, and thermal errors compensation by tool path modification using three methods of regression, neural networks, and fuzzy logic”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 65, sayı 9-12, ss. 1635-1649, 2013.
- [58] J. X. Yuan ve J. Ni, “The real-time error compensation technique for CNC machining systems”, *Mechatronics*, c. 8, sayı 4, ss. 359-380, 1998.
- [59] S. M. Wang, Y. L. Liu ve Y. A. Kang, “An efficient error compensation system for CNC multi-axis machines”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, c. 42, sayı 11, ss. 1235-1245, 2002.
- [60] M. Mares, O. Horejs ve L. Havlik, “Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece”, *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, c. 66, ss. 21-30, 2020.
- [61] H. Shi, C. P. Jiang, Z. Z. Yan, T. Tao ve X. S. Mei, “Bayesian neural network-based thermal error modeling of feed drive system of CNC machine tool”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 108, sayı 9-10, ss. 3031-3044, 2020.
- [62] Okuma. (2020, 15 Eylül). *Vertical Machining Centers GENOS M series* [Online]. Erişim: <https://www.okuma.co.jp/english/product/vmc/genosm.html>
- [63] G. L. P. Nijse, “Linear motion systems; A modular approach for improved straightness performance”, Doktora tezi, Delft Teknik Üniversitesi, Delft, Hollanda, 2001.
- [64] Kennametal. (2020, 10 Ekim). *KSEM™ Bodies • 3 x D / 5 x D • WN/WD* [Online]. Erişim: <https://www.kennametal.com/tr/tr/products/fam.ksem-bodies-3-x-d-5-x-d-wnwd-shank.100001406.html>
- [65] *ISO, Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes*, in *ISO 230-2*, Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu ISO, 2014.
- [66] Renishaw. (2016, 09 Eylül). *OMP40-2 optik iletim probu* [Online]. Erişim: <https://www.renishaw.com.tr/tr/omp40-2-optik-iletim-probu--7992>
- [67] Renishaw. (2016, 01 Ekim). *OMP60 optik iletişimli parça ölçme probu* [Online]. Erişim: <http://resources.renishaw.com/tr/download/bilgi-formu-omp60-optik-iletisimli-parca-olcme-probu--83140>
- [68] A. Slocum, “Kinematic couplings: A review of design principles and applications”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 50, sayı 4, ss. 310-327, 2010.
- [69] T. Yandayan, 1 Metre Neye Eşittir?, *Bilim ve Teknik*, ss. 40-45, 2012.
- [70] EURAMET. (2018, 05 Şubat). *Calibration Guidelines* [Online]. Erişim:

<https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>

- [71] S. Barman ve R. Sen, “Enhancement of accuracy of multi-axis machine tools through error measurement and compensation of errors using laser interferometry technique”, *Mapan-Journal of Metrology Society of India*, c. 25, sayı 2, ss. 79-87, 2010.
- [72] R. A. Mahdavinejad, “Prediction of angular errors on a vertical CNC milling machine”, *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering*, c. 35, sayı 2, ss. 181-195, 2011.
- [73] H. L. Liu, M. J. Su, J. L. Hou, L. L. Zhou, P. M. Peng ve C. Liu, “The research on the influence of position errors on the angular errors, straightness errors and perpendicularity errors”, *2020 10th Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, Çin, 2020, ss. 455-461.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gökhan ÖNER

Yabancı Dil : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Talaşlı İmalat Öğretmenliği	Marmara Üniversitesi	2012
Lise	Makine	STFA Anadolu Teknik Lisesi	2007

YAYINLAR

G. Öner, T. Yandayan ve S. Akıncıoğlu, "CNC işleme merkezlerinde hataların iş esasıyla yaklaşımla düzeltilmesi", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 9, sayı 1, ss. 92-103, 2021, doi:10.29130/dubited.842244