



**KARMAŞIK GEOMETRİLİ HASSAS
KOMPONENTLERİN BOYUTSAL
DOĞRULANMASINA YÖNELİK TEMASLI VE
TEMASIZ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN
UYGULANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA ESNEMEZ

ESKİŞEHİR 2023

**KARMAŞIK GEOMETRİLİ HASSAS KOMPONENTLERİN BOYUTSAL
DOĞRULANMASINA YÖNELİK TEMASLI VE TEMASSIZ ÖLÇÜM
YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI**

MUSTAFA ESNEMEZ

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR POYRAZ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2023

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

MUSTAFA ESNEMEZ'in KARMAŞIK GEOMETRİLİ HASSAS KOMPONENTLERİN BOYUTSAL DOĞRULANMASINA YÖNELİK TEMASLI VE TEMASSIZ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI başlıklı çalışması 04/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özgür POYRAZ

Üye : Doç. Dr. Koray KILIÇAY

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erdem ÖZYURT

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi MUSTAFA ESNEMEZ, KARMAşIK GEOMETRİLİ HASSAS KOMPONENTLERİN BOYUTSAL DOğRULANMASINA YÖNELİK TEMASLI VE TEMASSIZ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI VE KARşILAşTIRILMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR POYRAZ

ÖZET

KARMAŞIK GEOMETRİLİ HASSAS KOMPONENTLERİN BOYUTSAL DOĞRULANMASINA YÖNELİK TEMASLI VE TEMASSIZ ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI

MUSTAFA ESNEMEZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi ÖZGÜR POYRAZ

Yirmi birinci yüzyıl ile birlikte ortaya çıkan küreselleşmenin etkilediği faaliyetlerden bir tanesi ürün tedarik olmuştur. Bu doğrultuda farklı ülkeler arasında ürün alışverişi ve ticareti yapmak mümkün hale gelmiş ve buna ek olarak tasarım ve üretim gibi faaliyetler de farklı ülkeler arasında paylaşılmıştır. Bu sayede kaynak ve iş gücünün uygun olduğu ülkeler tarafından piyasaya ucuz ürün arzı sağlanmıştır. Günümüz dünyasında ürün maliyetlerine ek olarak tedarik sürelerinin de önemli olması daha hızlı imalat ve ölçüm yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu sebeple geçtiğimiz yüzyılda kavramsal araştırma seviyesinde olan üç boyutlu yazıcılar endüstride fonksiyonel parça üretiminde kullanılır hale gelmiştir. Uluslararası standartlarca eklemeli imalat olarak da adlandırılan söz konusu sistemlerin üretim hızlarını artırması, nihai ürünlerin kalite kontrol ve doğrulanmasında da benzer ihtiyacı doğurmuş ve optik, lazer veya X-ışını kullanan üç boyutlu temassız ölçüm yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Günümüzde ölçüm hızı ile öne çıkan bu yöntemlerden optik ve X-ışını kullanan bilgisayarlı tarama yöntemlerinin temel eksikliklerinden bir tanesi söz konusu yöntemlerle yapılacak ölçüm hassasiyetleri hakkındaki bilginin ve kabul görmüş standartların azlığıdır. Literatürdeki bilgi eksikliğini gidermek amaçlı gerçekleştirilmiş olan bu tez çalışması kapsamında kritik boyut ve şekil toleranslarına sahip numuneler tasarlanmıştır. Bu numuneler yüksek mukavemetli alüminyum alaşım malzemeden hem eklemeli imalat hem de konvansiyonel imalat yöntemleri ile üretilmiştir. Sonrasında hem uluslararası standartlarla kabul görmüş koordinat ölçme sistemleri ile hem de temassız optik ve X-ışını kullanan bilgisayarlı tarama ile kontrol edilmiştir. Toplam altmış iki farklı geometrik ölçü ve unsur için yapılan karşılaştırmalar sonucunda üç ölçüm yönteminin iki imalat yöntemine uygulanabilirlikleri ortaya konmuş, avantajlı ve zayıf yönleri vurgulanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Metroloji, Geometrik ürün özellikleri, Geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma, Koordinat ölçüm sistemleri, 3B optik tarama, X-ışını bilgisayarlı tomografi

ABSTRACT

APPLICATION OF CONTACT AND NON-CONTACT MEASUREMENT METHODS FOR DIMENSIONAL VERIFICATION OF PRECISION COMPONENTS WITH COMPLEX GEOMETRIES

MUSTAFA ESNEMEZ

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2023

Supervisor: Asst. Prof. Dr. ÖZGÜR POYRAZ

Product supply is an activity that has been affected by the emerging of globalization in twenty-first century. In this context, exchanging and trading goods between different countries have become possible, and in addition, activities such as design and production have been shared between different countries. In this way, cost-effective products have been supplied to the market by countries where resources and workforce are suitable. In today's world, the importance of lead times in addition to product costs has boosted the curiosity in faster manufacturing and measurement methods. For this reason, three-dimensional printers, which were at the conceptual research level in the last century, have become utilized in the production of functional parts in the industry. The increase in production speeds of these systems, also called additive manufacturing by international standards, has created a similar need for quality control and verification of final products, and three-dimensional non-contact measurement methods using optics, laser or X-ray have been started to be utilized. One of the main shortcomings of computerized scanning methods using optics and X-rays, which stand out today with their measurement speed, is the scarcity of information and accepted standards about the measurement accuracy to be made with these methods. Samples with critical size and shape tolerances were designed within the scope of this thesis study, which was carried out in order to eliminate the lack of information in the literature. These samples were produced from high strength aluminum alloy material by both additive manufacturing and conventional manufacturing methods. Afterwards, it was checked with both internationally accepted coordinate measuring systems and computer scanning using non-contact optics and X-rays. As a result of the comparisons made for a total of sixty-two different geometric dimensions and elements, the applicability of the three measurement methods to two manufacturing methods was revealed, and their advantages and weaknesses were emphasized.

Keywords: Metrology, Geometric product specifications, Geometric dimensioning and tolerancing, Coordinate measurement systems, 3D optic scanning, X-ray computed tomography

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde büyük katkıları olan, bilgi, birikimi ve tecrübesi ile yol gösteren, karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımcı olan ve değerli vaktini ayıran Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür POYRAZ'a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, her zaman yanımda olan değerli aileme; annem Sevim ESNEMEZ'e, kardeşim Esra Nur ESNEMEZ'e ve lisansüstü eğitime başlamak konusunda beni teşvik eden babam Münir ESNEMEZ'e sonsuz teşekkür ederim.

MUSTAFA ESNEMEZ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

MUSTAFA ESNEMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
GÖRSELLER DİZİNİ	XIX
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	4
1.2. Literatür Taraması	5
2. GEOMETRİK ÜRÜN ÖZELLİKLERİ.....	12
2.1. Temel Şartnameler: Temel Kabuller, İlkeler ve Kurallar	15
2.2. GPS Toleranslarının Sınıflandırılması.....	17
2.2.1. Şekil toleransları.....	19
2.2.1.1. Doğrusallık ve düzlemsellik.....	20
2.2.1.2. Dairesellik ve silindiriklik.....	23
2.2.1.3. Profil.....	26
2.2.2. Yönelim toleransları.....	29
2.2.2.1. Paralellik.....	30
2.2.2.2. Diklik.....	32
2.2.2.3. Açısallık.....	33

2.2.3. Yer toleransları.....	35
2.2.3.1. Konum.....	35
2.2.3.2. Eşmerkezlilik ve eşeksenlilik	36
2.2.3.3. Simetri	37
2.2.4. Salgı toleransları.....	38
2.2.4.1. Salgı.....	38
2.2.4.2. Toplam Salgı.....	40
3. ÖLÇÜM BİLİMİ	41
3.1. Ölçüm İzlenebilirliği ve Kalibrasyon	44
3.2. Ölçüm Belirsizliği.....	45
3.3. Üretim ve Ölçüm Bilimi Arasındaki İlişki	47
4. ÜÇ BOYUTLU ÖLÇÜM CİHAZLARI	49
4.1. CMM Cihazları	50
4.1.1. CMM cihazlarının genel özellikleri	50
4.1.2. CMM cihazı çeşitleri	51
4.1.2.1. Hareketli köprü tipi cihazlar	51
4.1.2.2. Dirsek tipi cihazlar.....	52
4.1.2.3. Kızak tipi cihazlar	53
4.1.2.4. Mafsal tipi cihazlar	54
4.2. Optik Ölçüm Cihazları	55
4.2.1. Optik ölçüm cihazlarının genel özellikleri	56
4.2.2. Optik ölçüm cihazı çeşitleri	59
4.2.2.1. Girişim tabanlı optik ölçüm cihazları	60
4.2.2.2. Uçuş süresi tabanlı optik ölçüm cihazları.....	61
4.2.2.3. Üçgenleme tabanlı optik ölçüm cihazları	62
4.3. X-ışını Bilgisayarlı Tomografi Cihazları.....	63
4.3.1. X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazının genel özellikleri	64
4.3.2. X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazlarının çeşitleri.....	65
4.3.2.1. Yelpaze ışın tarayıcıları	66
4.3.2.2. Konik ışın tarayıcıları.....	67
4.3.3. Temaslı ve temassız sistemlerin avantajları ve dezavantajları	68
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	74

5.1. Numune Tasarımı	74
5.2. Üretim Yöntemi.....	79
5.2.1. Talaşlı imalat.....	79
5.2.2. Eklemeli imalat	81
5.3. Ölçüm Yöntemi	83
5.3.1. Yüzey pürüzlülük cihazı	83
5.3.2. CMM.....	85
5.3.3. Optik üç boyutlu tarama	87
5.3.4. X-ray bilgisayarlı tomografi.....	92
6. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	97
6.1. Şekil Sorguları.....	98
6.1.1. Şekil sorgularına ait bulgular.....	98
6.1.2. Şekil sorgularına ait tartışmalar	100
6.2. Boyut Sorguları	101
6.2.1. Boyut sorgularına ait bulgular	101
6.2.2. Boyut sorgularına ait tartışmalar	103
6.3. Yer Sorguları.....	105
6.3.1. Yer sorgularına ait bulgular.....	105
6.3.2. Yer sorgularına ait tartışmalar	107
6.4. Yönelim Sorguları.....	108
6.4.1. Yönelim sorgularına ait bulgular.....	109
6.4.2. Yönelim sorgularına ait tartışmalar	110
6.5. Salgı Sorguları.....	112
6.5.1. Salgı sorgularına ait bulgular.....	112
6.5.2. Salgı sorgularına ait tartışmalar	113
6.6. Ölçüm Süreleri ve Veri Boyutları Arasındaki İlişki	114
7. SONUÇLAR	117
7.1. Sonuçlar	117
7.2. Öneriler	120
KAYNAKÇA.....	122
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. ISO GPS şartnameler matris modeli	14
Tablo 2.2. ISO GPS sisteminde geometrik karakteristikler için tanımlanmış göstergeler, referans gereklilikleri ve ilgili şartname maddeleri (ISO 1101)	19
Tablo 2.3. ISO GPS sistemine göre doğrusallık ve düzlemsellik sapması (ISO 12780-1) (ISO 12781-1)	21
Tablo 2.4. ISO GPS sistemine göre olan dairesellik ve silindiriklik sapması (ISO 12181-1) (ISO 12180-1).	24
Tablo 2.5. ISO GPS sistemine göre geçerli olarak uygulanabilir profil tolerans çeşitleri (ISO 1660)	27
Tablo 3.1. BIMP tarafından tanımlanan temel ölçüm birimleri (BIMP: SI Brochure, 2019)	42
Tablo 3.2. BIMP ölçüm bilimleri sözlüğündeki temel tanımlar ve açıklamalar (BIPM: JCGM 200, 2008)	43
Tablo 3.3. GUM kapsamında tanımlanmış ölçüm belirsizliği hesaplama adımları (Czichos, 2021)	46
Tablo 4.1. Parça unsurları, ölçümler ve veri değerlendirme için temaslı ve optik ölçüm sistemlerinin karşılaştırılması (GOM, 2022)	69
Tablo 4.2. Kullanılan sensörlerin sınırları (Leach, 2011)	70
Tablo 4.3. Köprü CMM ve optik tarama cihazının avantajları ve dezavantajları (Kupriyanov, 2018)	71
Tablo 4.4. X-ışını bilgisayarlı tomografi sistemlerinin avantajları ve dezavantajları	71
Tablo 5.1. Ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması için çalışmada kullanılan farklı unsurların sınıflandırılması, özellikleri ve miktarları	77
Tablo 5.2. Malzemenin seçiminde kullanılan değerlendirmeye alınan malzeme özellikleri	78
Tablo 5.3. Talaşlı imalat tezgahının teknik özellikleri	80
Tablo 5.4. Operasyon adımları, operasyona ait açıklamalar, takımlar ve üretim parametreleri	80
Tablo 5.5. Eklemeli imalat tezgahının teknik özellikleri	82

Tablo 5.6. Eklemeli imalat işleminde kullanılan parametreler.....	82
Tablo 5.7. Yüzey pürüzlülük ölçümü sırasında kullanılan parametreler	85
Tablo 5.8. Temaslı ölçüm sistemi için kullanılan CMM cihazının özellikleri.....	85
Tablo 5.9. CMM ölçüm yöntemine ait bilgiler	86
Tablo 5.10. Temassız ölçüm sistemi için kullanılan optik üç boyutlu tarama cihazının özellikleri.....	89
Tablo 5.11. Optik üç boyutlu ölçüm yöntemine ait bilgiler	91
Tablo 5.12. Temassız ölçüm sistemi için kullanılan bilgisayarlı tomografi cihazının özellikleri.....	93
Tablo 5.13. Bilgisayarlı tomografi ölçüm yöntemine ait bilgiler.....	95
Tablo 6.1. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi için pürüzlülük sorgularının sonuçlarının karşılaştırılması	97
Tablo 6.2. Şekil sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması	98
Tablo 6.3. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi şekil özellikleri için cihazların karşılaştırmalı özeti	99
Tablo 6.4. Boyut sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması	102
Tablo 6.5. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi boyut özellikleri için cihazların karşılaştırmalı özeti	103
Tablo 6.6. Yer sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması	106
Tablo 6.7. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi yer özellikleri için cihazların karşılaştırmalı özeti	107
Tablo 6.8. Yönelim sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması	109
Tablo 6.9. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi yönelim sapmaları için cihazların karşılaştırmalı özeti	110
Tablo 6.10. Salgı sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması	112
Tablo 6.11. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi salgı sapmaları için cihazların karşılaştırmalı özeti	113
Tablo 6.12. Cihazlar için dosya boyutlarına ait yaklaşık değerler	116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Serbest yüzey için farklı üç boyutlu optik ölçüm sistemlerinden elde edilen karşılaştırma verileri a) İkiz görüntü eşleme tabanlı sistem, b) Nesne görüntü eşleme tabanlı sistem, c) Saçak izdüşüm sistemi (Luhmann vd., 2008).....	5
Şekil 1.2. VideoAUDIT karşılaştırması sırasında kullanılan numuneler a) 300 mm cam ölçek, b) delik plaka; c) plastik kutular (Carmignato vd., 2010)	6
Şekil 1.3. Magics 20.04 kullanılarak düzeltilmiş bir kemik kütesine ait. STL dosyası (Dardzinska ve Fiedorczuk, 2020)	9
Şekil 1.4. Küre ve dikdörtgen parçalar için nokta sayısına bağlı olarak temaslı ve temassız ölçüm yöntemlerine ait ortalama ölçüm belirsizlikleri (Bastas, 2020)	10
Şekil 1.5. Parça yönelimine bağlı olarak tarama sonucu oluşturulan değerlerdeki sapmalar (Villarraga-Gomez vd., 2021)	11
Şekil 2.1. Yıllık olarak mevcut ve yeni oluşturulan ISO GPS şartnameleri (Humienny, 2021)	13
Şekil 2.2. Doğrusallık düzlemi, bu düzlem kullanılarak oluşturulan çıkarım çizgisi ve sınır bölge referans çizgileri (ISO 12780-1)	21
Şekil 2.3. Doğrusal unsurlar için referans ve yerel sapmalar (ISO 12780-1).....	21
Şekil 2.4. Gerçek yüzey, bu yüzey kullanılarak oluşturulan çıkarım yüzeyi ve sınır bölge referans düzlemi (ISO 12781-1)	21
Şekil 2.5. Ortalama ve en küçük karelere göre hesaplanmış referans ve yerel sapmalar (ISO 12781-1).....	22
Şekil 2.6. Çizgisellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)	22
Şekil 2.7. Düzlemsellik toleransının çizim üzerinde tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	23
Şekil 2.8. Erkek ve dişi dairesel unsurlar için yerel dairesellik sapmaları (ISO 12181-1).....	25
Şekil 2.9. Erkek ve dişi silindir unsurlar için yerel silindiriklik sapmaları ve genel terimler (ISO 12180-1)	25
Şekil 2.10. Dairesellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)	26

Şekil 2.11. Silindiriklik toleransının çizim üzerinde tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	26
Şekil 2.12. Referanstan bağımsız çizgisel profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	28
Şekil 2.13. Referanstan bağımsız yüzey profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	28
Şekil 2.14. Referansa bağlı çizgisel profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	29
Şekil 2.15. Referansa bağlı yüzey profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	29
Şekil 2.16. Düzleme göre eksen paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	30
Şekil 2.17. Eksene göre eksen paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	31
Şekil 2.18. Düzleme göre eksen paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	31
Şekil 2.19. Düzleme göre eksen-dizisi paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	31
Şekil 2.20. Eksene göre düzlem paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	31
Şekil 2.21. Düzleme göre düzlem paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	31
Şekil 2.22. Eksene göre eksen diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)	32
Şekil 2.23. Düzleme göre eksen diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	32
Şekil 2.24. Düzleme göre eksen diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	33
Şekil 2.25. Eksene göre düzlem diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması. (ISO 1101).....	33
Şekil 2.26. Düzleme göre düzlem diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	33

Şekil 2.27. Eksene göre eksen açısallık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	34
Şekil 2.28. Referansa göre eksen açısallık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	34
Şekil 2.29. Eksene göre düzlem açısallık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	34
Şekil 2.30. Düzleme göre düzlem açısallık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	34
Şekil 2.31. Referansa göre nokta konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	36
Şekil 2.32. Referansa göre eksen konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	36
Şekil 2.33. Referansa göre düzlem konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	36
Şekil 2.34. Referansa göre düzlem konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	36
Şekil 2.35. Eksene göre nokta eşmerkez toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	37
Şekil 2.36. Eksene göre eksen eşeksenlilik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	37
Şekil 2.37. Düzleme göre düzlem simetri toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	38
Şekil 2.38. Referansa göre dairesel salgı toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	39
Şekil 2.39. Eksene göre eksenel salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101)	39
Şekil 2.40. Eksene göre yönden bağımsız salgı toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101).....	39
Şekil 2.41. Eksene göre yöne bağımlı salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101).....	39
Şekil 2.42. Referansa göre dairesel toplam salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101).....	40

Şekil 2.43. Referansa göre eksenel toplam salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101).....	40
Şekil 3.1. BIPM tarafından tanımlanan eski ve güncel uluslararası birim sistemleri için temel birimler arasındaki ilişkinin tanımlanması.....	43
Şekil 3.2. Ölçümler için izlenebilirlik zinciri tanımı (Czichos, 2011)	44
Şekil 3.3. Üretim alanında gerçekleştirilen ölçüm yöntemlerinin yıllar içinde gelişimi (Stojkic vd., 2020).....	48
Şekil 4.1. Genel olarak koordinat ölçüm sistemlerinde kullanılan ölçüm sisteminin bir CMM cihazı için tanımı (Hocken ve Pereria, 2011)	49
Şekil 4.2. Koordinat ölçüm sisteminde kullanılan farklı tip ölçüm cihazları (Hocken ve Pereria, 2011)	51
Şekil 4.3. Mafsal kol CMM cihazının genel şekli ve cihaz için tanımlanan eksen ve enkoderlerin yerleri (Romdhan vd., 2014)	55
Şekil 4.4. Üçgenleme tabanlı aktif optik görüntüleme işlemi yapan sistemlerinin temel çalışma ilkesi (Gao vd., 2015)	56
Şekil 4.5. Görüntü işleme sistemlerindeki temel bileşenler (Osten, 2008)	57
Şekil 4.6. Uzaklık görüntüsü analizi için düzenlenmiş diyagram (Hoffman ve Jain, 1987)	58
Şekil 4.7. Optik ölçüm yöntemlerinin genel görüntü işleme adımları (Zuo vd., 2022)	58
Şekil 4.8. Optik mesafe ölçüm yöntemlerinin sınıflandırılması (Beraldin vd., 2012)	59
Şekil 4.9. Ölçüm mesafesi ve hassasiyet değerine göre farklı optik ölçüm yöntemlerinin performans değerlerinin karşılaştırılması (Se ve Pears, 2012)	60
Şekil 4.10. Girişim tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Teizer ve Kahlmann, 2007)	61
Şekil 4.11. Uyarlanmış uçuş süresi tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Boehler ve Marbs, 2002)	62
Şekil 4.12. Üçgenleme tabanlı süresi tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Harding, 2013)	62
Şekil 4.13. Üçgenleme tabanlı süresi tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Willomitzer, 2019).....	63

Şekil 4.14. X-ışını tomografik ölçüm sistemlerin çalışma ilkesi (Ametova vd., 2018)	64
Şekil 4.15. Genel x-ışını tomografik ölçüm çalışması adımları (Dewulf vd., 2013).....	65
Şekil 4.16. Soldan sağa, yukarıdan aşağıya birinci, ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci nesil klinik tomografi cihazları (Thompson ve Leach, 2018)	66
Şekil 4.17. Yelpeze ışın tarayıcısı bilgisayarlı tomografi sistemi çalışma ilkesi (Lifton, 2015)	67
Şekil 4.18. Konik ışın tarayıcısı bilgisayarlı tomografi sistemi çalışma ilkesi (Lifton, 2015)	68
Şekil 4.19. XBT sistemleri için ölçüm belirsizlikleri (Chiffre vd., 2014)	72
Şekil 4.20. CMM, OPT, XBT için ölçüm süreleri ve unsur sayısı arasındaki ilişki (Chiffre vd., 2014)	72
Şekil 4.21. Farklı ölçüm sistemlerinde yüzey topografyasında oluşabilecek farklı hatalar kaynaklı dezavantajlar (Carmignato ve Savio, 2011)	72
Şekil 5.1. Eklemeli imalat numune parçasının bilgisayar destekli tasarım izometrik görüntüleri	74
Şekil 5.2. CAD programı yardımı ile çizilen izdüşüm ve izometrik görüntüleri içeren teknik resim	75
Şekil 5.3. Balonlanmış teknik resim	76
Şekil 5.4. Temel proses parametreleri (Poyraz, 2018)	81
Şekil 5.5. ISO 4287 şartnamesine göre sırasıyla Ra, Rt ve Rz yüzey pürüzlülük parametreleri	84
Şekil 5.6. Yazılım tarafından birleştirilmiş üç boyutlu numune görüntüsü.....	91
Şekil 5.7. Eklemeli imalat numunesinin OPT sistemi ile oluşturulan yüzey renk haritası karşılaştırması	92
Şekil 5.8. Histogram görüntüsü, Pembe bölgeler hava boşluğu ve mavi bölgeler parçayı temsil etmektedir (Kowaluk, 2017).....	94
Şekil 5.9. XBT sistemi ile eklemeli imalat numunesine ait hacimsel nesne görüntüsü.....	95
Şekil 5.10. Eklemeli imalat numunesinin XBT sistemi ile oluşturulan yüzey renk haritası karşılaştırması	96
Şekil 6.1. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre şekil sapmaları	99

Şekil 6.2. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre şekil sapmaları	99
Şekil 6.3. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre boyut sapmaları	102
Şekil 6.4. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre boyut sapmaları	103
Şekil 6.5. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yer sapmaları	106
Şekil 6.6. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yer sapmaları	106
Şekil 6.7. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yönelim sapmaları	109
Şekil 6.8. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yönelim sapmaları	110
Şekil 6.9. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre salgı sapmaları	112
Şekil 6.10. Talaşlı ve eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre salgı sapmaları	113
Şekil 6.11. Programlama kullanılmadan yapılan ölçümlere ait süreler	115
Şekil 6.12. Programlama kullanarak yapılan ölçümlere ait süreler	115

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 4.1. Köprü CMM cihazı (Hexagon Köprü CMM, 2022)	52
Görsel 4.2. Dirsek CMM cihazı (Hexagon Dirsek CMM, 2022).....	53
Görsel 4.3. Kızak CMM cihazı (Hexagon Kızak CMM, 2022).....	54
Görsel 5.1. Talaşlı imalat numunesinin üretilmesi için kullanılan tezgâh	79
Görsel 5.2. Talaşlı imalat numunesinin üretilmesi için operasyon sırasında alınmış bir görüntü	81
Görsel 5.3. Eklemeli imalat numunesinin üretilmesi için kullanılan eklemeli imalat tezgâhı (EOS, 2022).....	82
Görsel 5.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (MAHR, 2022)	84
Görsel 5.5. Temaslı ölçüm sistemi kullanılan cihaz ve mengene ile bağlama yöntemi	86
Görsel 5.6. CMM ölçüm programı için ölçüm sonrasında yazılım arayüzü	87
Görsel 5.7. Developer uygulaması için kullanılan TiO ₂ – alkol çözeltisi ve havalı boya tabancası.....	88
Görsel 5.8. Parça yüzeyinin kaplanması ve referans noktaların yerleştirilmesi	89
Görsel 5.9. Optik tarama sistemi ve görüntü parçanın taranması	90
Görsel 5.10. XBT sistemi ile parçanın ölçümü için kullanılan düzen	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CMM	: Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçüm Cihazı)
CMS	: Coordinate Measuring System (Koordinat Ölçüm Sistemi)
OPT	: Optik tarama
XBT	: X-ray Bilgisayarlı Tomografi
XCT	: X-ray Computed Tomography
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
ISO/TC	: International Organization for Standardization / Technical Comitee (Uluslararası Standartlar Organizasyonu / Technical Committee)
GPS	: Geometrical Product Specifications (Geometrik Ürün Özellikleri)
GD&T	: Geometric Dimensioning and Tolerancing (Geometrik Boyutlandırma ve Toleranslandırma)
TPS	: Technical Product Specifications (Teknik Ürün Özellikleri)
TPD	: Technical Product Documentation (Teknik Ürün Dokümanları)
LS	: Least Square Method (En Küçük Kareler Yöntemi)
BIPM	: International Bureau of Weights and Measures (Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu)
SI	: International System of Units (Uluslararası Birimler Sistemi)
CGPM	: General Conference on Weights and Measures (Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı)
NMI	: National Metrology Institute (Ulusal Metroloji Enstitüleri)
GUM	: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Ölçüm Belirsizliğinin İfadesi Rehberi)
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IFCC	: International Federation of Clinical Chemistry (Uluslararası Klinik Kimya Federasyonu)
ILAC	: International Laboratory Accreditation Cooperation (Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği)
PUMA	: Procedure for the Uncertainty Management (Belirsizlik Yönetimi Prosedürü)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
STL	: Standard Triangle Language (Standart Üçgen Dili)
LPBF	: Laser Powder Bed Fusion (Lazer Toz Yatağı Füzyonu)
mm	: Milimeter (Milimetre)
µm	: Micrometer (Mikrometre)
WC	: Tungsten Carbide (Tungsten Karbür)

PBF	:	Powder Bed Fusion (Toz Yatak Füzyon Birleştirme Ergitme)
Mesh	:	Örgüsel Ağ
MPE	:	Maximum Permissible Error (İzin Verilen En Yüksek Hata)
3B	:	Üç boyutlu
dk	:	Dakika
Developer	:	Geliştirici



1. GİRİŞ

Günümüzde, küreselleşen dünyada, kısa ürün yaşam döngüleri ve büyüyen ürün çeşitleri gibi sorunları yönetebilmek, piyasaya ucuz ürün arzı sağlamak için ülkeler arasındaki artan ürün alışverişi ve ticaret ilişkileri ile imalat faaliyetleri için ihtiyaç duyulan süreçler farklı ülkeler arasında paylaşılarak, ürüne ait teknik bilginin en doğru şekilde aktarılmasının oldukça önemli olduğu ve yüksek maliyet ve zaman verimliliğine sahip ürün geliştirme ve üretim süreçlerini içeren bir ticaret ortamına ihtiyaç oluşmuştur. Hızla gelişen imalat yöntemleri ve makine yetenekleri ile pazardaki ürünlerin işlevsel ve görsel özelliklerine olan talep giderek artmıştır. Küresel pazardaki rekabeti arttıran bu süreç, ürünlerin teknik gerekliliklere uygun olarak üretilmesi ihtiyacını ve tanımlanan tolerans aralığının azalmasına sebep olarak üretilen ürünlerin kalitesinin giderek artmasının yolunu açmıştır. Böylece kalite süreçlerine bakış açısı, üreticinin ürün kalitesini belirlemesi yerine, pazarın ve müşteri ihtiyaçlarının kalite seviyesini belirlediği bir sürece doğru gelişmiştir. Pazarın karmaşık ihtiyaçları ve üreticiler arasındaki artan rekabet ile birlikte ürünlerin kalite kontrol süreçlerine olan ihtiyaç çeşitli iş kollarında giderek daha önemli bir noktaya gelmektedir.

Bu doğrultuda, ürünün yaşam döngüsü boyunca gerçekleşen ürün geliştirme, tasarım, imalat, ölçüm, kabul, kullanım, bakım ve hurdaya çıkarma gibi süreçler için ürünlerin özelliklerinin bir standartlar dizisi çerçevesi ile tanımlı olduğu geometrik ürün özellikleri (GPS) sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem, ürün boyutu, geometrik form ve yüzey görünümü gibi birçok konuyu kapsayacak şekilde ürün özelliklerini tanımlar. Bu açıdan bakıldığında, GPS, modern üretim bilgisi ve kalite yönetimi için önemli bir teknik bilgi birikimidir. Bu birikim ile üretim faaliyetlerinin küreselleşmesi ve uluslararası ticaretteki bazı teknik engellerin etkili bir şekilde ortadan kaldırılmasının yolu açılmıştır. Ürün özelliklerinin en doğru şekilde tanımlanmasının yanında küresel pazarda ürünlerin değiştirilebilirlik özelliğini sağlamak için izlenebilirlik ve ölçüm belirsizliği alanlarında iyi tanımlanmış ölçüm süreçlerine ihtiyaç vardır. Küresel olarak belirlenmiş standartlar çerçevesinde üretilmiş olan ürünler için ihtiyaç duyulan doğruluk, kesinlik ve değiştirilebilirlik gibi temel özellikleri sağlamak için izlenebilir ölçüm sonuçları ile parçaların doğrulanması oldukça önemlidir. Bu doğrulama işlemi için koordinat ölçüm teknolojisi, modern makine imalatı alanında, özellikle havacılık, otomobil imalatı, kalıp işleme ve diğer sanayilerde bulunan en yaygın ve temel ölçüm yöntemidir (Cheng, et al., 2018).

Bu boyutsal özelliklerin doğrulanması için geçtiğimiz yüzyılda kumpas, mihengir gibi çeşitli geleneksel ölçüm cihazları kullanmış olsa da günümüzde bu cihazların yerine prob yardımı ile parça yüzeyinden noktaların uzaysal koordinat bilgisini toplayan ve bu bilgiyi matematiksel olarak işleyen koordinat ölçme makinesi gibi bilgisayarlı modern sistemler geçmiştir (Acko, 2007). Ürün özelliklerini tanımlayan bu geometrik ve boyutsal ölçümler için kullanılan koordinat ölçüm cihazları (CMM) ölçüm alanındaki en eski ve en önemli dal olan ve aynı zamanda modern bilim ve teknolojinin gelişiminin temeli olan modern ölçüm biliminin temelidir. Günümüzde, farklı alanlardaki geometrik ölçümlerin gerçekleştirilmesi için çeşitli ölçüm cihazları ve yöntemleri geliştirilmesine rağmen koordinat ölçüm sistemleri şüphesiz en güvenilir yöntemdir (Li, et al., 2017). Bu ölçüm cihazlarının geleneksel cihazlara göre en önemli özelliği çeşitli boyutsal ve geometrik unsurları, insan hatasına, oldukça düşük sürelerde ve yüksek hassasiyet ile ölçebilmesi olarak sıralanabilir (De Aquino Silva & Burdekin, 2002). Koordinat ölçüm cihazları (CMM), çeşitli geometrik özellikleri yüksek doğruluk ve hassasiyette ölçebildikleri için endüstriyel metroloji alanında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır fakat CMM cihazları genellikle temaslı olarak çalışan mekanik prop sistemleri ile donatılmasına rağmen temas zorunluluğu ile gelen sınırlamalar sebebi ile optik sistemlerin üç boyutlu koordinat ölçüm sistemlerinde kullanılması da giderek yaygınlaşmaktadır (Savio, De Chiffre, & Schmitt, 2007).

Sürekli olarak artan kalite, esneklik ve hız talepleri ile değişen ve gelişen üretim ortamı nedeniyle geleneksel metroloji yöntemlerinin kullanımı ile ihtiyaçları karşılamak için giderek daha zorlaşmaktadır. Seri üretim ürünler için işlevsel gereksinimler için ihtiyaç duyulan boyutsal hassasiyet, üretim sınırlarına yaklaşmakta olduğundan dolayı bu süreçlerin eksiksiz bir şekilde doğruluk açısından boyutsal kontrol altında tutulması ihtiyacı doğmuştur. Temassız yöntemler, temaslı yöntemlere göre parçaya temas etmeden, daha kısa sürede daha fazla yüzey verisi oluşturabilmesi ve üretim alanın da kullanılabilmesi sebebi ile oldukça önemli doğrulama yöntemleridir (Schwenke, Neuschaefer-Rube, Pfeifer, & Kunzmann, 2002). Yüksek parça yüzeyi verisi oluşturabilen bu temassız ölçüm cihazları ile oluşturulan nokta bulutu verisinin STL formatına çevrilmesi ile ihtiyaca bağlı olarak uygun yazılımlar kullanılarak ölçüm sonuçlarını raporlama, CAD ile karşılaştırma ya da doğrudan oluşturulan veriyi tersine mühendislik çalışmaları için kullanmak mümkündür (Poyraz, Yılmaz, & Yasa, 2014). Bu temassız optik ölçüm yöntemlerinde metal yüzeyin parlaklığı, kamera açısı sebebi ile

parça yüzeyine kısıtlı erişimin olması, ışık ve gölge bölgeler arasındaki dengesizlik kaynaklı süreklilik hataları oluşabildiği görülmüştür (Ören, Yasa, Solakoglu, & Poyraz, 2014). Bu sorunları çözmek için geliştirilen developer uygulamaları ise detay bölgelere uygulandığında ölçüm sonuçların ve hassasiyetin etkilediği görülmüştür (Palousek, et al., 2015).

Bu bilgiler ışığında, günümüzde metroloji alanında giderek yaygınlaşmakta olan optik sistemler, kısa sürede ölçüm yüzeyine ait yüksek miktarda veri oluşturabilmesi, temassız olması sebebi ile prop yükü sebebi ile oluşan parça deformasyonunu ortadan kaldırması ve üretim ortamında yapılan kontrollere uygun olması gibi avantajlar sebebi ile öne çıkmaktadır. Ancak bu sistemlerde, temaslı yöntemlerine kıyasla ölçüm izlenebilirliğinin sağlanması ve ölçüm belirsizliklerinin açıkça tanımlı olması oldukça önemlidir. Bu sistemlerde ise izlenebilirlik göreve özel kalibrasyonlar ile sağlanabilmesine rağmen bu sistemlerdeki izlenebilirlik ve belirsizlik konuları için henüz küresel standartlar geliştirilmiş değildir (Wilhelm, Hocken, & Schwenke, 2001). Bu doğrultuda, optik ölçüm sistemleriyle geliştirilen yeni çözümler, parça geometrisini nispeten iyi bir hassasiyetle ve tarama süresiyle yakalamayı başarmıştır fakat bu sistemlerde parça yüzeyinin kaplanması ve referans noktaların işaretlenmesi de dahil olmak üzere elverişsiz bir hazırlık süresi olduğundan dolayı bu sisteme yeni alternatifler geliştirmek adına başka çözümler araştırılmaya devam edilmiştir. Bu amaç ile tıbbi görüntüleme ve tahribatsız muayene alanında kullanılan x-ışını bilgisayarlı tomografi teknolojisi, sürekli artan imalat endüstrisi gereksinimlerini karşılamak ve eklemeli imalat ile üretilen parçaların iç ve dış yapılarına dair boyutsal özelliklerini kontrol edebilmek için ticari metroloji cihazlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

Son yıllarda, eklemeli imalat gibi üretim teknolojilerindeki gelişmeler nedeniyle serbest biçimli yüzeylere ve doğrulanması gereken çok sayıda farklı özelliğe sahip karmaşık parçaların üretiminin hızlanması ile ürün özelliklerinin uygunluğunun her geliştirme ve üretimin aşamasında doğru olarak, zamandan tasarruf sağlayan ölçüm yöntemleri ile test edilmesi, hurda ve üretim maliyetlerin azaltılması için adına bilgisayarlı tomografi sistemleri boyutsal ölçüm alanındaki kullanım alanı genişlemeye başlamıştır. Bilgisayarlı tomografi, çok yönlü doğrulama görevi ve boyutsal ölçümlerin yanında tahribatsız olarak parçanın iç ve dış yapısına ait bütünsel hacim verisini oluşturmak için tersine mühendislik uygulamaları için de kullanılabilir çok amaçlı sistemler olarak geliştirilmiştir (Carmignato, Dewulf, & Leach, 2018). Teknolojide

yaşanan gelişmeler ile birlikte uzun yıllardır medikal gibi alanlarda kullanılan bilgisayarlı tomografi sistemlerinin boyutsal ölçüm alanında kullanılmaya başlanması ile birlikte parçanın iç ve dış yapısına dair veri üretmek mümkün hale gelmiştir. Parçanın iç ve dış yapısına ait özellikleri sunan bu sistemler, sanayide oldukça yaygın olarak kullanılan tersine mühendislik çalışmaları için oldukça önemlidir. Ayrıca parça teknik özelliklerini içeren verinin mevcut olmaması durumunda da bu teknik bilginin tekrar oluşturulması için oldukça önemli bir yere sahiptir (Akdoğan, Vanlı, & Durakbasa, 2019). Fakat günümüzde, bilgisayarlı tomografi sistemlerinde ölçüm sisteminin karmaşık yapısı sebebi ile doğrulanmış boyutsal ölçümlerin temeli olan SI sistemine göre izlenebilir ölçümlerin gerçekleştirilmesi ve kalibrasyon süreçleri günümüzde tam anlamıyla çözülememiş araştırma konularıdır (Drégelyi-Kiss & Durakbasa, 2018).

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

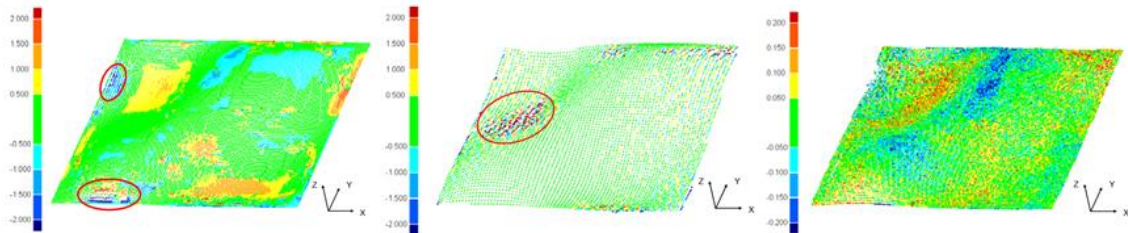
Bu çalışmanın ana amacı, farklı imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş olan numunelerdeki geometrik ve boyutsal unsurların temaslı ve temassız ölçüm yöntemleri ölçülerek sistemlerin performansının karşılaştırılmasıdır. Literatürdeki bu eksikliği gidermek amacı ile talaşlı ve eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş olan küçük boyutlu ve yüksek hassasiyetli numune parçalar temaslı ölçüm yöntemleri ile kalibre edilmiştir. Ardından numune parçalara optik tarama ve bilgisayarlı tomografi sistemleri uygulanmıştır. Malzeme ve yöntem ile detaylı olarak tanımlanan bu çalışma ile elde edilen bulgular, sonuçlar ve tartışmalar ile birlikte farklı sistemler ile gerçekleştirilen boyutsal ve geometrik sorgulamaların karşılaştırılmasına ve yorumlanmasına yer verilmiştir. Bu çalışmanın amacı kapsamında konu üzerine yapılmış olan literatürdeki yayınlar incelendikten sonra sırasıyla yapılacak deneysel çalışmanın yorumlanması için oldukça önemli olan aşağıdaki konulara değinilecektir.

- Üretilen parçaların değiştirilebilirliği ve montajı için oldukça önemli olan geometrik ürün özellikleri incelenecektir.
- Boyutsal ölçümleri gerçekleştirebilmek için gerekli olan ölçüm bilimin temelleri ve ayrıca üretim ve ölçüm arasındaki ilişki gözden geçirilecektir.
- Boyutsal ölçüm alanında, sanayide yaygın kullanılan ölçüm cihazlarının çalışma ilkeleri, çeşitleri, avantajları ve dezavantajları gözden geçirilecektir.

- Ölçüm sistemi performansı karşılaştırması için bir numune geliştirilecektir. Bu numune talaşlı ve eklemeli imalat ile üretilcektir ve CMM ile kalibre edilecektir.
- Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş kalibrasyonlu numuneler sırasıyla optik tarama ve bilgisayarlı tomografi yöntemleri ile ölçülecektir.
- Yapılan bu çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. Bu doğrultuda sonuçlar ve bulgular paylaşılacaktır.

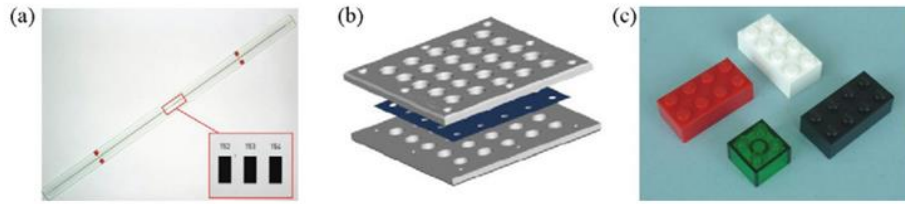
1.2. Literatür Taraması

Serbest şekilli yüzeylerin ölçümü için optik üç boyutlu ölçüm cihazlarının önemli oldukça fazladır. Luhmann ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada farklı yöntemler kullanan optik ölçüm cihazlarına ait hassasiyetler, temaslı ölçüm cihazları ile doğrulanmış serbest bir yüzey referans parçası kullanılarak karşılaştırılmıştır. CMM cihazı ile oluşturulan üç boyutlu koordinat haritası, matematiksel olarak uygun eğrilere dönüştürülerek parça yüzeyine ait üç boyutlu veri oluşturulmuştur. Bu veri ardından üç boyutlu ölçümlerde referans olarak kullanılacak bilgisayar destekli tasarımına dönüştürülmüştür ve Şekil 1.1 ile gösterildiği üzere bir yüzey karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan üç saçak izdüşüm sistemi, iki ikiz görüntü eşleme tabanlı sistem ve bir nesne çoklu görüntü eşleme tabanlı sistemin karşılaştırılmasında elde edilen sonuçlara göre doğruluğu en yüksek ölçüm sonuçları, en fazla 0,085 mm ile saçak izdüşüm sistemleri kullanılarak elde edilmiştir. Nesne görüntü eşleme tabanlı sistemleri için 0,773 mm değerine kadar sapmalar görülebilirken, ikiz görüntüleme eşleme tabanlı sistemlerde ise yüksek belirsizliğe sebep olan 0,593 mm değeri hariç tutulduğunda, genel olarak 0,102 mm seviyesine kadar sapmalar görülmektedir. Bu sonuçlara göre saçak izdüşüm sistemleri en doğru sonuçlara ulaşılabilen sistemler olarak görülmüştür (Luhmann, Bethmann, Herd, & Ohm, 2008).



Şekil 1.1. Serbest yüzey için farklı üç boyutlu optik ölçüm sistemlerinden elde edilen karşılaştırma verileri
a) İkiz görüntü eşleme tabanlı sistem, b) Nesne görüntü eşleme tabanlı sistem, c) Saçak izdüşüm sistemi (Luhmann vd., 2008)

Carmignato ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, 2007 ve 2009 yılları arasında Avrupa'daki orta ölçekli kurumların katıldığı 21 optik ölçüm cihazı ile yapılan karşılaştırma çalışmasının özeti verilmiştir. A, B ve C olarak sırasıyla 0-3 μm , 3-4 μm ve 4 μm üzeri ölçüm yeteneğine sahip olacak şekilde kümelenen optik sensörlü CMM cihazları ve lazer üçgenleme yöntemi kullanan cihazlar, Şekil 1.2 ile gösterilen cam cetvel, delikli plaka ve plastik kutu parçalarını ölçerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Cam cetvel ölçümleri için katılımcıların uzunluk ölçümlerini ve bağlı belirsizlik ölçümlerini 20 μm sapmaya kadar rahatlıkla gerçekleştirebildikleri görülmüştür. Delikli plaka için ise uzunluk ölçümleri cam cetvel ölçülerini doğrularken, aynı delik ölçüleri için uzunluktan bağımsız 25 μm değerine kadar hataların oluşabildiği görülmüştür. Plastik kutu parçalarda ise birçok farklı hatadan dolayı yüksek seviyede sapmalar görülmüştür fakat üçgenleme yöntemindeki sonuçların birbirine çok yakın ve 15 μm sapması olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, boyutsal ölçüm sonuçlarının kalitesinin CMM uzunluk ölçüm performansından büyük ölçüde bağımsız olduğunu ve ölçüm belirsizliğinin uygun olarak belirlenmesine bağlı olduğu görülmüştür (Carmignato, Voltan, & Savio, 2010).



Şekil 1.2. VideoAUDIT karşılaştırması sırasında kullanılan numuneler a) 300 mm cam ölçek, b) delikli plaka; c) plastik kutular (Carmignato vd., 2010)

CMM, üç boyutlu optik tarayıcı ve x-ışını bilgisayarlı tomografi ile yapılan boyutsal ölçüm yöntemlerini değerlendirmek için Gapinski ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada alüminyum kullanılarak üretilmiş bir numune parça bu yöntemler ile ölçülmüştür. Ardından referans değer olarak kabul edilen CMM cihazına göre diğer yöntemlerden elde edilen konum, açı, düzlemsellik ve paralellik gibi sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre farklı yöntemler ile tüm sonuçlar birleştirildiğinde ölçümlerdeki farkın en fazla 0.05 mm olduğu görülmüştür. Yüzey üzerinden alınan ölçümlerde iç küre için farkın 0,013 mm ve konum için ölçülerin, özellikle Z ekseninde, 0,05 seviyesinde olduğu görülmüştür. Temassız yöntemler tüm yüzey üzerinden noktaların alınmasına izin verdiği için temaslı yöntemlere göre düzlemsellik özelliği için

daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm yöntemler, tanımlanan unsurların ölçümü için gerekli yeteneğe sahip olmasına rağmen hangi yöntemin kullanılacağı ihtiyaca göre değişecektir (Gapinski, Wieczorowski, Marciniak-Podsadna, Dybala, & Ziolkowski, 2014).

Günümüzde, kompozit malzemelerinin tahribatsız muayenesi için x-ışını, ultrasonik, radyografi ve girdap akımı gibi yöntemlerden x-ışını yöntemi, boyutsal ölçümlerin de etkin hale gelmesi ile birlikte daha fazla tercih edilir bir yöntem haline gelmiştir. Kurra ve arkadaşları, ultrasonik ve geleneksel yöntemler ile delinmiş karbon fiber takviyeli polimer iş parçalarının x-ışını ile ölçümü sonrasında toplanan veriler bilgisayar ortamında analiz edilerek yeniden oluşturulmuştur. Her iki malzeme için de oluşturulan hacimsel nesneler incelendiğinde delik giriş ve çıkışlarında bulunan 4 mm yükseklikteki bölümde katman ayrışması sebebi ile ölçülerin bozulduğu görülmüştür. Değerlendirmeye göre dairesellik ölçülerinin, sırasıyla 0,5 mm ve 2 mm hatalı olduğu bulunmuştur. Ayrıca konum ölçülerinin ise sadece ultrasonik yöntem için 0,1 mm ile sınırlar içinde olduğu görülmüştür. Bu yöntemin, tolerans büyüklüğüne ve ihtiyaca göre tahribatsız bir şekilde parçanın boyutsal analizini yapabileceği ön görülmektedir (Kourra, et al., 2015).

Bir adım silindir parçasında Gapinski ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, silindire ait çap, dairesellik, silindirliklik, salgı, pah, radyus ve uzunluk gibi çeşitli ölçüleri sırasıyla lazer profil ölçüm, temaslı dairesellik ölçüm, kontür, koordinat ölçüm ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazı ile ölçülmüştür ve bu cihazların değerleri birbirine göre karşılaştırılmıştır. Farklı ölçüm yöntemleri arasında çaplar için 0,012 mm, dairesellik için 0,012 mm, uzunluk için 0,080 mm, radyuslar için 0,051 mm fark bulunmuştur (Gapinski, Zachwiej, & Kolodziej, 2015).

Gapinski ve arkadaşları tarafından eklemeli imalat parçalarında x-ışını bilgisayarlı tomografi uygulamalarını değerlendirmek için yayınlanan makalede eklemeli imalat yöntemlerinin doğrulanması için tomografi yönteminin kullanımı değerlendirilmiştir. ABS malzemesinden eklemeli imalat ile üretilen numune parça temaslı koordinat ölçüm cihazı ve tomografi yöntemleri ile ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem ile oluşturulan sonuçlara göre kademeli adım yay silindir referans parçasında ve adım referans parçasındaki sapmaların sırasıyla 0,1 mm ve 0,04 mm altında olduğu görülmüştür. Ayrıca delikli plaka parçası üzerinde yapılan tarama işlemi ile bilgisayar destekli tasarım karşılaştırması $\pm 0,3$ mm değerinden daha büyük sapmaların olmadığı

gözlemlenmiştir. Genel olarak, ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre her iki ölçüm yönteminin boyutsal kontrol işlemleri için uyumlu olabileceğini göstermektedir (Gapinski, Janicki, Marciniak-Podsadna, & Jakubowicz, 2016).

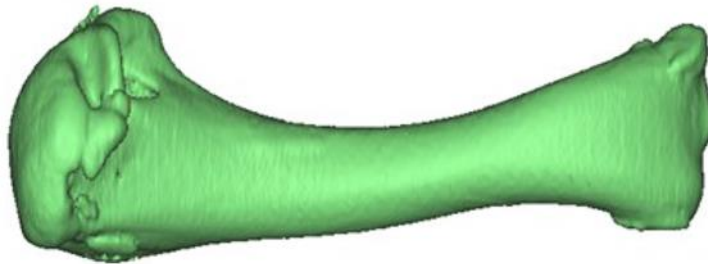
Eklemeli imalat yöntemleriyle oluşturulan parça içine gömülü dahili özelliklerin bilgisayarlı tomografi ile incelenmesi için Kim ve arkadaşları yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Deney sırasında kullanılan lazer toz yatağı füzyonu (LPBF) eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ø10 mm, Ø6 mm ve Ø5 mm boyutlarındaki silindirlerin içindeki sırasıyla 5 mm küp, 2 mm küp ve 0,2 – 2 mm çaplı küreler unsurlar incelenmiştir. Bilgisayar destekli tasarım ile yapılan karşılaştırma sonuçlarına göre en fazla $\pm 0,1$ mm seviyesine kadar saplamalar görülmüştür. Bir tomografi sistemi için belirsizlikler genellikle 10 μ m seviyesinde olduğundan dolayı, genel tolerans aralığı ± 50 μ m seviyesinde olan eklemeli imalat parçaları için bu yöntem oldukça yeterlidir (Kim, Villarraga-Gómez, & Moylan, 2016).

Bilgisayarlı tomografi uygulamalarında yüzey pürüzlülüğünü araştırmak için Aloisi ve Carmignato tarafından yayınlanan bir çalışma, temaslı ve temassız ölçüm yöntemlerinde, 30 μ m ile 125 μ m arasındaki yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip doğrulanmış üç farklı eklemeli imalat parçasının etkisini karşılaştırmalı yöntemler ile değerlendirmiştir. Yerel gelişmiş yüzey belirleme yöntemi kullanılarak değerlendirme yapıldığı için hem küçük hem de büyük pürüzlülük değerlerinin etkisi hesaba katılmıştır. Deneysel sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün, cihazların farklı ölçüm ilkeleri nedeniyle dış ve iç çapların sırasıyla referans koordinat ölçüm makinesi değerlerinden yarı Rz daha küçük ve daha yüksek olarak ölçüldüğü ve ölçümlerde sistematik bir hataya yol açtığını göstermektedir (Aloisi & Carmignato, 2016).

Koordinat ölçüm cihazları, ürünlerin boyutsal doğrulaması için aktif olarak kullanılan doğru ve güvenilir ölçüm cihazlardır. Bilgisayarlı tomografi ise dokunarak ulaşması zor dahili özellikleri ve yumuşak parçaları ölçmek için uygun bir yöntemdir. Villarraga-Gomez ve arkadaşları, iç ve dış özellikler içeren bir iş parçasında koordinat ölçüm sistemleri ve bilgisayarlı tomografi yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre 0,6 ve 65 mm arasındaki ölçülerde genel olarak 5 μ m altında sapmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca, temaslı ve temassız yöntemlerdeki ölçüm belirsizliği farkının sıfır kuvvet koordinat ölçüm makinesi ve hesaplı yöntemler kullanması durumunda ± 2 μ m düzeyinde yakınsayabileceği görülmüştür (Villarraga-Gómez, Lee, & Smith, 2018).

Arızalı türbin komponentlerini belirlenen bakım periyodu içerisinde tanımlanmış yedek komponentler ile değiştirmek oldukça önemli bir görev olmasına rağmen yedek parçaların uzun teslim süreleri ve parça resimlerine erişimiz zor olmasından dolayı her zaman mümkün olmamaktadır. Tersine mühendislik uygulamaları, hassas ürün geometrisini hızlı bir şekilde oluşturabildikleri ve modern imalat yöntemleri ile tersine mühendisliği kullanarak parçaların tekil olarak üretimine izin verdiği için için havacılık sektörü için oldukça önemlidir. Bauer ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilmiş türbin kanatçıklarının tersine mühendislik kapsamında taranması için üç boyutlu optik tarayıcı ve bilgisayarlı tomografi sistemlerini kullanmışlardır. Bilgisayar destekli tasarım verisine göre tomografi ile yapılan ölçümlerde iç ve dış unsurlarda oluşan ortalama sapmanın en fazla 50 µm seviyesinde olduğu ve üç boyutlu optik tarama sistemine göre sapmaların ise 40 µm seviyelerinde ve üretici hassasiyet sınırları ile uyumlu olduğu görülmüştür (Bauer, Schrapp, & Szijarto, 2019).

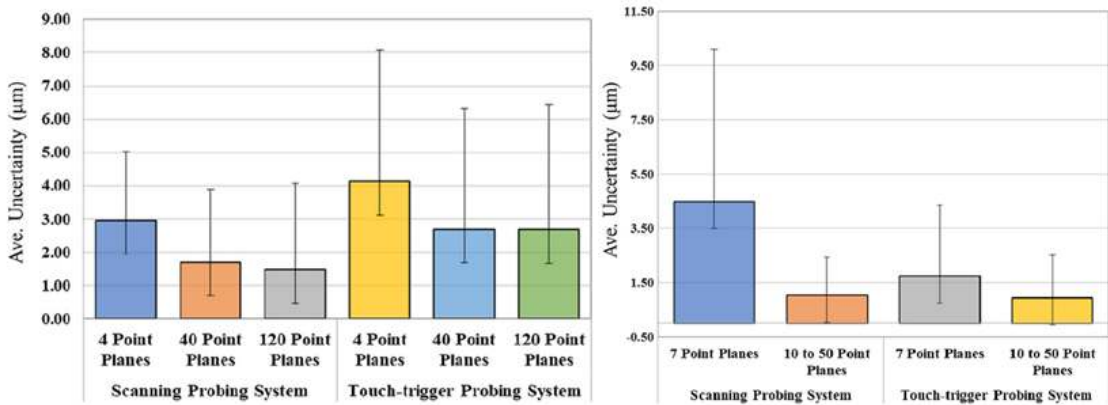
Günümüzde tersine mühendislik uygulamaları ile birlikte, bir nesne özelliklerinin yüksek hassasiyet ile oluşturmak mümkündür. Şekil 1.3 ile gösterildiği üzere hastalardan alınan bilgisayarlı tomografi görüntüleri kullanılarak uzuv ve implant modelleri oluşturulabilir ve eklemeli imalat ile hızlı bir şekilde üretilebilir. Dardzinska ve Fiedorczuk tarafından yapılan çalışmada ilk olarak PolyJet, FDM ve SLM gibi farklı yöntemler kullanılarak üretilmiş referans parçaların x-ışını bilgisayarlı tomografi yöntemi ile ölçülmesi ve cihazların yeteneğinin doğrulanması ardından da tomografi ile oluşturulmuş kemik kütlesi modelinin, aynı yöntemler kullanarak üretilmiş nesnelere göre karşılaştırması yapılmıştır. CMM ölçümlerine göre yapılan kıyaslamada ölçümlerdeki standart sapmanın en fazla 0,18 mm olduğu görülmüştür. Benzer çalışma daha karmaşık bir geometriye sahip kemik nesnesinde ise 0,30 mm sonuç vermiştir (Dardzińska & Fiedorczuk).



Şekil 1.3. *Magics 20.04 kullanılarak düzeltilmiş bir kemik kütlesine ait. STL dosyası (Dardzinska ve Fiedorczuk, 2020)*

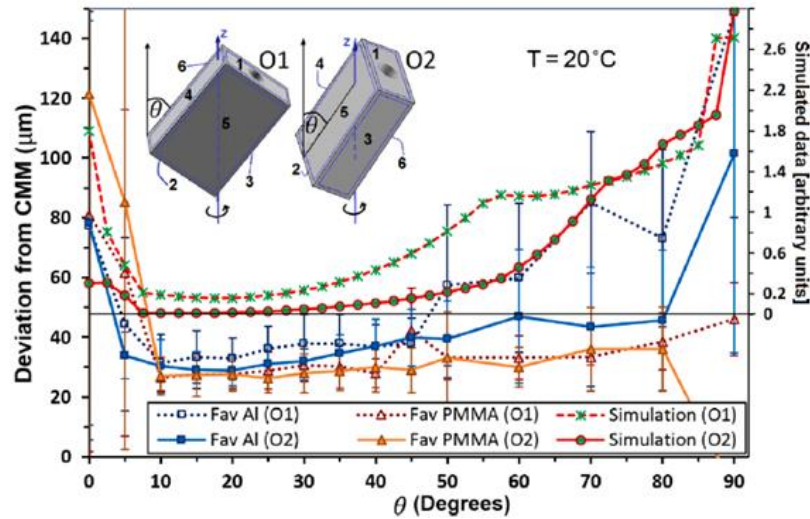
Polyjet malzemeler kullanılarak eklemeli imalat yöntem ile üretilen numunelerin uzun üretim süreleri altında tekrarlanabilirliğinin ve yeniden üretilebilirliğinin değerlendirilmesi için Pilipovic ve arkadaşları bir ay boyunca üretilen 21 tane numune parçayı incelemeye almışlardır. Bu çalışma sırasında numune parçaların doğrulanması için kullanılan bilgisayarlı tomografi cihazları ile yapılan ölçümler ile %95 güvenilirlik ile 200 μm içindeki parçaların üretiminin mümkün olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 0,75 mm altındaki deliklerin tekrarlanabilmesi mümkün gözükmemektedir. Baskı düzlemi yönündeki sonuçların doğruluğunun -8 μm ile 76 μm arasında ve buna dik yöndeki sonuçların ise 56 μm ile 197 μm arasında olduğu görülmüştür (Pilipović, Baršić, Katic, & Havstad, 2020).

Ali yaptığı çalışmada koordinat ölçüm yöntemlerinden temaslı ve temassız olanları ölçüm belirsizliği ve ölçüm süreleri açısından karşılaştırmıştır. SM25 temassız ve TP200 temaslı ölçüm sistemlerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada, karşılaştırılan özellikler dikdörtgen ve küre geometriler üzerinden alınmıştır. Temaslı ve temassız yöntemler için dikdörtgen için belirlenen özelliklere ait ortalama ölçüm belirsizlikleri mutlak farklarının Şekil 1.4 ile sunulan tabloda gösterildiği üzere 2 μm değerinden düşük, dikdörtgen içi ise 3 μm değerinden düşük olduğu görülmüştür. Ölçüm belirsizliği sonuçları, değerlendirilen unsurlar için bu iki sistem arasında, ilgili tablo ile gösterildiği üzere sonuçlar istatistiksel olarak kayda değer bir farklılık olmadığını göstermiştir. Tarama yönteminde sonuçlar daha hızlı alınabilirken, bu sistem için kalibrasyon sürelerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Bastas, 2020).



Şekil 1.4. Küre ve dikdörtgen parçalar için nokta sayısına bağlı olarak temaslı ve temassız ölçüm yöntemlerine ait ortalama ölçüm belirsizlikleri (Bastas, 2020)

Bilgisayarlı tomografi için ölçülen parçanın uzaydaki yönü soğurma seviyesini etkilediği için oldukça önemli bir parametredir. Bu değişkenin ve buna bağlı ışın bozulmaları ve sertleşmelerinin ölçümler üzerindeki etkisi, CMM cihazı referans olarak kullanılarak Villarraga-Gomez ve arkadaşları tarafından deneysel ve simülasyon çalışmaları ile gözden geçirilmiştir. Bu karşılaştırma sonunda CMM referans değerlerine göre oluşturulan deneysel sonuçların simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Parça yönelimi için en düşük sapma değerinin 10 ve 35 derece eğim altında en fazla 10 μm olduğu görülmüştür. Açının iki katına çıktığı durumda Şekil 1.5 kullanılarak gösterildiği üzere sapma değerlerinin yaklaşık altı kata kadar kötüleşeceği görülmüştür (Villarraga-Gómez, Amirkhanov, Heinzl, & Smith, 2021).



Şekil 1.5. Parça yönelimine bağlı olarak tarama sonucu oluşturulan değerlerdeki sapmalar (Villarraga-Gomez vd., 2021)

2. GEOMETRİK ÜRÜN ÖZELLİKLERİ

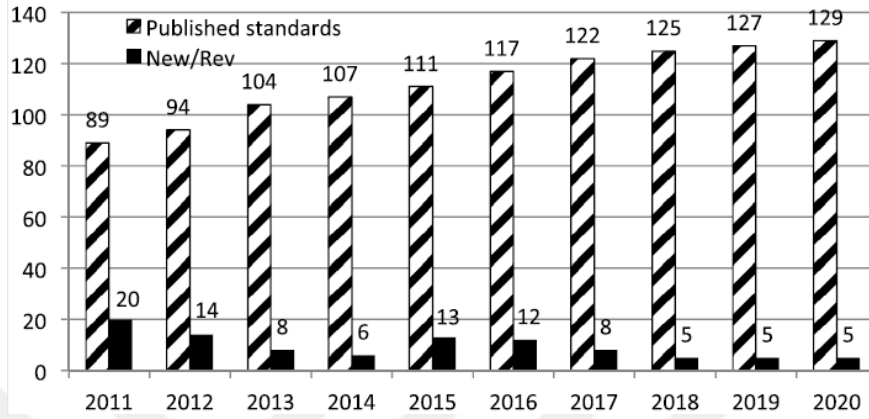
Günümüzde dünyadaki yaşanan küreselleşme hareketi ile birlikte tasarım ve üretim gibi süreçlerin farklı ülkeler tarafından yapıldığı uluslararası bir ticaret düzeni kuruldu. Böylece firmaların farklı ülkeler arasında ürün alışverişi ve ticaret yapabilmesinin yolu açıldı. Bu tasarım ve üretim tesislerinin dünya üzerinde uygun bulunan ülkelere taşınması daha da kolaylaştırdı fakat bu değişim ile birlikte ürüne ait bilginin ve teknik resimlerin belirsizliğe sebep olmayacak en doğru şekilde aktarılabilmesi ihtiyacını doğurdu (Gust & Sersch, 2020).

Bir ürün için toplam maliyetin %75'inden fazlası, kavramsal ve ön ürün tasarım süreçleri sırasında alınan kararlar çevresinde şekillenmektedir. Toplam ürün maliyetini etkileyen bu önemli aşamalarda alınan kararlar ve bilgiler sonraki tasarım süreci aşamalarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörleri için bu aşamada ürün için tanımlanacak olan geometrik özellikler ve toleranslar, üretimin doğasında olan ve ürün yaşam döngüsü boyunca zaman içerisinde fonksiyonel unsurlarda oluşacak olan sapmaları ve hataları da göz önünde bulunduracak şekilde belirli bir kalite seviyesi hedef alınarak belirlenmelidir (Dantan, Ballu, & Mathieu, 2008).

ISO tarafından geliştirilen GPS şartnameleri, bir ürünü tanımlamak için ihtiyaç duyulan ve teknik resimlerde tanımlanabilecek tüm boyutsal gereklilikleri açık ve net bir şekilde tanımlayan küresel teknik bir dil olarak tanımlanabilir. Bir ürünü tanımlamak için gerekli olan tüm özellikleri belirten ortak bir dilin geliştirilmesi ile birlikte tedarikçi zincirinin farklı noktalarındaki tasarım, üretim ve ölçüm çalışmaları için zaman alıcı olabilecek belirsizlikler ve tutarsızlıklar ortadan kaldırılmıştır (Płowucha, et al., 2014).

Tasarım, üretim ve ölçüm alanlarını doğrudan ilgilendiren GPS alanındaki şartnameler, bu alanlar arasındaki çelişkileri ve belirsizlikleri ortadan kaldırmak ve günümüzde kullanılan bilgisayar destekli tasarım, üretim ve ölçüm sistemleri arasındaki tutarlılığı temin etmek için ISO/TC 213 kurulu tarafından yönetilmektedir. ISO/TC 213 kuruluşunun görevi, boyutsal ve geometrik toleransları, yüzey özelliklerini ve ilgili doğrulama ilkelerini, ölçüm ekipmanlarını ve boyutsal ve geometrik ölçüm belirsizliğini de içerecek şekilde kalibrasyon ihtiyaçlarını kapsayan genel ve özel geometrik ürün spesifikasyonlarını (GPS) standartlaştırmak olarak tanımlanır. Bu standartlaştırma çizime ait göstergelerin açıklamalarını ve temel düzenini içermektedir. Bu şartnameler ilgili kurul tarafından belirsiz ve tutarsız noktaları ortadan kaldırmak için sürekli olarak güncellenmektedir. Ayrıca gelişen teknoloji ile birlikte oluşan ihtiyaçlar da göz önünde

bulundurularak, ihtiyaçlar doğrultusunda yeni şartnameler oluşturulmaktadır. ISO GPS şartnamelerindeki güncellemeler ve eklemeler Şekil 2.1 ile gösterildiği üzere ihtiyaca göre yıllar içerisinde güncellenmiştir (Humienny, 2021).



Şekil 2.1. Yıllık olarak mevcut ve yeni oluşturulan ISO GPS şartnameleri (Humienny, 2021)

ISO GPS sistemi mühendislik parçalarında ürünlerin geometrik olarak tanımlanması ve doğrulanması için gereklilikleri tanımlamaktadır. ISO/TC 213 kurulu tarafından yönetilen bu şartnameler, Teknik Ürün Özellikleri (TPS) oluşturmak için ISO/TC 10 kurulunun sorumluluğundaki diğer Teknik Ürün Dokümanları (TPD) ile birlikte kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ISO 14638 şartnamesi ile iş parçasına ait tanımlanan bu geometrik özellikler zincirler şeklinde alt bölümlere ayrılmıştır. İlgili zincirlerin altında ise ilgili geometrik özelliğe ait tanımlanmış olan GPS şartnamelerine atıflar yapılır (ISO 14638:2015).

Ürün yaşam döngüsünün tasarım, üretim ve kontrol gibi farklı aşamalarında kullanılan bu sistem, ürünlerin ihtiyaç duyulan tüm geometrik özelliklerini tanımlamak için geliştirilmiştir. Bu doğrultuda ISO GPS sisteminde boyut, mesafe, form, yönelim, konum, salgı, profil yüzey dokusu, bölgesel yüzey dokusu ve yüzey kusurları olmak üzere dokuz özellik tanımlanmıştır. ISO GPS şartnameleri örnek olarak Tablo 2.1 ile gösterildiği üzere bir matris yapı çerçevesinde zincirler şeklinde sırasıyla sembol ve göstergeler, unsur gereklilikleri, unsur özellikleri, uygunluk ve uygunsuzluk, ölçüm, ölçüm ekipmanı ve kalibrasyon olmak üzere bir matris model ile birbirine bağlanmıştır.

Tablo 2.1. ISO GPS şartnameler matris modeli

Özellik	Zincir Bağlantılar						
	A. Sembol ve Görseller	B. Unsur Gereklilikleri	C. Unsur Özellikleri	D. Uygunluk ve Uygunsuzluk	E. Ölçüm	F. Ölçüm Ekipmanları	G. Kalibrasyon
Boyut	ISO	ISO	ISO	ISO/TR	ISO	ISO	ISO/TS
	14405-1	14405-1	286-1	16015	1938-1	463	15530-3
	ISO	ISO	ISO/TS	ISO		ISO	ISO/TS
	286-1	286-1	16610	14253		13385-1	15530-4
		ISO	Serisi	Serisi		ISO	ISO/TR
		286-2	ISO			13385-2	16015
			14405-1			ISO	ISO/TS
						3650	16610
						ISO/TR	ISO
						16015	14253
						ISO/TS	Serisi
						23165	
						ISO	
						14253	
						Serisi	
						ISO	
						10360	
						Serisi	
Mesafe							
Şekil							
Yönelim							
Konum							
Salgı							
Profil Yüzey							
Dokusu							
Bölgesel							
Yüzey Dokusu							
Yüzey							
Kusurları							

Matris modelde tanımlanmış olan boyut, mesafe, form, yönelim, konum ve salgı özellikleri parça yüzey geometrisi ve profil yüzey dokusu, bölgesel yüzey dokusu ve yüzey kusurları özellikleri ise parça yüzey durumu ile alakalıdır. Bununla birlikte zincir bağlantılarda A, B ve C parça tolerans özellikleri, D doğrulama sonuçları ve tanımlanmış gerekliliklerin kıyası ile ilgili koşulları, E ve F doğrulama konularını ve G ise ekipman kalibrasyonu konularını içermektedir.

ISO 14638 şartnamesinde tanımlandığı üzere GPS şartnameleri temel, genel ve özel şartnameler olmak üzere üçe ayrılır. Temel şartnamelerde, tüm şartnameleri etkileyen kabuller, ilkeler ve kuralları tanımlar. Genel şartnameler bir ya da birden fazla zincir bağlantıya etki edecek şekilde tanımlanmıştır. Özel şartnameler ise benzersiz olarak bir üretim yöntemi ya da üretim parçası için geçerli olan şartnamelerdir.

2.1. Temel Şartnameler: Temel Kabuller, İlkeler ve Kurallar

GPS için temel kabul, ilkeler ve kurallar ISO 8015:2012 şartnamesi ile tanımlanmıştır. İlgili şartnamede tanımlı temel kabuller, ilkeler ve kurallara ait tanımlar çeşitli alt gruplara ayrılır (ISO 8015:2011). Bu temel kabuller ISO 14637 şartnamesinde tanımlandığı üzere ISO 8015:2012 temel şartnamesi tarafından tanımlanmış olan kabuller, ilkeler ve kurallardan en önemli olanlar sırasıyla incelenecektir.

Temel kabuller: Çizimde tanımlı şartnamelerin yorumlanması için temel kabuller kullanılmaktadır. Tolerans limitlerinin değerlendirilmesine için tanımlanan kabuller, GPS sistemi için tanımlanmış olan genel kabullerin temelini oluşturur. Burada çizimlerde tanımlanan genel ve özel şartnamelere kesin uyum oldukça önemlidir. Bir parça için tanımlanmış olan işlevsel limitlerin deney, teorik ya da her ikisi de kullanılarak kapsamlı bir şekilde yapılan araştırmalar ile herhangi bir belirsizlik olmadan tanımlandığı kabul edilir. Burada tasarımcının tanımlanan limitler için yaptığı seçimler ile parçaya ait işlevsellik limitlerinin tamamının kullanılıp kullanılmadığı kesinlikle bilinilmediği kabul edilir. Tolerans limitleri ile işlevsel limitlerin aynı olduğu kabul edilerek yorumlama yapılır. Tasarımcı çizimde tolerans limitlerini kullanarak doğrudan işlevsel limitleri tanımladığı varsayılır. İş parçasının ilgili özellikleri sadece tolerans limitleri içinde olduğunda her zaman çalıştığı fakat bu limitler dışında olduğunda ise hiçbir şekilde çalışmadığı varsayılarak yorumlama yapılır.

Çağırma ilkesi: Bir makine mühendisliği ürün dokümantasyonunda ISO GPS sisteminin bir kısmı atıfta bulunularak çağrıldığında, aksi belirtilmediği sürece tüm ISO GPS sistemi çağrılır. Eğer bölgesel, ulusal ya da şirket şartnamelerine uygun olarak hazırlanmış bir dokümantasyonda, dokümantasyonda aksi belirtilmedikçe ifadesi kullanılıyorsa, ilgili unsurun yorumlanması için ISO GPS şartnamesi değil tanımlanan ilgili şartname kullanılacaktır. ISO 8015 şartnamesi, antet içindeki bir bölümde isteğe bağlı olarak tanımlanması ile ilgili doküman için ISO GPS şartnameleri çağırılabilir fakat herhangi bir ISO GPS şartnamesine de atıf yapılarak bu çağırma işlemi gerçekleştirilebilir.

GPS şartnameleri sıradüzen ilkesi: ISO GPS sistemi, temel, küresel, genel ve tamamlayıcı GPS şartnameleri ile verilen bir sıradüzeni ile sıraya göre tanımlanır. Sıradüzende yüksek seviyedeki şartnamelerde tanımlı kurallar, daha düşük seviyedeki şartnamelerde tanımlı kurallara göre aksi belirtilmedikçe her zaman daha önceliklidir.

Nihai çizim ilkesi: Çizim nihaidir. Tüm özellikler, GPS göstergeleri, ilgili varsayılan ya da özel kurallar ve ilgili belgelere yapılan referanslar kullanılarak çizimde belirtilecektir. Sonuç olarak, çizimde belirtilmeyen gereksinimlerin uygulanmamalıdır. Bir çizim, ürünün son hali öncesinde üretimin farklı adımları için özellikleri içerebilir. Aksi belirtilmedikçe şartnameler ürünün çizimde belirtilen son hali için geçerlidir. Ara üretim adımları için bir özellik tanımlanması gerekiyor ise bu resimde özellikle belirtilmelidir.

Bağımsızlık ilkesi: Varsayılan olarak, bir unsur ya da unsurlar arası ilişki için tanımlanan her bir GPS özelliği, aksi ISO 2692 içinde tanımlı en fazla malzeme koşulu, ISO 1101 içinde tanımlı ortak bölge ya da ISO 14405-1 içinde tanımlı kapsama koşulu gibi özel bir gösterge ile çizim üzerinde tanımlanmadığı sürece diğer özelliklerden bağımsız bir şekilde yerine getirilmelidir.

Varsayım ilkesi: ISO temel GPS şartnameleri kullanılarak eksiksiz bir şekilde özellikler tanımlanabilir. Tanımlanan her bir ISO şartnamesi, önceden tanımlı bir dizi ISO şartnamesine bağlı kuralları çağırarak şekilde kurgulanmıştır. ISO GPS sisteminde bir kural önceden tek anlamlı bir şekilde tanımlanmıştır ve teknik resimlere aşırı atıf yapılmadan atıflar yardımı ile ortaya çıkarılabilir şekilde düzenlenmiştir. Önceden tanımlı olan bu kurallar isteğe bağlı olarak teknik resimde uygun düzenleyici göstergeler kullanılarak yok sayılabilir.

Referans durum ilkesi: Tüm GPS özellikleri, varsayılan referans koşullarında geçerlidir. ISO 1 içinde tanımlanan bu referans koşullara göre, referans sıcaklık 20 °C olmalıdır ve iş parçasında herhangi bir kirlilik olmamalıdır. Geçerli olan diğer koşullar çizim üzerinde tanımlanmalıdır.

Rijit iş parçası ilkesi: Bir iş parçasının sonsuz derecede rijit olduğu varsayılan olarak kabul edilecektir. Tüm GPS özellikleri, parçanın üzerine gelen yerçekimi de dahil herhangi bir kuvvet ile deformasyona uğramadığı serbest durumda koşulda uygulanır. ISO 10579 şartnamesine benzer olarak iş parçası için gerekli olan diğer tüm koşullar çizim üstünde tanımlı olmalıdır.

İkililik ilkesi: ISO GPS şartnamelerinde bir parçanın üretimi için kullanılacak olan ilgili unsurlara ait özellikleri tanımlayan göstergeler aynı zamanda ilgili özelliğin kontrol edilmesi ve doğrulanması için de kullanılmaktadır. Böylece tasarım sürecinde çizim üstüne tanımlanan tüm özellikler doğrudan ölçüm sürecine yansıtılır. Ürün tanımının yapılmasına imkân veren yöntemler tasarım ve kontrol aşamalarında aynıdır.

Genel özellikler ilkesi: Genel toleranslar, çizimin antet bölümünde ilgili ISO GPS şartnamelerine atıf yapılarak tasarımda belirtilebilir. Atıf yapılan bu şartnameler, unsura ait özellikte herhangi bir tolerans belirtilmediği sürece uygulanır. Kapsamı ve etkilediği özellikler belirtildiği sürece birden fazla şartnameye atıf yapılmasına izin verilir. Atıf yapılan tolerans şartnameleri arasında herhangi bir tezat oluşması durumunda, aralarından en serbest olan kullanılır.

2.2. GPS Toleranslarının Sınıflandırılması

Bir parçanın imalat sürecinde, parça özelliklerinde boyutsal ve geometrik olarak çeşitli ölçümsel sapmalar oluşabilir. Mesafe ve çap ölçülerindeki sapmalar boyutsal hatalar olarak tanımlanırken diğer geometrik sapmalar ISO 1101 şartnamesine göre şekil, yönelim, yer ve salgı olmak üzere 4 ana sınıfa ayrılabilir.

Geometrik ölçülere geçmeden önce boyutsal ölçülerin tanımlanması oldukça önemlidir. Bu toleranslar bir parçanın uzunluk, çap ve açı gibi özelliklerini tanımlamak için kullanılır. Bu unsur özellikleri silindir, küre ve birbirine paralel iki yüzey gibi unsurlar üzerinden tanımlanabilir. Bu konuda hazırlanmış olan ISO 286-1 şartnamesi, doğrusal boyutsal özellikler için temel tanımlamaları, temel aralıklarını, sapmaları ve parçaların montaj geçme durumlarını tanımlamaktadır. Benzer bir şekilde ISO 286-2

şartnamesi ise delikler ve şaftlar için ilgili temel tanımlamaları, tolerans aralıklarını, sapmaları, parçaların montaj geçme durumlarını tanımlamaktadır. Tüm bu tanımlanan özellikler için toleransların tanımlı olmadığı durumlarda ise ISO 2768-1 ve ISO 2768-2 şartnameleri kabul edilen standart toleransları vermektedir. Bir teknik resimde parçanın genel boyutları ve geçme özellikleri boyutsal toleranslar ile tanımlanırken, bu unsurların şekli, yeri, yönelimi ve salgısı gibi özellikler geometrik toleranslar kullanılarak tanımlanır.

Şekil toleransları, bir unsur için tasarımda belirtilen ideal unsur şeklinden oluşan sapmaların sınırlarını tanımlar. Bir unsur için tanımlanmış şekil toleransının uygun olması için gerekli koşul ilgili unsurun şeklinin belirtilen tolerans sınırları içinde kalması ile sağlanır. Profil toleransları, ilgili unsurun sadece şekil özelliğini değil aynı zamanda konum ve yönelim özelliklerini de sınırladığı için ayrı bir olarak değerlendirilmelidir.

Yönelim toleransları, referans olarak tanımlanmış bir ya da birden fazla unsura göre ölçülendirilmiş bir unsurda oluşabilecek sapmaların sınırlarını tanımlar. Yönelim toleranslarında, en doğru sonucu alabilmek için referans olarak kullanılan unsurun yeterince hassas olması gereklidir.

Konum toleransları, referans olarak tanımlanmış bir ya da birden fazla unsura göre tasarım süreçleri esnasında ideal konumu belirlenmiş bir unsurun, bu konuma göre oluşabilecek sapmalarının sınırlarını tanımlar.

Salgı toleransları, tasarım süreçleri esnasında belirlenmiş bir şekil ya da konuma göre bir unsurun referans olarak tanımlanmış bir referans etrafında dönüşü sırasında oluşabilecek sapmaların sınırlarını tanımlar (Tornincasa, 2021)

Tanımlanmış olan bu sınıflandırma altında bulunan geometrik ölçülendirme yöntemleri ISO 1101 şartnamesinde detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. Tablo 2.2 ile belirtildiği üzere bazı ölçülerin tamamlayıcı referans ölçüleri var olmasına rağmen diğer şekle bağlı ölçüler için bu tarz bir gereklilik söz konusu değildir. Bu kapsamda, şekil ölçüleri boyut, yönelim ya da konum gibi parça özelliklerini sınırlandırmazken diğer sınıflara ait ölçüler şekil, boyut, yönelim ve konum gibi parça özelliklerini birini ya da birden fazlasını aynı anda sınırlayabilir.

Tablo 2.2. ISO GPS sisteminde geometrik karakteristikler için tanımlanmış göstergeler, referans gereklilikleri ve ilgili şartname maddeleri (ISO 1101)

Sınıf	Karakteristik	Gösterge	Referans Gerekliliği	ISO 1101 İlgili Madde
Şekil	Doğrusallık	—	Hayır	17.2
	Dairesellik	○	Hayır	17.4
	Düzlemsellik	▭	Hayır	17.3
	Silindiriklik	⊘	Hayır	17.5
	Çizgi Profil	⌒ ^a	Hayır	17.6
	Yüzey Profil	⌒ ^a	Hayır	17.8
Yönelim	Paralellik	//	Evet	17.10
	Diklik	⊥	Evet	17.11
	Açısalılık	∠	Evet	17.12
	Çizgi Profil	⌒ ^a	Evet	17.7
	Yüzey Profil	⌒ ^a	Evet	17.9
Yer	Konum	⊕	Hayır	b
	Konum	⊕	Evet	17.13
	Eşmerkezlilik	⊙	Evet	17.14
	Eşksenlilik	⊙	Evet	17.14
	Simetri	≡	Evet	17.15
	Çizgi Profil	⌒ ^a	Evet	17.7
	Yüzey Profil	⌒ ^a	Evet	17.9
	Dairesel Salgı	↗	Evet	17.16
Salgı	Toplam Salgı	↗↗	Evet	17.17

2.2.1. Şekil toleransları

Bu tolerans grubu, teknik resimde belirtilen bir yüzeyin ya da unsurun mükemmel şeklinden olan sapmasını belirlemek için kullanılır. Doğrusallık, düzlemsellik, dairesellik, silindiriklik, referanstan bağımsız çizgi profili ve referanstan bağımsız yüzey profili şeklinde tanımlanan biçimsel özellikler, ilgili unsuru sınırlandırmak için unsurun mükemmel olarak sayılabilecek olan karşılığını kullanır. Bir doğru ya da yüzeyin şekil özelliğini belirleyen profil özelliği için tasarım ihtiyacına bağlı olarak bir referans ile sınırlandırılmış profil özelliği tanımlanabilir.

2.2.1.1. Doğrusallık ve düzlemsellik

Bir çizginin özelliği olan doğrusallık çizginin mükemmel derecede doğrusal olması, düzlemsellik ise yüzeyin düz olması durumudur. Bu özelliklerdeki hatalar, çizgi ya da düzlemin eğri ya da yamuk olması gibi sebepler yüzünden oluşturulan noktaların istenen mükemmel unsurdan uzaklaşması olarak tanımlanabilir.

Genel GPS şartnameleri olan ISO 12780-1 ve 12781-1 bir unsurun kendi içindeki doğrusallık ve düzlemsellik özelliklerini tanımlar. Her iki şartname de iki numaralı zincir bağlantının detaylarını açıklar. Bu özellikler için diğer kurallar ISO 1101 şartnamesi içinde tanımlanmıştır. Bu talimatta doğrusallık ve düzlemsellik, çizgisel ve yüzeysel unsurların mükemmel bir şekilde olması durumu olarak tanımlanır. ISO 12780-1 ve ISO12781-1 şartnameleri tarafından doğrusallık ve düzlemsellik için yapılan bazı önemli tanımlar ve bu özelliklere ait önemli görseller aşağıda detaylı bir şekilde tanımlanmıştır (ISO 12780-1:2011) (ISO 12781-1:2011).

Doğrusallık profili ve düzlemsellik yüzeyi, çıkarım çizgisinin uygun bir filtreleme ile düzenlenmiş halidir.

Çıkarım çizgisi ve yüzeyi, iş parçasına ait gerçek yüzey kullanılarak oluşturulan çizginin ve düzlemin sayısal temsilidir.

Referans çizgisi/düzlemi, doğrusallık ve düzlemsellik sapmaların hesaplanması sırasında referans olarak kullanılan ve doğrusallık ya da yüzey profiline uygun yöntemler kullanılarak sıgdırılmış mükemmel çizgi ya da düzlemdir. Bu özellik en LS anahtarı ile çağırılarak en küçük kareler yöntemine göre hesaplanabilir.

Sınır bölge referans çizgileri ve düzlemleri, doğrusallık ya da çıkarım yüzeyi profilini birbirine paralel olacak şekilde kapsayan ve aralarındaki mesafe en küçük olan iki çizgi ve düzlemdir. İç ve dış sınır bölge referans çizgileri ve düzlemleri ise parçanın sırasıyla en iç ve en dış bölgesinde kalan asgari bölge referans çizgileri ve düzlemleri olarak tanımlanır. Ortalama sınır bölge referans çizgisi ve düzlemi, iç ve dış asgari bölge referans çizgisi ve düzlemlerinin ortasından geçen çizgi ya da düzlemdir.

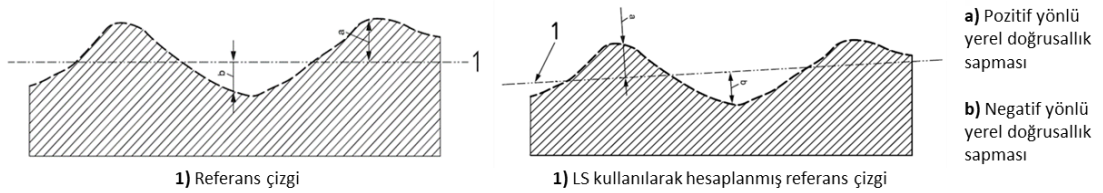
Yerel doğrusallık ve düzlemsellik sapması, doğrusallık profili ve çıkarım yüzeyi üzerindeki herhangi bir noktanın referans çizgiye ve düzleme olan uzaklığı olarak tanımlanır. Doğrusallık ve düzlemsellik profili üzerindeki yerel tepe ve çukurlar ile referans arasındaki bu sapma artı ya da eksi yönlü olabilir. ISO 12780-1 ve ISO 12781-1 şartnamesinde tanımlanan sapma çeşitleri ve açıklamaları ise Tablo 2.3 ile verilmiştir.

Tablo 2.3. ISO GPS sistemine göre doğrusalık ve düzlemsellik sapması (ISO 12780-1) (ISO 12781-1)

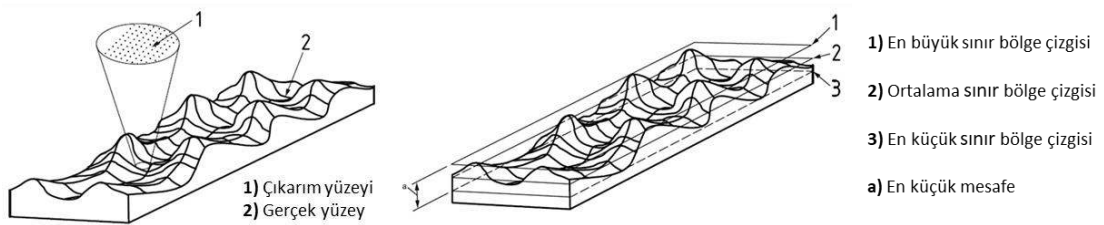
Doğrusallık Sapması	Tanım
Tepe - Çukur Sapması	Yerel en yüksek tepe ve en derin çukur arasındaki mutlak sapma ile tanımlanır. Tüm referans oluşturma yöntemleri için uygulanabilir.
Tepe – Referans Sapması	En yüksek yerel tepe ve en küçük kareler yöntemine göre oluşturulmuş referans arasındaki mutlak sapma ile tanımlanır.
Çukur – Referans Sapması	En derin yerel çukur ve en küçük kareler yöntemine göre oluşturulmuş referans arasındaki mutlak sapma ile tanımlanır.
Ortalama Karekök Sapması	En küçük kareler yöntemine göre hesaplanmış referansa göre yerel mutlak sapmaların karelerinin toplamının karekökünü ile tanımlanır.



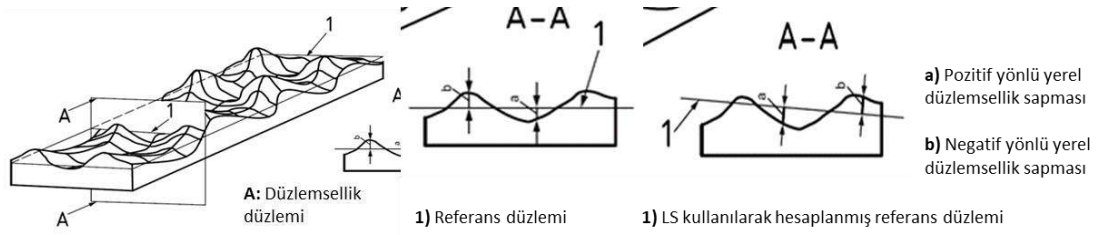
Şekil 2.2. Doğrusallık düzlemi, bu düzlem kullanılarak oluşturulan çıkarım çizgisi ve sınır bölge referans çizgileri (ISO 12780-1)



Şekil 2.3. Doğrusal unsurlar için referans ve yerel sapmalar (ISO 12780-1)



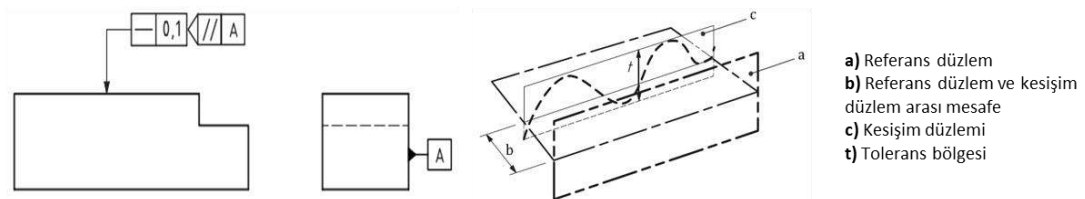
Şekil 2.4. Gerçek yüzey, bu yüzey kullanılarak oluşturulan çıkarım yüzeyi ve sınır bölge referans düzlemi (ISO 12781-1)



Şekil 2.5. Ortalama ve en küçük karelere göre hesaplanmış referans ve yerel sapmalar (ISO 12781-1)

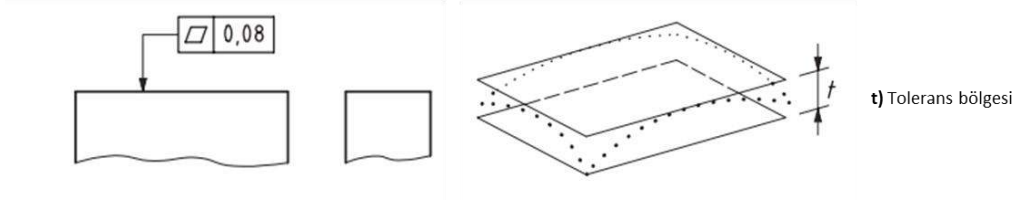
Çıkarım çizgisinin ve düzleminin oluşturulması sırasında toplanan veri üzerinde yapılan çeşitli işlemler ISO 12780-2 ve ISO 12781-2 şartnameleri ile tanımlanmıştır. Bu şartnameler ile profilin ölçümü için gerekli uç geometrisi, temas kuvveti, çıkarım yöntemleri ve filtreleme gibi veri toplama, düzenleme ve işleme gibi konular detaylandırılmıştır (ISO 12780-2:2011) (ISO 12781-2:2011).

Bu tanımlar doğrultusunda, ISO 1101 şartnamesinde belirtildiği üzere A kesişim bölgesine paralel olan herhangi bir düzlem üzerindeki bir çizginin doğrusallığı, Şekil 2.6 üzerinde gösterildiği üzere teknik resimde belirtilen ideal çizgiyi, belirtilen tolerans içine alacak aralıktaki bir bant ile sınırlandırılmıştır. Tanımlanan bu doğrusallık toleransının yorumlanması ise Şekil 2.6 kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu yoruma göre, A kesişim bölgesine paralel olan b mesafesindeki herhangi bir düzlem üzerindeki bir çizgiyi üzerinde, bu çizgiyi içine alacak t kalınlığındaki bant bölgesi bir tolerans aralığını oluşturmaktadır.



Şekil 2.6. Çizgisellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

Bu tanımlar doğrultusunda, ISO 1101 şartnamesinde belirtildiği gibi bir yüzeyin düzlemselliği Şekil 2.7 ile gösterildiği üzere teknik resimde belirtilen düzlemi, belirtilen tolerans içine alacak aralıktaki bir bant ile sınırlandırılmıştır ve tanımlanan bu düzlemsellik toleransının yorumlanması kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu yoruma göre, herhangi bir yüzey üzerinde, bu yüzeyi içine alacak t kalınlığındaki bant bölgesi bir tolerans aralığını oluşturmaktadır (ISO 1101:2017).



Şekil 2.7. Düzlemsellik toleransının çizim üzerinde tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

2.2.1.2. Dairesellik ve silindiriklik

Bir çizginin özelliği olan doğrusalık çizginin mükemmel derecede doğrusal olması, düzlemsellik ise yüzeyin düz olması durumudur. Bu özelliklerdeki hatalar, çizgi ya da düzlemin eğri ya da yamuk olması gibi sebepler yüzünden oluşturulan noktaların istenen mükemmel unsurdan uzaklaşması olarak tanımlanabilir.

Genel GPS şartnameleri olan ISO 12181-1 ve ISO 12180-1 çember bir unsurun kendi içindeki dairesellik ve silindiriklik özelliğini tanımlamak için kullanılır. Bu şartnameler iki numaralı zincir bağlantının detaylarını açıklar. Bu özellikler için diğer kurallar ISO 1101 şartnamesi içinde tanımlanmıştır. Bu şartnamede dairesellik ve silindiriklik, çember ve silindir unsurların mükemmel bir şekilde olması olarak tanımlanır. ISO 12181-1 ve ISO 12180-1 şartnameleri dairesellik ve silindiriklik için yapılan bazı önemli tanımlar ve bu özelliklere ait önemli görseller aşağıda detaylı bir şekilde tanımlanmıştır.

Dairesellik için dairesellik düzlemi, dairesel unsurun tümünü kapsayan bir eksene dik olarak çevresel çıkarım çizgisinin oluşturulması için kullanılan düzlem olarak tanımlanır. Silindiriklik için nominal silindir, silindir eksenindeki her düzleme dik olan düzlem üzerindeki ortalama şekil ile oluşturulan matematiksel silindir.

Çevresel çıkarım çizgisi ve yüzeyi, iş parçasına ait gerçek yüzey kullanılarak dairesellik ve silindiriklik düzlemi ya da yüzeyi üzerinden oluşturulan çizginin ve silindirin sayısal temsidir. Silindiriklik için çıkarım ana doğru çizgisi, gerçek yüzey ve ilgili silindirin ekseninden geçen ana doğru düzleminin kesişiminden geçen çizginin sayısal temsidir.

Dairesellik profili ve silindiriklik yüzeyi, çevresel çıkarım çizgisinin ya da yüzeyinin uygun bir filtreleme ile düzenlenmiş halidir. Benzer olarak ana doğru profili, çıkarım yüzeyinin uygun bir filtreleme ile düzenlenmiş halidir.

Referans dairesi ve silindir, dairesellik/silindiriklik sapmalarının hesaplanmasında referans olarak kullanılan ve dairesellik/çıkarm yüzey profiline profiline uygun yöntemler kullanılarak sığdırılmış mükemmel dairedir/silindirdir. Bu özellik en LS anahtarı ile çağırılarak en küçük kareler yöntemine göre hesaplanabilir.

Sınır bölge referans daireleri ve silindirleri, dairesellik ve silindiriklik profilini eş merkezli olacak şekilde kapsayan ve aralarındaki mesafe en küçük olan iki daire ya da silindirdir. İç ve dış sınır bölge referans dairesi ve silindiri ise parçanın sırasıyla en iç ve en dış bölgesinde kalan sınır bölge referans dairesi ve silindiri olarak tanımlanır. Ortalama sınır bölge referans dairesi ve silindiri, iç ve dış sınır bölge referans dairesi ve silindirinin ortasından geçen daire ya da silindirdir.

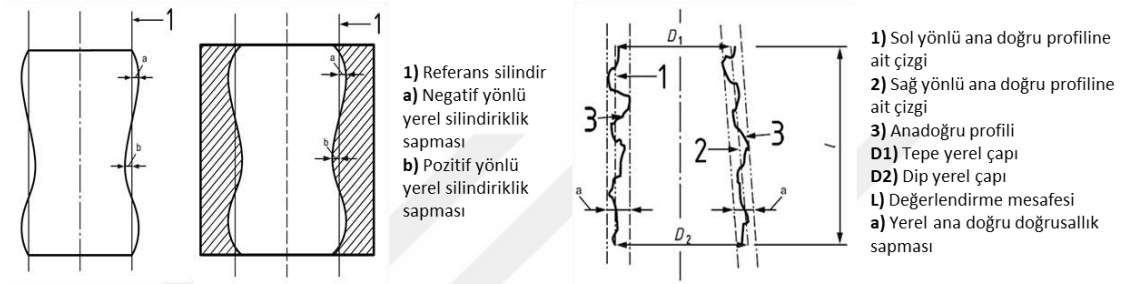
Yerel dairesellik ve ana doğru sapması, dairesellik ve ana doğru profili üzerindeki herhangi bir noktanın referans daireye ya da silindire olan uzaklığı olarak tanımlanır. Erkek ve dişi unsurlar için yön değiştirmek üzere, dairesellik ve ana doğru profili üzerindeki yerel tepe ve çukurlar ile referans daire ve silindir arasındaki bu sapmalar artı ya da eksi yönlü olabilir. ISO 12181-1 ve ISO12180-1 şartnamesinde tanımlanan dairesellik/silindiriklik sapması çeşitleri ve açıklamaları ise Tablo 2.4 ile kullanılarak verilmiştir (ISO 12181-1:2011) (ISO 12180-1:2011).

Tablo 2.4. ISO GPS sistemine göre olan dairesellik ve silindiriklik sapması (ISO 12181-1) (ISO 12180-1).

Dairesellik Sapma	Tanım
Tepe – Çukur Sapması	Yerel en yüksek tepe ve en derin çukur arasındaki mutlak sapma ile tanımlanır. Tüm referans oluşturma yöntemleri için uygulanabilir.
Tepe – Referans Sapması	En yüksek yerel tepe ve en küçük kareler yöntemine göre oluşturulmuş referans dairesi arasındaki mutlak sapma ile tanımlanır.
Çukur – Referans Sapması	En derin yerel çukur ve en küçük kareler yöntemine göre oluşturulmuş referans dairesi arasındaki mutlak sapma ile tanımlanır.
Ortalama Karekök Sapması	En küçük kareler yöntemine göre hesaplanmış referansa göre yerel mutlak sapmaların karelerinin toplamının karekökünü ile tanımlanır.



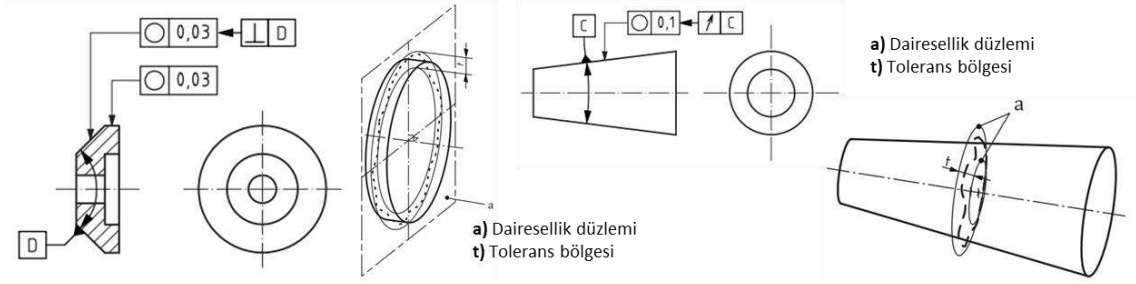
Şekil 2.8. Erkek ve dişi dairesel unsurlar için yerel dairesellik sapmaları (ISO 12181-1)



Şekil 2.9. Erkek ve dişi silindir unsurlar için yerel silindiriklik sapmaları ve genel terimler (ISO 12180-1)

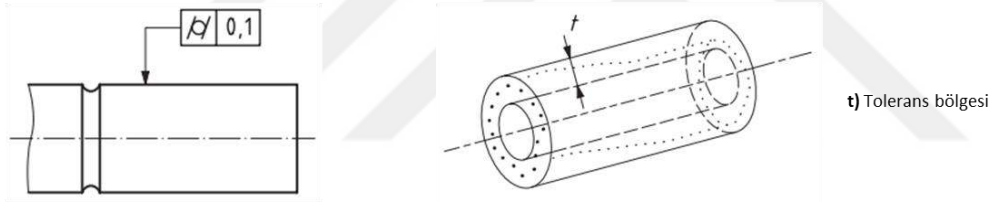
Çevresel çıkarım çizgisinin oluşturulması sırasında toplanan veri üzerinde yapılan çeşitli işlemler ISO 12181-2 şartnamesi ile tanımlanmıştır. Bu şartname ile dairesellik profilinin ölçümü için gerekli uç geometrisi, temas kuvveti, çıkarım yöntemleri ve filtreleme gibi veri toplama, düzenleme ve işleme gibi konular detaylandırılmıştır (ISO 12181-2:2011) (ISO 12180-2:2011).

Bu tanımlar doğrultusunda, ISO 1101 şartnamesinde belirtildiği gibi silindir ya da konik unsur üzerindeki herhangi bir çemberin daireselliği Şekil 2.10 ile gösterildiği üzere teknik resimde belirtilen ideal daireyi, belirtilen tolerans içine alacak aralıktaki bir bant ile sınırlandırılmıştır ve tanımlanan bu doğrularlık toleransının yorumlanması görselleştirilmiştir. Bu yoruma göre, silindir üzerindeki herhangi bir düzlemindeki çap üzerinde, bu çapı içine alacak t kalınlığındaki bant bölgesi bir tolerans aralığını oluşturmaktadır (ISO 1101:2017).



Şekil 2.10. Dairesellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

Bu tanımlar doğrultusunda, ISO 1101 şartnamesinde belirtildiği gibi silindir unsurun silindirik değeri Şekil 2.11 ile gösterildiği üzere teknik resimde belirtilen ideal silindiri, belirtilen tolerans içine alacak aralıktaki silindir bir bant ile sınırlandırılmıştır ve tanımlanan bu silindiriklik toleransının yorumlanması görselleştirilmiştir. Silindir üzerindeki ana doğru profilini, içine alacak t kalınlığındaki silindir bant bölgesi bir tolerans aralığını oluşturmaktadır (ISO 1101:2017).



Şekil 2.11. Silindiriklik toleransının çizim üzerinde tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

2.2.1.3. Profil

Biz çizgi ya da bir yüzeyin tanımlanması için kullanılan profil, şekil dışında, boyut, yönelim ve konum gibi özellikleri de sınırlandırmak için kullanılabildiği için bu tolerans iş parçasını tanımlamak için kullanılabilecek olan en güçlü araçlardan biri olarak tanımlanır. Bu bölümde öncelikle referanstan bağımsız olarak iş parçası şeklini kontrol eden ve ardından da referansa bağlı olarak boyut, yönelim ve konum gibi özellikleri de kontrol altına alan profil özelliğinin detayları sırasıyla aktarılacaktır. Bu yüzden diğer ilişkili bölümlerde bu konular tekrar edilmeyecektir. ISO şartnameleri tarafından tanımlanan referansa bağımlı ve referanstan bağımsız profil özellikleri için verilecek olan temel kurallar temelde her ikisi için de geçerlidir.

Çizgi profil ve yüzey profil karakteristikleri için genel kurallar ISO 1660 şartnamesi tarafından tanımlanmıştır. Çizgi ve yüzey profil için genel kurallar ise ISO 1101

şartnamesinde verilmiştir. Teknik çizimde çağırılmış olan bir çizgi ya da yüzey profil özelliği için bilgisayar destekli tasarım kullanılması gerekliliği tanımlandığı durum için kullanılan bilgisayar destekli tasarımın ISO 16792 şartnamesi tarafından tanımlanan kurallara uyması gerekmektedir. ISO 1660 şartnamesi profil toleransının uygulanabilmesi için temel kuralları aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

Profil toleransı uygulanan unsurun ölçüleri temel ölçüler olarak teorik kesin boyutlar ile ya da bilgisayar destekli tasarımın içine gömülü şekilde tanımlanır.

Çizgi profil toleransı bölgesi, aksi belirtilmedikçe merkezi teorik unsurun üzerinde bulunan tolerans çapındaki bir daire ile sınırlıdır.

Yüzey profil tolerans bölgesi, aksi belirtilmedikçe, merkezi teorik unsurun üzerinde bulunan tolerans çapındaki bir küre ile sınırlıdır.

- Unsur ilkesine göre belirtilen profil toleransı varsayılan olarak sürekliliği bozulmamış tekil bir unsur için geçerlidir.

- Bağımsızlık ilkesine göre birden fazla unsur için tanımlanmış olan profil özelliği, varsayılan olarak her bir unsura ayrı ayrı uygulanır. Eğer profil özelliği, birleşik alan gibi bir niteleyici ile kullanılması gerekiyorsa gösterge açıkça belirtilmelidir.

- Profil toleransı için baştan başa ya da çevresi boyunca gibi bir gösterge kullanılması gerekiyorsa, bu gösterge, UF, CZ, SZ gibi göstergeler ile açık hale getirilmelidir.

- Bir unsurun kendi özelliği ya da başka unsurlara bağlı bir özellik olarak tanımlanabilir. Bu olasılıklar ISO 1660 şartnamesinde Tablo 2.5 ile tanımlanmıştır. Doğrusal ve düzlemsel olan çizgi ve yüzeyler için unsur özellikleri doğrudan doğrusallık ve düzlemsellik özellikleri kullanılabilir (ISO 1660:2017).

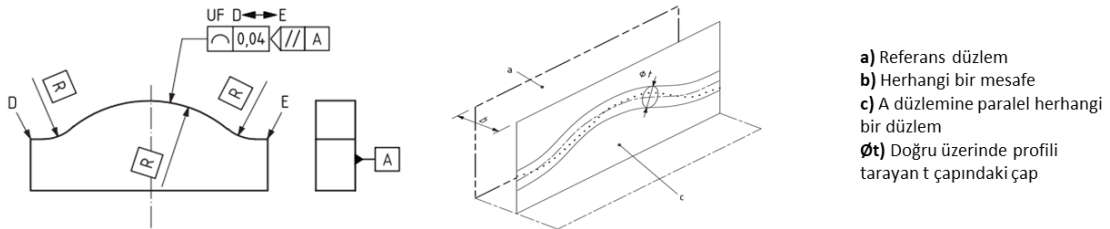
Tablo 2.5. ISO GPS sistemine göre geçerli olarak uygulanabilir profil tolerans çeşitleri (ISO 1660)

Unsur	Çizgi Profil Toleransı	Yüzey Profil Toleransı
Tümleşik doğrusal çizgi	x	
Türetilmiş doğrusal çizgi	x	
Tümleşik doğrusal olmayan çizgi	x	
Türetilmiş doğrusal olmayan çizgi	x	
Tümleşik düzlemsel yüzey		x
Türetilmiş düzlemsel yüzey		x
Tümleşik düzlemsel olmayan yüzey		x
Türetilmiş düzlemsel olmayan yüzey		x

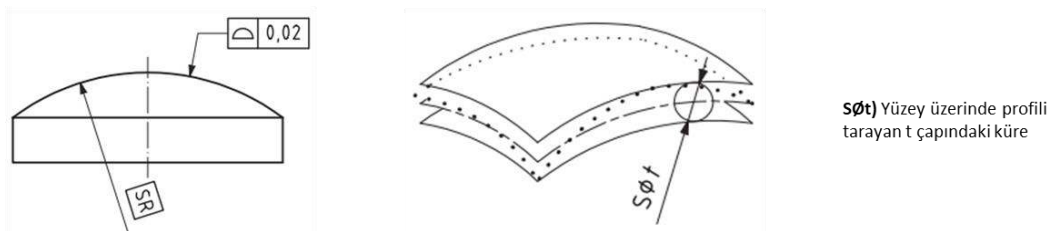
Profil özelliği referanstan bağımsız ve referansa bağımlı çizgi ve yüzey profil olmak üzere temel yöntem kullanılarak açıklanabilir.

Referanstan bağımsız çizgi ve yüzey profil toleransı için özelliğin doğası gereği nominal unsur, çizgi profil için bir doğrusal unsur şeklinde ya da birden fazla doğrusal unsurun birleşimi şeklinde ve yüzey profil için ise yüzeysel unsur şeklinde tanımlanır. Ölçülendirilmiş unsur, düz bir çizgi ya da düzlem olmadığı sürece, ISO 16792 şartnamesinde belirtildiği üzere teknik çizim ya da bilgisayar destekli tasarım ile belirsizliğe yer bırakmayacak şekilde tanımlanmalıdır.

ISO 1101'de referanstan bağımsız çizgi profil toleransı Şekil 2.12 kullanılarak gösterildiği üzere A kesişim düzlemine paralel olarak oluşturulan profil çıkarım çizgisi, tolerans büyüklüğündeki çap dairesini çevreleyen ve profili izleyen iki eşit mesafeli çizgi tarafından kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. Benzer olarak, referanstan bağımsız yüzey profil toleransı ise Şekil 2.13 kullanılarak gösterildiği üzere referans unsur üzerinden oluşturulan yüzey profilini, tolerans büyüklüğündeki çap küresi ile çevreleyen ve yüzey profilini izleyen iki eşit mesafeli çizgi tarafından kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. Her iki tanım için oluşturulan tolerans bölgeleri ilgili şartnameler ile açıklanmıştır (ISO 1101:2017).



Şekil 2.12. Referanstan bağımsız çizgisel profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

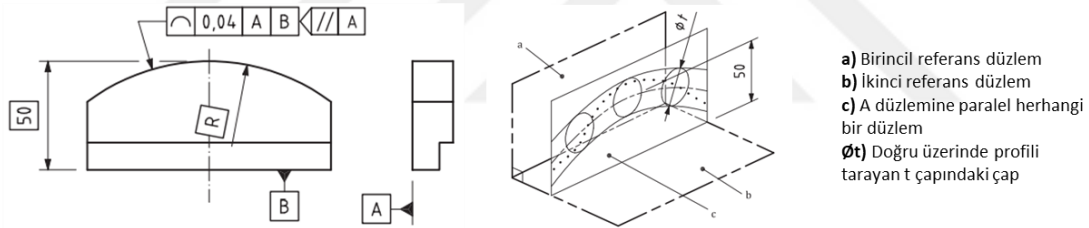


Şekil 2.13. Referanstan bağımsız yüzey profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

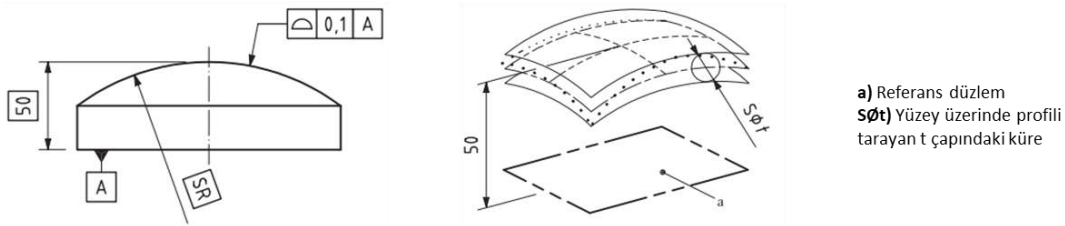
Referansa bağlı çizgi ve yüzey profil toleransları için özelliğin doğası gereği nominal unsur, çizgi profil için bir doğrusal unsur şeklinde ya da birden fazla doğrusal

unsurun birleşimi şeklinde ve yüzey profil için yüzeysel bir unsur olarak tanımlanır. Ölçülendirilmiş unsur, düz bir çizgi ya da düzlem olmadığı sürece, ISO 16792 şartnamesinde belirtildiği üzere teknik çizim ya da bilgisayar destekli tasarım ile belirsizliğe yer bırakmayacak şekilde tanımlanmalıdır.

ISO 1101'de referansa bağlı çizgi profil toleransı Şekil 2.14 kullanılarak gösterildiği üzere teorik kesin boyutlar kullanılarak oluşturulan, A ve B referans düzlemlerine göre çizgi profilini izleyen ve A kesişim düzlemine paralel olarak yönlendirilmiş olan tolerans büyüklüğündeki daire çapı ile çizgi profilini iki eşit mesafeli çizgi tarafından sınırlandıran bölge olarak tanımlanmıştır. Benzer olarak, referansa bağlı yüzey profil toleransı da Şekil 2.15 kullanılarak gösterildiği üzere teorik kesin boyutlar kullanılarak oluşturulan ve A referans düzlemlere göre yüzey profili izleyen ve tolerans büyüklüğündeki küre çapı ile yüzey profilini iki eşit mesafeli yüzey tarafından sınırlandıran bölge olarak tanımlanmıştır. Her iki tanım için oluşturulan tolerans bölgeleri ilgili şartnameler ile açıklanmıştır (ISO 1101:2017).



Şekil 2.14. Referansa bağlı çizgisel profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



Şekil 2.15. Referansa bağlı yüzey profil toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

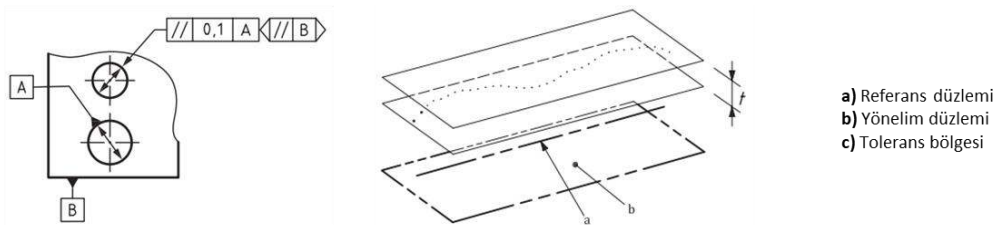
2.2.2. Yönelim toleransları

Bu tolerans grubu, teknik resimde belirtilen bir unsurun referansa göre yönelim açısından sapmasını belirlemek için kullanılır. Parça üzerindeki yönelim özellikleri dahili ya da türetilmiş unsurlar kullanılarak ölçülendirilebilir. Yönelim toleranslarının kötü

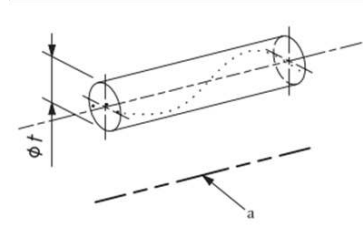
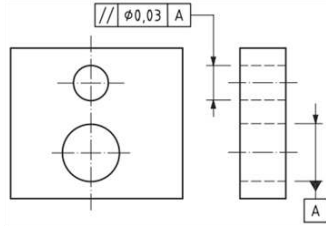
yönde etkilenmemesi için kullanılan referans unsurlar yeteri seviyede hassas olmalıdır. Paralellik, diklik, açısallık, referansa bağımlı çizgi profil ve referansa bağımlı yüzey profil şeklinde tanımlanan bu yönelim özellikleri, ilgili unsurun yönelim özelliklerini sınırlandırmak için referans olarak kullanılan diğer unsurları kullanır.

2.2.2.1. Paralellik

İki unsur arasındaki paralellik ölçüsünü sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsurlar dahili ya da türetilmiş doğru, doğru dizisi ya da yüzey bir unsur olabilir. Paralellik kullanılarak tanımlanmış her bir unsur, düz bir doğru ya da yüzey kullanılarak tanımlanmalıdır. Düz bir yüzey üzerinde bulunan bir dizi çizgi ölçülendirildiğinde, bir kesişim düzlemi göstergesi kullanılmalıdır. Ölçülendirilmiş unsurlar ve referanslar arasındaki açı doğal olarak 0° olacak şekilde teorik kesin boyutlar kullanılarak sınırlandırılmıştır. Bir referansa göre sorgulanan unsurun paralellik özelliği, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiği üzere sorgulanan unsurun, referansa paralel olacak şekilde iki paralel düzlem arasında sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiği üzere referansa paralel t kalınlığındaki iki paralel düzlem arasındaki bölge ile oluşturulur (ISO 1101:2017). Paralellik özellikleri farklı tür unsurlar arasındaki ilişkiler şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18 Şekil 2.19, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır. Bu özelliğin toleranslandırılması sırasında tasarım ve işlevsellik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yönelim göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca toleranslandırma sırasında çap göstergesi kullanılması ile tolerans bölgesi silindirik olarak tanımlanabilir.

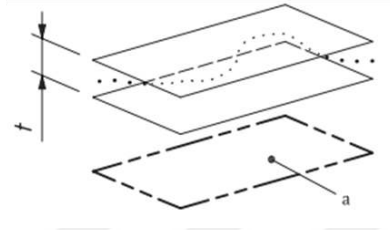
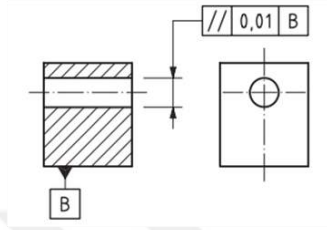


Şekil 2.16. Düzleme göre eksen paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



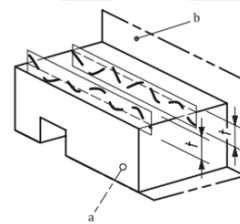
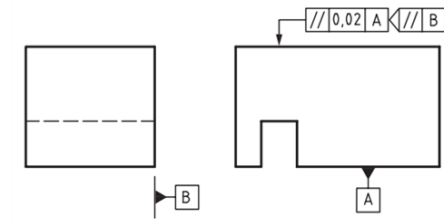
- a) Referans çizgi
 Øt) Silindirik tolerans bölgesi

Şekil 2.17. Eksene göre eksen paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



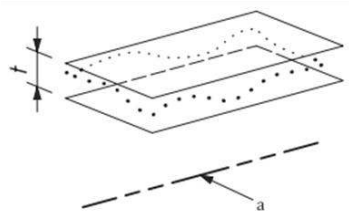
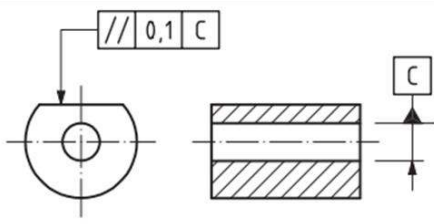
- a) Referans çizgi
 b) Tolerans bölgesi

Şekil 2.18. Düzleme göre eksen paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



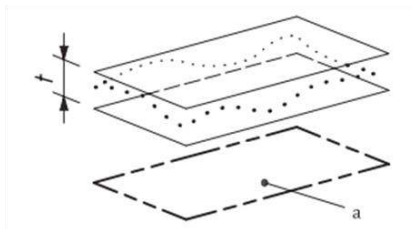
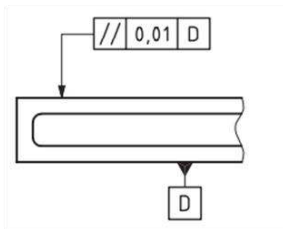
- a) Referans düzlemi
 b) Yönelim düzlemi
 t) Tolerans bölgesi

Şekil 2.19. Düzleme göre eksen-dizisi paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



- a) Referans eksen
 t) Tolerans bölgesi

Şekil 2.20. Eksene göre düzlem paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

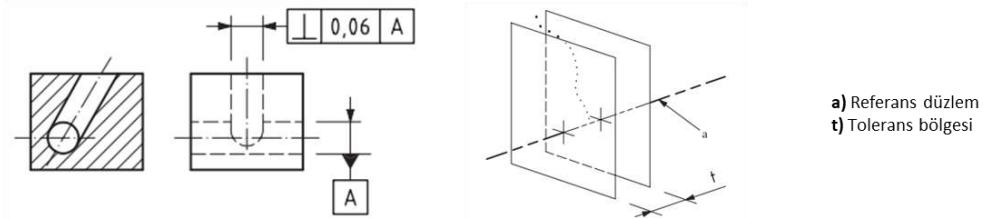


- a) Referans düzlem
 t) Tolerans bölgesi

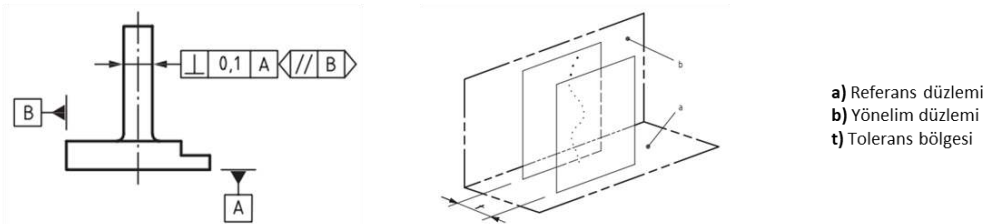
Şekil 2.21. Düzleme göre düzlem paralellik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

2.2.2.2. Diklik

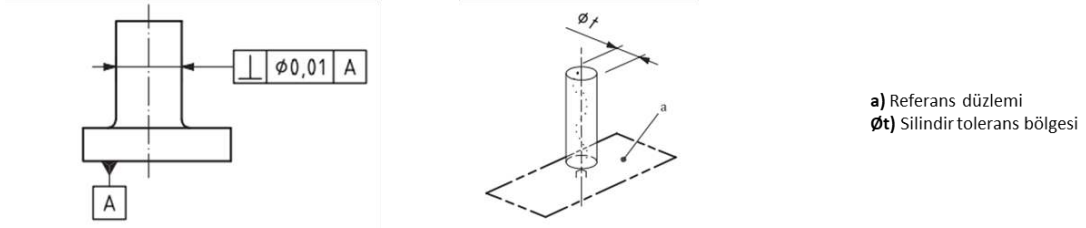
İki unsur arasındaki diklik ölçüsünü sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsurlar dahili ya da türetilmiş doğru, doğru dizisi ya da yüzey bir unsur olabilir. Paralellik kullanılarak tanımlanmış her bir unsur, düz bir doğru ya da yüzey kullanılarak tanımlanmalıdır. Düz bir yüzey üzerinde bulunan bir dizi çizgi ölçülendirildiğinde, bir kesişim düzlemi göstergesi kullanılmalıdır. Ölçülendirilmiş unsurlar ve referanslar arasındaki açı doğal olarak 90° olacak şekilde teorik kesin boyutlar kullanılarak sınırlandırılmıştır. Bir referansa göre sorgulanan unsurun diklik özelliği, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiği üzere sorgulanan unsurun, referansa dik olacak şekilde iki paralel düzlem arasında sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiği üzere referansa dik t kalınlığındaki iki paralel düzlem arasındaki bölge ile oluşturulur (ISO 1101:2017). Diklik özellikleri farklı tür unsurlar arasındaki ilişkileri içerecek şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.22, Şekil 2.23, Şekil 2.24, Şekil 2.25 ve Şekil 2.26 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır. Bu özelliğin toleranslandırılması sırasında tasarım ve işlevsellik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yönelim göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca toleranslandırma sırasında çap göstergesi kullanılması ile tolerans bölgesi silindirik olarak tanımlanabilir.



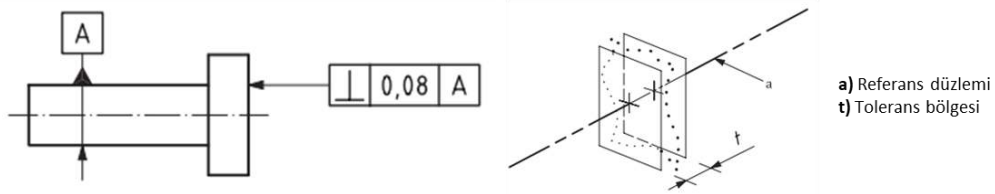
Şekil 2.22. Eksene göre eksen diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



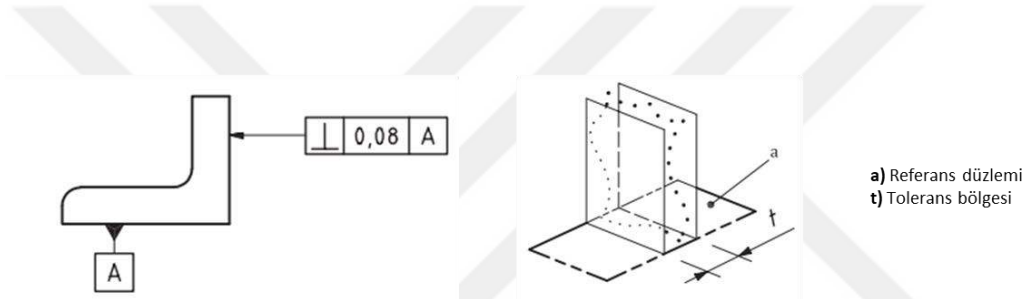
Şekil 2.23. Düzleme göre eksen diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



Şekil 2.24. Düzleme göre eksen diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



Şekil 2.25. Eksene göre düzlem diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması. (ISO 1101)

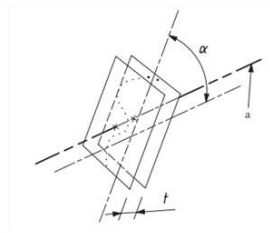
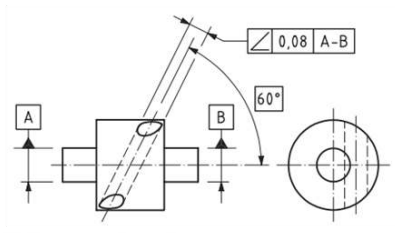


Şekil 2.26. Düzleme göre düzlem diklik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

2.2.2.3. Açısallık

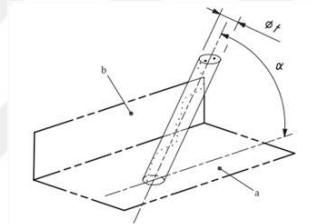
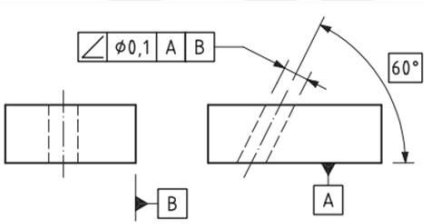
İki unsur arasındaki açı ölçüsünü sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsur dahili ya da türetilmiş bir doğru, doğru dizisi ya da yüzey bir unsur olabilir. Paralellik kullanılarak tanımlanmış her bir unsur, düz bir doğru ya da yüzey üzerinden verilmelidir. Düz bir yüzey üzerinde bulunan bir dizi çizgi ölçülendirildiğinde, bir kesişim düzlemi göstergesi kullanılmalıdır. Ölçülendirilmiş unsurlar ve referanslar arasındaki açı 0° ile 90° arasındaki teorik kesin boyutlar kullanılarak gerekli açı tanımlamaları yapılabilir. Bir referansa göre sorgulanan unsurun açısallık özelliği, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiği üzere sorgulanan unsurun, referansa tanımlı bir açı yapacak şekilde iki paralel düzlem arasında sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiği üzere referansa dik t kalınlığındaki iki paralel düzlem arasındaki bölge ile oluşturulur. (ISO 1101:2017). Açısallık özellikleri farklı tür unsurlar arasındaki ilişkileri içerecek şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde

tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.27, Şekil 2.28, Şekil 2.29 ve Şekil 2.30 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır. Bu özelliğin toleranslandırılması sırasında tasarım ve işlevsellik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yönelim göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca toleranslandırma sırasında çap göstergesi kullanılması ile tolerans bölgesi silindirik olarak tanımlanabilir.



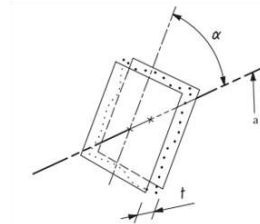
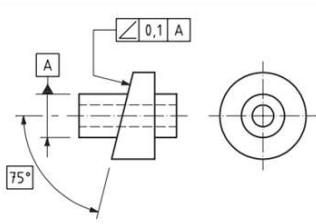
- a) A-B Referans eksen
- α) Teorik kesin boyut ile tanımlı açı
- t) Tolerans bölgesi

Şekil 2.27. Eksene göre eksen açısalılık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



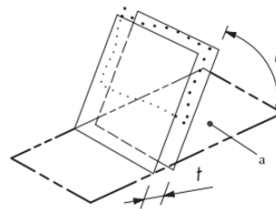
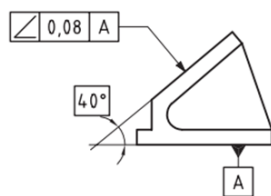
- a) Birincil referans düzle
- b) İkincil referans düzle
- α) Teorik kesin boyut ile tanımlı açı
- t) Silindirik tolerans bölgesi

Şekil 2.28. Referansa göre eksen açısalılık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



- a) Referans eksen
- α) Teorik kesin boyut ile tanımlı açı
- t) Tolerans bölgesi

Şekil 2.29. Eksene göre düzlem açısalılık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



- a) Referans eksen
- α) Teorik kesin boyut ile tanımlı açı
- t) Tolerans bölgesi

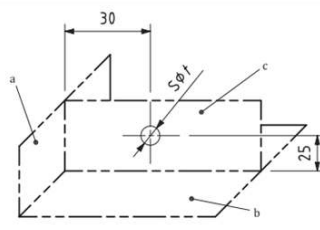
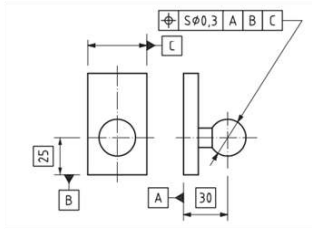
Şekil 2.30. Düzleme göre düzlem açısalılık toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

2.2.3. Yer toleransları

Bu tolerans grubu, teknik resimde belirtilen bir unsurun referansa göre yer açısından sapmasını belirlemek için kullanılır. Parça üzerindeki yer özellikleri dahili ya da türetilmiş unsurlar kullanılarak ölçülendirilebilir. Yer toleranslarının kötü yönde etkilenmemesi için kullanılan referans unsurlar yeteri seviyede hassas olmalıdır. Paralellik, diklik, açısallık, referansa bağımlı çizgi profil ve referansa bağımlı yüzey profil şeklinde tanımlanan bu yönelim özellikleri, ilgili unsurun yönelim özelliklerini sınırlandırmak için referans olarak kullanılan diğer unsurları kullanır.

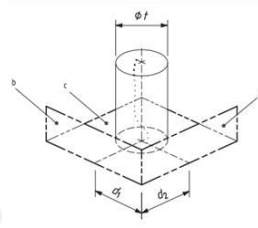
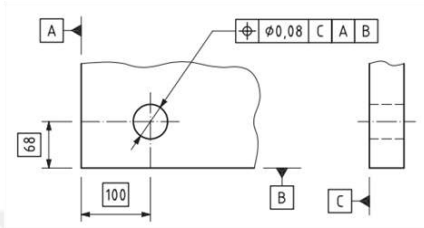
2.2.3.1. Konum

Bir unsurun başka bir referans unsura göre konum ölçüsünü sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsur dahili ya da türetilmiş bir nokta, düz doğru ya da yüzey ve türetilmiş eğri çizgi ya da yüzey olabilir. Ölçülendirilmiş unsur, düz bir çizgi ya da yüzey olmadığı sürece, ISO 16792 şartnamesinde belirtildiği üzere teknik çizim ya da bilgisayar destekli tasarım ile belirsizliğe yer bırakmayacak şekilde tanımlanmalıdır. Bir referansa göre sorgulanan unsurun konum özelliği, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiği üzere sorgulanan unsurun, referanslara göre tanımlanmış teorik kesin boyutlar ile belirtilen konumda olacak şekilde belirtilen tolerans ile sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiği üzere tanımlanan merkez nokta etrafındaki bir çap, silindir ve küre ya da referansa paralel t kalınlığındaki iki paralel düzlem arasındaki bölge ile oluşturulabilir (ISO 1101:2017). Konum özellikleri farklı tip unsurlar arasındaki ilişkiler şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.31, Şekil 2.32, Şekil 2.33 ve Şekil 2.34 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır. Bu özelliğin toleranslandırılması sırasında tasarım ve işlevsellik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yönelim göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca toleranslandırma sırasında çap göstergesi kullanılması ile tolerans bölgesi silindirik olarak tanımlanabilir.



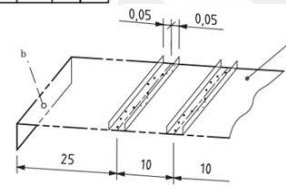
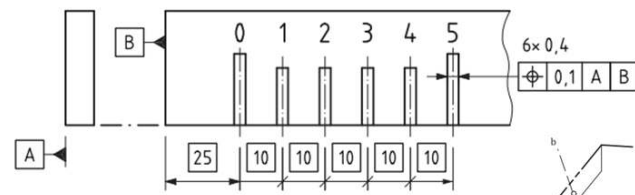
- a) Birincil referans düzlem
- b) İkincil referans düzlem
- c) Üçüncül referans düzlem
- Søt) Küresel tolerans bölgesi

Şekil 2.31. Referansa göre nokta konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



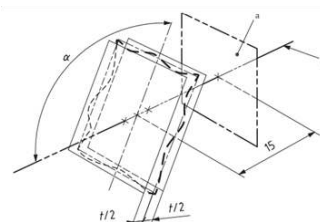
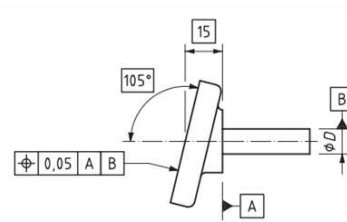
- c) Birincil referans düzlem
- a) İkincil referans düzlem
- a) Üçüncül referans düzlem
- d1) İkincil referansa göre teorik kesin boyut
- d2) Üçüncül referansa göre teorik kesin boyut
- øt) Silindirik tolerans bölgesi

Şekil 2.32. Referansa göre eksen konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



- a) Birincil referans düzlem
- b) İkincil referans düzlem

Şekil 2.33. Referansa göre düzlem konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



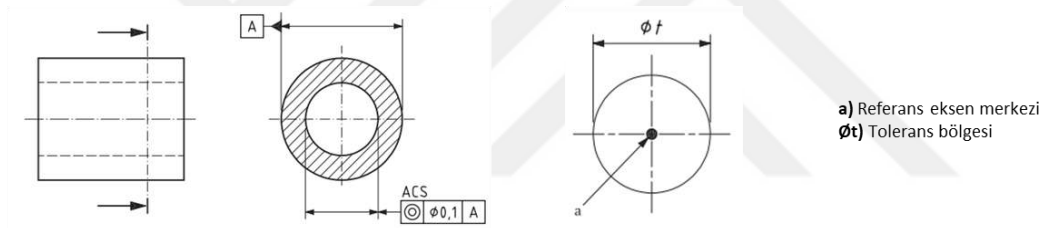
- a) Birincil referans düzlem
- b) İkincil referans eksen
- α) Teorik kesin boyut ile tanımlı açı

Şekil 2.34. Referansa göre düzlem konum toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

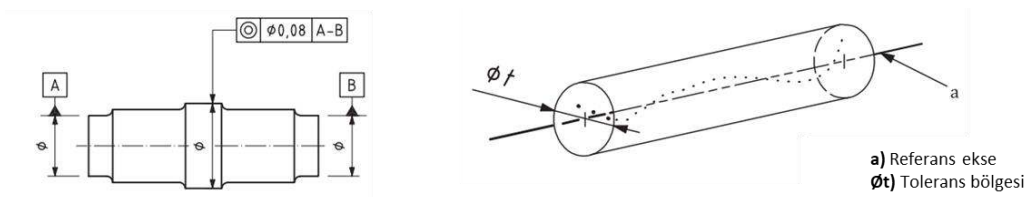
2.2.3.2. Eşmerkezlilik ve eşeksenlilik

Bir unsurun başka bir referans unsura göre eş merkezlilik ya da eşeksenlilik değerini sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsur dahili ya da türetilmiş bir nokta, nokta dizisi, düz doğru olabilir. Eğer sorgulanan unsur düz bir çizgi üzerindeki nokta dizisi ise bu çizgi üzerinde herhangi bir kesit için özelliğin geçerli olması

bekleniyorsa ACS göstergesi kullanılmalıdır. Bir referansa göre sorgulanan unsurun eşmerkezlilik ve eşeksenlilik özelliği, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiği üzere sorgulanan unsurun, referanslara göre tanımlanmış teorik kesin boyutlar ile belirtilen eşmerkez/eşeksen üzerinde olacak şekilde belirtilen tolerans ile sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiği üzere tanımlanan merkez nokta etrafındaki bir çap ve silindir ile oluşturulabilir (ISO 1101:2017). Eşmerkez/eşeksen özellikleri farklı tip unsurlar arasındaki ilişkiler şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.35 ve Şekil 2.36 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır. Bu özelliğin toleranslandırılması sırasında tasarım ve işlevsellik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yönelim göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca toleranslandırma sırasında çap göstergesi kullanılması ile tolerans bölgesi silindirik olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.35. Eksene göre nokta eşmerkez toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

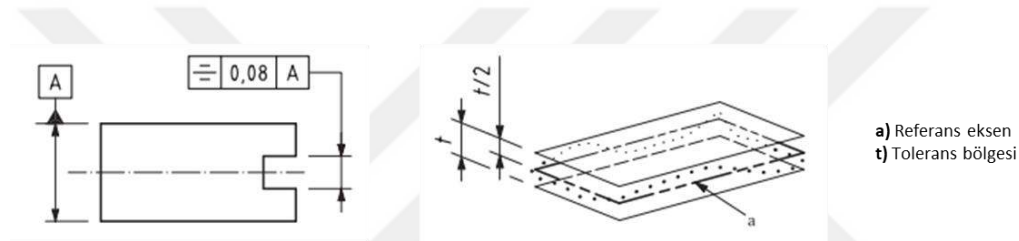


Şekil 2.36. Eksene göre eksen eşeksenlilik toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

2.2.3.3. Simetri

Bir unsurun başka bir referans unsura göre simetri değerini sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsur dahili ya da türetilmiş bir nokta, nokta dizisi, düz doğru, düz doğru dizisi ya da düz yüzey olabilir. Düz bir yüzey üzerinde bulunan bir dizi çizgi ölçülendirildiğinde, bir kesişim düzlemi göstergesi kullanılmalıdır. Eğer sorgulanan unsur düz bir çizgi üzerindeki nokta dizisi ise bu çizgi üzerinde herhangi bir kesit için

özelliğın geçerli olması bekleniyorsa ACS göstergesi kullanılmalıdır. Ayrıca, teknik çizimde tolerans bölgesinin uzayda dönüş hareketini kitleyen en az bir referans belirtilmelidir. Simetri özelliğı yerine ilgili teorik kesin boyutlu ölçüler ve referansların sıfır olduğu sürece konum özelliğı kullanılabilir. Bir referansa göre sorgulanan unsurun simetri özelliğı, aşağıdaki şekil kullanılarak gösterildiğı üzere sorgulanan unsurun, referansa göre merkezi teorik kesin boyutlar ile tanımlanan yerde olacak şekilde iki paralel düzlem arasında sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiğı üzere referans merkezini içine alan t kalınlığındaki iki paralel düzlem arasındaki bölge ile oluşturulur (ISO 1101:2017). ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde referansa göre simetri özelliğı Şekil 2.37 ile tanımlanmıştır.



Şekil 2.37. Düzleme göre düzlem simetri toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)

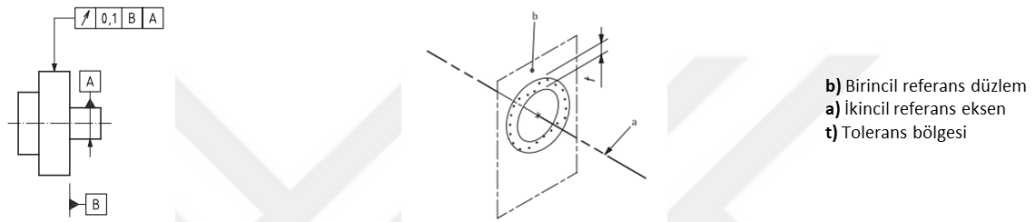
2.2.4. Salgı toleransları

Bu tolerans grubu, teknik resimde belirtilen bir unsurun tanımlanmış referansa göre salgı açısından sapmasını belirlemek için kullanılır. Parça üzerindeki salgı özellikleri, dahili unsurlar kullanılarak ölçülendirilir. Ölçülendirilen unsur için en doğru sonuçları elde edebilmek için referansın yeteri kadar hassas olması gerekmektedir. Salgı ve toplam salgı şeklinde tanımlanan bu salgı özellikleri, ilgili unsurun referans unsura göre salgısını sınırlandırmak için kullanılır.

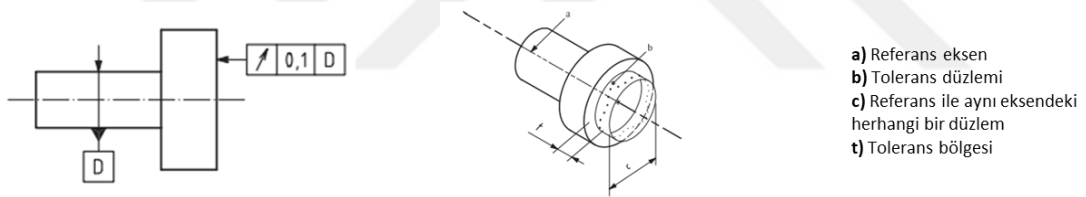
2.2.4.1. Salgı

Bir unsurun başka bir referans unsura göre salgı değeriını sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsur dahili bir çevresel çizgi ya da çevresel çizgi dizisi olabilir. Bir referansa göre sorgulanan salgı özelliğı, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiğı üzere sorgulanan unsur için oluşturulan çevresel çıkarım çizgisinin, eş merkezli iki çember arasında sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiğı üzere, aralarındaki mesafe t olan eş merkezli

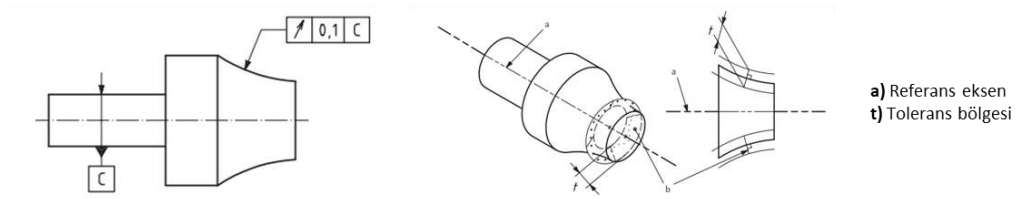
iki çember arasında kalan alan ile tanımlanır (ISO 1101:2017). Salgı özellikleri farklı tür unsurlar arasındaki ilişkileri içerecek şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.38, Şekil 2.39, Şekil 2.40 ve Şekil 2.41 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır. Bu özelliğin toleranslandırılması sırasında tasarım ve işlevsellik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yönelim göstergeleri kullanılabilir. Ayrıca dairesel salgı özelliği için eksene dik kesişim düzleminin referans düzlem üzerine taşıyan yansıma düzlemi kullanılabilir.



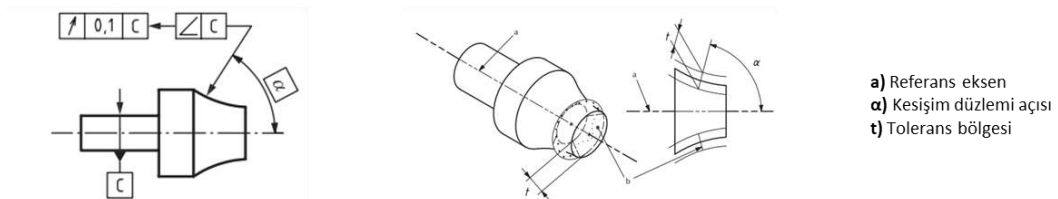
Şekil 2.38. Referansa göre dairesel salgı toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



Şekil 2.39. Eksene göre ekstenel salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101)



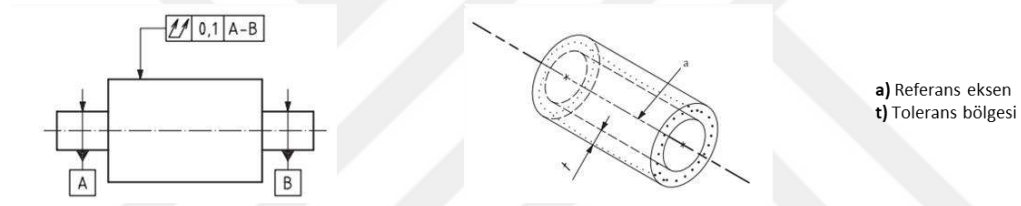
Şekil 2.40. Eksene göre yönden bağımsız salgı toleransının tanımlanması ve yorumlanması (ISO 1101)



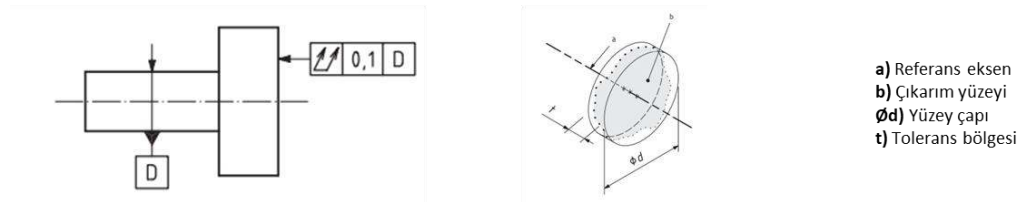
Şekil 2.41. Eksene göre yöne bağımlı salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101)

2.2.4.2. Toplam Salgı

Bir unsurun başka bir referans unsura göre salgı değerini sınırlamak için kullanılan bu özellik için ilgili unsur dahili bir düz yüzey ya da silindirik yüzey olabilir. Bu özellik için tolerans bölgesi unsurun kendi şeklini korur fakat silindirik yüzeyler için radyal ölçü sınırlandırılmaz. Bir referansa göre sorgulanan toplam salgı özelliği, sırasıyla aşağıdaki şekiller kullanılarak gösterildiği üzere sorgulanan unsur için oluşturulan çevresel çıkarım çizgisinin, eş merkezli iki silindir arasında sınırlandırılması şeklinde tanımlanır. Tolerans bölgesi, şekillerde tanımlanarak gösterildiği üzere, aralarındaki mesafe t olan eş merkezli iki silindir arasında kalan alan ile tanımlanır (ISO 1101:2017). Toplam salgı özellikleri farklı tür unsurlar arasındaki ilişkileri içerecek şekilde tasarım ihtiyaçlarına göre çizimde tanımlanabilir. Bu türler, ISO 1101 şartnamesi çerçevesinde tanımlı özellikler açıklamaları ile birlikte Şekil 2.42 ve 2.43 kullanılarak sırasıyla tanımlanmıştır.



Şekil 2.42. Referansa göre dairesel toplam salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101)



Şekil 2.43. Referansa göre eksenel toplam salgı toleransının çizim üzerinde tanımlanması (ISO 1101)

3. ÖLÇÜM BİLİMİ

İnsanlık tarihinin başlangıcından itibaren ağırlık ve uzunluk başta olmak üzere günlük hayatta kullanılan birçok şeyi ölçmek için çeşitli ölçüm araçlarına ve bu araçların standartlaştırılmasına ihtiyaç vardı. Uzunluk için bölgeden bölgeye değişiklik göstermek üzere insan uzuvları kullanılmaktaydı. Ağırlık için avuç büyüklüğündeki bir taşın ağırlığı ve zaman için ise gün ve ay döngüleri gibi temel kavramlar günlük ihtiyaçları karşılamak için yeterliydi fakat medeniyetlerin gelişimi ile birlikte ölçüm bilimi alanındaki ihtiyaçlar da giderek daha karmaşıklaştı ve daha iyi tanımlara ihtiyaç duyuldu (Butcher, 2012).

Yıllar boyu ülkeler tarafından yerel olarak geliştirilen bu ölçüm standartları sebebi ile ülkeler arasındaki ticaret ilişkileri kötü olarak etkileniyordu. Bu yerel standardizasyon 17'nci yüzyıla kadar devam etti fakat sanayi devrimi ile birlikte bölgesel çalışmalar yerine küresel olarak ölçümleri standartlaştırma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Günümüzde hala kullanılmakta olan metre sözleşmesi ile birlikte, 1875 yılından beri küresel ağırlık ve ölçüm sistemlerinin çerçevesi belirlendi ve küresel bir standartlaştırma çalışması anlamında önemli bir dönüm noktası yaşandı. Katılımcılar, bu sözleşme ile birlikte ölçüm bilimi alanındaki küresel kararların alınacağı Bureau International des Poids et Mesures (BIMP) kuruluşunu oluşturdular (Butcher, 2012).

Bu kuruluşun oluşturulması ile birlikte küresel boyutta ölçme bilimi alanındaki birimlerin tanımlanması, ilkelerin, yöntemlerin ve kuralların belirlenmesi sağlanmıştır. Böylece ölçümler arasındaki anlam karmaşaları ve belirsizlikler en düşük seviyeye indirilmiştir. Ayrıca ölçüm izlenebilirliği sisteminin kurulması ile birlikte ölçüm cihazlarının kalibrasyonları ve ölçümlerin uluslararası bir standarda bağlı olarak tanımlanabilmesi gibi temel konular netleştirilmiştir.

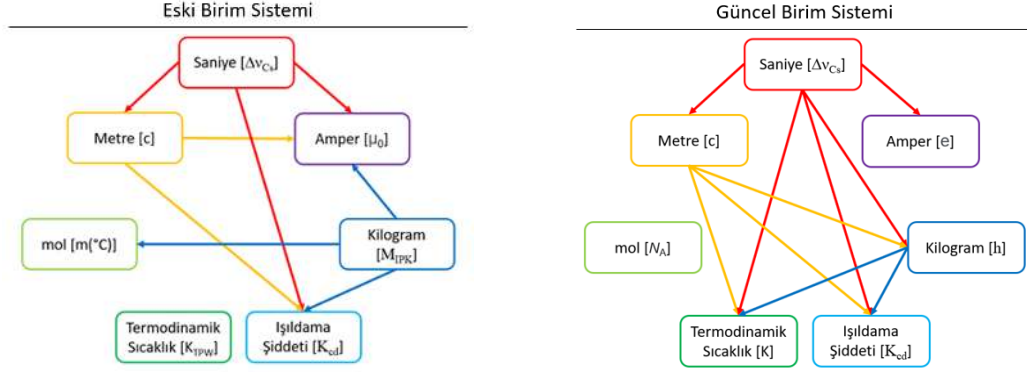
Bugün uluslararası birimler sistemi (SI) olarak adlandırılan ve dünyanın büyük çoğunluğu tarafından bilim, teknoloji, sanayi ve ticaretin temel dili olarak tercih edilen bu ölçüm sistemi 1960 yılında düzenlenen 11. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı (CGPM) sonrasında alınan kararlar çerçevesinde kurulmuştur. Uluslararası birimler sisteminde kullanılan tüm ölçüm birimleri, temel yedi sabit kullanıldığında türetilbilir şekilde tanımlanmıştır. Bilimsel ilerleme göz önüne alınarak özel olarak seçilmiş olan bu yedi temel birim, tüm birimler sistemi oluşturan yapı taşlarıdır. Kullanılan bu temel ölçüm birimleri Tablo 3.1 kullanılarak verilmiştir (BIMP: SI Brochure, 2019).

Tablo 3.1. BIMP tarafından tanımlanan temel ölçüm birimleri (BIMP: SI Brochure, 2019)

Temel Nicelik		Temel Büyüklük		
İsim	Özgün Sembol	İsim	Sembol	Tanım
Zaman	t	Saniye	s	Saniye, Sezyum-133 bozulmamış temel durumdaki atomunun aşırı ince geçiş frekansı ($\Delta\nu_{Cs}$) sayısal değeri 192631770 Hz sabit alınarak tanımlanır.
Uzunluk	l, x, r, vb.	Metre	m	Metre, ışık hızının boşluktaki hızının (c) sayısal değeri 299792458 ms^{-1} sabit alınarak, $\Delta\nu_{Cs}$ saniye cinsinden tanımlanır.
Ağırlık	m	Kilogram	kg	Kilogram, Planck sabitinin (h) sayısal değeri $6.62607015 \times 10^{-34}$ Js ya da eşit kgm^2s^{-1} sabit alınarak, c metre ve $\Delta\nu_{Cs}$ saniye tanımlanır.
Elektirik akımı	I, i	Amper	A	Amper, temel elektrik yükün (e) sayısal değeri $1.602176634 \times 10^{-19}$ C ya da eşit As sabit alınarak, $\Delta\nu_{Cs}$ saniye cinsinden tanımlanır.
Termodinamik sıcaklık	T	Kelvin	K	Kelvin, Boltzmann sabitinin (k) sayısal değeri 1.380649×10^{-23} JK ⁻¹ ya da eşit $kgm^2s^{-2}K^{-1}$ sabit alınarak, kilogram h, metre c ve saniye $\Delta\nu_{Cs}$ cinsinden tanımlanır.
Madde miktarı	n	Mol	mol	Bir mol tam olarak $6.02214076 \times 10^{23}$ temel öge içerir. Bu sayı, mol ⁻¹ biriminde ifade edildiğinde Avogadro sabitinin (N_A) sabit sayısal değeri olarak bilinir ve Avogadro sayısı olarak adlandırılır. Temel bir eleman atom, molekül, iyon, elektron, ya da parçacık veya parçacık grubu olabilir.
Işıldama şiddeti	I _v	Kandela	cd	Monokromik radyasyona ait ışık etkinliğinin sayısal değeri 683 lmW ⁻¹ ya da eşit $cdsrkg^{-1}m^{-2}s^3$ sabit alınarak, kilogram h, metre c ve saniye $\Delta\nu_{Cs}$ cinsinden tanımlanır.

BIPM tarafından tanımlanmış olan uluslararası birimler sistemlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki farklar Şekil 3.1 kullanılarak özetlenmiştir. Bu güncelleme ile birlikte temel olarak hedef, tüm temel birimleri zaman içinde değiştiği gözlemlenen değişkenlerden kurtarmak ve günlük yaşantımızı doğrudan etkilemeden, evren tarafından belirlenmiş doğal sabitleri kullanarak bilimin çeşitli alanlarında

kullanılacak olan çeşitli sabitlere zemin oluşturacak, zaman içindeki değişikliklere kapalı, istikrarlı, doğru ve evrensel bir dizi temel birim oluşturmaktır.



Şekil 3.1. BIPM tarafından tanımlanan eski ve güncel uluslararası birim sistemleri için temel birimler arasındaki ilişkinin tanımlanması

SI sistemine bağlı olarak tanımlanmış bir ölçüm işlemini gerçekleştirebilmek için ilgili büyüklüğün tanımlı olması, büyüklük ve nesne hakkında yeterli nicel bilginin var olması, büyüklüğün uluslararası bir standart ile ilişkili olması gibi koşullar yerine getirilmelidir. Böyle bir büyüklüğün ölçüm sonucunu öğrenmek için belirli ölçüm kuramları etrafında tanımlanmış olan ölçüm yöntemleri kullanılır. Bir ölçüm yöntemleri için temel tanımlar BIPM tarafından hazırlanan ölçüm bilimi sözlüğü tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir (BIMP: JCGM 200:2012).

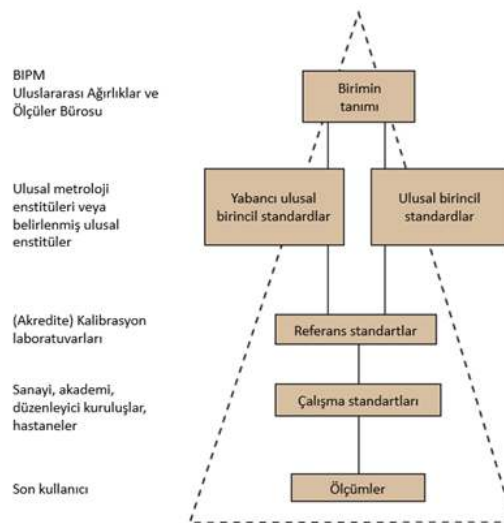
Tablo 3.2. BIMP ölçüm bilimleri sözlüğündeki temel tanımlar ve açıklamalar (BIMP: JCGM 200, 2008)

Ölçüm ilkesi	Bir ölçümün temelini oluşturan olgudur.
Ölçüm yöntemi	Bir ölçüm için kullanılan temel mantıksal işlem sıralamasının genel açıklamasıdır.
Ölçüm sistemi	Belirtilen türdeki büyüklükler hakkında tanımlı aralıklarda ölçüm değerleri hakkındaki bilgileri oluşturmak için kullanılan, birleştirilmiş ve uyarlanmış, bir ya da birden fazla ve bazen farklı türdeki ölçüm cihazı dizisidir.
Ölçüm belirsizliği	Ölçülen büyüklüğe ait ölçümün olası dağılımını temsil eden pozitif yönlü nicel özelliktir. Bir ölçüm sonucu, ölçüme ait belirsizlik ve ölçüm birimi ile birlikte verilmelidir

3.1. Ölçüm İzlenebilirliği ve Kalibrasyon

Ölçüm izlenebilirliğinin sağlanabilmesi, metre sözleşmesinin ana hedeflerinden biridir. Temel olarak, ölçüm belirsizliği, bir ölçüm sırasında kullanılan cihazın oldukça hassas bir referans parçaya göre karşılaştırılması ve bu referansın, farklı kurumlar tarafından çok daha hassas cihazlar ve referanslar kullanılarak doğrulanması şeklinde sağlanır. Referansların ve cihazların birbirine göre karşılaştırılması ve doğrulanması işlemi, hassasiyet giderek artarak öncelikle ulusal metroloji enstitülerine (NMI) ardından da SI sisteminde kullanılan temel standart referanslar ve cihazlara kadar takip edilebilmesi gerekmektedir. İzlenebilirliğin sağlanabilmesi için yapılan çalışmalar sırasında ara bölümlerdeki kalibrasyon kuruluşlarının ISO/IEC 17025 gibi uluslararası şartnamelere uygun olarak çalışması beklenmektedir (Wallard, 2011).

Bir ölçümün güvenilirliğini sağlamak için ölçülen bir büyüklük, belgeleri ile birlikte bağlantılar arasında herhangi bir kopukluk olmadan izlenebilirlik zinciri üzerinden temel birimler tarafından tanımlanmış referans değerler ile ilişkilendirilmelidir. Şekil 3.2 kullanılarak gösterildiği üzere bir izlenebilirlik zinciri, ölçüm sonuçlarının ya da bir referans standarda ait değerlerin, uluslararası birimler sistemine göre yüksek seviyeli standartlar kullanılarak tanımlanmış temel standart değerlere göre zincir şeklinde ilişkisinin kurulması ile oluşturulur. Bu ilişki son kullanıcı için genellikle akredite laboratuvarlar ve ulusal metroloji enstitüleri yardımı ile kurulur fakat uluslararası anlaşmalar kapsamında yabancı bir ülkenin ulusal metroloji enstitülerinin imkanları kullanılarak da izlenebilirlik zinciri sağlanabilir (Czichos, 2011).



Şekil 3.2. Ölçümler için izlenebilirlik zinciri tanımı (Czichos, 2011)

Kalibrasyon, bir ölçüm standardı ile karşılaştırıldığında ölçüm sırasında okunan değerlerin nasıl arasındaki bağlantıyı ortaya çıkarmak için gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu işlem ile birlikte, kullanılan standartlarının değerleri ile ölçüm sırasında okunan değerler arasında bir ilişki kurmak ve belirsizlik değerlerini tespit etmek amaçlanır (BIMP: JCGM GUM-6:2020). Bir ölçümün uluslararası standartlara göre izlenebilirliğini sağlayabilmek için genellikle ölçüm standartları veya sertifikalı malzemelere göre karşılaştırma ile ölçüm öncesinde hazırlık yapılan kalibrasyon işlemleri ya da ölçüm sistemini kullanım sırasında doğrulayan referans malzemeler ile birlikte yapılan ölçüm yöntemleri gibi araçlar kullanılabilir.

Genel olarak bir kalibrasyon işlemi, Ölçüm Belirsizliğinin İfadesi Rehberi (GUM) ile tanımlandığı üzere, belirli koşullar altında, amacı bir birim ya da nicel değeri tanımlamak, oluşturmak ya da yeniden üretmek olan malzeme ölçüsü, ölçüm aleti, referans malzeme ya da ölçüm sistemi olarak tanımlanan bir ölçüm standardını kullanarak, bu ölçüm standardı için geçerli olan değer ile bu değerlerin ölçüm ekipmanı tarafından oluşturulan karşılık değeri arasındaki ilişkiyi kuran bir dizi işlem olarak tanımlanabilir (BIMP: JCGM 100:2008).

3.2. Ölçüm Belirsizliği

Ölçüm belirsizliği, Uluslararası Metrolojide Temel ve Genel Terimler Sözlüğü 'ne (VIM) göre, ölçülen bir büyüklüğün gerçek değerinin içinde bulunduğu ve ölçüm sırasında oluşan sistematik ve raslantısal hataları da içeren bir aralık olarak tanımlanır (BIMP: JCGM 200:2012). GPS sapmaları için ISO 14253-1 şartnamesine göre aksi belirtilmedikçe ölçüm belirsizliği %95 istatistiksel güven seviyesinde olmalıdır (ISO 14253-1: 2017).

Ölçüm belirsizliğinin hesaplanması için farklı yöntemler kullanılabilir. Ölçüm bilminde belirsizliği tahmin edebilmek için kullanılan bazı yöntemler Ölçüm Belirsizliğinin İfadesi (GUM) ve Monte Carlo yöntemleridir. Her iki yöntem de ölçüm modelinin oluşturulması, niceliklere ait olasılık dağılımlarının tanımlanması, ilgili miktarları belirleyen bir hesaplama aşaması ile ölçüm sistemine ait belirsizliklerin hesaplanmasında kullanılırlar. Yöntemler için ilk iki adım ortak olmasına rağmen, üçüncü adımda GUM hesaplamaları kolaylaştırmak için doğrusallaştırma uygulayarak farklı bir hesaplama yöntemi kullanır (Mohamed & Hegazy, 2017). BIMP, IEC, IFCC ve ILAC

gibi çeşitli üye kuruluşların bulunduğu Ortak Metroloji Kılavuzları Komitesi (JGGM) tarafından yayınlanan GUM çok fazla teorik bilgi içerdiği için zaman içerisinde ölçüm belirsizliği hesaplamaları için belirsizlik yönetimi için prosedür (PUMA), belirsizlik bütçesi yöntemi (ISO 14253-2), sanal koordinat ölçüm sistemi yöntemi (ISO 15530-4) ve çıkarım yöntemi (ISO 15530-3) gibi çeşitli yöntemler de geliştirilmiştir.

GUM yöntemine göre ölçüm belirsizliği hesaplamasında bazı temel ilkeler mevcuttur. Bu ilkelere göre, ölçülecek olan büyüklük için değer bir olasılık fonksiyonu ile tanımlanır ve kesin olarak bilinemez. Ölçüm sonucu, bu olasılık fonksiyonunun içindeki yaklaşık bir değerdir ve bu değer ölçüm değişkenliğinin karekökünün genişletilmesi ile hesaplanan ölçüm belirsizliği değeri birlikte sunulur. Bu hesaplar sırasında, A tipi tekrarlı ölçümler üzerinden yapılan istatistiksel belirsizlik hesaplama çalışmaları ya da bunlar dışında kalan B tipi ölçüm belirsizliği hesaplama yöntemleri kullanılır. Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında GUM tarafından kullanılan yöntem Tablo 3.3. kullanılarak gösterildiği gibi sıralanabilir (Czichos, 2011).

Tablo 3.3. GUM kapsamında tanımlanmış ölçüm belirsizliği hesaplama adımları (Czichos, 2021)

GUM Kapsamındaki Tanımlı Adımlar	Açıklama
Bileşenlerin belirlenmesi	Ölçüm belirsizliğine etki edebilecek tüm ölçüm belirsizliği bileşenleri tanımlanır. Ölçüm belirsizliğinin kaynağını tespit edebilmek için ölçüm sürecinden alınan niceliksel değerler kullanılarak matematiksel bir model uygulanır.
Standart standart belirsizliklerin hesaplanması	Ölçüm belirsizliğine ait tüm bileşenler için standart belirsizlik A ya da B tipi değerlendirme sonucunda belirlenen cinsten ifade edilecek şekilde hesaplanır.
Bileşik ölçüm belirsizliğinin hesaplanması	Belirsizlik bütçesi ve belirsizliğin yayılması yasasına göre bireysel belirsizliklerin birleştirilmesi ile bileşik ölçüm belirsizliği karelerin toplamalarının karekökü gibi yöntemler kullanarak hesaplanır.
Genişletilmiş ölçüm belirsizliğinin hesaplanması	Genişletilmiş belirsizlik değeri (U), bileşik ölçüm belirsizliği değerinin, kapsama katsayısı (k) ile çarpılması ile elde edilir.
Ölçüm belirsizliğinin ifade edilmesi	Ölçüm sonucu, ölçülen değer ve artı ve eksi yönlü ölçüm belirsizliğinin oluşturduğu bölge ile ifade edilir.

3.3. Üretim ve Ölçüm Bilimi Arasındaki İlişki

Ölçüm biliminin üretim içindeki ana görevi, ürün testi olarak da adlandırılan, genellikle iş parçası olan ürünün çeşitli özelliklerine ait kalite kriterlerinin ölçülmesi, gerekliliklerin karşılandığının kayıt altına alınması olarak özetlenebilir fakat üretimde ölçülecek olan nesneler her zaman sadece iş parçaları olmazlar. Üretim ortamında çeşitli bazen de test ekipmanları, makineler ve hatta ölçüm ekipmanlarının bile ölçümleri gerçekleştirilebilir. Herhangi bir parçasına ait bir testin sonucunun desteklenmesi için bu ölçüm kayıtları kullanılır. Üretim alanında yapılan en yaygın olarak genellikle boyutsal ölçümler yapılır. Genellikle üretim alanındaki her on ölçüm işleminden dokuz tanesi doğrudan iş parçasının boyutsal ve geometrik ölçümleri ile alakalıdır. Ayrıca şekil, konum, boyutsal ve geometrik özelliklerin kontrolü yanında yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de önemli boyutsal ölçümler arasında sayılabilir (Pfeifer, 2002).

Yüksek miktarlı malzemenin doğrulanması gereken yerlerde, üretilen tüm ürünleri ayrı ayrı doğrulamak genellikle mümkün olmadığından dolayı parçaların doğrulanması için üretimin örneklenmesi için çeşitli yöntemler kullanılır. Numune seçme yönteminin kalitesiz olduğu bir işleminde, yapılan ölçümün hassasiyeti her ne kadar iyi olursa olsun sonuç üretimin gerçeğini doğru bir şekilde vermeyecektir. Bir ölçümün kalitesinin sınırı ancak alınan doğru örneklemenin kalitesi ile belirlenebilir. Bu yüzden, doğru parçayı üretebilmenin ilk adımlarından biri doğru yöntem ile etkin bir numune seçiminin kurgulanması ile başlar (Ramsey, et al., 2011).

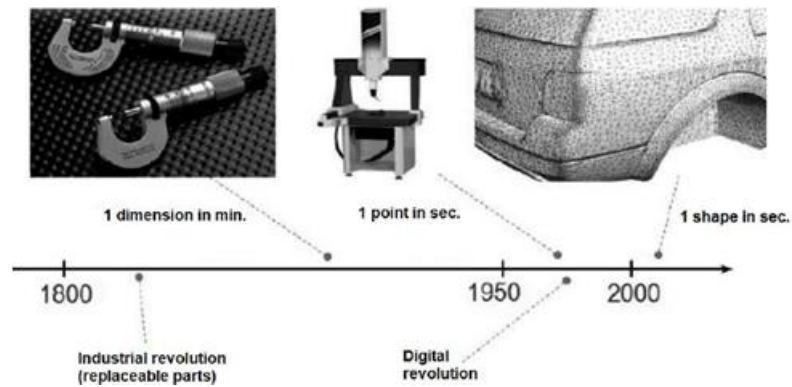
Günümüzde, bir ürün için değer zinciri farklı tasarım ve üretim aşamalarını birine bağlı süreçler farklı tarafından oluşturulur. Üretim alanında yapılan ölçümler, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca değer zincirinde geçirdiği tüm aşamaları içerecek şekilde bir müşteri ihtiyaçları doğrultusunda tanımlanan teknik özellikleri doğrulamak, süreçler hakkında gerekli bilgi birikimini sağlamak ve süreçleri birbirine en anlamlı biçimde bağlayabilmek için oldukça önemlidir. Bu doğrulama işlemleri sırasında süreçlere ait ihtiyaç duyulan bilgiyi oluştururken, aynı zamanda ölçümlerin ekonomik etkilerini de göz önünde bulundurmak önemli noktalardan biridir. Üretimde çoğunlukla destek görevi gören ölçüm süreçleri ancak toplanan bilginin üretim ve tasarım süreçlerini iyileştirmesi ile katma değerli bir adıma dönüşebilir (Kunzmann, Pfeifer, Schwenke, & Weckenmann, 2005)

Seri üretimde, parçaların değişebilirliği oldukça önemlidir. Dolayısıyla, farklı fabrikalar ve süreçler kullanılarak üretilen ve üretim yeri dışında farklı bir hatta

birleştirilen bileşenlerin birbiri yerine kullanılabilmesi ve montaj yapılabilmesi için gerçekleştirilen boyutsal ölçümler ve doğrulama işlemleri oldukça önemlidir. Çeşitli tedarikçilerden ve üretim hatlardan tedarigi yapılan parçaların birleştirilebilmesi için parçaların teknik çizimlerde belirlenmiş boyutsal gereklilikleri sağlaması beklenir. Üretim için oldukça önemli olan ölçüm işlemlerinin temel faydaları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Parça, malzeme ya da bileşenler tanımlı gereklilikleri sağlar ve bileşenlerin kendi içinde değiştirilebilirliğin garanti altına alınır.
- Üretimdeki problemlerin tespit edilmesine ve hatasız sevkiyat için yardımcı olur.
- Potansiyel iyileştirme noktalarının belirlenmesi sağlar ve hatalı ürün oranını düşürür. Hurda maliyetini azaltmak için tamir çalışmalarına gerekli veriyi sağlar.
- Daha kaliteli ürünlerin üretilmesi için makine, cihaz ve malzeme gibi ihtiyaçların belirlenmesine yardımcı olur.
- Üretim, kalite, satın alma ve diğer departmanların işlevleri koordine eder.
- Darboğazları kaldırır, üretim tekniklerinin gelişmesine yardımcı olur ve daha kaliteli ürün üretmek için rekabet ortamı hazırlar (Raghavendra & Krishnamurthy, 2013).

Gelişen üretim teknolojileri ile birlikte kalite kontrol ve ölçüm yöntemleri de paralel olarak gelişme göstermiştir. Gelişen temassız ölçüm yöntemleri ile birlikte üretim ihtiyaçları doğrultusunda parçaya teması en aza indirerek ölçüm sürelerini hızlandırmak için bu yönde çeşitli çalışmalar yapılmaya başlamıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda zaman içinde ölçüm başına yoğunluk sayısı öncelikle dakika başına bir unsurdan, saniye başına bir nokta seviyelerine, ardından da Şekil 3.3 kullanılarak gösterildiği üzere saniye başına bir yüzeye kadar ilerlemiştir ve üretimin ihtiyaç duyduğu hızlı ve yoğun ölçüm verisi bilgisini oluşturmak mümkün olmuştur (Stojkic, Čuljak, & Šaravanja, 2020).

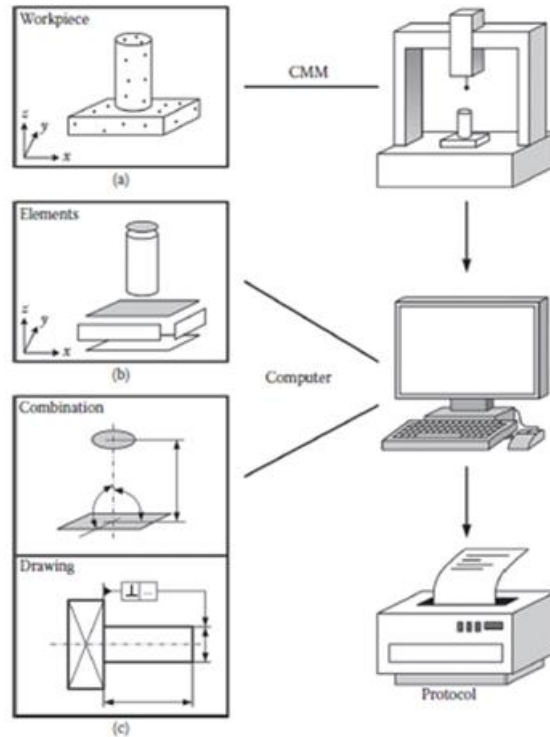


Şekil 3.3. Üretim alanında gerçekleştirilen ölçüm yöntemlerinin yıllar içinde gelişimi (Stojkic vd., 2020).

4. ÜÇ BOYUTLU ÖLÇÜM CİHAZLARI

Ölçüm ihtiyaçlarını karşılamak için üretimde kullanılan ölçüm cihazlarının ana görevi iş parçasının şekli, boyutu, biçimi, yönü ve konumu gibi boyutsal ve geometrik özelliklerinin, iş parçası yüzeyinden elde edilen noktaların uzaydaki koordinatlarını kullanarak, analitik yöntemler kullanılarak oluşturulmuş geometrik elemanlar yardımı ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi şeklinde özetlenebilir. Cihazın gelen çalışma yöntemi Şekil 4.1 kullanılarak açıklanmıştır. Genel bir koordinat ölçüm işlemi sırasındaki adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- İş parçasının üzerindeki ölçüm noktalarına ait veri setlerinin temassız ve temassız yöntemler kullanılarak oluşturulması
- Boyut, biçim, konum gibi özelliklerin değerlendirilebilmesi için ihtiyaç duyulan temsili geometrik elemanların oluşturulması
- Teknik gerekliliklere göre iş parçası özelliklerinin, oluşturulan bu temsili geometrik elemanları kullanarak değerlendirilmesi
- İş parçasına ait özelliklerin değerlendirilmesi için gerekli olan bu adımlar gelen olarak kullanılan bir CMM cihazı için kullanılarak tanımlanmıştır (Bosch, 1995).



Şekil 4.1. Genel olarak koordinat ölçüm sistemlerinde kullanılan ölçüm sisteminin bir CMM cihazı için tanımı (Hocken ve Pereria, 2011)

4.1. CMM Cihazları

Bilgisayar desteli CMM cihazları 1956 yılından beri çeşitli boyutsal ölçüm işlemleri için üretimde kullanılmaktadır. Bu tarihten öncesinde ise üretimdeki ölçüm ihtiyacını karşılayabilmek için çoğunlukla masterlar ve aparatlar tercih ediliyordu. Üretim sürecinde, master, aparat ve daha geleneksel ölçüm cihazları ile gerçekleştirilen zaman alıcı boyutsal ölçümler, CMM cihazlarının güvenilirliğinin artması ile birlikte yerini CMM ile yapılan otomatik ölçümlere bıraktı (Salah, 2017). Günümüzde, birçok gelişmiş ülkede yüksek katma değerli üretim yapılan tesisler için üretilen parçaların doğrulanması amacı ile sayıları dünya çapında toplamda 500,000 taneyi aşacak şekilde, çoğunlukla temaslı yöntemler kullanan CMM cihazları kullanılmaktadır (Rezchikov, Kochetkov, & Zakharov, 2017).

4.1.1. CMM cihazlarının genel özellikleri

Bir CMM cihazının çalışma ilkesi, cihaz üzerindeki ölçüm probu yardımı ile iş parçası yüzeyine doğru yapılan kademeli hareket ve ardından iş parçası yüzeyine temas sonrasında, ilgili yüzeye ait temas noktasının uzaydaki koordinatlarının bulunması ve bu noktaları sayısal olarak işleyerek yön, mesafe, şekil ve salgı gibi özellikleri hesaplaması şeklinde tanımlanabilir (Ganeshkumar & Navith, 2021).

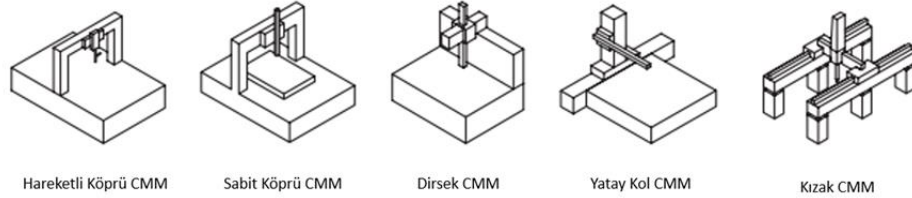
Genellikle, CMM cihazları makine, ölçüm probu ve yazılım tabanlı kontrol birimleri şeklinde üç ana sistem ve ihtiyaca göre çoklu prob ve sensör sistemleri, ölçüm kolu ve lazer tarama kafaları gibi alternatif sistemler kullanarak uzayda ölçüm için gerekli bir referans kartezyen koordinat sistemi oluştururlar ve bu koordinat sistemini kullanarak parçanın istenen özelliklerini ölçerler. Bu kartezyen sistemi kurabilmek için CMM cihazları çoğunlukla birbirine dik üç ana eksen ile bu eksenlere ait hassas birer cetvel kullanır (Mussatayev, Huang, M, & Beshleyev, 2020).

Bir CMM cihazında, ölçüm için ihtiyaç duyulan hesaplamaları yapmak için makine koordinat ekseni ve parça koordinat ekseni olmak üzere iki tane eksen bulunur. Üzerinde cetvellerin bulunduğu bu makine koordinat ekseni, cihazın x, y ve z gibi eksenlerdeki hareketlerini tanımlar. Parça koordinat ekseni ise parçanın üzerindeki çeşitli unsurlar kullanılarak oluşturulan ve parçayı cihaz eksenine matematiksel olarak bağlayan eksen olarak tanımlanır (Aitchison & Sulaiman, 2013).

Üretim maliyetlerini düşürmek için koordinat ölçüm sistemlerinin doğru sonuçları en hızlı şekilde sağlayabilmesi oldukça önemlidir. Üretim yöntemlerindeki gelişmeler sebebi ile karmaşılaşan parçaların ölçümü için geleneksel temaslı CMM cihazları, temassız sistemler ile karşılaştırıldığında, yüksek sayıda ölçüm noktası içeren yüzeyleri ölçmek için yeteri kadar hızlı olmadığından dolayı temaslı yöntemler için ölçüm hızını arttıracak yeni teknikler geliştirilmesi için bir araştırma başlamıştır. Bu doğrultuda geliştirilen beş eksenli koordinat ölçüm sistemleri ile birlikte, prop kafasına eklenen fazladan iki eksen ile birlikte elde edilen aynı anda beş eksenle yapılan sürekli ölçüm yeteneği ihtiyaçları karşılamak için geliştirilen rekabetçi bir temaslı ölçüm yöntemi olmuştur (Gaška, Gaška, & Gruza, 2017).

4.1.2. CMM cihazı çeşitleri

Ölçüm alanında kullanılan farklı tip CMM cihazları ve bu cihazların genel kullanım alanlarına örnekler Şekil 4.2. kullanılarak verilmiştir. Bazı önemli olanlara tiplere ait yapılar, bu tip cihazların avantajları ve dezavantajları ilerleyen bölümlerde detaylıca aktarılmıştır.



Şekil 4.2. Koordinat ölçüm sisteminde kullanılan farklı tip ölçüm cihazları (Hocken ve Pereria, 2011)

4.1.2.1. Hareketli köprü tipi cihazlar

Küresel olarak sanayi, laboratuvar ve araştırma merkezlerinde en yaygın kullanılan koordinat ölçüm cihazları, hareketli köprü tipi cihazlardır (Ferreira, de Vicente y Oliva, & Sanchez Perez, 2013). Bu cihazlar iş parçasını destekleyen sabit bir tabla ve hareketli köprü sistemini kullanarak çalışırlar. Bu tip, diğer tip cihazlara göre oldukça hassas olmasına rağmen tabla üzerindeki ağır köprü yapısından dolayı oldukça yavaş çalışır.

Bu tip CMM cihazı için tabla üzerindeki köprü yapısını oluşturan iki adet hareketli sabit sütun bulunmaktadır. İş parçası sabit olan tabla üzerinde bulunur ve tablaya paralel

eksendeki köprü yapının hareketi ile gerçekleştirilir. Ölçüm kafasının yüksek hareketi taşıyıcı üzerinde sağlanır. Sanayide aktif olarak kullanılan, endüstriyel bir köprü tipi CMM cihazı Görsel 4.1 yardımı ile gösterilmiştir (Hexagon Köprü CMM, 2022).



Görsel 4.1. Köprü CMM cihazı (Hexagon Köprü CMM, 2022)

Hareketli köprü tipi cihazlarda kullanılan çift sütun yapısında, sütunlarda oluşabilecek farklı hareket hızları sebebi ile eksenlerde bir bükülme oluşabilir. Bu bükülme sebebi ile tablanın farklı noktalarında ölçülen parçalar arasında ölçümsel farklar görülmesi mümkündür fakat geliştirilen çift iticiye sahip ve konum geribeslemeli sistemler ile birlikte bu bükülme hareketi en düşük seviyeye indirilebilmektedir. Diğer yandan hareketli köprü tipi cihazlardaki ikinci sütunun sağladığı destek sebebi ile cihazın dirsek tipinde gözlemlenen eğilme olasılığı çok daha düşüktür (Hocken & Pereria, 2011).

4.1.2.2. Dirsek tipi cihazlar

Bu tip CMM cihazlarında, taşıyıcının hareketini sağlayan bir dirsek yapı kullanılır ve ölçüm cihazının yükseklik hareketi, dirsek üzerindeki bir taşıyıcı ile sağlanır. Bu sistemlerde, iş parçası eksen yataklarının üzerinde bulunduğu sabit bir tablaya yerleştirilir. Göreceli olarak ağır parçalar, tablanın eksen yataklarından bağımsız yapısı ve sisteme ait parçaların ataletinin düşük olması sayesinde oldukça hassas ve seri bir şekilde ölçülebilir (Hocken & Pereria, 2011). Üretim alanının içinde aktif olarak kullanılan ve yüksek sıcaklık aralıklarından en düşük seviyede etkilenen endüstriyel bir köprü tipi CMM cihazı Görsel 4.2 yardımı ile gösterilmiştir (Hexagon Dirsek CMM, 2022).

Yüksek hassasiyetteki ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılan dirsek tipi cihazlar, boyutları göreceli olarak küçük olduğu için genellikle daha az ölçüm aralığına ihtiyaç

duyulabilecek olan üretim kalite kontrol alanlarında kullanılmaktadır. Genellikle bu cihazlar kullanıcılara, polar ve silindirik koordinatları ölçebilecek sensör sistemleri ile birlikte sunulmaktadır (Kopáčík, Erdélyi, & Kyrinovič, 2020).

Köprü ve kızak tipi CMM cihazlar daha fazla mukavemetli olduğu ve cihaz hareketi sırasında oluşabilecek olan sapmalara oldukça iyi direnç gösterebildiği için kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen cihazlardan biridir. Ancak bu tip cihazlardaki yüksek atalet sebebi kayma ivmesi düştüğü için cihaz hareket hızı göreceli olarak azalmaktadır. Dolayısıyla dirsek tipi CMM cihazları yüksek ölçüm sürelerinin sorun olduğu alanlarda daha fazla tercih edilmektedir. Köprü ve kızak CMM cihazlarının üst bölgesindeki boşluğun az olmasından dolayı otomatik besleme ile kullanılan yığın işleme sistemleri (BPS) için uygunluğu diğer cihazlara göre daha kötüdür (Tannock, 1992).



Görsel 4.2. Dirsek CMM cihazı (Hexagon Dirsek CMM, 2022)

4.1.2.3. Kızak tipi cihazlar

Bu tip CMM cihazlarında, yükseklik harici kalan hareketleri sağlayan iki paralel kızak üzerinde hareket eden hareketli bir çıkma yapısı kullanılır. Bu yapıdaki cihazlarda, ölçüm cihazının yükseklik hareketi, çıkma üzerindeki bir taşıyıcı ile sağlanır. Bu sistemlerde, iş parçası eksen yataklarından bağımsız sabit bir tablaya yerleştirildiğinden dolayı, cihaz üzerinde iş parçası ağırlığı kaynaklı herhangi bir eğilme ya da bükülme hareketi görülmez. Bu sebepten dolayı oldukça ağır parçaların ölçümüne izin veren bu sistemler, eksen yataklarının serbestliğinden dolayı aynı zamanda oldukça seri ölçümlere de yapabilmektedir (Hocken & Pereria, 2011). Kızak tipi CMM cihazı Görsel 4.3 kullanılarak gösterilmiştir (Hexagon Kızak CMM, 2022).

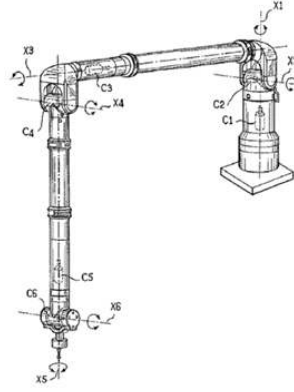
Diğer ölçüm cihazları ile kıyaslandığında, bu cihaz tipi en büyük ölçüm hacmine sahip CMM tipi olduğundan dolayı, genellikle 10 metreden büyük parçaların ölçülmesi için kullanılır. Cihaz eksenlerdeki yükün düşük olması sebebi ile bu tip kullanılarak yapılan ölçümler göreceli olarak hızlı gerçekleştirilebilmekle birlikte yüksek ölçüm alanı sebebi ile hassasiyet diğer koordinat ölçüm sistemlerine göre genellikle daha düşüktür.



Görsel 4.3. Kızak CMM cihazı (Hexagon Kızak CMM, 2022)

4.1.2.4. Mafsal tipi cihazlar

Mafsal kol koordinat ölçüm cihazı, çoğunlukla altı döner mafsallı olan ve temaslı yöntemleri kullanan mekanik ölçüm sistemleri olarak tanımlanabilir. Bu cihazlarda yedinci eksene ihtiyaç sadece temassız yöntemler ile kullanılan lazer tarayıcı kafanın yönlendirilmesi için gereklidir. Cihazların ölçüm ilkeleri, genel CMM ölçüm ilkeleri ile benzer olacak şekilde bilinen kol uzunlukları ve eksenlerde bulunan açı enkoderleri yardımı ile cihaz ucundaki sensör yardımı ile oluşturulan noktanın uzaydaki koordinatlarının hesaplanması şeklinde tanımlanabilir. Bu noktanın hesaplanması için kullanılan sensöre ait özelliklerin, cihaza uç noktasına ait boyutsal ve açısal bilgiler ile birleştirilmesi ve ölçümler için bu bileşik bilginin işlenmesi gerekmektedir. Genellikle alüminyum ya da kompozit malzemeler kullanılarak üretilen mafsal kol CMM cihazına ait, enkoder konumları ve cihazın genel şekli Şekil 4.3 kullanılarak gösterilmiştir (Romdhani, Hennebelle, Ge, & Juillion, 2014).



Şekil 4.3. Maşsal kol CMM cihazının genel şekli ve cihaz için tanımlanan eksen ve enkoderlerin yerleri (Romdhan vd., 2014)

4.2. Optik Ölçüm Cihazları

Parça kalıplama işlemlerinde, temaslı yöntemlerin ışık kullanılarak yapılan ölçümlere göre göreceli olarak yavaş kalmasından dolayı 1980 yılından sonra üretimdeki bu ihtiyacı kapatabilmek için optik ölçüm sistemlerinin gelişimi başladı. Parçaya prop yardımı ile fiziksel olarak temas etmek yerine ışık kullanarak incelemenin oldukça hızlı sonuçlar verdiği görüldü. Ayrıca, geliştirilen bu yöntem ile yumuşak parçaların, temas yükü altında şekil değiştirmesi gibi değişkenlerin de ortadan kaldırılması hedeflendi. Bu dönemde nokta, bölge ve şerit ölçüm yöntemlerini kullanan sistemler geliştirildi. Nokta ölçüm sistemi, ölçüm için tek bir referans sistemi kullanması ve tekrarlı hareketler içermesi sebebi ile en yavaş sistem olarak tanımlanabilir. Bölge ölçüm sistemleri ise teknik olarak kullanılması zor sistemler olduğundan dolayı satış miktarları oldukça düşük kalmıştır. Şerit ölçüm sistemleri ise şerit halindeki bir nokta grubu kullanarak hassas ve hızlı bir şekilde parçaları ölçebildiğinden dolayı öncelikli geliştirilen sistem olmuştur (Mostafa & Ebrahim, 2014).

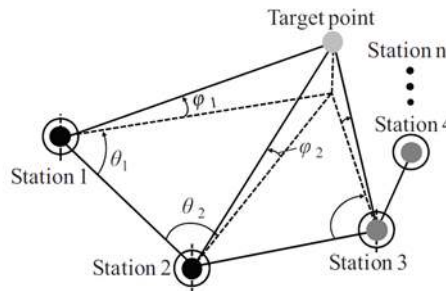
Üretim alanındaki parçalar, gün geçtikçe boyutsal ve geometrik olarak giderek hassaslaşmaktadır. Bununla birlikte gelişen üretim yöntemleri ile birlikte parçalar boyutsal olarak daha küçük ve karmaşık hale gelmektedir. Bu doğrultuda, üç boyutlu konum verisi oluşturmada kullanılan geleneksel yöntemler ve cihazlar sanayinin ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmıştır ve daha sıkı üretim şartlarına uyabilmek için daha hassas, yüksek yetkinlikte ve uygun maliyetler ile geliştirilen yeni ölçüm cihazlarına ihtiyaç duyulmuştur. Günümüzde, bu ihtiyaç doğrultusunda temassız ölçüm yapabilmek için geliştirilen üç boyutlu optik ölçüm cihazları, üretim alanlarındaki kalite kontrol,

tersine mühendislik ve üç boyutlu iş parçası verisi oluşturma gibi sanayinin çeşitli ihtiyaçlarını karşılamaktadır (Chen, Brown, & Song, 2000). Yüksek hassasiyetteki parçalardaki tarama ihtiyaçları sebebi ile sektörel ihtiyacın artması, lazer sistemlerindeki gelişmeler ve yüksek hızlı kamera teknolojisindeki atılımlar sebebi ile son yıllarda optik tarama sistemlerinde, yöntemlerinde ve uygulamalarında büyük gelişmeler olmuştur (De Groot, 2015).

4.2.1. Optik ölçüm cihazlarının genel özellikleri

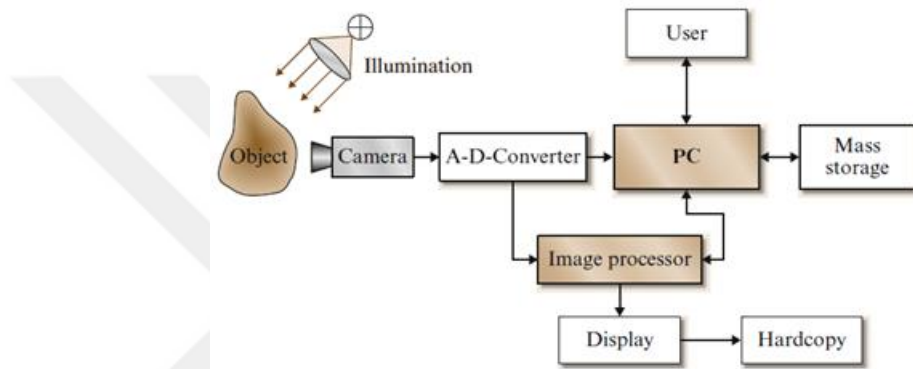
Optik teknikler kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm işlemlerinde, parça üzerinden toplanan verinin sensör üzerinde oluşturduğu yoğunluk miktarı işlenerek parçanın üç boyutlu şeklinin oluşturulması amaçlanır. Optik ölçümler için kullanabilecek olan artıları ve eksileriyle birçok farklı yöntem mevcuttur. Sanayide kullanılan güncel yöntemlerde, iş parçasının yüzey topoğrafyasını hassas ve güvenilir bir şekilde oluşturmak için yapılandırılmış aydınlatma sistemleri kullanılır. Bu aktif aydınlatma yöntemleri, kullanılan tür ve yönteme bağlı olarak değişmek ile birlikte, bir ışık hüzmesi kullanarak ölçülecek olan bölgeyi aydınlatmak ile görevlidir (Marrugo, Gao, & Zhang, 2020). Üçgenleme tabanı ile çalışan aktif ışık kullanan ölçüm cihazlarının çalışma ilkesi Şekil 4.4 kullanılarak örneklendirilmiştir (Gao, et al., 2015).

Temassız olarak ölçüm yapabilen optik görüntüleme sistemleri, belirli bir uzaklıkta bulunan sınırlı bir hacim içindeki bir nesne yüzeyinin sayısal temsiliyi belirli bir çözünürlük değeri ve ölçüm belirsizliği ile birlikte üretebilen cihazlardır. Bu tarz sistemler sadece iş parçasına ait yüzeylerin geometrik özelliklerini değil aynı zamanda x, y ve z koordinatlarını içeren nokta bulutları ile birlikte yoğunluk görüntüsünü de oluşturur (Beraldin, Carrier, MacKinnon, & Cournoyer, 2012).



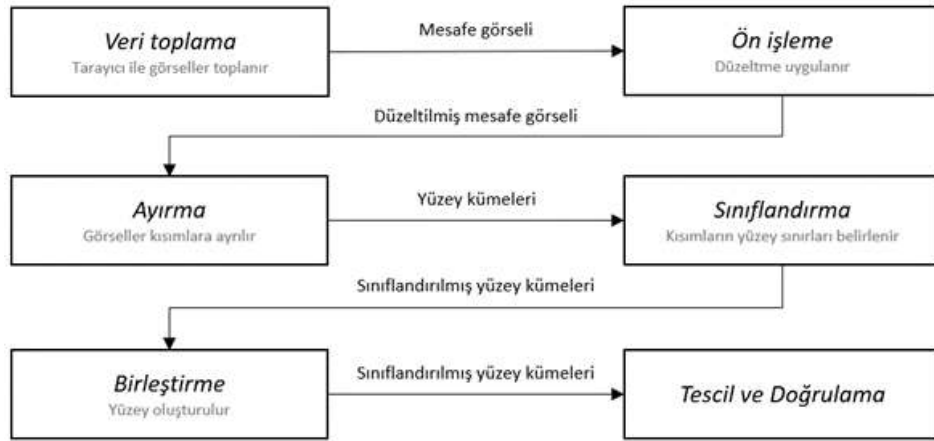
Şekil 4.4. Üçgenleme tabanı aktif optik görüntüleme işlemi yapan sistemlerinin temel çalışma ilkesi (Gao vd., 2015)

Bu sistemlerde temel çalışma yöntemi, nesne üzerine yönlendirilen bir ışık hüzmesinin, nesne yüzeyinden saçılması sonrasında saçılan hüzmelerin bir sensör yardımı ile toplanması üzerine kuruludur (Curless, 1999). Sensörler tarafından toplanan görüntüler bir dönüştürücüler yardımı ile görüntü sayısal değerler işlenebilir verilere çevrilir. İşlenebilir bu veri çeşitli işlemler yardımı ile iyileştirilir. Işık kaynağı tarafından aydınlatılan nesnenin görüntüleri bir sensör tarafından kayıt altına alınması sonra verinin sunulmasındaki görüntü işleme süreci temel bileşenleri Şekil 4.5 kullanılarak gösterilmiştir (Osten, 2008).



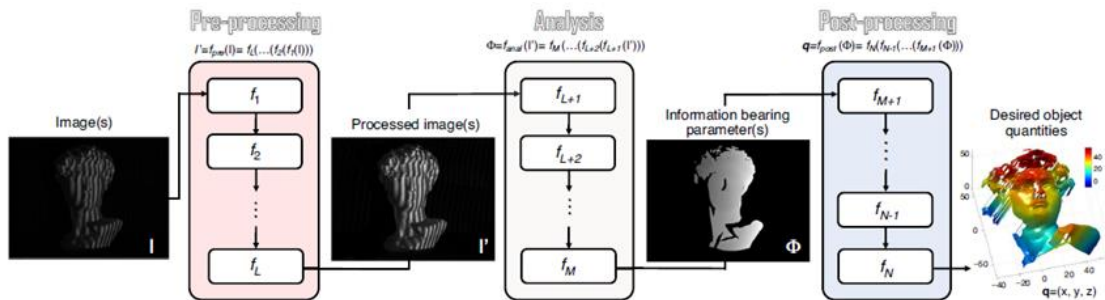
Şekil 4.5. Görüntü işleme sistemlerindeki temel bileşenler (Osten, 2008)

Bir üç boyutlu tarama ile yapılan ölçüm işleminde, nesneye ait modelin oluşturulabilmesi için uzaklık görüntülerinin farklı adımlarda işlenmesini içeren sıralı bir yöntem kullanılır. Uzaklık görüntülerine ait veri oluşturulduktan sonra ön işleme, ayırma, sınıflandırma, birleştirme ve tescil ve doğrulanması gibi adımlar temel olarak Şekil 4.6 kullanılarak verilmiştir (Hoffman & Jain, 1987)



Şekil 4.6. Uzaklık görüntüsü analizi için düzenlenmiş diyagram (Hoffman ve Jain, 1987)

Sayısal görüntünün işlenmesindeki temel amacı, oluşturulan ham yoğunluk görüntülerinin, yoğunluk dağılımı modelini kullanarak istenen nesne niceliklerine genellikle mantıksal bir hiyerarşi içinde çeşitli adım ya da adımlar kullanarak dönüştürülmesidir. Bu adımlar, Şekil 4.7 kullanılarak açıklandığı üzere, çoğu yöntemde hiyerarşik bir dizi işlem içeren ön-işleme, analiz ve son-işleme süreçlerini kapsamaktadır. Ön işleme adımının görevi, oluşturulan saf verinin kalitesini değerlendirmek ve ihtiyaç doğrultusunda parazitlerin azaltılması ya da baskılanması için gürültüden arındırma, görüntü iyileştirme, renk kanalı ayrıştırma, görüntü tescili ve doğrultuma, iç değer biçim ve dış değer biçim gibi işlevler kullanmaktır. Analiz adımının görevi ise ön işleme sonrası oluşan girdi görüntüleri kullanarak istenen fiziksel özellikleri taşıyan anahtar bilgileri çıkarmak için uzaya ve zamana bağlı faz çözümleri ve açılımları, geometrik faz açılımı, altküme ilişkilendirme ve alt-imgecik (alt-piksel) düzeltme gibi işlevler kullanmaktadır. Son işleme adımı ise fiziksel olarak parçayı oluşturmadan önce gürültüden arındırma, sayısal odaklama, hata dengeleme ve nicelik dönüştürme gibi işlevler kullanmaktadır (Zuo, et al., 2022).



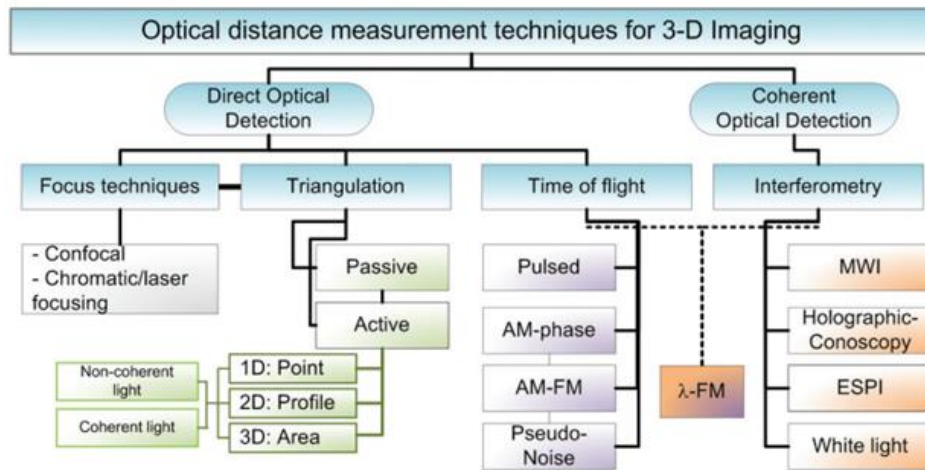
Şekil 4.7. Optik ölçüm yöntemlerinin genel görüntü işleme adımları (Zuo vd., 2022)

4.2.2. Optik ölçüm cihazı çeşitleri

Optik üç boyutlu görüntüleme sistemleri, aktif aydınlatma, pasif aydınlatma, bağdaşık ışık algılama, doğrudan ışık algılama gibi Şekil 4.8 ile gösterildiği üzere birçok sınıfa ayrılabilir. Bu çalışmada aktif aydınlatma yapan sistemlerden, doğrudan ışık algılama sistemlerindeki üçgenleme tabanlı yöntemler ve uçuş süresi tabanlı yöntemler ve bağdaşık ışık algılama sistemlerindeki giriş tabanlı yöntemler kısa olarak incelenecektir.

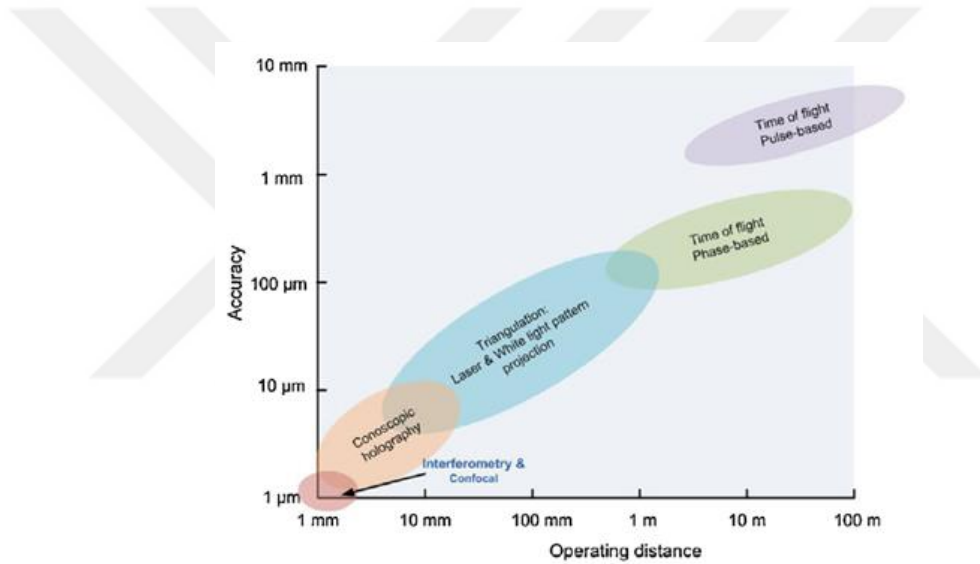
Aktif üç boyutlu görüntüleme sistemleri, bir nesnenin yüzey geometrisine ait özellikleri ortaya çıkarmak için kullanılır. Bu sistemlerde, aktif yapılandırılmış bir aydınlatma kaynağı kullanıldığından dolayı dışarıdan özelliksiz olduğu düşünülen unsurlar için bile göz ile görülemeyen ufak detaylar ortaya çıkarılabilir. Yaygın olarak kullanılan fotogrametri gibi pasif sistemlerde ise doğal ışık kaynakları kullanıldığından dolayı, yüzey dokusuna bağlı özelliklerin ve bazen diğer üç boyutlu özelliklerin çıkarılabilmesi için ön kabul yapılmış bilgiler kullanır (Remondino, El-Hakim, Gruen, & Zhang, 2008).

Üçgenleme, uçuş süresi ve girişim tabanlı aktif yöntemlerde, üç boyutlu yoğunluk görüntüsünü oluşturabilmek için düşük seviyeli bağdaşık kaynaklar ya da geniş ışık yelpazeli kaynaklar kullanılarak nesne üzerine tanımlanmış desenler ile aydınlatma yapılır (Jähne, Haußecker, & Geißler, 1999).



Şekil 4.8. Optik mesafe ölçüm yöntemlerinin sınıflandırılması (Beraldin vd., 2012)

Üçgenleme tabanlı üç boyutlu görüntüleme sistemleri, kabaca 10 cm³ ila 1 m³ arasında bir hacme sahip nesnelerin üretiminde ve saniyede 5000 üç boyutlu koordinatın üzerinde veri toplama hızlarında kullanılan optik teknolojilerin çoğunu temsil eder (Beraldin, Carrier, MacKinnon, & Cournoyer, 2012). Lazer ve beyaz ışık desenleri ile çalışabilen bu üçgenleme sistemlerinin uçuş zamanlı faz ve atım tabanlı, konoskopik holografi, girişim ve eş odaklı sistemlere karşı performans değerleri ölçüm mesafesi ve hassasiyet cinsinden Şekil 4.9 kullanılarak verilmiştir (Se & Pears, 2012). Üretim sektöründe hassas imalat parçalarının ölçümünde en geniş kullanım alanı bulan yöntem çoğunlukla düşük belirsizlik değerleri ve kayda değer ölçüm hacimlerine sahip olmasından dolayı üçgenleme tabanlı yöntemlerdir.

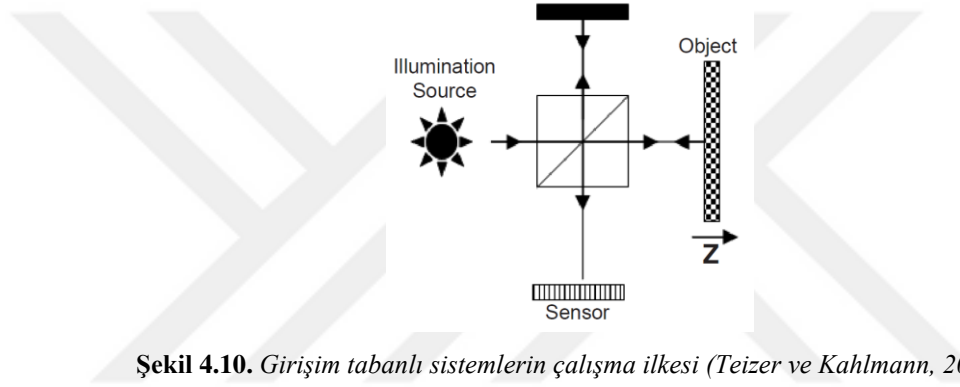


Şekil 4.9. Ölçüm mesafesi ve hassasiyet değerine göre farklı optik ölçüm yöntemlerinin performans değerlerinin karşılaştırılması (Se ve Pears, 2012)

4.2.2.1. Girişim tabanlı optik ölçüm cihazları

Yüzey girişim ölçüm sistemlerinde, yüzey koordinatları sabit bir girişim saçacağı kullanılarak iş parçası yüzeyi ile bir referans yüzey arasındaki optik yol farkının dağılımına karşılık gelen iki ışınlar arasındaki girişim kullanılarak olarak oluşturulur. İş parçası yüzeyinin mesafe bilgisini ışık dalga boyları cinsinden analiz etmek için ışınlar arasındaki girişimin yoğunluk görüntüsü, deklanşör süresi 0,2 ile 10 milisaniye arasındaki çerçeve hızları arasında çalışan bir görüntü sensörü tarafından yakalanır. Yüzey formunun hassasiyeti, bu süre içerisinde titreşim gibi sebepler yüzünden girişim deseninde oluşabilecek olan herhangi bir bozulma sebebi ile kötü yönde etkilenebilir

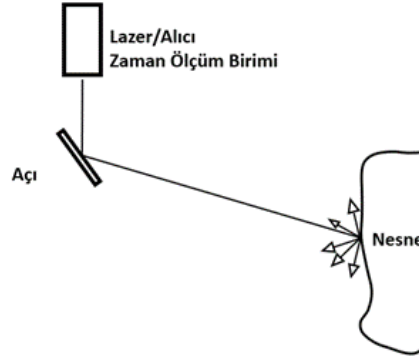
(Gao, et al., 2019). Girişim tabanlı optik ölçüm cihazları, Şekil 4.10 ile gösterildiği üzere bir aynadan yansıyan tek renkli bir lazer tarafından oluşturulan, tutarlı bağdaşık ışık dalgası desenlerini kullanarak mikrometre altı seviyede ölçüm yapan bir yöntemdir. Bu sistemlerde kullanılan düz dalga cepheleleri ve aynalar küçük ölçüm mesafesi ile sınırlanmış dikdörtgen bir koordinat sistemi oluşturur. Tek renkli ışık yerine, beyaz ışık girişim ve optik bağdaşım tomografisi gibi yöntemler ile birlikte mesafenin birkaç milimetreye kadar genişletilebilir. Bu cihazlardaki yayıcı ve toplayıcı arasındaki yüksek dalga boyu ve hassasiyet eşleşmesi gereksinimi sebebi ile cihaz maliyetleri diğer sistemlere göre oldukça yüksektir (Teizer & Kahlmann, 2007).



Şekil 4.10. Girişim tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Teizer ve Kahlmann, 2007)

4.2.2.2. Uçuş süresi tabanlı optik ölçüm cihazları

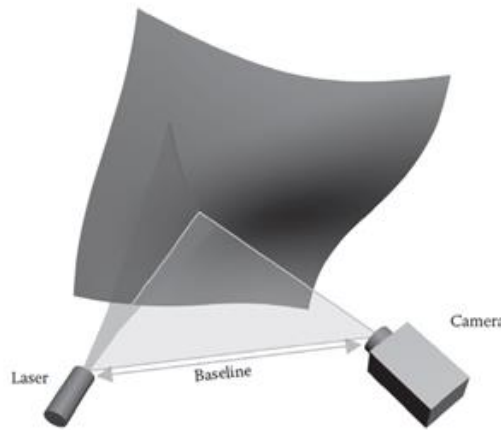
Bu yöntemde, elektronik takometrelerin çalışma prensibine benzer olarak, verici ile yansıtıcı yüzey arasındaki mesafe, nesneye bir lazer atımı yönlendirerek, gönderilen sinyalin gidiş ve dönüşü arasındaki seyahat süresi üzerinden hesaplanır. Sistemin çalışma ilkesi Şekil 4.11 kullanılarak açıklanmıştır. Bu yöntem ile çalışan cihazlarda, ölçüm mesafeleri genellikle kısa olduğundan dolayı ölçüm hassasiyetleri tüm nesne alanı içinde genellikle milimetre seviyesindedir. Üç boyutlu ölçümlerin doğruluğu doğrudan ışığın açısal yaklaşımından etkilenmektedir (Boehler & Marbs, 2002). Şekli ölçmek için uçuş süresi yöntemi, atım uçuş süresinin ölçülmesi için bir lazer ya da başka bir ışık kaynağı kullanabilir. Nesne tarafından geri yansıtılan atım alıcı sensör tarafından algılanır ve referans atım ile birlikte fiber optik kullanılarak ilgili işleme birimine alınır. Milimetre altında bir hassasiyet değeri ile ölçüm yapabilmek için yüksek çözünürlüklü elektronikler ve piko-saniye altında atım yapabilen lazer diyotlar kullanılabilir (Chen, Brown, & Song, 2000).



Şekil 4.11. Uyarlanmış uçuş süresi tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Boehler ve Marbs, 2002)

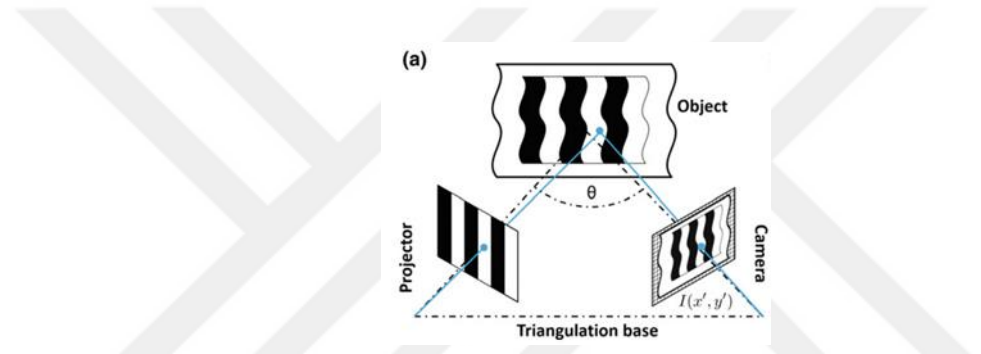
4.2.2.3. Üçgenleme tabanlı optik ölçüm cihazları

Üç boyutlu ölçüm yöntemlerinin gelişimi incelendiğinde, ölçümlerin giderek hızlandığı ve yoğunluk görüntüsü seviyesinde iyileşmeler olduğunu görüyoruz. Bu sistemlerde önemli olan nokta, yüzey ölçümlerini yapabilmek için yeterli yoğunluğun oluşturulması fakat bu süreçte sürenin ise gereğinden fazla uzatılmamasıdır. Bu ihtiyaç doğrultusunda, saniye milyonlarca noktaya kadar ölçüm alabilen, hızlı ölçümlere izin veren ve kapsamlı inceleme gerektiren uygulamalar için uygun olan üçgenleme tabanlı üç boyutlu optik ölçüm tarayıcıları geliştirilmiştir. Bu cihazların temel çalışma ilkesi, Şekil 4.12 kullanılarak gösterildiği üzere taranacak nesneye bir lazer ışığı yansıtılması ve nesne yüzeyinde oluşan ışık yansımalarının üçgenleme ilkesine dayalı olarak bir ya da birden fazla kamera ile optik yöntemler kullanılarak kaydedilmesi ve görüntünün işlenmesi şeklinde özetlenebilir (Harding, 2013).



Şekil 4.12. Üçgenleme tabanlı süresi tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Harding, 2013)

Bu temel ilkeyi kullanan en önemli temel yöntemlerden biri ise faz ölçümü ile üçgenleme (PMT) yöntemidir. Bu yöntem, yüksek hassasiyet ve üç boyutlu veri yoğunluk seviyesinden dolayı günümüzde hala küçük iyileştirmeler kullanılarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, Şekil 4.13 kullanılarak gösterildiği üzere temel olarak sinüzoidal saçak desenler nesne üzerine yansıtılır ve nesne üzerindeki bu izdüşüm üçgenleme açısı kullanılarak bir kamera sistemi ile değerlendirmeye alınır. Nesne yüzeyindeki oluşan saçak izdüşümleri, yüzeydeki derinlik ve düzlemsellik farkları sebebi ile yüzey şekline bağlı olarak şekil değiştirir. Ardından bu şekil değişikliği sebebi ile oluşan faz farkları kullanılarak yüzey üzerindeki noktaların koordinatlar ve derinlik değeri oluşturulur (Willomitzer, 2019).



Şekil 4.13. Üçgenleme tabanlı süresi tabanlı sistemlerin çalışma ilkesi (Willomitzer, 2019)

4.3. X-ışını Bilgisayarlı Tomografi Cihazları

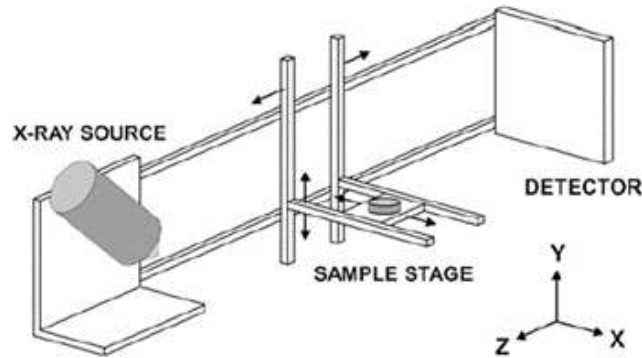
Tomografi kelimesi Yunanca dilim veya bölüm anlamına gelen "tomos" ve tanımlamak anlamına gelen "grafi" kelimesinden türetilmiştir. Tomografi alanı, bir nesnenin kesit görüntülerini çıkarılmasına ve parçanın iç yapısının incelenmesine izin veren bir yöntemdir (Guillet, et al., 2014). Tomografi, kesitlerden oluşturulan bir temsil olarak tanımlanabilir. X-ışını tomografisi ise x-ışınları kullanılarak kesitlerin ve katmanların birleştirilmesi ile oluşturulan görüntü anlamına gelir (Villarraga-Gómez, Herazo, & Smith, Progression of x-ray computed tomography from medical imaging to current status in dimensional metrology, 2019).

İlk bilgisayarlı x-ışını tomografi sistemleri 1969 yılında Hounsfield tarafından tıbbi görüntüleme için geliştirilmiştir. Bu teknik ile birlikte hastanın iç organlarının taranması ve incelenmesi mümkün kılınmıştır. 1980'li yıllardan beri ise bu sistemler tahribatsız muayene amacıyla malzeme iç yapısını ve kusurları tespit etmek için aktif olarak kullanılmıştır. Boyutsal ölçümler için kullanılan ilk bilgisayarlı tomografik ölçüm

cihazları 2005 yılında kullanılmaya başlayan nesnelerin iç yapısını oluşturan karmaşık geometrilerin ölçülmesine yardımcı olmuştur (Angel, 2014).

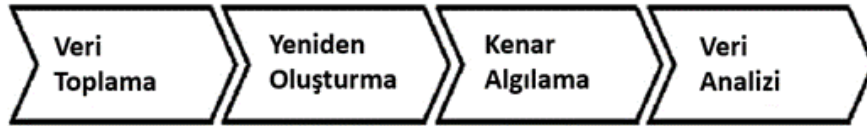
4.3.1. X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazının genel özellikleri

Bilgisayarlı tomografi, nesnenin tomografik kesit görüntülerinin elde edilmesini sağlayan bir x-ray tomografi türüdür. X-ışınlarını kullanarak nesnenin iki boyutlu temsillerini oluşturarak nesnenin kendisinin matematiksel olarak uzamsal bir temsilini oluşturan bir yöntem olarak tanımlanabilir (Gapinski, Janicki, Marciniak-Podsadna, & Jakubowicz, Application of the computed tomography to control parts made on am process., 2016). Bu sistemler, bir numunenin farklı açılar kullanılarak x-ışını demeti altındaki görüntüsünü oluşturma ilkesi üzerine çalışır. Tomografi yönteminde x-ışınlarının malzemenin içinden geçebilme özelliği sayesinde, nesnenin farklı katmanları tarafından x-ışını demetinin soğrulması sonrasında algılayıcı üzerinde oluşan farklı açılardan oluşturulmuş izdüşüm görüntülerinin yardımı ile parçanın iç yapısı hakkında detaylı bilgi alınabilir. Çıkarılan bu görüntü kümesi üzerinde yapılan matematiksel işlemler ile birlikte nesneye ait hacimsel bir veri kümesi oluşturulabilir. Bu hacimsel veri kümesi, x-ışınının ışın yoğunluğu, malzeme yoğunluğu, atomik kütle gibi değişkenlere bağlı olarak soğrulma miktarı kadar parlaklığa sahip hacimsel imgecikler şeklinde oluşturulur (Du Plessis, Yadroitsev, Yadroitsava, & Le Roux, 2018). Bu yöntem ile alakalı olarak bir ölçüm sürecine ait diyagram Şekil 4.14 kullanılarak açıklanmıştır (Ametova, Probst, & Dewulf, 2018).



Şekil 4.14. X-ışını tomografik ölçüm sistemlerin çalışma ilkesi (Ametova vd., 2018)

Standart bir x-ray bilgisayarlı tomografi ölçüm uygulaması, Şekil 4.15 ile gösterildiği üzere veri toplama, yeniden oluşturma, kenar algılama ve veri analizi olmak üzere dört temel adıma ayrılabilir. Bilgisayarlı tomografi kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerin birincil adımı, numunenin x-ışınlarıyla farklı açılardan çok sayıda görüntüsünün alınmasını gerektirir. Veri toplama sürecinden sonra, elde edilen görüntü dilimlerinin birleştirilmesi ve toplanan görüntülerin üst üste bindirilerek yeniden oluşturulmasıyla birlikte hacimsel bir nesne oluşturulur. Daha sonra malzemelerin kenarlarını algılanarak ve ayırt edilerek hacimsel veriler işlenir ve bölümlere ayrılır. Son olarak, işlenen verilerden üzerinden nesneye ait boyutsal ve geometrik bilgiler çeşitli ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılır (Dewulf, Kiekens, Tan, & Welkenhuyzen, 2013). Bilgisayarlı tomografi ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ve izlenebilirliğini artırmak için bu sürece kalibrasyon gibi ek adımlar da dahil edilebilir.



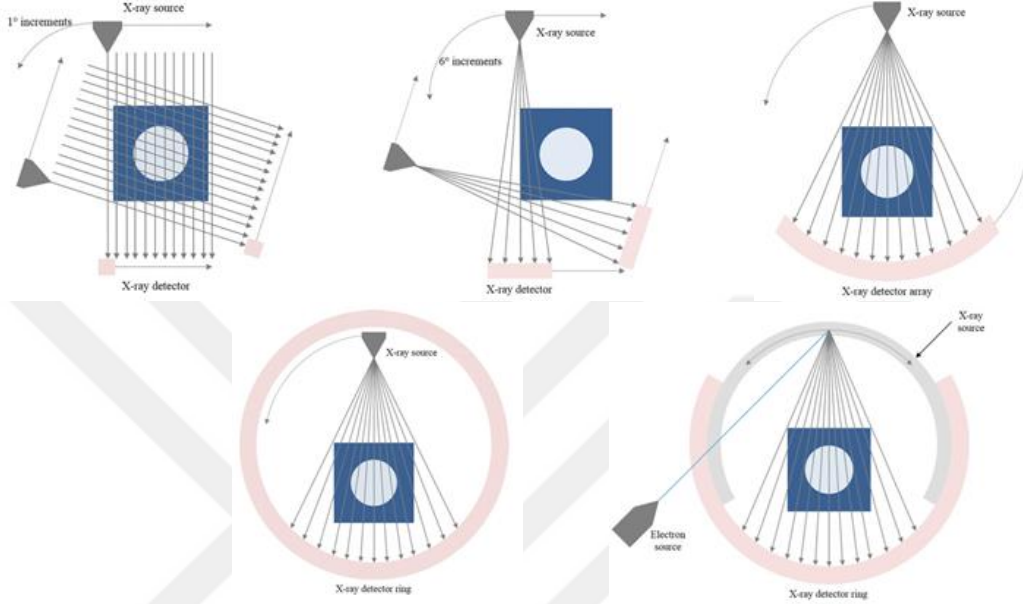
Şekil 4.15. Genel x-ışını tomografik ölçüm çalışması adımları (Dewulf vd., 2013)

4.3.2. X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazlarının çeşitleri

Hounsfiend tarafından hazırlanan ilk bilgisayarlı tomografi cihazından bugüne zaman içinde bilgisayarlı tomografi teknolojisinde öncelikle klinik görüntüleme, sonra tahribatsız muayene ve boyutsal ölçüm alanındaki ihtiyaçlardan dolayı Şekil 4.16 ile gösterildiği üzere birçok gelişme yaşanmıştır. Birinci ve ikinci nesil klinik bilgisayarlı tomografi cihazları yapılan tek yönlü taramaları birleştirirken, yavaş tarama hızları ve düşük görüntü kalitesi sebebi ile üçüncü nesil cihazlar ile birlikte radyal olarak dönen kaynak ve algılayıcı cihazlar kullanılmaya başlandı. Tomografideki tarama sürecini daha da iyileştirmek için dördüncü nesilde algılayıcı tam bir çember şekline getirildi. Beşinci nesilde ise hem kaynağın hem de dönüş yapabildiği bir yapıya geçilerek, klinik tomografi cihazları günümüzdeki halini almıştır.

Endüstriyel alanda kullanılan bilgisayarlı tomografik tarama işlemlerinin amaçları tıp alanında kullanılan cihazlardan oldukça farklıdır. Bu alandaki cihazlarda genellikle parçaya uygulanan doz oranının bir önemi yoktur. Dolayısıyla endüstriyle tomografi

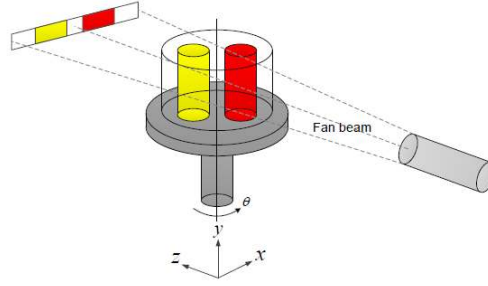
cihazları hassasiyeti arttırmak için ihtiyaç doğrultusunda x-ışını yoğunluğunu artırma ve tarama sürelerini uzatabilme yeteneğine sahiptir. Boyutsal ölçümler için ilerleyen bölümlerde detaylandırılacak olan bu cihazlarda amaç genellikle tarama hassasiyetini, çözünürlüğün ve doğruluğunu arttırmak üzerine kurulmuştur (Thompson & Leach, 2018).



Şekil 4.16. Soldan sağa, yukarıdan aşağıya birinci, ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci nesil klinik tomografi cihazları (Thompson ve Leach, 2018)

4.3.2.1. Yelpaze ışın tarayıcıları

Endüstriyel bilgisayarlı tomografi sistemleri için günümüzde iki ana tarama yöntemi uygulanmaktadır. Bunlardan ilki fan ışını tabanlı bilgisayarlı tomografi sistemleridir. Bu sistemlerde parçanın her dönüşü sırasında sonlu kalınlıklardaki dilimlerin izdüşümü alınarak tarama işlemi gerçekleştirilir (Kruth, et al., 2011). Tüm x-ışını tomografi sistemlerinde benzer yapılar kullanılmakla birlikte bu sistemde de Şekil 4.17 kullanılarak gösterildiği üzere bir x-ışını kaynağı tarafından yayılan yelpaze şeklindeki ışın hüzmesi nesne içinden geçer ve soğrulan ışın ile algılayıcı üzerinde bir izdüşüm oluşturulur. Yelpaze ışın tarayıcı sistemlerde izdüşümlerin oluşturulması, birden fazla açı kullanılarak parçanın tam hacminin çeşitli stratejiler kullanılarak taranması şeklinde gerçekleştirilir. Ardından toplanan bu izdüşümler matematiksel olarak birleştirilerek, üç boyutlu parça modeli oluşturulur (Lifton, 2015).

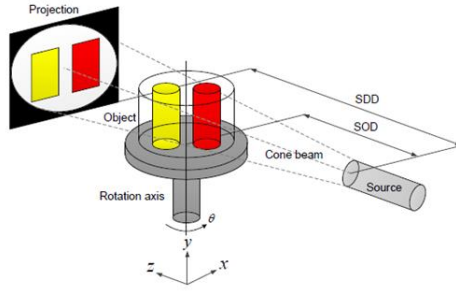


Şekil 4.17. *Yelpaze ışın tarayıcısı bilgisayarlı tomografi sistemi çalışma ilkesi (Lifton, 2015)*

4.3.2.2. Konik ışın tarayıcıları

Endüstriyel bilgisayarlı tomografi sistemlerinden bir diğeri olan konik ışın tarayıcıları da yelpaze tipi tarayıcılara benzer bir yöntem ile çalışır. Temelde benzer yöntemler kullanan bu iki sistem arasındaki ana fark ışın tipi ve yeniden oluşturma yöntemleri olarak özetlenebilir (Kruth, et al., 2011). Bu sistemde tüp kaynağı, mümkün olacak en fazla foton sayısını oluşturulabilmek için koni içinde elektronların hızlandırma voltajının yüksek tutulması ile birlikte geniş bir x-ışını enerji spektrumuna sahip olacak şekilde genellikle çok-renkli beyaz bir ışık yayarak önemli büyüklükteki bir numune hacmi aydınlatılır. Bu sistemlerde görüntünün hassaslaştırılması için numuneler kaynağa doğru yaklaştırılır ve imgeciklerin daha keskin hale gelmesi için bir büyüteç etkisi yaratılır. Genellikle bu hassasiyete bağlı olarak sistemlerin ölçüm sürelerinin bir dakika ve bir saat arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Withers, et al., 2021).

Günümüzün endüstriyel ve klinik bilgisayarlı tomografi sistemlerinin çoğu, sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle konik ışın tarayıcıları kullanmaktadır. Bu sistemler iki boyutlu sistemlere kıyasla, konik ışın tarayıcıları çok daha karmaşık cihazlar olduğundan dolayı genelde diğer sistemlere göre oldukça fazla görüntü toplaması ve Feldkamp-Deviss-Kress (FDK) gibi sürekli iyileştirilen yeniden oluşturma algoritmaları ile işlenmesi gerekmektedir (Hermanek, Rathore, Aloisi, & Carmignato, 2018). Endüstriyel uygulamalara yönelik bilgisayarlı tomografi sistemleri, 360 derecelik tek bir tarama ile birlikte tüm numune hacmini yakalamak için geniş bir görüş alanına sahip oldukları için genellikle olarak düz panel algılayıcı ve dairesel yörüngeli tarama yoluna sahip konik ışın konfigürasyonları ile kullanılır (Villarraga-Gómez & Smith, 2020). Bu sistemin temel çalışma ilkesi Şekil 4.18 ile görselleştirilmiştir.



Şekil 4.18. Konik ışın tarayıcısı bilgisayarlı tomografi sistemi çalışma ilkesi (Lifton, 2015)

4.3.3. Temaslı ve temassız sistemlerin avantajları ve dezavantajları

Daha sürdürülebilir, kaliteli ürünler ve hizmetler sağlayabilmek için birçok sektörde yaşanan küresel rekabet gün geçtikçe giderek sertleşmektedir. Bu rekabete bağlı olarak tasarım aşamasında ürünlerin boyutsal olarak daha sıkı tolerans aralığında üretilmesi ihtiyacı oluşturmaktadır. Bu ihtiyaçları güvenilir bir şekilde karşılamak ve giderek sıkılaştan istenen ölçüm işlemlerini gerçekleştirmek için en fazla tercih edilen cihaz, diğer alternatiflerine göre kayda değer olarak daha az ölçüm belirsizliğine sahip olmasından, karmaşık geometrileri hızlı ve hassas bir şekilde ölçme yeteneğinden, yapılan ölçümlerin güvenilirliğinden ve güçlü veri toplama yeteneğinden dolayı CMM olmuştur (Bastas, 2020).

Geleneksel CMM cihazlarının başlıca sınırlayıcı özelliklerinden bir tanesi küçük boyutlu parçalara ait özelliklerin ölçümüdür. Bu özelliklerin ölçümü sırasında prob çapının ölçüm üzerindeki etkileri, parça temas kuvvetleri kaynaklı deformasyonlar ve dar ölçülerdeki hassasiyet kaybı gibi sebeplerden dolayı ölçümün doğruluğu kötü yönde etkilenir. Görüntüleme sistemlerine ile birlikte kullanılan çok sensörlü CMM cihazları küçük boyutlu parçalardaki özellikleri ölçmek için oldukça uygun olmasına rağmen bu sistemlerde uluslararası standartlara göre izlenebilirliğinin sağlanması konusunda araştırmalar devam etmektedir. Diğer yandan temaslı ölçüm yöntemleri ile birlikte yüksek hassasiyetli izlenebilirlik zincirleri başarılı bir şekilde kurulabilmektedir (Thalmann, Meli, & Küng, 2016).

Optik sistemlerin, temaslı yöntemlere tercih edilmesinin en önemli sebeplerinden biri incelenen parçaya herhangi bir temas yapmadan parça hakkında kısa sürede büyük miktarda veri oluşturabilmesidir. Ayrıca bu tarz cihazlar doğrudan üretim ortamında ve süreçlerin içinde kullanılmak için oldukça uygunlardır. Herhangi bir ölçüm işlemi için genellikle eyleme özel ölçüm yöntemleri kullanılarak izlenebilirlik zincirinin kurulması

oldukça önemlidir (Carmignato, Voltan, & Savio, 2010). Ancak gelişmelere rağmen, optik sistemlerde izlenebilirlik zincirinin kurulması için henüz bir uluslararası şartname geliştirilememiştir.

Genel olarak ölçümler için temaslı ve optik yöntemlerde unsurlara, ölçümlere ve veri değerlendirme yöntemlerine bağlı Tablo 4.1 ile belirtildiği üzere olarak birçok yönden benzerlik ve farklar mevcuttur (GOM, 2022).

Tablo 4.1. Parça unsurları, ölçümler ve veri değerlendirme için temaslı ve optik ölçüm sistemlerinin karşılaştırılması (GOM, 2022)

Özellikler	Optik ölçüm	Temaslı ölçüm
Aynalı, çok parlak ve yarı saydam yüzeyler için uygunluk	Uygun yüzey gerekli	✓
Mikrometre toleranslarla kesin ölçümler	X	✓
Yüksek ölçüm hızları	✓	X
Temasız ölçüm yeteneği	✓	X
Ölçüm sebebi ile aşınmama	✓	X
Aşırı hassas yüzeyler için uygunluk	✓	X
Nokta bazlı ölçüm verisi	✓	✓
İşlevsellik özelliklerinin değerlendirilebilmesi	✓	✓
GPS özelliklerinin değerlendirilebilmesi	✓	Şartlı
Tüm alanın ölçümünün verisi oluşturulabilmesi	✓	X
Tüm yüzeyin ölçülebilmesi	✓	X
Bilgisayar destekli tasarıma göre karşılaştırma	✓	X

Ayrıca, optik üç boyutlu ölçüm sensörlerinin çeşitli yüzeyler üzerinde gösterdiği performans karşılaştırması Tablo 4.2 kullanılarak verilmiştir (Leach R. , 2011). Tabloda görüldüğü üzere bu sistemlerde kullanılan sensörlerin çalışma ilkeleri göz önüne alındığında sadece bazı tip yüzey ölçümleri için uygun olduğu gözükmemektedir.

Tablo 4.2. Kullanılan sensörlerin sınırları (Leach, 2011)

Yüzey ve sensör tipi	Lazer üçgenleme	Saçak izdüşüm	SL Mikroskopi	Kaba yüzey CSI	Klasik girişim	Saptırım ölçüm
Yansayan düz yüzey	- -	- -	++	++	++	++
Yansayan eğri yüzey	- -	- -	++	0	0	++
Tam mat yüzey	+	++	+	++	- -	- -
Talaşlı imalat yüzeyi	0	0	+	++	- -	-
Açılı işleme	-	0	+	+	- -	-
Derin delikler	- -	- -	-	+	- -	- -
Hacim saçılğan	-	0	-	+	- -	- -

Geleneksel temaslı ölçüm yöntemleri ve hatta üç boyutlu optik tarayıcı sistemler ile kıyaslandığında x-ışını tomografi cihazları sunduğu avantajlar sebebi ile diğer sistemleri geride bırakmaktadır. Bugün birçok tomografi cihazı tahribatsız muayene ve ölçüm işlemleri için kullanılabilir. Sunduğu avantajlar sebebi ile ilk üretim numunesi ve seri üretim aşamalarında inceleme ve analiz maliyetlerinde önemli iyileştirmelerin yapılmasına yardımcı olur. Bu cihazlar hem iç hem de dış komponentlerin tasarım ihtiyaçlarının hızlı bir şekilde doğrulanması için kullanılabilir. Ayrıca hassas iç unsurların tahribatsız olarak ölçülmesine de izin verir. Parçalar uzay boşluğunda serbest biçimde ölçüldüğü için ölçüm ihtiyaçlarını bağlama hatalarından arındırır. Geometrik olarak kapalı parçalar üzerinde tersine mühendislik çalışmalarının yapılmasına izin verir. (Wenjuan, Brown, & Leach, 2011).

Farklı ölçüm cihazlarına ait özellikler hassasiyet, CAD verisine göre kıyaslama, parça başına ölçüm süresi, yazılım kullanış kolaylığı, tersine mühendislik yeteneği, taşınabilirlik, görsel sunum, bakım ve kalibrasyon, sarf malzemeler ve ücret gibi çeşitli özellikler açısından kıyaslanabilir. Bu karşılaştırma, optik tarama sistemleri ve CMM sistemleri için Tablo 4.3 kullanılarak sunulmuştur (Kupriyanov , 2018).

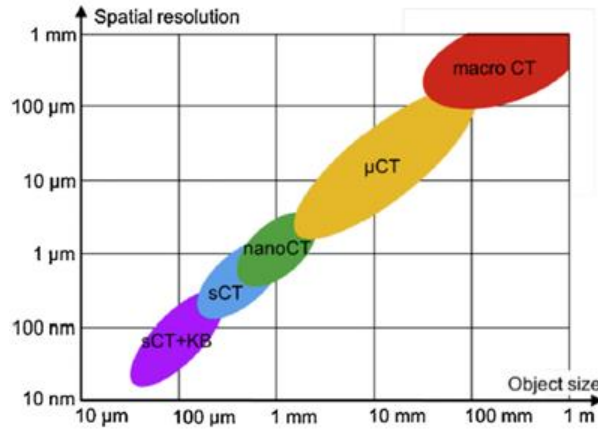
Tablo 4.3. Köprü CMM ve optik tarama cihazının avantajları ve dezavantajları (Kupriyanov, 2018)

	Köprü CMM	Optik tarama cihazları
Avantajlar	Yüksek hassasiyet Düşük sarf malzeme ihtiyacı Hızlı tarama yeteneği Parlak yüzeyleri ölçme yeteneği Otomatik ölçümler	Karmaşık yüzeylerin ölçümü Geniş ölçüm hacmi Taşınabilirlik Hızlı kalibrasyon süreci Tersine mühendislik uygulamaları
Dezavantajlar	Sabit yer kaplaması ve taşınabilirlik Karmaşık yüzeylerin ölçümü Tarama başına yoğunluk Görsel 3B parça sunumu Ölçüm öncesi parça doğrultma ihtiyacı	Her yıl tam kalibrasyon ihtiyacı Her ölçüm için sarf malzeme ihtiyacı Otomatik ölçümler Parlak yüzeyleri ölçme yeteneği

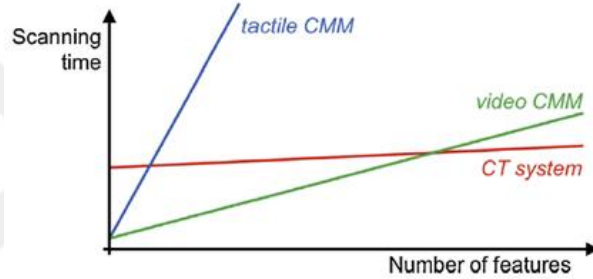
Boyutsal ölçüm sistemleri için günümüzde yeni geliştirilmekte olan x-ışını bilgisayarlı tomografi sistemlerini birçok zorluk beklemektedir. Bu sistemlerin genel olarak avantajları ve dezavantajları Tablo 4.4 kullanılarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.20 ile gösterildiği üzere XBT sistemlerindeki hassasiyet değerleri kullanım amacına göre 10 nm ile 1 mm arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Buna ek olarak, Şekil 4.21 ile gösterildiği üzere ölçülecek olan unsur sayısının artması ile birlikte OPT ve XBT sistemleri için ölçüm sürelerinin de hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür (De Chiffre, Carmignato, Kruth, Schmitt, & Weckenmann, 2014).

Tablo 4.4. X-ışını bilgisayarlı tomografi sistemlerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Tahribatsız muayene gerçekleştirebilme yeteneği	Karmaşık ve çok sayıdaki etkileyici unsur
İç ve dış geometrilerin belirlenebilmesi	Kabul görmüş standart test ve prosedürlerin olmaması
Yüksek bilgi yoğunluğu	Ölçüm hataları kaynaklı düşük ölçüm yeteneği
Herhangi bir yüzeyi belirli bir yoğunluk ve kalınlık değerine kadar tarayabilmesi	Ölçüm belirsizliğinin net olmaması kaynaklı ölçümlerin izlenebilirliğinin olmaması
	Çoklu-malzemelerde yapılan taramadaki sorunlar
	Soğurma sebebi ile nüfuz edilebilecek malzeme kalınlığının kısıtlı olması

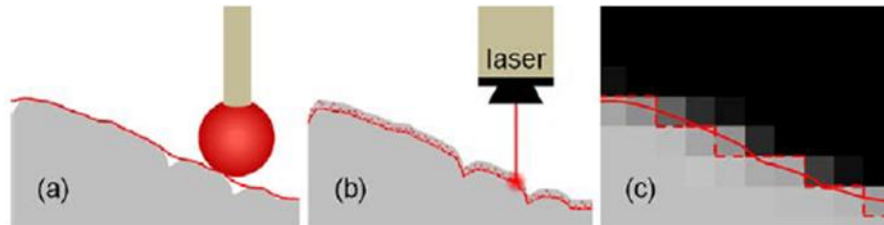


Şekil 4.19. XBT sistemleri için ölçüm belirsizlikleri (Chiffre vd., 2014)



Şekil 4.20. CMM, OPT, XBT için ölçüm süreleri ve unsur sayısı arasındaki ilişki (Chiffre vd., 2014)

Her üç sistem göz önüne alındığında, Şekil 4.21 ile gösterildiği üzere ölçüm sistemi yüzey değerlendirmesi sırasında oluşabilecek hatalardan farklı şekilde etkilendiği görülmektedir. Temaslı ölçüm yöntemlerinde, temas probu yüzey topografyası ile yanlış bir şekilde etkileşime girebilir. Lazer sistemlerinde lazer ışığının yarı saydam bir yüzeye nüfus etmesi gibi hatalar oluşabilir. XBT sistemlerinde ise yüzey eşiği belirleme yöntemi kaynaklı hatalar ortaya çıkabilir (Carmignato & Savio, 2011).



Şekil 4.21. Farklı ölçüm sistemlerinde yüzey topografyasında oluşabilecek farklı hatalar kaynaklı dezavantajlar (Carmignato ve Savio, 2011)

XBT sistemlerinin, temaslı ve optik ölçüm sistemlerine göre tercih edilmesindeki esas sebeplerden bir tanesi ise eklemeli imalat gibi yöntemler ile hayatımıza giren parça iç yapıları ve geleneksel yöntemler ile erişilemeyen bölgelerin ölçümü yeteneğidir. Bu sebepten dolayı XBT sistemleri iç unsurlara ait boyutsal ve geometrik özellikler ile birlikte yüzey dokusuna ait özellikleri de ölçebildikleri için günümüzde önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu sistemlerin optik tarama sistemlerine benzer olarak serbest şekilli yüzeyleri ölçme yeteneklerinin de olduğu bilinmektedir (Leach, et al., 2019).

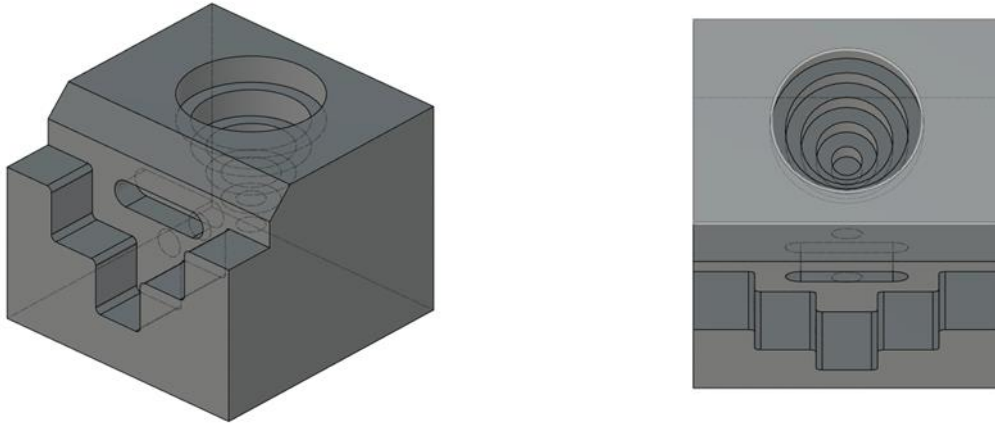


5. MALZEME VE YÖNTEM

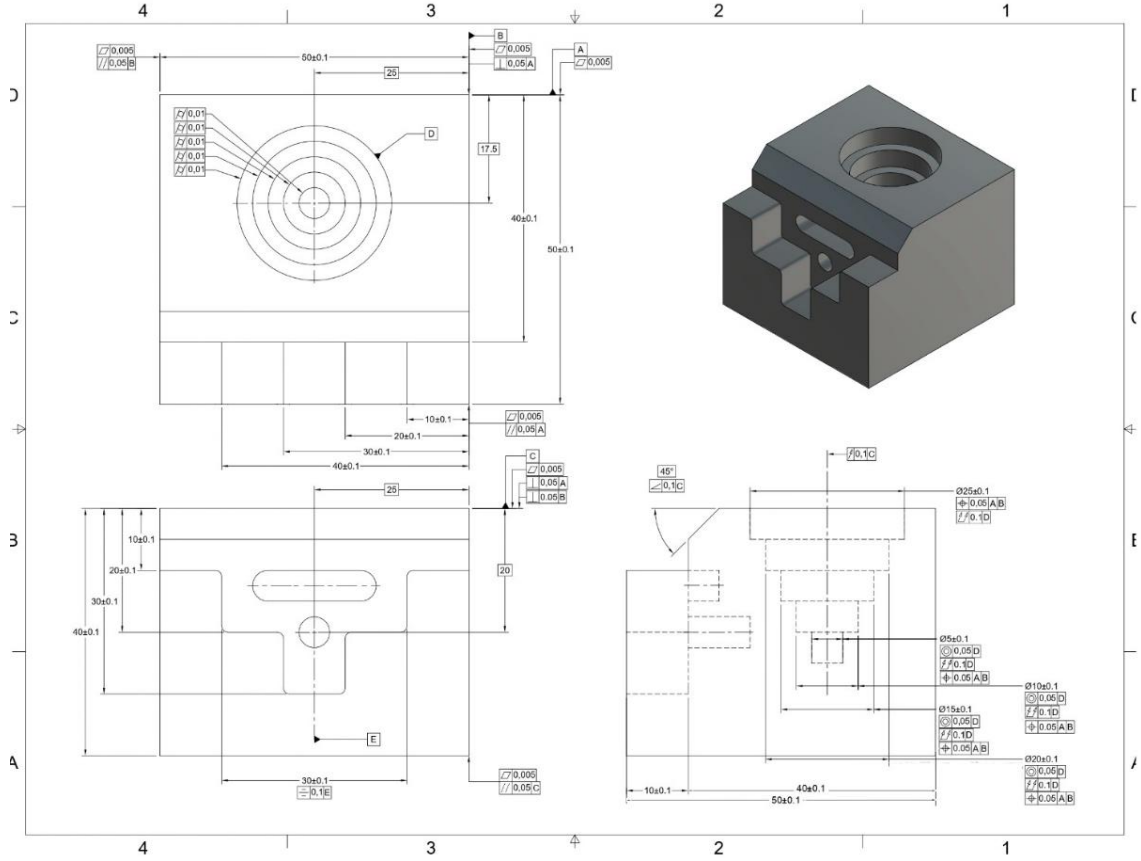
Bu çalışmaya konu olan temaslı ve temassız ölçüm yöntemlerini karşılaştırmak için farklı boyutsal ve geometrik unsurları içeren bir referans bir malzeme tasarımı yapılmıştır. Bu malzeme ardından işlenebilirlik özelliği yüksek, yaygın kullanımı olan bir alüminyum malzeme kullanılarak talaşlı imalat yöntemi ve benzer özelliklerdeki başka bir alüminyum malzeme kullanılarak eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ardından farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilen bu iki parçaya farklı boyutsal ve geometrik özellikler kullanılarak seçilen ilgili unsurlar temaslı ve temassız ölçüm yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Temaslı ölçüm yöntemi olarak kullanılan CMM, temassız ölçüm yöntemlerine göre daha hassas ve izlenebilir sonuçlar sunduğundan dolayı çalışma sırasında bu değerler referans olarak kullanılmıştır. Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmada sırasında kullanılan malzeme, makine, tasarım, üretim ve ölçüm yöntemleri gibi konulardan detaylıca bahsedilecektir.

5.1. Numune Tasarımı

Bu çalışmada sırasında parça tasarımını yapabilmek için Fusion 360 yazılımının katı modelleme ekranı kullanılarak Şekil 5.1. kullanılarak gösterildiği gibi bir numune hazırlanmıştır. Ardından yazılım yardımı ile üç boyutlu katı model oluşturulduktan sonra tasarım, Şekil 5.2 ile gösterildiği gibi iki boyutlu olarak bir teknik çizime aktarılmıştır. Bu teknik çizim oluşturma aşamasında parçaya ait tüm ölçülerin çizime aktarılması yerine sadece karşılaştırma çalışmasını ilgilendiren ilgili unsurların ölçülendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 5.1. Eklemeli imalat numune parçasının bilgisayar destekli tasarım izometrik görüntüleri



Şekil 5.2. CAD programı yardımı ile çizilen izdüşüm ve izometrik görüntüleri içeren teknik resim

CAD programı yardımı ile oluşturulan bu teknik resimde parçanın izometrik görünüşü ve ortogonal izdüşümleri verilmiştir. Ortogonal izdüşümler oluşturulurken dik paralel izdüşüm yöntemi kullanılmıştır. Teknik resmin sol üst bölgesinde, sol alt bölgesinde ve sağ alt bölgesinde sırasıyla parça üst, ön ve yan görünümleri paylaşılmıştır.

Parça boyutları, imalat ve ölçüm yöntemlerinde kullanılacak tezgâhın ve cihazların özellikleri, yeteneği ve işlem hacimleri göz önünde bulundurularak 50 x 50 x 40 mm boyutlarındaki bir dikdörtgen prizma üzerinde ilgili unsurların tasarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı ölçüm sistemlerinin karşılaştırması çalışmasında kullanılacak olan bu unsurlar Şekil 5.3 ile gösterildiği üzere ölçümlerin raporlamasını kolaylaştırmak için teknik resim üzerinde numaralandırılmıştır.

Bilgisayar destekli tasarım üzerinde tanımlanmış olan ve ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılmasında kullanılacak olan bu boyutsal ve geometrik unsurlar Tablo 5.1 kullanılarak gösterildiği üzere, kısıtlı boyutlar içinde sistemleri karşılaştırılması için olabildiğince fazla unsur yerleştirilmeye çalışılmıştır.

Tablo 5.1. Ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması için çalışmada kullanılan farklı unsurların sınıflandırılması, özellikleri ve miktarları

Tür	Sınıf	Özellik	Unsur Miktarı
Boyutsal	-	Uzunluk	12
		Çap	5
Geometrik	Şekil	Düzlemsellik	6
		Silindiriklik	5
	Yer	Konum	5
		Eşmerkezlilik	4
		Simetri	1
	Yönelim	Diklik	3
		Paralellik	3
		Açısalılık	1
	Salgı	Salgı	5

Geliştirme sürecinde, çalışmanın asıl amacı olan farklı ölçüm sistemlerinin karşılaştırılması konusu göz önünde bulundurularak, kullanılan üretim yöntemleri için istenilen özellikleri karşılayan benzer termal özelliklere sahip iki farklı tip malzeme seçilmiştir. Talaşlı imalat kullanılarak üretilcek numune için kolay işlenebilirlik, sanayideki sık kullanım ve hızlı bulunabilirlik gibi özellikler göz önünde bulundurularak, Alüminyum 3003 malzemesi seçilmiştir. Benzer olarak eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilcek numune için ise mevcut SLM üretim yöntemleri göz önünde bulundurularak talaşlı imalat için seçilen numuneye benzer AlSi10Mg malzemesi seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak malzemenin seçimi, sonuçları etkileme ihtimali olabilecek Tablo 5.2 ile belirtilen özellikler yakın olacak şekilde yapılmıştır.

Tablo 5.2. *Malzemenin seçiminde kullanılan değerlendirmeye alınan malzeme özellikleri*

Sınıf	Özellik	Talaşlı İmalat Alüminyum 3003	Eklemeli İmalat Alüminyum AlSi10Mg
Kimyasal	[Si] Silisyum	9.0 – 11.0	9.0 – 11.0
	[Fe] Demir	0.55	0.55
	[Cu] Bakır	0.05	0.05
	[Mn] Manganez	0.45	0.45
	[Mg] Magnezyum	0.25 – 0.45	0.20 – 0.45
	[Ni] Nikel	0.05	0.05
	[Zn] Çinko	0.10	0.10
	[Pb] Kurşun	0.05	0.05
	[Ti] Titanyum	0.15	0.15
	[Sn] Kalay	0.05	0.05
	[Al] Alüminyum	Kalan	Kalan
Fiziksel	Isıl işlem	Uygulanabilir değil	Yok
	Isıl iletkenlik	110 W/mK	115 W/mK
	Sertlik	55 HB	119 ± 5 HBW
	Talaşlı imalat ile üretilebilirlik	İyi	İyi
	Eklemeli imalat ile üretilebilirlik	Uygulanabilir değil	İyi

Burada her iki imalat yöntemi arasındaki malzeme kaynaklı değişkenlikleri en düşük seviyeye indirebilmek için birbirine yakın özelliklerde malzemeler seçilmiştir. Tablo 5.2. incelendiğinde, malzemelerin kimyasal özelliklerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Benzer bir yorum fiziksel özellikler için de yapılabilir fakat üretim yöntemleri kaynaklı malzemenin sertlik değerleri arasında bir fark olduğu görülmektedir. Her iki numunenin sertlik ölçümü için kullanılan Brinell yöntemi belirli bir çaptaki sert malzemeden yapılmış bilyenin belirli bir yük kullanarak numune yüzeyine belirli bir süre uygulanması sonrasında oluşan iz çapının ölçülmesi yöntemini kullanmaktadır. Fakat bu ölçümler sırasında HB yöntemi çelik bir bilye, HBW yöntemi ise tungsten karbür (WC) bir bilye kullanır. Yüksek sertlik değerine sahip malzemelerde bilyenin deformasyonunu azaltmak için HBW yöntemi tercih edilmektedir. HB ve HBW olarak tanımlanmış olan sertlik sonuçlarını, kullanılan iz açar bilyenin farklılığı sebebi ile elde edilen sonuçları yüksek sertlik değerlerinde birbirine çevirmek mümkün değildir.

5.2. Üretim Yöntemi

Bu çalışma kapsamında benzer kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip, talaşlı ve eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş iki farklı numune kullanılmıştır. Karşılaştırma için kullanılmamak üzere tasarım aşamasında belirlenen özelliklerin üretilmesi için alüminyum 3003 kullanılarak talaşlı imalat yöntemi ile ve AlSi10Mg kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile ilgili numuneler üretilmiştir. Bu yöntemlere ait hammadde, kullanılan tezgahlar, yöntemler ve üretim parametreleri gibi özellikler ilerleyen başlıklarda detaylandırılmıştır.

5.2.1. Talaşlı imalat

Bu numunenin hazırlanması için tercih edilen hammadde olarak 70 x 70 x 70 mm boyutlarında iyi işlenebilirlik özelliğine sahip alüminyum 3003 kütük seçilmiştir. Bu kütük parça ardından, görseli Görsel 5.1 kullanılarak gösterilmiş olan ve özellikleri Tablo 5.3 kullanılarak tanımlanmış olan Travis markasına ait bir geleneksel talaşlı imalat freze tezgâhı ile tasarımda istenen özelliklere göre Görsel 5.2 ile gösterildiği üzere işlenmiştir. Bu işlemler sırasındaki operasyon adımları ve bu adımlara ait parametreler ise Tablo 5.4 kullanılarak verilmiştir. Tablo 5.4 kullanarak verilen operasyon adımlarına ve parametrelerine göre işlenmiştir. Bu işlem sırasında ilk referans düzlemlerini işleyebilmek için noktasal temas yapan dayamalar kullanılmasına dikkat edilmiştir. Tüm dış yüzeyler bu referanslar kullanılarak işlendikten sonra diğer unsurlar işlenmiştir.



Görsel 5.1. Talaşlı imalat numunesinin üretilmesi için kullanılan tezgâh

Tablo 5.3. *Talaşlı imalat tezgahının teknik özellikleri*

Talaşlı imalat tezgahına ait özellikler	
Aktif eksen hareketi – x	700 mm
Aktif eksen hareketi – y	250 mm
Aktif eksen hareketi – z	440 mm
Tezgâh işlem hacmi	0,77 mm ³
Spindle gücü	3 – 5 HP
Devir	60 - 1100 RPM
Yatay ilerleme	18 – 320 mm / dakika

Tablo 5.4. *Operasyon adımları, operasyona ait açıklamalar, takımlar ve üretim parametreleri*

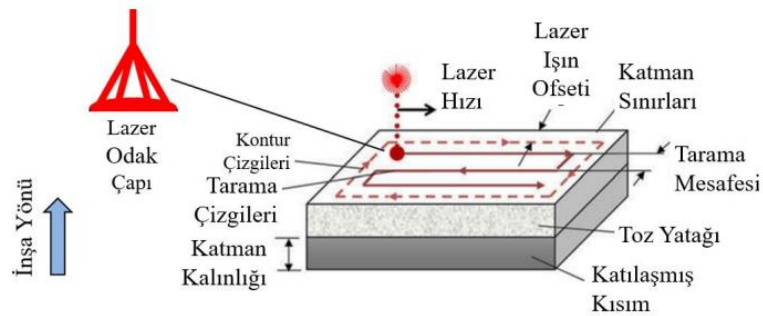
Operasyon	Açıklama	Takım	Devir	İlerleme
10	A yüzey işleme	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
20	B yüzey işleme	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
30	C yüzey işleme	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
40	A' (karşı) yüzey işleme	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
50	B' (karşı) yüzey işleme	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
60	C' (karşı) yüzey işleme	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
70	Delik delme	Parmak freze Ø5	800 rpm	~90 mm/dk
80	Delik delme	Parmak freze Ø10	800 rpm	~90 mm/dk
90	Delik delme	Parmak freze Ø15	800 rpm	~90 mm/dk
100	Delik delme	Parmak freze Ø20	800 rpm	~90 mm/dk
110	Delik delme	Parmak freze Ø25	800 rpm	~90 mm/dk
120	Adım yüzey işleme	Parmak freze Ø5	800 rpm	~300 mm/dk
130	Yan delik delme	Parmak freze Ø5	800 rpm	~90 mm/dk
140	Slot işleme	Parmak freze Ø5	800 rpm	~90 mm/dk
150	Pah işleme	Parmak freze Ø5	800 rpm	~90 mm/dk
160	Alın frezeleme (Hata düzeltme)	Alın freze Ø50	800 rpm	300 mm/dk
160	Köşelere manuel pah kırma	Parmak freze Ø5	800 rpm	~90 mm/dk



Görsel 5.2. Talaşlı imalat numunesinin üretilmesi için operasyon sırasında alınmış bir görüntü

5.2.2. Eklemeli imalat

Bu numunenin hazırlanması için tercih edilen hammadde olarak AlSi10Mg malzemesi ve seçmeli lazer ergitme eklemeli imalat yöntemi kullanılmıştır. Bu numune parçanın üretimi sırasında tasarım sırasında oluşturulmuş. STL uzantılı bilgisayar destekli tasarım verisi, Görsel 5.3 kullanılarak gösterilmiş ve özellikleri Tablo 5.3 kullanılarak verilmiş olan EOS M 290 markalı tezgâha aktarılmıştır (EOS, 2022). Katmanlı imalat sistemlerinde başarılı bir imalat için doğru üretim parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir. Seçilen özellikler doğrudan parça mikro yapısını, mekanik özelliklerini, deformasyonunu, boyutsal ve geometrik doğruluğu ve yüzey kalitesini etkileyebilir. Katmanlı imalat çalışması için tanımlanan çeşitli parametreler Şekil 5.4 kullanılarak verilmiştir (Poyraz, 2018). Parça özelliklerini doğrudan etkileyen ve eklemeli imalat parçasının imalatı için kullanılan üretim parametreleri Tablo 5.6 kullanılarak detaylı bir şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 5.4. Temel proses parametreleri (Poyraz, 2018)

Tablo 5.5. Eklemeli imalat tezgahının teknik özellikleri

Eklemeli imalat tezgahına ait özellikler	
Aktif lazer eksen genişliği – x	250 mm
Aktif lazer eksen genişliği – y	250 mm
Aktif lazer eksen genişliği – z	325 mm
Tezgâh işlem hacmi	0,20 mm ³
Lazer gücü	400 W
Tarama hızı	7,0 m/s
Odak çapı	100 µm
Üretilebilir toleranslar	± 100 µm
Minimum duvar kalınlığı	0,3 – 0,4 mm



Görsel 5.3. Eklemeli imalat numunesinin üretilmesi için kullanılan eklemeli imalat tezgâhı (EOS, 2022)

Tablo 5.6. Eklemeli imalat işlemi sırasında kullanılan parametreler

Operasyon parametreleri	
Katman kalınlığı	30 µm
Lazer gücü	370 W
Lazer tarama hızı	1300 mm/s
Atım arası mesafe	0,19 mm
Işın kaçıklığı	0,02 mm
Enerji yoğunluğu	49,932 J/mm ³
Tarama stratejisi	X etrafında döndürülmüş
Üretim platformu ön-ısıtma sıcaklığı	35 °C

Eklemeli imalat işlemi sonrasında parçanın imalat tablasındaki başlangıç noktasında yüksek düzlemsellik hatası gözlemlendiğinden dolayı, eklemeli imalat sonrasında parçaya talaşlı imalat 60 numaralı operasyondaki parametreleri korunarak talaşlı imalat uygulanmıştır. Bu operasyon sonrasında ölçüm sonuçlarını doğrudan etkileyecek olan C' yüzeyindeki düzlemsellik problemi ortadan kaldırılmıştır. Bu işlemin parça yüzeyindeki matlık seviyesini değiştirdiği görüldüğünden dolayı, optik ölçüm işlemi sırasında bu bölgeye de developer işlemi uygulanmıştır.

5.3. Ölçüm Yöntemi

Bu çalışmada hazırlanan teknik resimde tanımlanmış ölçülerin ölçülmesi için üç farklı boyutsal koordinat ölçüm sistemi kullanılmıştır. Temaslı ve temassız olarak, ikiye ayrılabilen bu ölçüm yöntemlerinde temaslı olarak koordinat ölçüm cihazı ve temassız olarak ise optik üç boyutlu tarama ve x-ışını bilgisayarlı tomografi tarama sistemleri kullanılmıştır. Bu ölçümler sırasıyla CMM, OPT ve XBT tarama sistemleri ile gerçekleştirilmiştir. Optik ölçüm sırasında numune üzerine uygulanan developer ve referans markalamalar x-ışını bilgisayarlı tomografi uygulaması öncesinde tanımlanan yöntemler kullanılarak kaldırılmıştır. Çalışma sırasında kullanılan bu ölçüm yöntemlerine ait teknik özellikler ve detaylar ilerleyen bölümde aktarılacaktır.

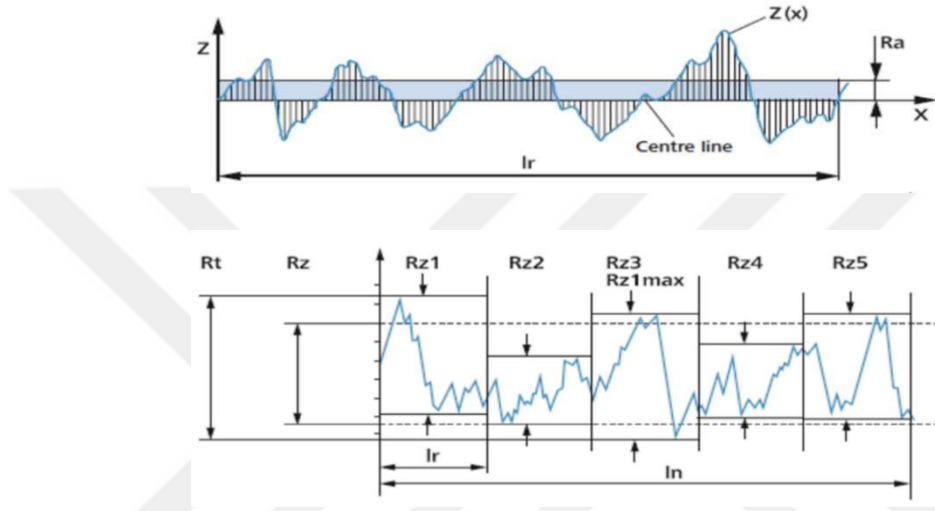
5.3.1. Yüzey pürüzlülük cihazı

Bu çalışma kapsamında üretilmiş olan parçaların yüzey pürüzlülükleri değerlerinin ölçüm sonuçlarına etkilerini görebilmek için bir yüzey pürüzlülük cihazı yardımı ile parçanın dış yüzeylerine ait Ra, Rz ve Rt yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Aşağıda ISO 4287 şartnamesine göre tanımları verilmiş olan bu yüzey pürüzlülük kriterleri Şekil 5.5 kullanılarak görselleştirilmiştir (Hamed, Zedan, Samuel, Doty, & Samuel, 2019).

Ra: Yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalamasıdır. Tüm profil değerlerinin toplamının aritmetik ortalaması olarak da açıklanabilir. Yüzey kalitesi ölçümlerinde ve kalite kontrol uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan parametredir. Ölçüm doğası gereği oluşan sınırlamalara rağmen bu parametre ölçülmesi oldukça kolay ve yüzey profil yüksekliğinin genel bir tanımını verir.

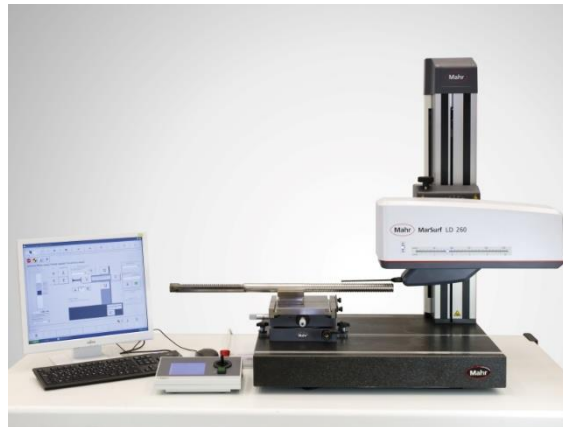
Rz: Yüzey pürüzlülük derinliği olarak açıklanabilir. Ardışık örnekleme uzunluklarının tek pürüzlülük derinliklerinin aritmetik ortalama değeridir.

Rt: Yüzey pürüzlülük profilinin toplam yüksekliğidir. Ölçüm sırasında profilin değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek tepe ile en alçak vadi arasındaki dikey mesafe kullanılır. Dolayısıyla bu parametre, yüksek tepe noktalarına veya derin çiziklere karşı çok hassastır (Chaidas, Kitsakis, Kechagias, & Maropoulos, 2016)



Şekil 5.5. ISO 4287 şartnamesine göre sırasıyla Ra, Rt ve Rz yüzey pürüzlülük parametreleri

Bu yüzey parametrelerini ölçümü için sanayide oldukça yaygın olarak kullanılan Görsel 5.4 ile bir görseli sunulan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar için gelişmiş olanlar eşzamanlı olarak kontür ve yüzey pürüzlülük değerini ölçebilmektedir. (MARH, 2022). Yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçüm sırasında kullanılan çeşitli parametreler Tablo 5.7 ile sunulmuştur.



Görsel 5.4. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (MAHR, 2022)

Tablo 5.7. *Yüzey pürüzlülük ölçümü sırasında kullanılan parametreler*

Yüzey pürüzlülük ölçüm parametreleri	
Standart	ISO, JIS, ASME ($N + 2xLc$)
Hareket Uzunluğu	17,5 [mm]
Örnekleme Aralığı	5
Kesme (Lc)	2,5 [mm]
Ölçüm Hızı	1 [mm/s]
Ölçüm Aralığı	1,5 [μm]

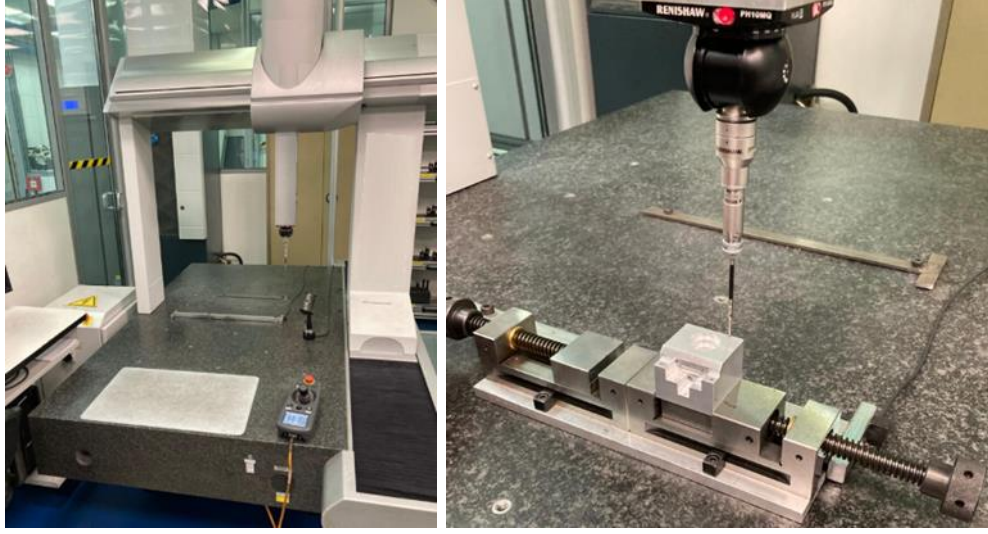
5.3.2. CMM

CMM ile yapılan temaslı ölçüm çalışması için detayları Tablo 5.8 ile verilen cihaz kullanılmıştır. Ölçüm yöntemine ait bazı değişkenler Tablo 5.9 kullanılarak detaylı bir şekilde aktarılmıştır. Talaşlı ve eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş olan numune parçaların ölçümü için işlem adımları aşağıda tanımlanmıştır.

Tablo 5.8. *Temaslı ölçüm sistemi için kullanılan CMM cihazının özellikleri*

CMM cihazına ait özellikler	
Ölçüm hacmi (x, y, z)	700 x 700 x 1000
Hız	250 mm/s
İvme	1000 mm/s ²
Ölçüm belirsizliği	2,1 + L/333

Ölçülecek olan numune parça, Görsel 5.5 kullanılarak gösterildiği üzere bir mengene yardımı ile sabitlenir ve ölçüm tablasının üzerine yerleştirilir. Burada ölçüm sırasında parçanın oynamasını engelleyecek şekilde en düşük sıkma kuvvetinin uygulanması fakat bu işlem sırasında parçanın yük altında şekil değiştirmesini ve ölçüm sonuçlarının bu yük kaynaklı etkilenmesinin engellenmesi oldukça önemlidir.



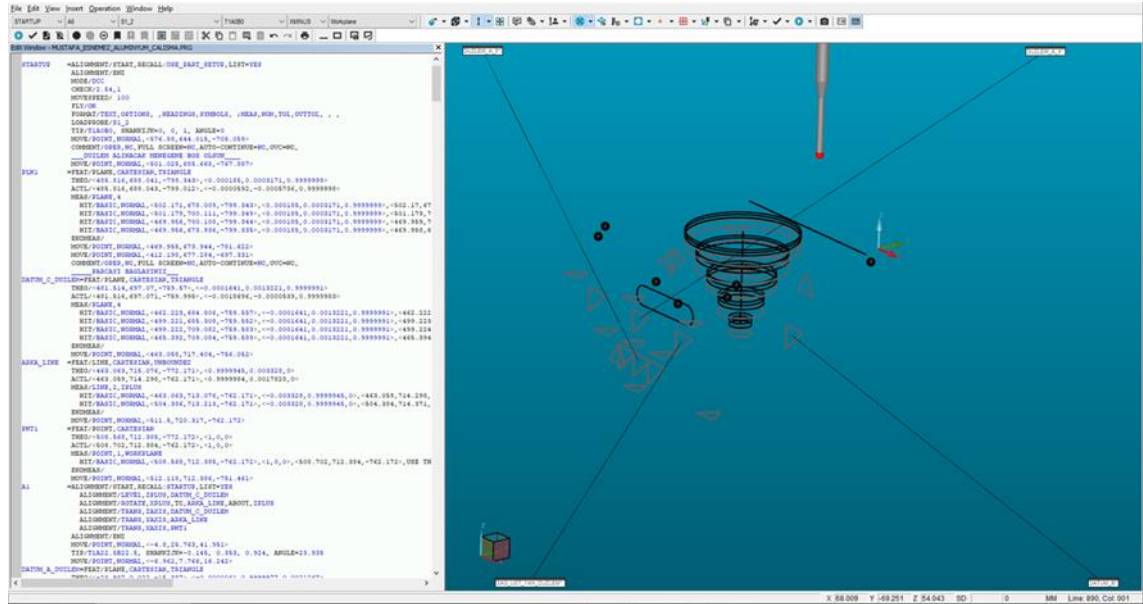
Görsel 5.5. Temaslı ölçüm sistemi kullanılan cihaz ve mengene ile bağlama yöntemi

Tablo 5.9. CMM ölçüm yöntemine ait bilgiler

Ölçüm ayarları ve yöntem	
Unsur başına nokta sayısı	4
Unsur oluşturma yöntemi	Gauss
Prop kafası	PH10MQ Plus
Kafa modülü	Renishaw TP200
Prop modülü	Standard güç kontrol modülü
Prop çapı, uzunluğu ve malzemesi	Ø2 mm / 50 mm / Yakut
Hız	250 mm/s
İvme	1000 mm/s ²
Nem	23,7 °C / 39 %RH
Ön hazırlık süresi	~ 5 dakika
Ölçüm süresi	~ 1 saat
Sorgulama süresi (Programlı / Programsız)	~ 1 saat / ~ 5 dakika
Ölçüm dosyası boyutu	<1 MB

CMM yazılımı çalıştırılarak, programlama ekranı açılır. Bu ekranda öncelikle cihaz eksenine göre parça eksenini tanımlamak için parça uzayda 3-2-1 düzlem, çizgi ve nokta kuralı uygulanarak doğrultulur. Böylece cihaz ekseni ve parça ekseni arasındaki ilişki kurulur. Parçanın uzaydaki konumu tezgâha tanıtıldıktan sonra, teknik çizim ile tanımlanmış özellikleri ölçebilmek için oluşturulacak olan geometrik unsurlar, parça yüzeyinden alınan ve koordinatları cihaz eksenine göre bilinen noktaların matematiksel yöntemler kullanılarak birleştirilmesi ile oluşturulur.

Bu çalışmadaki oluşturulmuş geometrik unsurların görselleri ve yazılım arayüzü Şekil 5.6 kullanılarak gösterilmiştir. Ölçümler sırasında, geometrik unsurlara ait şekil hatalarını da görebilmek için parça yüzeyinden uygun büyüklükte nokta alınmalıdır. Bu çalışmada, düzlemler ve çaplar için en düşük gereklilik olan 4 noktadan ölçüm yapılmıştır. Düzlemler için tüm parça yüzey alanının temsil edilebilmesi için noktaların köşelere yakın ve yeterli genişlikte olduğuna dikkat edilmiştir. Ölçümlerde kullanılan çaplar silindirin orta bölgesinden seçilmiştir. Silindirler ise ağız ve dip çapları kullanılarak matematiksel olarak birleştirilerek oluşturulmuştur. Tüm geometrik elemanların oluşturulması sırasında sıgdırma için Gauss yöntemi kullanılmıştır.



Görsel 5.6. CMM ölçüm programı için ölçüm sonrasında yazılım arayüzü

Teknik çizim üzerinde işaretlenmiş ölçülerin sorgulama işlemi için oluşturulan bu elemanlar ve bu elemanlara bağlı referans sistemleri kullanılmıştır. Rapor olarak alınan sonuçlar, ardından karşılaştırma için bir veri tablosuna aktarılmıştır.

5.3.3. Optik üç boyutlu tarama

Optik üç boyutlu tarama cihazı ile yapılan temasız ölçüm çalışması için detayları Tablo 5.10 ile verilen cihaz kullanılmıştır. Talaşlı ve eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş olan numune parçaların optik üç boyutlu tarama cihazı ile ölçümü için ilgili işlem adımları aşağıda tanımlanmıştır. Tanımlanan diğer yöntemlerinden farklı olarak

optik üç boyutlu tarama ölçümlerinde sarf malzeme ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ölçüm yönteminde talaşlı imalat gibi yüksek hassasiyet ile üretilmiş parçalar için bir developer uygulanması ihtiyacı vardır. Ayrıca bu ölçüm yöntemi kullanılarak ölçüm tüm parçaların bir referans sistemi içine yerleştirilebilmesi için parça karmaşıklığına ve büyüklüğüne bağlı olarak yüzeye referans markalamalar yerleştirilmesi gerekmektedir.

Ölçülecek olan numune yüzeyinin parlaklığı ve karmaşıklığı bu sistemlerde doğrudan ışığın kırılımını etkilediği için ölçüm sonuçlarını değiştirebilmektedir. Bu çalışmada, numune yüzeyindeki bu etkiyi en düşük seviyeye indirmek için Görsel 5.7 ile gösterildiği üzere bir havalı boya tabancası yardımı ile parça yüzeyine 2 – 10 μm kalınlığında titanyum oksit (TiO_2) – alkol çözeltisi ile ince bir developer uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama sırasında developer çözeltisi havalı boya tabancası yardımı ile atomize edilerek yüzeye püskürtülür. Teknik bir uygulama olarak tanımlanabilecek olan bu işlem sırasında parça yüzeyine gereğinden fazla developer uygulanmaması adına yetkin bir uygulayıcı bu işlemi gerçekleştirmiştir.

Developer uygulaması sadece yüksek yüzey parlaklığına sahip olan talaşlı imalat numunesi için gerçekleştirilmiştir. Eklemeli imalat numunesi için yüzey yeterince mat olduğu için bu parçaya developer uygulaması gerçekleştirilmemiştir ve eklemeli imalat yöntemi ile üretilen numune olduğu gibi kullanılmıştır. Numune yüzeyinde kalıcı olmayan bu developer uygulaması, aşağıda tanımlanan tüm ölçüm işlemleri tamamlandıktan sonra XBT kullanılarak yapılacak ölçüm öncesinde alkol, uygun ince bir kumaş ve basınçlı hava kullanılarak temizlenmiştir.



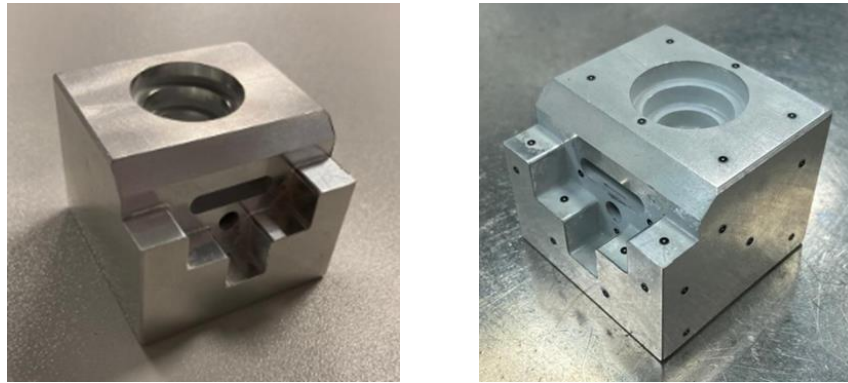
Görsel 5.7. Developer uygulaması için kullanılan TiO_2 – alkol çözeltisi ve havalı boya tabancası

Tablo 5.10. Temassız ölçüm sistemi için kullanılan optik üç boyutlu tarama cihazının özellikleri

Optik üç boyutlu ölçüm cihazına ait özellikler	
Işık kaynağı	LED – Mavi
Çözünürlük	8 MP
Tarama başına nokta sayısı	8 000 000
Notalar arası mesafe	0,04 – 0,15
Çalışma mesafesi	490 mm
Ölçüm alanı	100 × 70 mm ² – 500 × 370 mm ²

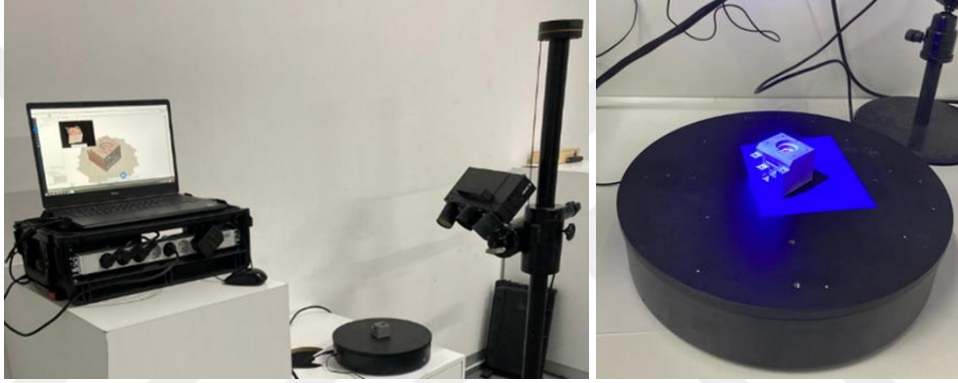
Bu sistemler parçanın uzaydaki konumunu bulabilmek için parça yüzeyinden alınan farklı görüntülerin birleştirilmesi yöntemi ile çalışırlar. Sistemin ölçüm sırasında aktif olarak görüntüleri birleştirme işlemi yapabilmesi için ölçüm öncesinde parçanın taranacak olan tüm yüzeylerine Görsel 5.8 ile gösterildiği üzere referans noktalar yapıştırılmıştır. Ayrıca bu işlemi genel olarak kolaylaştırmak için parçanın üzerinde durduğu tabla da referans noktalar ile işaretlenmiştir. Ölçüm öncesinde hem talaşlı hem de eklemeli imalat numunesi üzerine bu referans noktalar yapıştırılmıştır. Developer uygulama adımı bahsedildiği üzere yapıştırılan bu referans noktalar optik üç boyutlu tarama işlemi tamamlandıktan sonra XBT ölçümü öncesinde temizlenmiştir.

Referans noktalar optik üç boyutlu tarama için oldukça önemlidir çünkü cihaz ölçüm sırasında daha önce gördüğü referans noktaları da içerecek şekilde tarama yaparak sıralı görüntüleri birbirine ekleme ve birleştirme yöntemi ile parçanın üç boyutlu görüntüsünü oluşturmaktadır. Bu işlem sırasında, görüntülerin birleştirilebilmesi için alınan her yeni görüntü daha önceki görüntüler ile tanımlanmış en az üç noktayı içeriyor olmalıdır. Aksi halde, görüntüler arası birleştirilme işlemi yapılamayacağından görüntü işleme yapılamamaktadır.



Görsel 5.8. Parça yüzeyinin kaplanması ve referans noktaların yerleştirilmesi

Üç boyutlu parça görüntüsünü oluşturmak için Görsel 5.9 ile gösterilen optik üç boyutlu tarama sistem kullanılarak Tablo 5.11 ile belirtilen parametreler kullanılarak parçanın sırasıyla farklı açılardan mavi ışık altında görüntüleri alınır. İkiz görüntülü kamera sisteminden alınan görüntüler, işlenmek üzere bir fiber optik kablo yardımı ile doğrudan bilgisayara aktarılır. Hareketli parça tablası yardımı ile bilgisayar üzerinde tanımlanan açılar kullanılarak, tablaya belirli açılar ile otomatik hareket vererek, yüzey görüntüsü alma işlemi oldukça hızlı bir şekilde yapılabilir. İhtiyaç doğrultusunda kamera sistemi z ekseninde hareket ettirilerek, mevcut açı ile görülemeyen noktaların görüntüleri alınır.

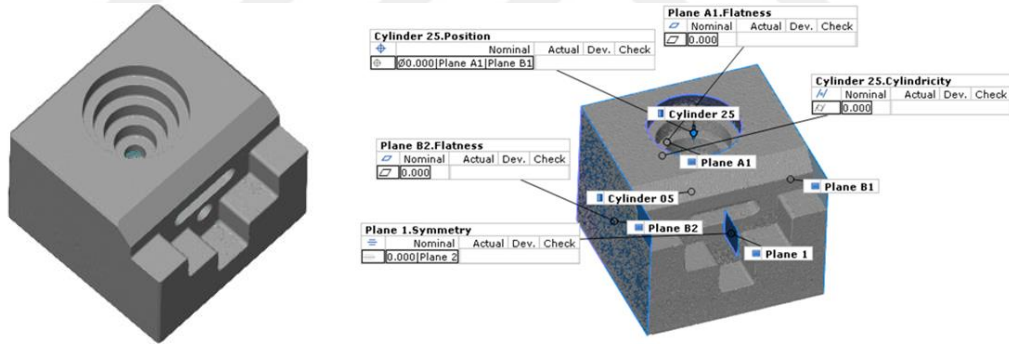


Görsel 5.9. *Optik tarama sistemi ve görüntü parçanın taranması*

Bu işlem sırasında öncelikle numunenin üst bölgesi farklı açılardan olmak üzere yaklaşık 50 görüntü ile taranmıştır. Bu işlemden sonra numune ve tabla görüntülerinin birbirinden ayrılması için parçanın iç yüzeyine doğru bir kesit oluşturularak, numune görüntüsü tabladan ayrılmıştır. Ardından parçanın arka bölgesi çevrilerek aynı tarama ve tabladan ayırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu farklı tarama işlemlerinden oluşturulan ön ve arka numune yüzey verileri cihaz yazılımı yardımı ile noktalar arasındaki farkın en az olacağı şekilde Şekil 5.6 ile gösterildiği üzere otomatik olarak birleştirilmiştir ve parça yüzeyine ait ham veri oluşturulmuştur.

Tablo 5.11. *Optik üç boyutlu ölçüm yöntemine ait bilgiler*

Ölçüm ayarları ve değişkenleri	
Developer uygulama yöntemi	Havalı boya tabancası
Developer tipi	TiO ₂
Developer kalınlığı	2 – 10 µm
Yüzey nokta sayısı	2705236
Yüzey başına referans nokta sayısı	~ 8
Görüntü sayısı	~ 50 (x2)
Çokgenleme yöntemi	Standart
Uzunlu başına nokta sayısı	CMM ile korelasyon yakalamak için düzlemler ve silindirler için ~ 4 noktasal bölgeden ve çizgisel
Uzunlu oluşturma yöntemi	Noktasal / çizgisel unsurlar ile Gauss
Sıcaklık / Nem	0,8 °C / 44 % Rh
Ön hazırlık süresi	~ 15 dakika
Ölçüm süresi / Çokgenleme süresi	~ 30 dakika / ~ 5 dakika
Sorgulama süresi (Programlı / Programsız)	~ 2 saat / ~ 5 dakika
Ölçüm dosyası boyutu (STL / Mesh)	<1 MB / >1 GB

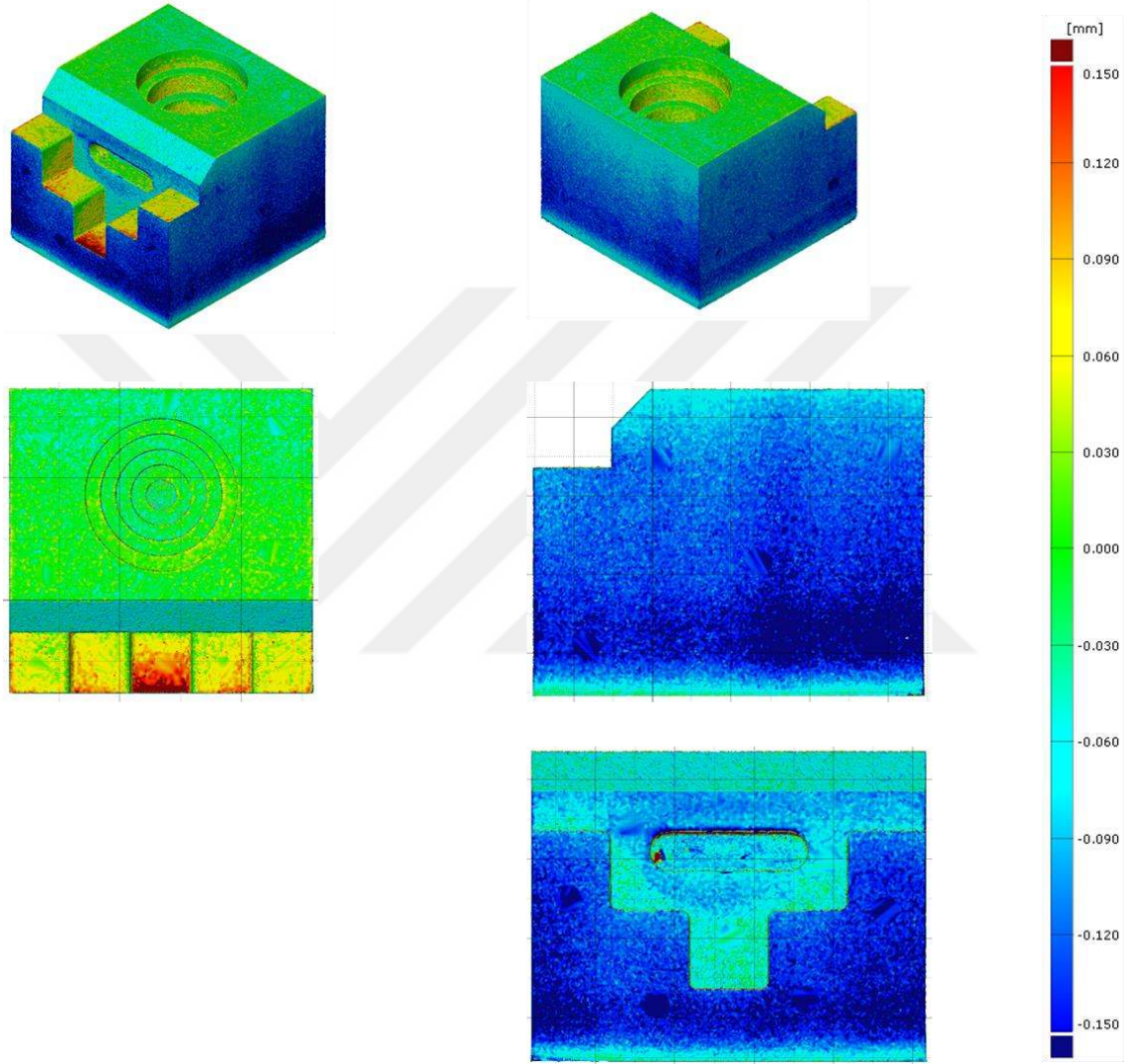


Şekil 5.6. *Yazılım tarafından birleştirilmiş üç boyutlu numune görüntüsü*

Bu işlemlerden sonra yüksek boyutlu ham veri ile oluşturulan yüzey nokta bulutu çokgenleme yapılarak bir parça yüzeyine ait bir ağ verisi oluşturulmuştur. Bu yüzey ağ verisi ardından yazılım yardımı ile uzayda istenilen yönde doğrultulmuştur ve ihtiyaç duyulan sorgulama işlemleri için numune yüzeyine oturan elemanlar oluşturulmuştur. Ardından bu elemanlar kullanılarak teknik çizim üzerindeki numaralandırılmış özellikler sorgulanmıştır ve sonuçlar karşılaştırma için ilgili veri tablosuna aktarılmıştır.

Bu cihazlar ile ayrıca çokgenleme yapılarak işlenmiş olan yüzey verisi ve parça bilgisayar destekli tasarım verisi kullanılarak doğrudan yüzeyler üzerinde renk haritaları ile sapmaları karşılaştırmak da mümkündür. Bu yüzey renk haritası karşılaştırmaları için

genellikle CAD ve STL herhangi bir referans kurulmadan doğrudan verilerin en az sapmaya sebep olduğu otomatik yöntemler kullanılarak birleştirilir. Bu yöntem ile birleştirilmiş veri, $\pm 0,15$ tolerans aralığındaki bir yüzey karşılaştırma çalışmasının sonuçlarına ait görseller Şekil 5.7 ile sunulmuştur.



Şekil 5.7. Eklemeli imalat numunesinin OPT sistemi ile oluşturulan yüzey renk haritası karşılaştırması

5.3.4. X-ray bilgisayarlı tomografi

Bilgisayar destekli tomografi cihazı ile yapılan temasız ölçüm çalışması için detayları Tablo 5.12 ile verilen cihaz kullanılmıştır. Talaşlı ve eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş olan numune parçaların bilgisayarlı tomografi cihazı ile ölçümü için ilgili işlem adımları aşağıda tanımlanmıştır.

Tablo 5.12. Temassız ölçüm sistemi için kullanılan bilgisayarlı tomografi cihazının özellikleri

Bilgisayarlı tomografi cihazına ait özellikler	
Tip	Konik x-ışını
Genişletilmemiş ölçüm hacmi	Ø150 x 170 mm
En yüksek tüp voltajı	225 kV
En yüksek tüp akımı	3000 µA
En yüksek hedef performansı	500 W
En küçük odak nokta büyüklüğü	0,007 mm
İmgecik sayısı	1920 x 1536
İmgecik büyüklüğü	127 x 127
En yüksek uzaysal çözünürlük	4 µm
Hassasiyet	<0,010 µm

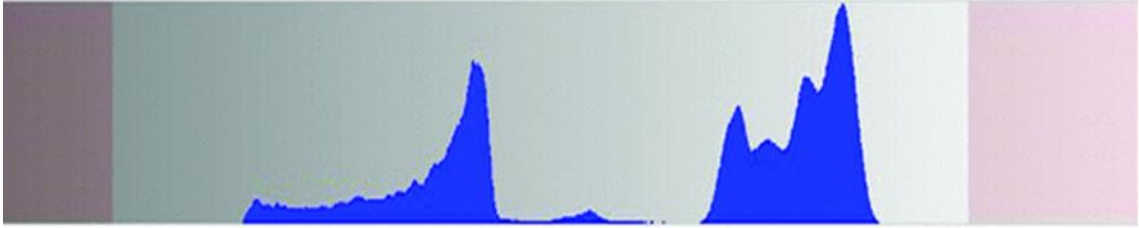
Bilgisayarlı tomografi ile x-ışını uygulanması öncesinde parça uygun bir şekilde cihaz aynasına sabitlenir. Bu işlem sırasında numunenin aynadan bir miktar daha yukarıda olacağı şekilde bir konumlama yapılır. Bu konumlama işleminde ölçülecek numuneye göre yoğunluğu oldukça düşük olan bir malzeme kullanılabilir. Bu çalışma sırasında parça, bir köpük içine açılan yuva içine yerleştirilmiştir. Ardından köpük içine sabitlenen ve ölçüm eksenlerinin hareketleri sırasında parçadaki oynamayı en düşük seviyeye indirecek şekilde konumlanan numune, köpük ile birlikte Görsel 5.10 ile gösterildiği üzere aynaya sabitlenmiştir.



Görsel 5.10. XBT sistemi ile parçanın ölçümü için kullanılan düzen

Parça aynaya yerleştirildikten sonra x-ışını verilmeden önce güvenlik kapıları kapatılır. Tarama işlemi öncesinde, ölçülecek olan numune, bilgisayar programları yardımı ile algılayıcı ve kaynak arasına konumlandırılmıştır. Doğru konumlandırma sağlandıktan sonra parça üzerine x-ışını verilmiştir ve parçanın iki boyutlu izdüşümü algılayıcı üzerinde oluşması sağlanmıştır.

İzdüşüm oluşturulduktan sonra doğru parametrelerin seçilmesi için bir hazırlık yapılır. Burada, Şekil 5.8 ile gösterilen histogram görüntüsüne benzer bir histogram değeri kullanılarak ve bu değerlere bağlı olarak ölçüm parametrelerinde gerekli değişiklikler yapılarak, algılayıcıya yansıyan parça ve hava boşluğu arasındaki ayrımın netleştirilmesi sağlanmıştır ve uygun parametre aralığı Tablo 5.13 ile belirtildiği üzere seçilmiştir (Kowaluk & Woźniak, 2017).

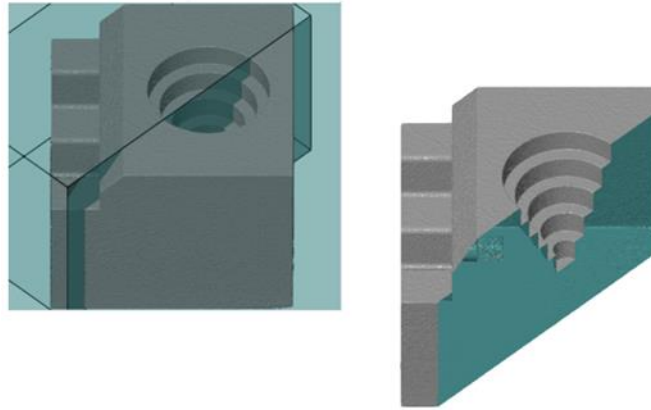


Şekil 5.8. Histogram görüntüsü, Pembe bölgeler hava boşluğu ve mavi bölgeler parçayı temsil etmektedir (Kowaluk, 2017)

Ölçüm parametrelerindeki değişiklik sonrasında uygun histogram değerleri oluştuğunda, x-ışını taraması işlemi başlatılmıştır. Bu işlem sonrasında, tanımlanmış olan görüntü sayısı boyunca, belirli açılar kullanılarak parçanın x-ışını altındaki iki boyutlu izdüşüm görüntülerinin alınması işlemi başlar. İzdüşüm görüntülerin toplanması işlemi tamamlandıktan sonra görüntülerin birleştirilmesi işlemi başlar ve Şekil 5.9 ile gösterildiği üzere numuneye ait hacimsel nesne verisi oluşturulur. Bu hacimsel nesne verisi kullanılarak sadece parça dış yüzeyi değil aynı zamanda son dönemde yaygınlığı giderek artan eklemeli imalat parçalarında ihtiyaç duyulan parçanın iç yapısına ait detayları da incelemek mümkündür. Bununla birlikte bu yöntem, montajlı parçaların sökülmeden kontrol edilebilmesine de imkân tanımaktadır.

Tablo 5.13. Bilgisayarlı tomografi ölçüm yöntemine ait bilgiler

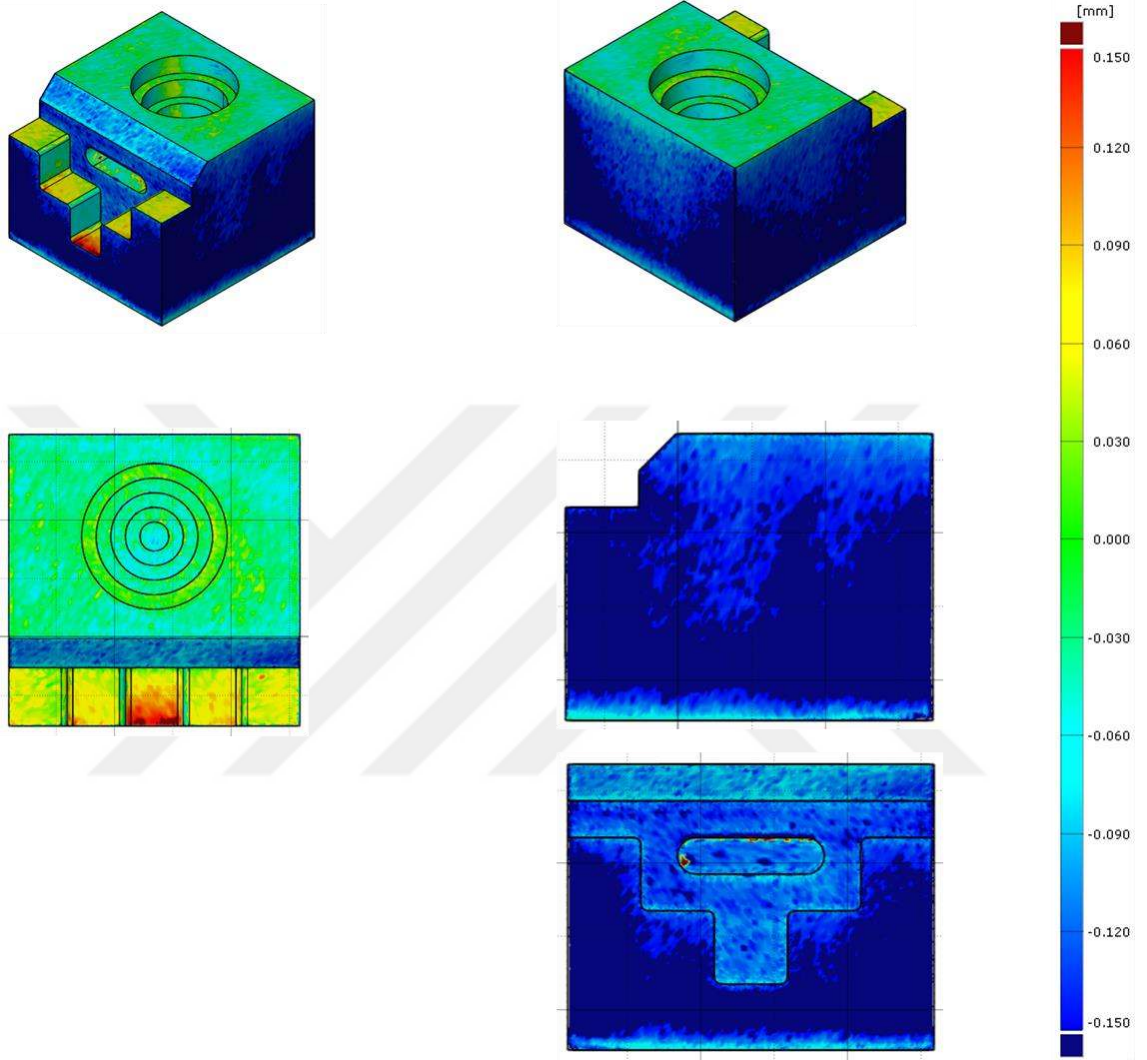
Ölçüm ayarları ve değişkenler	
Volt	180 kV
Amper	580 μ A
Odak noktası büyüklüğü	104 μ m
Üç boyutlu imgecik büyüklüğü	57,30 μ m
Büyütme oranı	2,2
Birleştirme süresi	133 ms
Görüntü ortalama	3 Görüntü
Gain	1x
Filtre	0,75 Cu
İzdüşüm sayısı	1800 Görüntü
Yüzey belirleme yöntemi	ISO50
Çokgenleme yöntemi	Standart
Unsur başına nokta sayısı	CMM ile korelasyon yakalamak için düzlemler ve silindirler için ~ 4 noktasal bölgeden ve çizgisel
Unsur oluşturma yöntemi	Noktasal / çizgisel unsurlar ile Gauss
Sıcaklık / Nem	20 °C / 47 %Rh
Ön hazırlık süresi	~ 5 dakika
Tarama süresi / Çokgenleme süresi	~ 30 dakika / ~ 5 dakika
Sorgulama süresi (Programsız / Programlı)	~ 2 saat / ~ 5 dakika
Ölçüm dosyası boyutu	> 3,5 GB



Şekil 5.9. XBT sistemi ile eklemeli imalat numunesine ait hacimsel nesne görüntüsü

Bu cihazlar ile OPT sistemlere benzer olarak çokgenleme yapılarak işlenmiş olan hacim verisi kullanılarak yüzey renk haritaları ile sapma karşılaştırılması yapmak

mümkündür. Bu yöntem ile birleştirilmiş veri, $\pm 0,15$ tolerans aralığındaki bir yüzey karşılaştırma çalışmasının sonuçlarına ait görseller Şekil 5.10 ile sunulmuştur.



Şekil 5.10. Eklemeli imalat numunesinin XBT sistemi ile oluşturulan yüzey renk haritası karşılaştırması

Numuneye ait hacimsel verinin oluşturulmasından sonra yüksek boyutlu ham veri ile oluşturulan hacim nokta bulutu çokgenleme yapılarak bir parça hacmine ait bir ağ verisi oluşturulmuştur. Bu yüzey ağ verisi ardından yazılım yardımı ile uzayda istenilen yönde doğrultulmuştur ve ihtiyaç duyulan sorgulama işlemleri için numune yüzeyine oturan elemanlar oluşturulmuştur. Ardından bu elemanlar kullanılarak teknik çizim üzerindeki numaralandırılmış özellikler sorgulanmıştır ve sonuçlar karşılaştırma için ilgili veri tablosuna aktarılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Deneysel bulgular doğrultusunda hem talaşlı imalat hem de eklemeli imalat numuneleri için CMM, üç boyutlu optik tarama cihazı ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazları ile yapılan ölçümlerin sonuçları ve CMM cihazına göre gözlemlenen sapmalar bu bölümde sunulmuştur. CMM ölçüm sonuçları daha hassas, güvenilir ve izlenebilir sonuçlar sunduğundan dolayı temaslı yöntemler ile elde edilen sonuçlar referans değerler olarak kabul edilmiştir. Bu referans değerlere göre her iki temassız ölçüm yöntemi ile elde edilen sonuçlar arasındaki farklar ilgili bölümlerde sırasıyla kıyaslanmıştır.

Bu doğrultuda her iki numune için CMM, OPT ve XBT ile yapılan şekil, boyut, yer, yönelim ve salgı sorgularına ait sonuçlar sırasıyla Tablo 6.2, Tablo 6.4, Tablo 6.6, Tablo 6.8 ve Tablo 6.10 ile verilmiştir. Benzer bir şekilde, her iki numune için bu sonuçlara göre OPT ve XBT cihazlarına göre elde edilen sonuçların CMM cihazına göre sapmaları ise sırasıyla Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 ile verilmiştir. En son aşamada ise bu sistemler ile gözlemlenen en yüksek ve ortalama sapma değerleri Tablo 6.3, Tablo 6.5, Tablo 6.7, Tablo 6.9 ve Tablo 6.11 ile sunulmuştur.

Ayrıca eklemeli imalat parçasında ölçümlerin doğrudan yüzey pürüzlülüğü kaynaklı etkilenebileceği ön görüldüğü için çalışma öncesinde bir yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılarak talaşlı ve eklemeli imalat numunelerinin dış yüzeylerindeki pürüzlülük değerleri Tablo 6.1 ile gösterildiği üzere kayıt altına alınmıştır.

Tablo 6.1. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi için pürüzlülük sorgularının sonuçlarının karşılaştırılması

Yüzey	Talaşlı imalat numunesi			Eklemeli imalat numunesi		
	Ra	Rz	Rt	Ra	Rz	Rt
A	1,503	8,486	9,494	15,574	95,102	114,934
B	1,675	8,77	9,602	17,391	108,029	133,429
C	1,52	7,259	8,028	9,158	52,854	68,031
A' (Karşı yüzey)	1,517	8,547	9,641	14,487	93,401	108,567
B' (Karşı yüzey)	1,695	7,289	8,406	9,158	52,854	68,031
C' (Karşı yüzey)	1,595	7,987	8,891	1,595	7,987	8,890

6.1. Şekil Sorguları

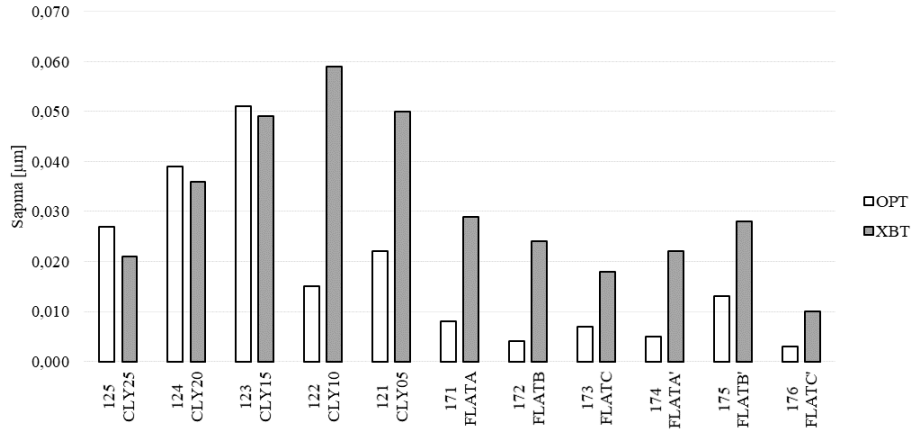
Bu bölümde talaşlı ve eklemeli imalat numunelerindeki şekil sorguları incelenecektir ve bu sorgular doğrultusundaki bulgular aktarılacaktır.

6.1.1. Şekil sorgularına ait bulgular

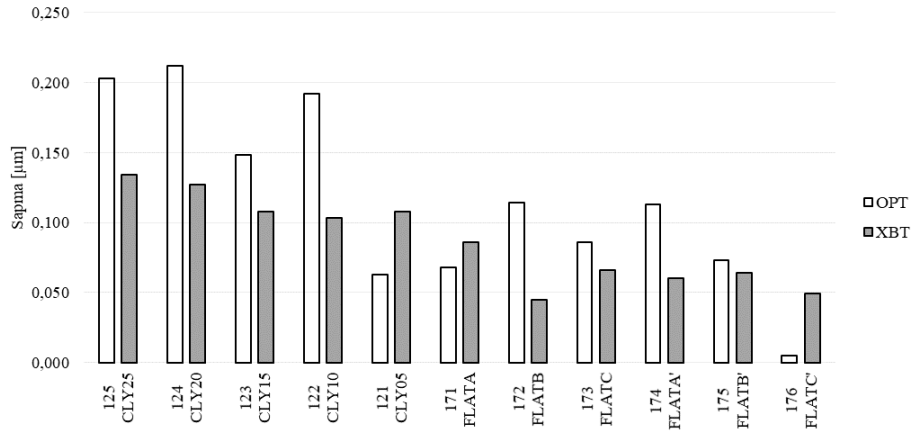
Üç boyutlu optik tarama ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazları ile talaşlı imalat ve eklemeli imalat numuneleri üzerinde yapılan şekil sorgulamalarına ait ölçüm değerleri Tablo 6.2 kullanılarak verilmiştir. Tablo 6.3 ile gösterildiği üzere, talaşlı imalat numunesinde, her iki cihaz için en yüksek sapmaların 50 µm ve 60 µm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için ise bu sonuçların 210 µm ve 135 µm boyutlarında olduğu görüldü. Bu sapmalar genel olarak bulgular bölümünde detaylı bir şekilde incelenecektir.

Tablo 6.2. Şekil sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması

#	Talaşlı imalat numunesi			Eklemeli imalat numunesi		
	CMM	OPT	XBT	CMM	OPT	XBT
#125	0,023	0,050	0,044	0,021	0,224	0,155
#124	0,011	0,050	0,047	0,024	0,236	0,151
#123	0,011	0,062	0,060	0,034	0,182	0,142
#122	0,011	0,026	0,070	0,043	0,235	0,146
#121	0,024	0,046	0,074	0,026	0,089	0,134
#171	0,001	0,009	0,030	0,006	0,074	0,092
#172	0,002	0,006	0,026	0,011	0,125	0,056
#173	0,003	0,010	0,021	0,007	0,093	0,073
#174	0,001	0,006	0,023	0,014	0,127	0,074
#175	0,002	0,015	0,030	0,003	0,076	0,067
#176	0,009	0,012	0,019	0,012	0,017	0,061



Şekil 6.1. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre şekil sapmaları



Şekil 6.2. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre şekil sapmaları

Tablo 6.3. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi şekil özellikleri için cihazların karşılaştırmalı özeti

Numune	Unsur	OPT		XBT	
		En yüksek	Ortalama	En yüksek	Ortalama
Talaşlı	Silindiriklik	0,051	0,031	0,059	0,043
	Düzlemsellik	0,013	0,007	0,029	0,022
Eklemeli	Silindiriklik	0,212	0,164	0,134	0,116
	Düzlemsellik	0,114	0,077	0,086	0,062

6.1.2. Şekil sorgularına ait tartışmalar

Talaşlı imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki silindiriklik ve düzlemsellik sorgularının sırasıyla 50 μm ve 15 μm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Talaşlı imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorgularının, XBT sisteminde ise 60 μm ve 30 μm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Silindiriklik özelliği için sapmaların küçülen çaplar ile birlikte arttığı görülmüştür. 121 ve 122 numaralı derin delikler için Şekil 5.6 ile gösterildiği üzere kamera görüş açısının düşmesi kaynaklı yüzey çukur bölgelerinden yeterli veri alınamadığı için sapma düşmüştür. Düzlemsellik özelliği için tüm dış yüzeyler kamera ile erişilebilir olduğu için sapmaların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Silindiriklik özelliği için sapmaların küçülen çaplar ile birlikte arttığı görülmüştür. Bu yöntem ile hacimsel veri oluşturulduğu için sapmadaki görüş açısı kaynaklı değişkenliğin etkisi kalkmıştır. Düzlemsellik özelliği için developer uygulaması olmadığı için doğrudan yüzey belirleme ve cihaz belirsizlik hatalarının sonuçlara yansıdığı görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasında developer uygulaması ve ölçüm ilkeleri kaynaklı düşük seviyede farklılık olduğu görülmüştür. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının silindiriklik ve düzlemsellik için sırasıyla 12 μm ve 15 μm seviyesinde olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki silindiriklik ve düzlemsellik sorgularının sırasıyla 200 μm ve 110 μm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorgularının, XBT sisteminde ise 135 μm ve 75 μm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Silindiriklik özelliği için sapmaların boyut ve sapma arasındaki ilişkinin yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile oluşmadığı görülmüştür. 122

numaralı derin delikler için kamera görüş açısının düşmesi kaynaklı sapma düşmüştür. Düzlemsellik özelliği için tüm dış yüzeyler kamera ile erişilebilir olduğu için sapmaların birbirine yakın olduğu görülmüştür. 176 numaralı yüzeye talaşlı imalat uygulandığı için yüzey pürüzlülük değeri oldukça düşük çıkmıştır.

Eklemeli imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Silindiriklik özelliği için boyut ve sapma arasındaki ilişkinin yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile oluşmadığı görülmüştür. Bu yöntem ile hacimsel veri oluşturulduğu için sapmadaki görüş açısı kaynaklı değişkenliğin etkisi kalkmıştır. Düzlemsellik özelliği için developer uygulaması olmadığı için doğrudan yüzey belirleme ve cihaz belirsizlik hatalarının sonuçlara yansıdığı görülmüştür. 176 numaralı yüzeyde de eklemeli imalat yöntemi kaynaklı yüzey belirleme hatalarının oluştuğu ön görülmektedir.

Eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasında yüksek yüzey pürüzlülüğü ve ölçüm ilkeleri kaynaklı silindiriklik için farklılık olduğu görülmüştür. Düzlemsellik için iki sistem de benzer sonuçlar vermiştir. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının silindiriklik ve düzlemsellik için sırasıyla 48 µm ve 15 µm seviyesinde olduğu görülmüştür.

6.2. Boyut Sorguları

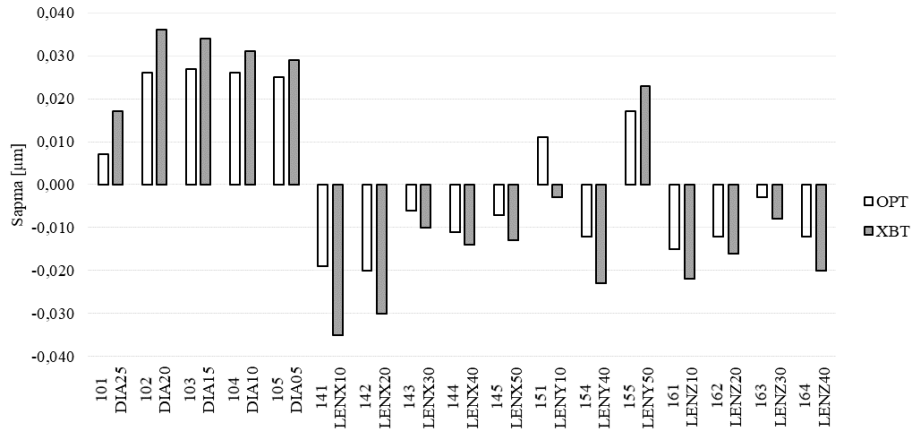
Bu bölümde talaşlı ve eklemeli imalat numunelerindeki boyut sorguları incelenecektir ve bu sorgular doğrultusundaki bulgular aktarılacaktır.

6.2.1. Boyut sorgularına ait bulgular

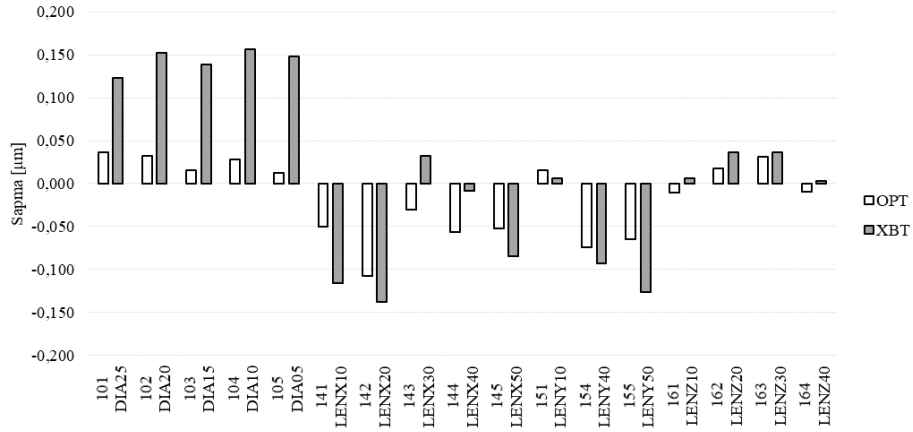
Üç boyutlu optik tarama ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazları ile talaşlı imalat ve eklemeli imalat numuneleri üzerinde yapılan boyut sorgulamalarına ait ölçüm değerleri Tablo 6.4 kullanılarak verilmiştir. Tablo 6.5 ile gösterildiği üzere, talaşlı imalat numunesinde, her iki cihaz için en yüksek sapmaların 30 µm ve 35 µm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için ise bu sonuçların 100 µm ve 155 µm boyutlarında olduğu görüldü. Bu sapmalar genel olarak bulgular bölümünde detaylı bir şekilde incelenecektir.

Tablo 6.4. Boyut sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması

#	CMM	Talaşlı imalat numunesi		Eklemeli imalat numunesi		
		OPT	XBT	CMM	OPT	XBT
101	24,995	25,002	25,012	24,927	24,964	25,050
102	19,977	20,003	20,013	19,885	19,917	20,037
103	14,977	15,004	15,011	14,899	14,915	15,038
104	9,977	10,003	10,008	9,887	9,915	10,043
105	4,970	4,995	4,999	4,905	4,918	5,053
141	9,931	9,912	9,896	9,992	9,942	9,876
142	19,860	19,840	19,830	19,994	19,887	19,856
143	29,912	29,906	29,902	29,864	29,834	29,896
144	39,998	39,987	39,984	39,871	39,815	39,863
145	49,774	49,767	49,761	49,849	49,797	49,765
151	9,482	9,493	9,479	9,980	9,996	9,986
154	39,859	39,847	39,836	39,881	39,807	39,788
155	49,340	49,357	49,363	49,861	49,796	49,735
161	9,979	9,964	9,957	9,957	9,947	9,963
162	19,974	19,962	19,958	19,919	19,937	19,956
163	29,967	29,964	29,959	29,881	29,912	29,918
164	39,792	39,780	39,772	38,986	38,977	38,989



Şekil 6.3. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre boyut sapmaları



Şekil 6.4. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre boyut sapmaları

Tablo 6.5. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi boyut özellikleri için cihazların karşılaştırmalı özeti

Numune	Unsur	OPT		XBT	
		En yüksek	Ortalama	En yüksek	Ortalama
Talaşlı	Çap	0,027	0,022	0,036	0,029
	Uzunluk	-0,020	-0,007	-0,035	-0,014
Eklemeli	Çap	0,037	0,025	0,156	0,144
	Uzunluk	-0,107	-0,032	-0,138	-0,037

6.2.2. Boyut sorgularına ait tartışmalar

Talaşlı imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki çap ve mesafe sorgularının sırasıyla 25 µm ve 20 µm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Talaşlı imalat numunesi için çap ve mesafe sorgularının, XBT sisteminde ise 35 µm ve 35 µm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Çap özelliği için sapmaların küçülen çaplar ile birlikte arttığı görülmüştür. Developer kaynaklı sapmaların CMM ölçümüne daha yakın olduğu görülmektedir. Mesafe özelliği için tüm dış yüzeyler kamera ile erişilebilir olduğu için sapmaların birbirine genel olarak yakın olduğu görülmüştür. Genel olarak X ve Y yönü için mesafe arttıkça sapmanın azaldığı görülmektedir. Bu ilişki, sadece 164 numaralı yüzey tarafından bozulmaktadır. Bu farkın kök nedeni tam anlamı ile bilinmemek ile birlikte developer uygulama, veri birleştirme, ölçüm programı yetkinliği

gibi farklı sebeplerden olabileceği ön görülmektedir. Bununla birlikte Y yönü için ölçüm sırasında kullanılan referans değiştiği için ölçüm sonucunun yön değiştirdiği görülmektedir.

Talaşlı imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Çap özelliği için sapmaların küçülen çaplar ile birlikte arttığı görülmüştür. Bu yöntem ile hacimsel veri oluşturulduğu ve developer etkisi olmadığı için ölçüm ilkesi gereği sapmanın daha yüksek çıktığı görülmüştür. Mesafe özelliği için X ve Y yönü için mesafe arttıkça sapmanın azaldığı görülmektedir. Bu ilişki, benzer sebeplerden dolayı sadece 164 numaralı yüzey tarafından bozulmaktadır. Bununla birlikte Y yönü için ölçüm sırasında kullanılan referans değiştiği için ölçüm sonucunun bu ölçüm için de yön değiştirdiği görülmektedir.

Talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasında developer uygulaması ve ölçüm ilkeleri kaynaklı düşük seviyede farklılık olduğu görülmüştür. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının çap ve mesafe için sırasıyla 7 µm ve 7 µm seviyesinde olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için çap ve mesafe sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki çap ve mesafe sorgularının sırasıyla 200 µm ve 110 µm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için çap ve mesafe sorgularının, XBT sisteminde ise 135 µm ve 75 µm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Çap özelliği için sapmaların genel olarak benzer seviyede olduğu görülmüştür. Delik çapı küçüldükçe, deliklerdeki yansıma hatalarının ve yüzeydeki çukur bölgelerden veri alma zorluğu etkisi ile sonuçların göreceli olarak azaldığı görülmüştür. Mesafe özelliği için tüm dış yüzeyler kamera ile erişilebilir olduğu için sapmaların göreceli olarak büyük olduğu görülmüştür. X ve Y yönlerinde sapmaların genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin ise eklemeli imalat yönündeki C' yüzeyinin işlenmesi olduğu ön görülmektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü ve developer uygulamama sebebi ile oluşan yansıma hatalarının etkisi doğrudan sonuçlara yansımıştır.

Eklemeli imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Çap özelliği için boyut ve sapma arasındaki ilişkinin

yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile tam anlamı ile oluşamadığı görülmüştür. Bu yöntem ile hacimsel veri oluşturulduğu için sapmadaki görüş açısı kaynaklı değişkenliğin etkisi kalkmıştır ve yüksek yüzey pürüzlülüğünün etkisi sonuçlara yüzey belirleme hataları olarak doğrudan yansımıştır. Mesafe özelliği için yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile sapmaların göreceli olarak yüksek olduğu görülmüştür. Benzer olarak C' yüzeyinin işlenmesi kaynaklı X ve Y yönlerinde sapmaların genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü ve developer uygulamama sebebi ile oluşan yansıma hatalarının etkisi doğrudan sonuçlara yansımıştır.

Eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasında yüksek yüzey pürüzlülüğü ve ölçüm ilkeleri kaynaklı çap için farklılık olduğu görülmüştür. Mesafe için iki sistem de benzer sonuçlar vermiştir. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının çap ve mesafe için sırasıyla 118 μm ve 5 μm seviyesinde olduğu görülmüştür.

6.3. Yer Sorguları

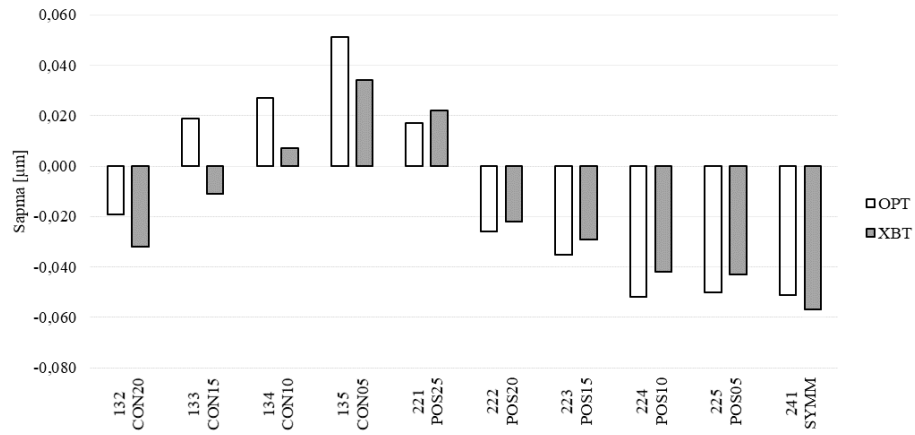
Bu bölümde talaşlı ve eklemeli imalat numunelerindeki yer sorguları incelenecektir ve bu sorgular doğrultusundaki bulgular aktarılacaktır.

6.3.1. Yer sorgularına ait bulgular

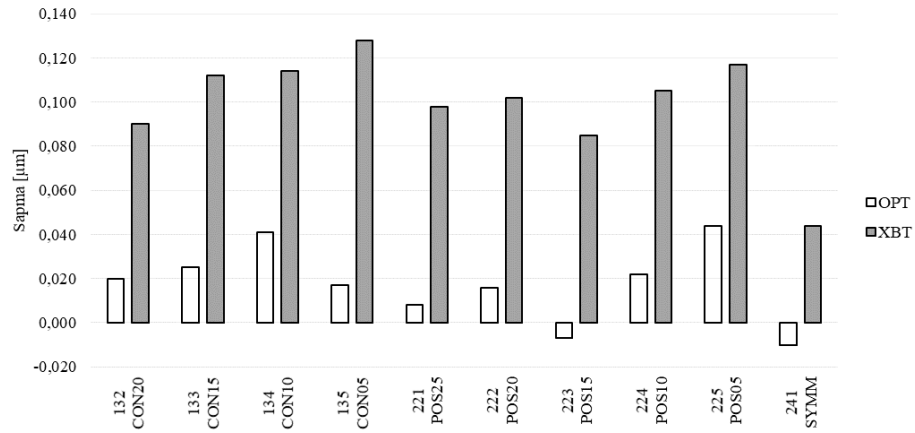
Üç boyutlu optik tarama ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazları ile talaşlı imalat ve eklemeli imalat numuneleri üzerinde yapılan yer sorgulamalarına ait ölçüm değerleri Tablo 6.6 kullanılarak verilmiştir. Tablo 6.7 ile gösterildiği üzere, talaşlı imalat numunesinde, her iki cihaz için en yüksek sapmaların 50 μm ve 60 μm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için ise bu sonuçların 45 μm ve 130 μm boyutlarında olduğu görüldü. Bu sapmalar genel olarak bulgular bölümünde detaylı bir şekilde incelenecektir.

Tablo 6.6. Yer sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması

#	Talaşlı imalat numunesi			Eklemeli imalat numunesi		
	CMM	OPT	XBT	CMM	OPT	XBT
135	0,073	0,054	0,041	0,006	0,026	0,096
134	0,065	0,084	0,054	0,053	0,078	0,165
133	0,055	0,082	0,062	0,021	0,062	0,135
132	0,049	0,100	0,083	0,056	0,073	0,184
221	0,267	0,284	0,289	0,155	0,163	0,253
225	0,338	0,312	0,316	0,160	0,176	0,262
224	0,329	0,294	0,300	0,182	0,175	0,267
223	0,325	0,273	0,283	0,176	0,198	0,281
222	0,307	0,257	0,264	0,102	0,146	0,219
241	0,083	0,032	0,026	0,032	0,022	0,076



Şekil 6.5. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yer sapmaları



Şekil 6.6. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yer sapmaları

Tablo 6.7. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi yer özellikleri için cihazların karşılaştırmalı özeti

Numune	Unsur	OPT		XCT	
		En yüksek	Ortalama	En yüksek	Ortalama
Talaşlı	Eş merkezlilik	0,051	0,020	0,034	0,000
	Konum	-0,052	-0,029	-0,043	-0,023
	Simetri	-0,051	-	-0,057	-
Eklemeli	Eş merkezlilik	0,041	0,026	0,128	0,111
	Konum	0,044	0,017	0,117	0,101
	Simetri	-0,010	-	0,044	-

6.3.2. Yer sorgularına ait tartışmalar

Talaşlı imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki eşmerkezlilik, konum ve simetri sorgularının sırasıyla 50 μm , 50 μm ve 50 μm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Talaşlı imalat numunesi için eşmerkezlilik, konum ve simetri sorgularının, XBT sisteminde ise 35 μm , 45 μm ve 60 μm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Eşmerkezlilik ve konum özelliği için sapmaların küçülen çaplar ile bir ilişki içinde olduğu görülmüştür. Referans düzleme yansıtılan noktaların uzaklaşması kaynaklı sapmanın değiştiği ön görülmektedir. Simetri özelliği ile oluşan sapmanın unsurların oluşturulması sırasında kullanılan nokta sayısı ile ilişkili olduğu ön görülmektedir.

Talaşlı imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Eşmerkezlilik ve konum özelliği için de sapmaların küçülen çaplar ile bir ilişki içinde olduğu görülmüştür. Referans düzleme yansıtılan noktaların uzaklaşması kaynaklı sapmanın değiştiği ön görülmektedir. Simetri özelliği ile oluşan sapmanın unsurların oluşturulması sırasında kullanılan nokta sayısı ile ilişkili olduğu ön görülmektedir.

Talaş imalat numunesi için her iki sistem arasında developer uygulaması ve ölçüm ilkeleri kaynaklı düşük seviyede farklılık görülmüştür. Her iki sistem için sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama

ölçüm farkının eşmerkezlilik, konum ve simetri için sırasıyla 20 μm , 6 μm ve 6 μm seviyesinde olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için eşmerkezlilik, konum ve simetri sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki eşmerkezlilik, konum ve simetri sorgularının sırasıyla 40 μm , 45 μm ve 10 μm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için eşmerkezlilik, konum ve simetri sorgularının, XBT sisteminde ise 130 μm , 120 μm ve 45 μm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Eşmerkezlilik ve konum özelliği için boyut ve sapma arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Yüzey çukur bölgelere erişimin kısıtlı olması kaynaklı sapmaların göreceli olarak düşük olduğu görülmüştür. Simetri özelliği ile oluşan sapmanın yüzey pürüzlülüğünün sebep ile yüksek çıkması beklenirken, simetri özelliğinin sorgulanma yöntemi kaynaklı oluşturulan yüzeylerin merkezlenmesi sebebi ile diğer sorgulara göre göreceli olarak düşük çıktığı görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Eşmerkezlilik ve konum özelliği için boyut ve sapma arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Bu yöntem ile hacimsel veri oluşturulduğu için sapmadaki görüş açısı kaynaklı değişkenliğin etkisi kalkmıştır ve yüksek yüzey pürüzlülüğünün etkisi sonuçlara yüzey belirleme hataları olarak doğrudan yansımıştır. Simetri özelliği için sorgulamanın yöntemi kaynaklı sonucun göreceli olarak daha düşük çıktığı fakat yüzey belirleme hatalarının etkisinin devam ettiği görülebilir.

Eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasında yüksek yüzey pürüzlülüğü ve ölçüm ilkeleri kaynaklı yüksek sapmaların olduğu görülmüştür. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının eşmerkezlilik, konum ve simetri için sırasıyla 85 μm , 85 μm ve 55 μm seviyesinde olduğu görülmüştür.

6.4. Yönelim Sorguları

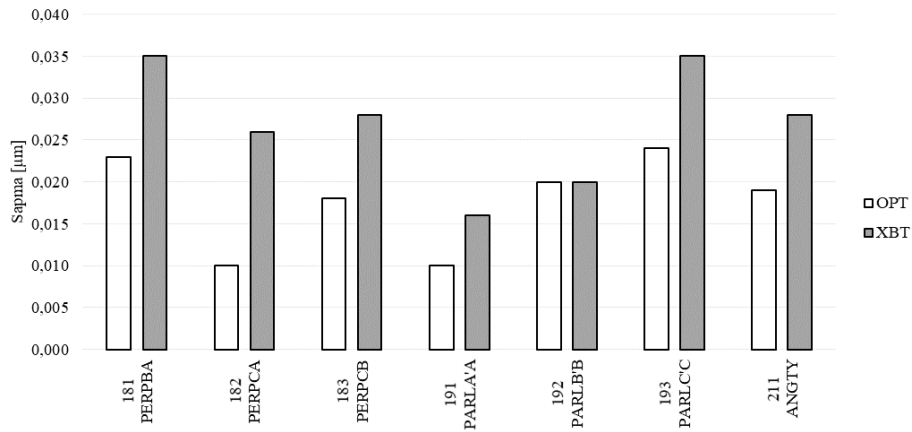
Bu bölümde talaşlı ve eklemeli imalat numunelerindeki yönelim sorguları incelenecektir ve bu sorgular doğrultusundaki bulgular aktarılacaktır.

6.4.1. Yönelim sorgularına ait bulgular

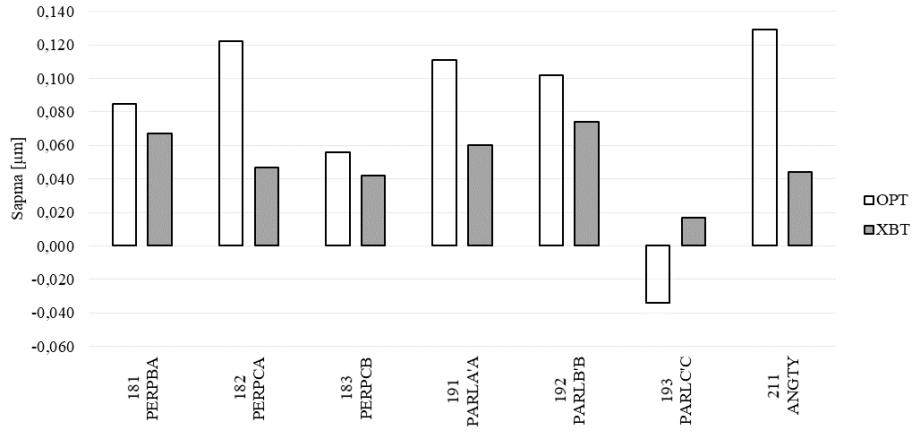
Üç boyutlu optik tarama ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazları ile talaşlı imalat ve eklemeli imalat numuneleri üzerinde yapılan yönelim sorgulamalarına ait ölçüm değerleri Tablo 6.8 kullanılarak verilmiştir. Tablo 6.9 ile gösterildiği üzere, talaşlı imalat numunesinde, her iki cihaz için en yüksek sapmaların 20 µm ve 35 µm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için ise bu sonuçların 125 µm ve 75 µm boyutlarında olduğu görüldü. Bu sapmalar genel olarak bulgular bölümünde detaylı bir şekilde incelenecektir.

Tablo 6.8. Yönelim sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması

#	Talaşlı imalat numunesi			Eklemeli imalat numunesi		
	CMM	OPT	XBT	CMM	OPT	XBT
181	0,050	0,073	0,085	0,040	0,125	0,085
182	0,058	0,068	0,084	0,025	0,147	0,122
183	0,045	0,063	0,073	0,056	0,112	0,056
191	0,059	0,069	0,075	0,084	0,195	0,111
192	0,041	0,061	0,061	0,062	0,164	0,102
193	0,027	0,051	0,062	0,070	0,036	-0,034
211	0,002	0,021	0,030	0,044	0,173	0,044



Şekil 6.7. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yönelim sapmaları



Şekil 6.8. Eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre yönelim sapmaları

Tablo 6.9. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi yönelim sapmaları için cihazların karşılaştırmalı özeti

Numune	Unsur	OPT		XBT	
		En yüksek	Ortalama	En yüksek	Ortalama
Talaşlı	Diklik	0,023	0,017	0,035	0,030
	Paralellik	0,024	0,018	0,035	0,024
	Açısallık	0,019	-	0,028	-
Eklemeli	Diklik	0,122	0,088	0,067	0,052
	Paralellik	0,111	0,060	0,074	0,050
	Açısallık	0,129	-	0,044	-

6.4.2. Yönelim sorgularına ait tartışmalar

Talaşlı imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki diklik, paralellik ve açısallık sorgularının sırasıyla 25 µm, 25 µm ve 20 µm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Talaşlı imalat numunesi için diklik, paralellik ve açısallık sorgularının, XBT sisteminde ise 30 µm, 35 µm ve 30 µm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Diklik, paralellik ve açısallık özelliği için sapmalar arasında doğrudan bir ilişki görülememiştir. Sapmaların cihaz hassasiyetleri ve ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında göreceli olarak düşük olduğu görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Diklik, paralellik ve açısallık özelliği için sapmalar

arasında doğrudan bir ilişki görülememiştir. Sapmaların cihaz hassasiyetleri ve ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında göreceli olarak düşük olduğu görülmüştür.

Talaş imalat numunesi için her iki sistem arasında developer uygulaması ve ölçüm ilkeleri kaynaklı düşük seviyede farklılık görülmüştür. Her iki sistem için sonuçlar birbirine oldukça yakındır. XBT sapmaları genel olarak daha yüksek olmakla birlikte developer kaynaklı OPT sapmalarının daha düşük olduğu ön görülmektedir. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının diklik, paralellik ve açısallık için sırasıyla 13 μm , 6 μm ve 9 μm seviyesinde olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için diklik, paralellik ve açısallık sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki diklik, paralellik ve açısallık sorgularının sırasıyla 40 μm , 45 μm ve 10 μm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için diklik, paralellik ve açısallık sorgularının, XBT sisteminde ise 130 μm , 120 μm ve 45 μm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Diklik, Paralellik ve Açısallık özelliği için boyut ve sapma arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Sapmaların yüksek yüzey pürüzlülüğü ve yansıma hataları kaynaklı daha yüksek olduğu görülmüştür. Paralellik için 193 numaralı ölçünün sorgusunda C' düzlemine talaşlı imalat uygulanması sebebi ile sonuçların oldukça düşük geldiği görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Diklik, Paralellik ve Açısallık özelliği için boyut ve sapma arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Sapmaların yüksek yüzey pürüzlülüğü ve yansıma hataları kaynaklı daha yüksek olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasında yüksek yüzey pürüzlülüğü ve ölçüm ilkeleri kaynaklı yüksek sapmaların oluşabildiği görülmüştür. OPT için herhangi bir developer kullanılmadığı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile yansıma hataları kaynaklı sapmaların yüksek olduğu ön görülmektedir. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının diklik, paralellik ve açısallık için sırasıyla 36 μm , 9 μm ve 85 μm seviyesinde olduğu görülmüştür.

6.5. Salgı Sorguları

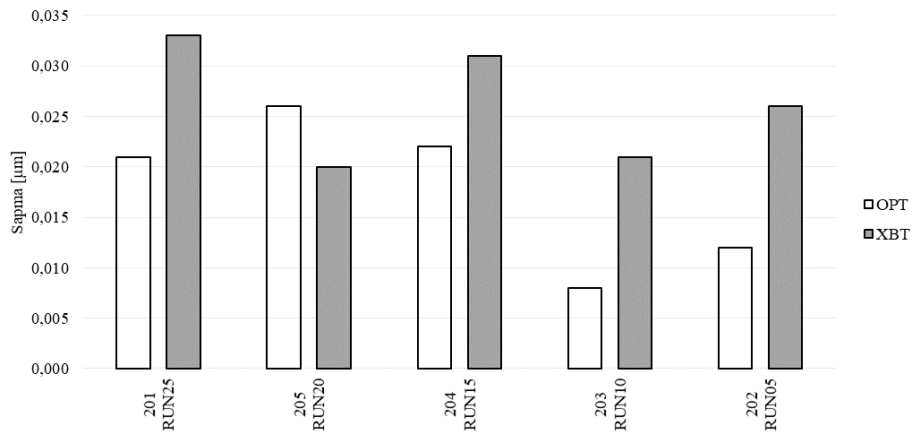
Bu bölümde talaşlı ve eklemeli imalat numunelerindeki salgı sorguları incelenecektir ve bu sorgular doğrultusundaki bulgular aktarılacaktır.

6.5.1. Salgı sorgularına ait bulgular

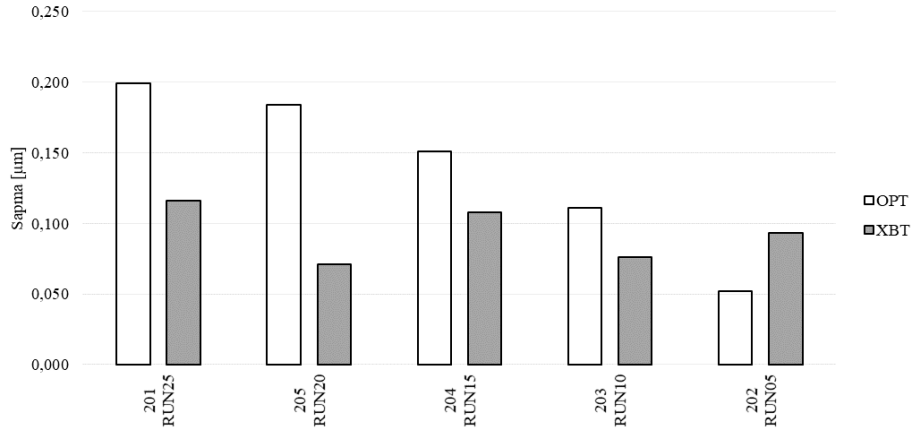
Üç boyutlu optik tarama ve x-ışını bilgisayarlı tomografi cihazları ile talaşlı imalat ve eklemeli imalat numuneleri üzerinde yapılan yönelim sorgulamalarına ait ölçüm değerleri Tablo 6.10 kullanılarak verilmiştir. Tablo 6.11 ile gösterildiği üzere, talaşlı imalat numunesinde, her iki cihaz için en yüksek sapmaların 25 μm ve 35 μm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için ise bu sonuçların 200 μm ve 115 μm boyutlarında olduğu görüldü. Bu sapmalar genel olarak bulgular bölümde detaylı bir şekilde incelenecektir.

Tablo 6.10. Salgı sorguları için CMM sonuçlarına göre OPT ve XBT sonuçlarının karşılaştırılması

#	Talaşlı imalat numunesi			Eklemeli imalat numunesi		
	CMM	OPT	XBT	CMM	OPT	XBT
201	0,044	0,065	0,077	0,049	0,248	0,165
205	0,044	0,070	0,064	0,098	0,282	0,169
204	0,014	0,036	0,045	0,056	0,207	0,164
203	0,012	0,020	0,033	0,087	0,198	0,163
202	0,013	0,025	0,039	0,054	0,106	0,147



Şekil 6.9. Talaşlı imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre salgı sapmaları



Şekil 6.10. Talaşlı ve eklemeli imalat ile üretilen numune için CMM sonuçlarına göre salgı sapmaları

Tablo 6.11. Talaşlı ve eklemeli imalat numunesi salgı sapmaları için cihazların karşılaştırmalı özeti

Numune	Unsur	OPT		XBT	
		En yüksek	Ortalama	En yüksek	Ortalama
Talaşlı	Diklik	0,026	0,018	0,033	0,026
Eklemeli	Diklik	0,199	0,139	0,116	0,093

6.5.2. Salgı sorgularına ait tartışmalar

Talaşlı imalat numunesi için silindiriklik ve düzlemsellik sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki salgı sorgularının 25 µm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Talaşlı imalat numunesi için salgı sorgularının, XBT sisteminde ise 35 µm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Salgı özelliği için sapmalar arasında doğrudan bir ilişki görülemez. Sapmaların cihaz hassasiyetleri ve ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında göreceli olarak düşük olduğu görülmüştür.

Talaşlı imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Salgı özelliği için sapmalar arasında doğrudan bir ilişki görülemez. Sapmaların cihaz hassasiyetleri ve ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında göreceli olarak düşük olduğu görülmüştür.

Talaş imalat numunesi için her iki sistem arasında developer uygulaması ve ölçüm ilkeleri kaynaklı düşük seviyede farklılık görülmüştür. Her iki sistem için sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar

karşılaştırıldığında, talaşlı imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının salgı için sırasıyla 8 µm seviyesinde olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat numunesi için salgı sorguları her iki ölçüm sistemi için incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre OPT sistemindeki salgı sorgularının 200 µm seviyesinde sapmalara kadar yükselebildiği görülmüştür. Eklemeli imalat numunesi için salgı sorgularının, XBT sisteminde ise 100 µm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

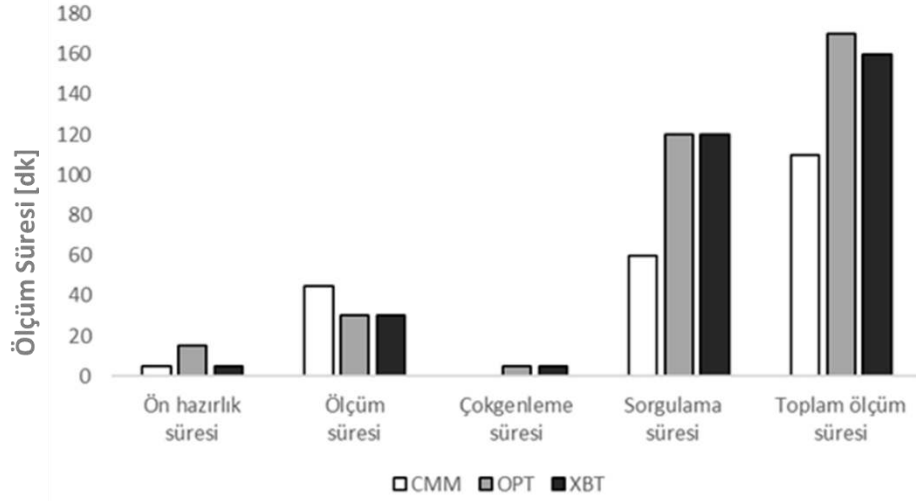
Eklemeli imalat numunesi için OPT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Salgı özelliği için boyut ve sapma arasında tersine bir ilişki olduğu görülmüştür. Küçülen çaplar ile birlikte sonuçların nominale yaklaştığı görülmektedir. Sonuçların kurulan referans ile ilişkili olduğu ön görülmektedir. Genel olarak developer uygulaması olmadığı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile yüksek sapmaların olduğu görülmektedir.

Eklemeli imalat numunesi için XBT sistemi sonuçları incelenerek özellikler için çeşitli gözlemler gerçekleştirilmiştir. Salgı özelliği için yüzey pürüzlülük değerinin yüzey belirleme sırasında kullanılan yöntemi etkilediği sapmaları sönmülediği görülmektedir.

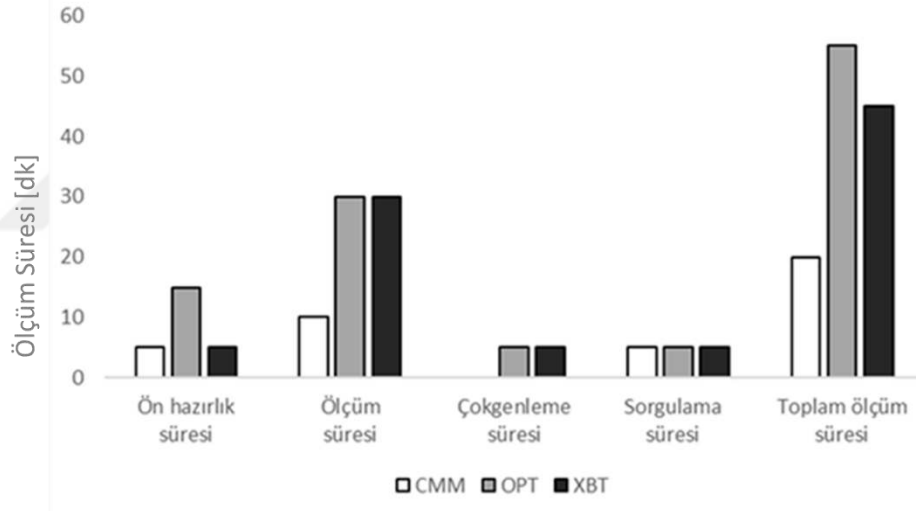
Eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasında yüksek yüzey pürüzlülüğü ve ölçüm ilkeleri kaynaklı yüksek sapmaların oluşabildiği görülmüştür. OPT için herhangi bir developer kullanılmadığı ve yüksek yüzey pürüzlülüğü sebebi ile yansıma hataları kaynaklı sapmaların yüksek olduğu ön görülmektedir. Ölçüm sistemlerinin sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, eklemeli imalat numunesi için her iki sistem arasındaki mutlak ortalama ölçüm farkının salgı için 36 µm seviyesinde olduğu görülmüştür.

6.6. Ölçüm Süreleri ve Veri Boyutları Arasındaki İlişki

Parça yüzeylerine ait bu verilerin oluşturulması sırasında cihazların kullandığı farklı yöntemler kaynaklı ölçüm sürelerinde de kayda değer değişiklikler gözükmemektedir. Her bir cihaz için programlı ve programsız çalışma yöntemleri kullanılarak alınan ölçüm süresi değerleri sırasıyla Görsel 6.11 ve Görsel 6.12 kullanılarak verilmiştir.



Şekil 6.11. Programlama kullanılmadan yapılan ölçümlere ait süreler



Şekil 6.12. Programlama kullanarak yapılan ölçümlere ait süreler

Genel olarak optik ölçüm cihazları developer ve referans nokta yapıştırma işlemleri sebebi ile göreceli olarak daha yüksek ön hazırlık sürecine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca CMM cihazında herhangi bir çokgenleme işlemi gerekmediği için ölçüm süresini doğrudan etkilediği görülmüştür. Ölçüm süreleri programsız ve programlı uygulamalar için temassız ölçüm yöntemleri için aynı kalırken, CMM cihazının veri toplama hızının kayda değer biçimde arttığı görülmektedir. Sorgulama süreleri ise CMM için genellikle programsız ölçümlerde daha düşük iken programlandığında tüm sistemlerin benzer hızda sorgulama yaparak rapor verdiği görülmüştür. CMM cihazının genel olarak oldukça hızlı

olduğu ve temassız ölçüm yöntemlerinin çoğunlukla sorgulama aşamasında süre kazanabildiği görülmüştür. Diğer taraftan, rapor boyutları tüm cihazlarda 1MB değerinden küçük olmasına rağmen ölçüm dosyalarında büyük farklar gözükmemektedir. Özellikle OPT ve XBT sistemlerinde ham verinin 1GB değerinden yüksek olabildiği görülmüştür. Veri işlendikten sonra bu değer 1MB seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. Dosya boyutuna ait özellikler Tablo 6.12 kullanılarak özetlenmiştir.

Tablo 6.12. *Cihazlar için dosya boyutlarına ait yaklaşık değerler*

Dosya Tipi	CMM	OPT ve XBT
Program	~ 1 MB	~ 1 MB
Ölçüm Kayıtları (Nokta Koordinatları)	~ 1 MB	Tüm Kayıtlar: 1000 MB Üzeri Mesh: ~ 100 MB
Rapor	~ 1 MB	~ 1 MB

7. SONUÇLAR

Bu bölümde yapılan yöntem ve malzeme ile tanımlanmış olan çalışma kapsamında tespit edilen deneysel bulgulara ait sonuçlar ve ilerleyen dönemlerde yapılabilecek olan çalışmalardan çeşitli öneriler ile bahsedilmiştir.

7.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında talaşlı imalat ve eklemeli imalat kullanılarak üretilmiş olan numune parçalara ait çeşitli boyutsal ve geometrik ölçüler koordinat ölçüm cihazı, optik tarama cihazı ve x-ışını bilgisayarlı tarama cihazı ile ölçümleri alınmış ve bu ölçüler cihazların doğruluk değerlerini kıyaslamak için karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda bu çalışma için numune başına 17 tane boyutsal ve 28 tane geometrik özellik sorgulanmıştır. Ayrıca bu çalışma sırasında kullanılan parçaların yüzey pürüzlülük değerleri de ölçülerek sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu deneysel çalışma sonucunda elde edilen çıktılar genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Geleneksel temaslı ölçüm yöntemleri hassasiyet olarak temassız ölçüm yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Talaşlı imalat yöntemi gibi düşük yüzey pürüzlülüğü ile üretilmiş parçaların OPT ve XBT ile yapılan ölçümlerdeki sapmaların yaklaşık 50 μm ve 60 μm seviyesinde kadar çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada talaşlı imalat numunesi için şekil, boyut, yer, yönelim ve salgı özelliklerindeki hatalarının her iki sistem ile yapılan ölçümlerde birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Sonuçlar bu alanda yapılan benzer çalışmalar ile kıyaslandığında

Eklemeli imalat yöntemi gibi yüksek yüzey pürüzlülüğü ile üretilmiş parçalarda ise OPT ve XBT ile yapılan ölçümlerdeki sapmaların 200 μm ve 150 μm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Her iki temassız sistem arasında ölçüm ilkeleri kaynaklı sapmaların olabileceği görülmüştür. OPT sisteminde sapmaların çoğunlukla yüzey parlamaları, yüzey pürüzlülük hataları, yüzeye uygulanan developer etkisi ve cihazın kamera açısına bağlı veri toplama özelliği kaynaklı olduğu görülmüştür. XBT sisteminde ise sistemin karmaşık çalışma yapısı, çeşitli hata kaynakları ve yüzey belirleme hataları sebebi ile sapmaların oluştuğu görülmüştür.

Detayları "1.2 Literatür Taraması" bölümünde detaylıca incelenmiş olan çalışmalar ile yapılan bu çalışma arasındaki benzerlik üzerine örnek çalışmalar üzerinden bulguların karşılaştırılması örnek makaleler kullanılarak aktarılmıştır. Bu konu ile ilgili güncel yayınlar ve makaleler incelendiğinde yapılan çalışmanın boyutsal ve geometrik parça ölçümü üzerinde literatürde incelenmiş olan diğer çalışmalar ile genel olarak benzer sonuçları ve bulguları bulduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat ile üretilmiş gömülü iç unsurların ölçümü ile ilgili 2016 yılında Kim ve Villaraga-Gomez tarafından yapılan çalışmada lazer-tabanlı PBF ile üretilmiş olan eklemeli imalat numunelerinin XBT ile değerlendirilmesi çalışmasına göre 200 μm ve 5 mm seviyesindeki unsurlar ölçülmüştür. Mesh – CAD karşılaştırılması şeklinde gerçekleştirilen bu çalışmada CMM ile kalibre edilmiş değerlere göre yapılan kıyaslamada nominal değere göre sapmaların işbu çalışmaya benzer olarak ± 0.1 mm seviyesine kadar çıktığı görülmüştür.

Benzer olarak 2016 yılında Gapinski ve arkadaşları tarafından yapılmış çalışmada FDM yöntemi kullanarak eklemeli imalat ile üretilmiş olan üç farklı tip numunenin XBT yöntemi ile değerlendirmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. ABS ile üretilmiş olan bu numuneler için değerlendirmeye alınan ölçüler öncelikle CMM ile doğrulanmıştır. Doğrulan bu ölçüler ardından bu çalışmaya benzer olarak XBT yöntemi ile kontrol edilmiştir. Basamaklı yay numunesinde çaplarda ve mesafelerde yapılan sorgular için sapmaların yapılan bu çalışmaya benzer olarak sırasıyla 0.05 mm seviyesini geçmediği görülmüştür. Merdiven numune için ise derinlik ve yükseklik için sapmaların 0,05 mm ve 0,04 seviyesini geçmediği görülmüştür. Delikli plaka parça için ise CAD üzerinden yapılan karşılaştırmaya göre sapmaların genel olarak sapmaların ± 0.1 mm içinde olduğu ve ± 0.3 seviyesini geçmediği belirtilmiştir. Bu çalışmada doğrudan yüzey pürüzlülük değerleri verilmemek ile birlikte, yazar tarafından yüzey pürüzlülüğünün XBT sonuçları üzerindeki etkisine değinilmiştir. Bu bilgiler ışığında üretim süreçleri ve malzemeler her ne kadar farklı olsada sonuçların temelde benzerlik gösterdiği söylenebilir.

Aloisi ve Carmignato tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada ise yüzey pürüzlülük değerlerinin CMM ve XBT boyutsal ölçümleri üzerindeki etkisinden bahsedilmiştir. Bu çalışmaya göre parça üzerindeki çeşitli bölgelerden bulunan 30 μm ve 125 μm seviyelerindeki yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümler üzerinde sistematik bir hataya sebep olduğu görülmektedir. Bu çalışmaya göre XBT ile ölçülen dış çapların CMM değerlerine göre her zaman Rz değerinin yarısı kadar daha küçük olduğunu

göstermiştir. Benzer olarak da iç çapların Rz değerinin yarısı kadar büyük olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da benzer sonuçlar görülmekle birlikte yüzey pürüzlülük değerleri doğrudan çaplar üzerinden alınmadığı için yaklaşık olarak Rz/2 kadar büyük olduğunu görülmüştür

Gapinski ve arkadaşları tarafından 2015 yılında boyutsal ölçümler üzerine yapılan başka bir çalışmada ise temaslı ve temassız ölçüm sistemlerinin talaşlı imalat ile üretilmiş silindirik bir numune parça üzerindeki karşılaştırılması yapılmıştır. Çap ölçümleri için bu sistemdeki sapmaların 10 µm içinde kaldığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında ise çaplarda sapmaların 30 µm seviyesine kadar çıkması görülmekle birlikte yöntemler arasında temel farklar olduğu ve sonuçların bu şartlar altında birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Silindir uzunluk ölçülerinde ise sapmaların 25 µm seviyesine kadar çıktığı görülmektedir. Benzer yöntemler kullanarak ölçüm gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da sonuçların 25 µm seviyesinde olduğu görülmektedir. Talaşlı imalat ile üretilmiş parça için sonuçların genel olarak literatürdeki bulgular ile eştiği görülmektedir.

Dardzinska ve Fiedorczuk tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada prototipleme üzerine yapılan çalışmalarda optik ölçüm yöntemleri ile CMM cihazının performansı kıyaslanmıştır. Bu çalışmada PolyJet, FDM ve SLM yöntemleri ile üretilmiş olan çeşitli referans numune parçaların optik ölçüm sonuçlarının CMM değerlerine göre kıyaslaması yapılmıştır. Karşılaştırma yöntemi kullanarak yapılan bu çalışmada, sapması diğerlerine göre yüksek olan iki numune hariç olmak üzere kalan tüm numuneler incelendiğinde sapmaların genel olarak 80 µm ve altında kaldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasına göre sonuçlar göreceli olarak nominale daha yakın olsa da üretilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri bilinmediği için doğrudan bir kıyaslama yapmak mümkün değildir. Genel olarak sonuçların düşük yüzey pürüzlülüğü ile üretilen parça sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir.

CMM, OPT ve XBT sistemlerini karşılaştırmak için 2014 yılında Gapinski ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise alüminyum bloktan üretilmiş bir talaşlı imalat numunesi üzerindeki tanımlı ölçülerin karşılaştırılması benzer bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma bulgularına doğrultusunda OPT ve XBT için CMM ölçülerine göre küre çapı ölçülerinde sırasıyla 7 µm ve 6 µm sapma, düzlemsellik ölçülerinde 35 µm ve 45 µm sapma, paralellik ölçülerinde 11 µm ve 8 µm sapma görülmüştür. Yapılan bu tez çalışmasında ise silindir çapı için 30 µm ve 40 µm, düzlemsellik için 15 µm ve 30 µm, paralellik için 25 µm ve 35 µm seviyesinde sapmalar görülmüştür. Unsurların

oluşturulması ve ölçülmesi arasında temel farklar olmakla birlikte Gapinski tarafından yapılan çalışmada şekil hataları haricinde sonuçların nominal ölçülere daha yakın olduğu ve iki çalışmanın temel farklılıklar çerçevesinde 30 µm seviyesini geçmeyen yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Üç boyutlu optik tarama sistemleri ve x-ışını bilgisayarlı tomografi sistemlerinin temaslı yöntemler kullanarak çalışan CMS göre göreceli olarak oldukça yeni sistemler oldukları söylenebilir. Göreceli olarak yeni teknolojiler olduğu kabul edilebilecek bu sistemlerin geleneksel yöntemlere göre oldukça avantajlı olduğu çok farklı metroloji uygulamaları bulunmalıdır. Bununla birlikte temassız ölçüm sistemleri için ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek çok farklı hata kaynakları bulunmaktadır. Ayrıca temassız sistemler için ölçüm belirsizliği hesabı için uluslararası standartlar da belirli olmadığı için hata kaynakları net olarak belirlemek oldukça zordur. Bu konuda küresel çalışmaların hala devam etmektedir. Bu doğrultuda ihtiyaç duyulan ölçümü en uygun biçimde gerçekleştirebilmek için çoğunun detayları "4.3.3 Temaslı ve Temassız Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları" bölümünde detaylıca verilen MPE değerleri, izlenebilirlik, cihaz ölçüm hassasiyetleri, parça toleransları, ölçüm nokta yoğunluğu, 3B veri oluşturması, tersine mühendislik ihtiyaçları, çoklu-malzeme ya da montaj parça ölçümü, iç unsurların ya da matris yapıların değerlendirilmesi, taşınabilirlik ve ölçüm hızı gibi bir çok parametre değerlendirilmelidir.

7.2. Öneriler

Bu çalışmada yıllar boyunca geliştirilen ve doğruluk ve hassasiyet açısından oldukça güvenilir bir çalışma ilkesine sahip olan CMM cihazları ile ölçümleri doğrudan etkileyebilecek olan karmaşık hata türlerine sahip temassız ölçüm cihazlarının temel bir performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu çalışmada doğrudan tekil ölçümler ile bir karşılaştırma yapıldığından dolayı ilerleyen çalışmalarda bu ölçüm yöntemleri kullanılarak tekrarlı ölçümler ile benzer bir çalışma yapılabilir. Ayrıca tekrarlı ölçümler kullanılarak cihazların tekrarlanabilirlik çalışmaları da gözden geçirilebilir. Tekrarlanabilirlik çalışmalarına ek olarak cihaz ölçüm belirsizliklerinin hesaplanması için "3.2 Ölçüm Belirsizliği" bölümünde tanımlanmış olan yöntemler kullanılarak ölçüm belirsizliği bütçesi çalışması yapılabilir.

Çalışma sırasında kullanılan parçaların boyutları göreceli olarak küçük olduğundan dolayı gelecek çalışmalarda benzer geometrik unsurlar daha büyük boyutlu parçalar kullanılarak ölçülerek bir performans analizi çalışması yapılabilir. Bununla birlikte farklı geometrik unsurlar da eklenerek çalışmanın zenginleştirilmesi mümkündür.

Ayrıca sadece alüminyum malzeme üzerinden yapılan bu çalışma farklı malzemeler ve üretim yöntemleri kullanılarak hazırlanmış numuneler yardımı ile tekrar değerlendirmeye alınabilir. Yumuşak malzemeler ile hazırlanmış numuneler ile temaslı ölçüm yöntemlerinin uyguladığı temas yükü etkisini incelemek mümkündür. Farklı malzemelerin kullanıldığı bu çalışmanın yanında insert içeren döküm malzemeler ya da montaj yapılmış kullanılarak parçaların boyutsal ölçümü için demontaj gerçekleştirilmeden parça üzerinden veri almak ve montaj doğruluğunu değerlendirmek üzerine çeşitli çalışmalar yapmak mümkündür.

Üç boyutlu optik ölçüm ve x-ışını bilgisayarlı tomografi sistemleri oldukça karmaşık hata türlerine sahip olduğundan dolayı farklı numuneler hazırlanarak bu hata türlerinin ve ölçüm parametreleri kaynaklı değişkenlerin detaylı incelemesi yapılabilir.

Optik ölçüm cihazına özel olarak developer tipi ve kalınlığı, ortam aydınlatması, aydınlatma için kullanılan ışık özellikleri, kamera çözünürlüğü, lensler ve buna benzer çeşitli değişkenler üzerine çalışma yapılarak sistemlerin ölçüm belirsizliğinin net bir şekilde tanımlanmasını engelleyen etmenler üzerine çeşitli çalışmaları yapılabilir. Benzer olarak bu çalışmalar, bilgisayarlı tomografi sistemleri için ışıma parametreleri, algılayıcı yüzeyindeki imgecik hataları, aynadaki parça yönelimi gibi çeşitli konular üzerine gerçekleştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Acko, B. (2007). Calibration of measuring instruments on a coordinate measuring machine. *Advances in Production Engineering & Management*, 2(3).
- Aitchison, D., & Sulaiman, R. (2013). Determining the surface form of polystyrene through the coordinate measurement machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*.
- Akdoğan, A., Vanlı, A. S., & Durakbasa, N. (2019). Re-engineering of Manufacturing Parts by Computed Tomography Data. *Proceedings of the 12th International Conference on Measurement and Quality Control - Cyber Physical Issue*.
- Aloisi, V., & Carmignato, S. (2016). Influence of surface roughness on X-ray computed tomography dimensional measurements of additive manufactured parts. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 6(B), 104-110.
- Ametova, E., Probst, G., & Dewulf, W. (2018). X-ray Computed Tomography Devices and Their Components. C. Simone, W. Dewulf, & R. Leach içinde, *Industrial X-Ray Computed Tomography* (s. 69–98). Springer.
- Angel, J. A. (2014). *Quality assurance of CT scanning for industrial applications*. DTU Mechanical Engineering.
- Bastas, A. (2020). Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe. *Measurement*, 156.
- Bauer, F., Schropp, M., & Szijarto, J. (2019). Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed tomography and additive manufacturing. *Precision Engineering*, 60, 63-75.
- Beraldin, J.-A., Carrier, B., MacKinnon, D., & Cournoyer, L. (2012). Characterization of Triangulation-Based 3D Imaging Systems Using Certified Artifacts. *The Journal of Measurement Science*, 7(4).
- BIMP: JCGM 100:2008. (2008). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. (1st). <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications> adresinden alındı
- BIMP: JCGM 200:2012. (2012). BIMP: International Vocabulary of Metrology. (3rd). https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1 adresinden alındı
- BIMP: JCGM GUM-6:2020. (2020). Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. (1st). <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications> adresinden alındı
- BIMP: SI Brochure. (2019). BIMP: The International System of Units. (9th). <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/> adresinden alındı
- Boehler, W., & Marbs, A. (2002). 3D Scanning Instruments. *Physics*.
- Bosch, J. A. (1995). *Coordinate Measuring Machines and Systems* (1st b.). CRC Press.
- Butcher, L. J. (2012). *The Metrology Handbook* (2nd b.). Quality Press.
- Carmignato, S., & Savio, E. (2011). Traceable volume measurements using coordinate measuring systems. *CIRP Annals*, 60(1), 519-522.

- Carmignato, S., Dewulf, W., & Leach, R. (2018). *Industrial X-Ray Computed Tomography*. Springer.
- Carmignato, S., Voltan, A., & Savio, E. (2010). Metrological performance of optical coordinate measuring machines under industrial conditions. *CIRP Annals*, 59(1), 497-500.
- Chaidas, D., Kitsakis, K., Kechagias, J., & Maropoulos, S. (2016). The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161.
- Chen, F., Brown, G. M., & Song, M. (2000). Overview of 3-D shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, 39(1).
- Cheng, Y., Wang, Z., Chen, X., Li, Y., Li, H., Li, H., & Wang, H. (2018, 12). Evaluation and Optimization of Task-oriented Measurement Uncertainty for Coordinate Measuring Machines Based on Geometrical Product Specifications. *Applied Sciences*, 9(1).
- Curless, B. (1999). From Range Scans to 3D Models. *Materials Science*.
- Czichos, H. (2011). Introduction to Metrology and Testling.
- Dantan, J.-Y., Ballu, A., & Mathieu, L. (2008). Geometrical product specifications — model for product life cycle. *Computer-Aided Design*, 40(4), 493-501.
- Dardzińska, A., & Fiedorczuk, K. (tarih yok). Geometric accuracy of rapid prototyping technologies using laser scanner and coordinate measurement machine. *IOP Conference Series Materials Science and EngineerinG*, 770(1).
- De Aquino Silva, J. B., & Burdekin, M. (2002). A modular space frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs). *Precision Engineering*, 26(1).
- De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R., & Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals*, 655-677.
- De Groot, P. J. (2015). The Optics Encyclopedia: Basic Foundations and Practical Applications. T. G. Brown , K. Creath, H. Kogelnik, M. Kriss, J. Schmit, & M. J. Weber içinde, *The Optics Encyclopedia*. Wiley-VCH.
- Dewulf, W., Kiekens, K., Tan, Y., & Welkenhuyzen, F. (2013). Uncertainty determination and quantification for dimensional measurements with industrial computed tomography. *CIRP Annals*, 62(1), 535-538.
- Drégelyi-Kiss, Á., & Durakbasa, N. (2018). Measurement Error on the Reconstruction Step in Case of Industrial Computed Tomograph. *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018*.
- Du Plessis, A., Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., & Le Roux, S. G. (2018). X-Ray Microcomputed Tomography in Additive Manufacturing: A Review of the Current Technology and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(3).
- EOS. (2022). <https://na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms/EOS-M-290> adresinden alındı

- Ferreira, F. A., de Vicente y Oliva, J., & Sanchez Perez, A. M. (2013). Evaluation of the performance of coordinate measuring machines in the industry, using calibrated artefacts. *Procedia Engineering*, 63, 659-668.
- Ganeshkumar, S., & Navith, M. A. (2021). Design and fabrication of Coordinate Measuring Machine.
- Gao, W., Haitjema, H., Fang, F. Z., Leach, R. K., Cheung, C. F., Savio, E., & Linares, J. M. (2019). On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals*, 68(2), 843-866.
- Gao, W., Kim, S. W., Bosse, W., Haitjema, H., Chen, Y. L., Lu, X. D., . . . Kunzmann, H. (2015). Measurement technologies for precision positioning. *CIRP Annals*, 62(4), 773-796.
- Gapinski, B., Janicki, P., Marciniak-Podsadna, L., & Jakubowicz, M. (2016). Application of the Computed Tomography to Control Parts Made on Additive Manufacturing Process. *Procedia Engineering*, 149, 105-121.
- Gapinski, B., Janicki, P., Marciniak-Podsadna, L., & Jakubowicz, M. (2016). Application of the computed tomography to control parts made on am process. *Procedia Engineering*, 105-121.
- Gapinski, B., Wieczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., Dybala, B., & Ziolkowski, G. (2014). Comparison of Different Method of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D. *Procedia Engineering*, 69, 255-262.
- Gapinski, B., Zachwiej, I., & Kolodziej, A. (2015). Comparison of different coordinate measuring devices for part geometry control. *Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*.
- Gaska, P., Gaska, A., & Gruz, M. (2017). Challenges for Modeling of Five-Axis Coordinate Measuring Systems. *Applied Sciences*, 7(8), 803.
- GOM. (2022). Tactile and optical measurement technology for dimension checks: Advantages, differences and application fields of both measuring methods. <https://www.gom.com/en/topics/tactile-and-optical-measurement-technology>
- Guillet, J. P., Recur, B., Frederique, L., Bousquet, B., Canioni, L., Manek-Hönniger, I., . . . Mounaix, P. (2014). Review of Terahertz Tomography Techniques. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35, 382-411.
- Gust, P., & Sersch, A. (2020). Geometrical Product Specifications (GPS): A Review of Teaching Approaches. *Procedia CIRP*, 92.
- Hamed, M., Zedan, Y., Samuel, A. M., Doty, H. W., & Samuel, F. H. (2019). Milling parameters of Al-Cu and Al-Si cast alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Harding, K. (2013). *Handbook of Optical Dimensional Metrology* (1st b.). CRC Press.
- Hermanek, P., Rathore, J. S., Aloisi, V., & Carmignato, S. (2018). Principles of X-ray Computed Tomography. S. Carmignato, W. Dewulf, & R. Leach içinde, *Industrial X-Ray Computed Tomography* (s. 25-67). Springer.

- Hexagon Dirsek CMM. (2022). <https://hexagon.com/tr/products/tigo-sf>. adresinden alındı
- Hexagon Kızak CMM. (2022). <https://hexagon.com/products/product-groups/measurement-inspection-hardware/coordinate-measuring-machines/gantry-CMMs> adresinden alındı
- Hexagon Köprü CMM. (2022). <https://hexagon.com/tr/products/product-groups/measurement-inspection-hardware/coordinate-measuring-machines/bridge-CMMs/entry-level-CMMs> adresinden alındı
- Hocken, R. J., & Pereria, P. H. (2011). *Coordinate Measuring Machines and Systems*. CRC Press.
- Hoffman, R., & Jain, A. K. (1987). Segmentation and Classification of Range Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-9(5), 608 - 620.
- Humienny, Z. (2021). State of art in standardization in the geometrical product specification area a decade later. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 42-51.
- ISO 1101:2017. (2017). *Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out*.
- ISO 12180-1:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Cylindricity — Part 1: Vocabulary and parameters of cylindrical form*.
- ISO 12180-2:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Cylindricity — Part 2: Specification operators*.
- ISO 12181-1:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Roundness — Part 1: Vocabulary and parameters of roundness*.
- ISO 12181-2:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Roundness — Part 2: Specification operators*.
- ISO 12780-1:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Straightness — Part 1: Vocabulary and parameters of straightness*.
- ISO 12780-2:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Straightness — Part 2: Specification operators*.
- ISO 12781-1:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Flatness — Part 1: Vocabulary and parameters of flatness*.
- ISO 12781-2:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Flatness — Part 2: Specification operators*.
- ISO 14253-1: 2017. (2017). *Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications*.
- ISO 14638:2015. (2015). *Geometrical product specifications (GPS) — Matrix model*.
- ISO 1660:2017. (2017). *Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Profile tolerancing*.

- ISO 8015:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Fundamentals — Concepts, principles and rules*.
- Jähne, B., Haußecker, H., & Geißler, P. (1999). *Handbook of Computer Vision and Applications: Signal Processing and (Cilt 2)*. Academic Press.
- Kim, F., Villarraga-Gómez, H., & Moylan, S. P. (2016). Inspection of Embedded Internal Features in Additive Manufactured Metal Parts Using Metrological X-ray Computed Tomography. *Conference: ASPE/euspen 2016 Summer Topical Meeting - Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing*.
- Kopáček, A., Erdélyi, J., & Kyrinovič, P. (2020). *Engineering Surveys for Industry*. Springer.
- Kourra, N., Warnett, J. M., Attridge, A., Kirací, E., Gupta, A., Barnes, S., & Williams, M. A. (2015). Metrological study of CFRP drilled holes with x-ray computed tomography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 2025–2035.
- Kowaluk, T., & Woźniak, A. (2017). Influence of Measurement Parameters Settings on the Results of the CT Measurement. *International Conference Mechatronics*.
- Kruth, J. P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L., & Weckenmann, A. (2011). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals*, 60(2), 821-842.
- Kunzmann, H., Pfeifer, T., Schwenke, H., & Weckenmann, A. (2005). Productive Metrology - Adding Value to Manufacture. *CIRP Annals*, 54(2), 155-168.
- Kupriyanov, V. (2018). *Comparison of optical and tactile Coordinate Measuring Machines in a production environment*. Hämeenlinna: Häme University of Applied Sciences, Mechanical Engineering and Production Technology.
- Leach, R. (2011). *Optical measurement of surface topography*. Springer.
- Leach, R. K., Bourell, D., Carmignato, S., Donmez, A., Senin, N., & Dewulf, W. (2019). Geometrical metrology for metal additive manufacturing. *CIRP Annals*, 68(2), 677-700.
- Li, H., Chen, X., Cheng, Y., Liu, H., Wang, H., Cheng, Z.-Y., & Wang, H. (2017). Uncertainty Modeling and Evaluation of CMM Task Oriented Measurement Based on SVCMM. *Measurement Science Review*, 17(5).
- Lifton, J. (2015). *The influence of scatter beam and beam hardening*. Southampton: University of Southampton, Engineering and the Environment.
- Luhmann, T., Bethmann, F., Herd, B., & Ohm, J. (2008). Comparison and verification of optical 3-D surface measurement systems.
- MARH. (2022). *MarSurf LD 130 - LD 260*. <https://megadanismanlik.com.tr/urun-1433-marsurf-ld-130---ld-260-adresinden-alindi>
- Marrugo, A. G., Gao, F., & Zhang, S. (2020). State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review. *Journal of the Optical Society of America*, A37(9), B60-B77.

- Mohamed, G., & Hegazy, R. (2017). Comparison of GUM and Monte Carlo methods for the uncertainty estimation in hardness measurements. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8(14).
- Mostafa, A.-B., & Ebrahim, M. A.-B. (2014). 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(10).
- Mussatayev, M., Huang, M. M., & Beshleyev, S. (2020). Thermal influences as an uncertainty contributor of the coordinate measuring machine (CMM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111, 537–547.
- Osten, W. (2008). Digital Image Processing for Optical Metrology. W. Sharpe içinde, *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Springer Handbooks.
- Ören, S., Yasa, E., Solakoglu, E. U., & Poyraz, Ö. (2014). Havacılık Sektöründe Optik Ölçüm Yöntemlerinin Yeri ve Karşılaştırmalı Değerlendirmesi Üzerine Bir Çalışma. *Mühendis ve Makine*, 55(654).
- Palousek, D., Omasta, M., Koutny, D., Bednar, J., Koutecky, T., & Dokoupil, F. (2015). Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*, 40(1).
- Pfeifer, T. (2002). *Production Metrology*. De Gruyter Oldenbourg.
- Pilipović, A., Baršić, G., Katic, M., & Havstad, M. R. (2020). Repeatability and Reproducibility Assessment of a PolyJet Technology Using X-ray Computed Tomography. *Applied Sciences*, 10(20), 7040.
- Płowucha, W., Jakubiec, W., Humienny, Z., Hausotte, T., Savio, E., Dragomir, M., . . . Mathieu, L. (2014). Geometrical Product Specification and Verification as toolbox to meet up-to-date technical requirements. *The 11th International Scientific Conference "Coordinate Measuring Technique" CMT2014*.
- Poyraz, Ö. (2018). *Metallerin Lazer Katmanlı İmalatında Kullanılan Proses Parametrelerinin Etkisinin, Modelleme ve Simülasyon Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi*. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Poyraz, Ö., Yılmaz, O., & Yasa, E. (2014). Investigation of Free-Form Surface Reconstruction Techniques for Reverse Engineering of Worn-Out Gas Turbine Blades: A Case Study. *16th International Conference on Machine Design and Production (UMTIK)*, 30.
- Raghavendra, N. V., & Krishnamurthy, L. (2013). *Engineering metrology and measurements*. Oxford University Press.
- Ramsey, M., Ellison, S., Czichos, H., Hässelbarth, W., Ischi, H., Wegscheider, W., . . . Schmidt, A. (2011). *Quality in Measurement and Testing*.
- Remondino, F., El-Hakim, S. F., Gruen, A., & Zhang, L. (2008). Turning images into 3-D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(4), 55-65.
- Rezchikov, A. F., Kochetkov, A. V., & Zakharov, O. V. (2017). Mathematical models for estimating the degree of influence of major factors on performance and accuracy of coordinate measuring machines. *MATEC Web of Conferences*, 129:01054., 129 (01054).

- Romdhani, F., Hennebelle, F., Ge, M., & Juillion, P. (2014). Methodology for assessment of measuring uncertainties of articulated arm coordinates measuring machine. *Measurement Science and Technology*, 25(12).
- Salah, H. R. (2017). State of the art of CMM coordinate metrology in automotive industry. *The-State-of-the-Art of CMM-Coordinate Metrology in Automotive Industry*, 2017-01-0397.
- Savio, E., De Chiffre, L., & Schmitt, R. (2007). Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals*, 56(2).
- Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., & Kunzmann, H. (2002). Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. *CIRP Annals*, 51(2).
- Se, S., & Pears, N. (2012). Passive 3D Imaging. N. Pears, Y. Liu, & P. Bunting içinde, *3D Imaging, Analysis and Applications* (1st b., s. 35–94). Springer London.
- Stojkic, Z., Čuljak, E., & Šaravanja, L. (2020). 3D Measurement – Comparison of CMM and 3D Scanner. *Proceedings of the 31st International DAAAM Symposium*, 780-787.
- Tannock, J. (1992). Coordinate measuring machines. *Materials Science*.
- Teizer, J., & Kahlmann, T. (2007). Range Imaging as Emerging Optical Three-Dimension Measurement Technology. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2020(2040), 19-29.
- Thalmann, R., Meli, F., & Küng, A. (2016). State of the Art of Tactile Micro Coordinate Metrology. *Applied Sciences*, 6(5), 150.
- Thompson, A., & Leach, R. (2018). Introduction to Industrial X-ray Computed Tomography. S. Carmignato, W. Dewulf, & R. Leach içinde, *Industrial X-Ray Computed Tomography* (s. 1–23). Springer.
- Tornincasa, S. (2021). *Technical Drawing for Product Design: Mastering ISO GPS and ASME GD&T* (1st b.). Springer Cham.
- Villarraga-Gómez, H., & Smith, S. T. (2020). Effect of the number of projections on dimensional measurements with X-ray computed tomography. *Precision Engineering*, 66, 445-456.
- Villarraga-Gómez, H., & Smith, S. T. (2020). Effect of the number of projections on dimensional measurements with X-ray computed tomography. *Precision Engineering*, 66, 445-456.
- Villarraga-Gómez, H., Amirkhanov, A., Heinzl, C., & Smith, S. (2021). Assessing the effect of sample orientation on dimensional X-ray computed tomography through experimental and simulated data. *Measurement*, 178.
- Villarraga-Gómez, H., Herazo, E. L., & Smith, S. T. (2019). Progression of x-ray computed tomography from medical imaging to current status in dimensional metrology. *Precision Engineering*, 60, 544-569.
- Villarraga-Gómez, H., Lee, C., & Smith, S. T. (2018). Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures. *Precision Engineering*, 51, 291-307.

- Wallard, A. (2011). Metrology Principles and Organization.
- Wenjuan, S., Brown, S., & Leach, R. (2011). *An overview of industrial X-ray computed tomography*. NPL.
- Wilhelm, R. G., Hocken, R., & Schwenke, H. (2001). Task Specific Uncertainty in Coordinate Metrology. *CIRP Annals*, 50(2).
- Willomitzer, F. (2019). State of the Art: The Basic Principles. F. Willomitzer içinde, *Single-Shot 3D Sensing Close to Physical Limits and Information Limits* (1st b., s. 29-51). Springer Cham.
- Withers, P. J., Bouman, C., Carmignato, S., Cnudde, V., Grimaldi, D., Hagen, C. K., . . . Stock, S. R. (2021). X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(18).
- Zuo, C., Qian, J., Feng, S., Yin, W., Li, Y., Fan, P., . . . Chen, Q. (2022). Deep learning in optical metrology: a review. *Light: Science & Applications*, 11(1), 39.



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-8736-7424

Ad Soyad :

Yabancı Dil : İngilizce, Almanca

Doğum Yeri ve Yılı :

E-Posta :

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2019 – 2023, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği
- 2014 – 2015, Castilla La Mancha Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği (Erasmus+)
- 2011 – 2015, Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- 2021 – 2022, Kalite Mühendisi, Hitachi Astemo Türkiye
- 2018– 2021, Kalite Mühendisi, Arslan Kalıp Metal

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Esnemez, M. ve Poyraz, Ö. (2022). Hassas Mekanik Unsurların Temassız Ölçüm Yöntemleri ile Doğrulanması ve Koordinat Ölçme Yöntemi ile Karşılaştırılması. Journal of New Results in Engineering and Natural Science, (17), 71-80.