FREZELEME PARAMETRELERİNİN PMMA SAYDAM MALZEMELERDE IŞIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gürkan AYDIN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREZELEME PARAMETRELERİNİN PMMA SAYDAM MALZEMELERDE IŞIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gürkan AYDIN
502137005

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
EKLEMELİ İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FREZELEME PARAMETRELERİNİN PMMA SAYDAM MALZEMELERDE IŞIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gürkan AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Eklemeli İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Teknolojik gelişmelerin endüstriyel alanlara entegrasyonu ile bazı geleneksel üretim yöntemlerinin kullanımı azalmaya başlamıştır. Özellikle üç boyutlu yazıcı teknolojileri ve bu üretim teknolojilerinin kullanım amacına yönelik farklı sektörlere hitap eden alternatiflerinin olmasının yanı sıra hızlıca dünya çapında yaygın hale gelmesi endüstriyel bir devrim niteliğindedir. Geleneksel üretim metodlarının girdileri olan yetkinlik, tecrübe, görece fazla ihtiyaç duyulan üretim alanı üç boyutlu üretim metotlarında söz konusu değildir. Farklı sektörlere hitap eden geniş hammadde seçenekleri, gerektiğinde ardıl işlem uygulamaları sayesinde son kullanıcı ürünü haline getirilebilmeleri de bu teknolojilere farklı kullanım alanları oluşturmaktadır.

Günümüz itibariyle kullanıma sunulan 3B teknolojik imkanlar savunmadan sağlık sektörüne kadar birçok alandaki uygulamaya olanak tanısa dahi bazı özel durumlar geleneksel üretim metotlarının kullanılmaya devam edildiği nadir alanlardan olabilmektedir. Örneğin otomotiv aydınlatma sektöründe ihtiyaç duyulan görsellik ve fonksiyonellik özelliklerini bir arada barındırma gerekliliği olan şeffaf optik iletken ve/veya geçirgen ürünler üç boyutlu teknolojilerin kullanım alanının sınırlandığı endüstriyel uygulamalardan bir tanesidir. Sektörün temel ihtiyaçlarından olan PMMA malzemesinin teknik özellikleri üç boyutlu imalat teknolojileri aracılığıyla bugün itibariyle karşılanamamaktadir.

Şeffaf reçinelerin gerekli optik nitelikleri sağlamaması, PMMA talaşlı imalat metotlarının yabancı menşeili firmalarda uygulanması, yüksek maliyetler ve terminler bu alanda çalışma gerekliliğini göstermektedir. Bu çalışmada sıvı reçineli 3B sistemler ve CNC frezeler ile düzlemsel yüzeyli numuneler üretilmiş, numunelerin yüzey ve optik özellikleri kontrol edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Buna paralel PMMA hammaddesi için imalat parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PMMA, Frezeleme, Işık geçirgenliği, Optik, Parametre, Prototip, Numune, Maket, Model,

2015, vii + 149 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MILLING PARAMETERS ON LIGHT DISTRIBUTION FOR PMMA TRANSPARENT MATERIALS

Gürkan AYDIN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Additive Manufacturing

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Usage of some traditional production methods has start to decrease with the integration of technological developments into industrial areas. In particular, 3D printing technologies and the fact that these production technologies have alternatives that appeal to different sectors for their intended use, as well as rapidly becoming widespread around the world, constitute an industrial revolution. Competence, experience, and relatively much needed production space, which are the inputs of traditional production methods, are not necessary for three-dimensional production methods. Wide range of raw material options that appeal to different sectors and possibility for end-user products thanks to post-processing applications, create different areas of use for these technologies.

Even though the 3D technological opportunities enable applications in many areas from defense to the health sector, some special cases may be rare areas where traditional production methods preffered. For example, transparent optical products that require visuality and functionality in the automotive lighting industry are one of the industrial applications where the use of three-dimensional technologies is limited. The technical specifications of PMMA material, which is one of the basic needs of the lighting industry, cannot be met through three-dimensional production technologies.

The fact that transparent resins do not provide the necessary optical qualities, the application of PMMA machining methods in foreign companies, high costs and deadlines show the necessity of working in this field. In this study, planar surface samples were produced with liquid resin 3D systems and CNC milling machines. The surface and optical properties of the samples were checked and compared. In parallel, manufacturing parameters for PMMA raw material were determined.

Key words: PMMA, Milling, Light transmittance, Optic, Parameters, Prototype, Sample, Mockup

2015, vii + 149 pages.

ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarımda bana her zaman destek olan bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli hocam Prof.Dr. Gökhan SEVİLGEN' e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ve tez sürecimi destekleyen Marelli Türkiye' ye ve değerli yöneticim Teoman ŞENYILDIZ' a, tez sürecimde yardımlarını esirgemeyen Arge / Optik Mühendisliği ekibinden Şevket ÇALIŞKAN, Erhan TİRYAKİ ve Tunç ŞENYÜZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında bana destek olan değerli eşim Derya KIZIK AYDIN' a teşekkürlerimi sunarım.

Gürkan AYDIN
30/04/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Talaşlı İmalat 3
2.2. Talaşlı İmalat Yöntemleri 4
2.2.1. Tornalama 5
2.2.2. Frezeleme 6
2.2.3. Vargelleme ve Planyalama 8
2.2.4. Delik Delme 9
2.2.5. Taşlama 10
2.3. Eklemeli İmalat ve Yöntemleri 10
2.3.1. Eriyik yığma yöntemi (FDM) 11
2.3.2. Toz yataklı ergitme 12
2.3.3. Fotopolimerizasyon (SLA, DLP) 13
2.4. Eklemeli İmalatta Şeffaf Hammadde Kullanımı 14
2.5. Polimetil Metakrilat Malzemesi (PMMA) 16
3. MATERYAL ve YÖNTEM 19
3.1. Uygulamalarda Kullanılan Makina Ekipman ve Hammaddeler 22
3.1.1. Stereolitografi 3B Yazıcı ve Hammaddeler (Reçineler) 22
3.1.2. Polimetil Metakrilat (PMMA) Hammadde 25
3.1.3. CNC Freze 26
3.1.4. Pürüzlülük Test Cihazı 27
3.1.5. Mikroskop 27
3.1.6. Spektrometre Cihazı 28
3.2. Testlerde Kullanılan Numunelerin Üretim Uygulamaları 31
3.2.1. 3B Yazıcı Numunelerinin Oluşturulması ve Üretimi 31
3.2.2. Polimetil Metakrilat Numunelerinin Oluşturulması ve Üretimi 37
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 42
4.1. 3B Yazıcı Numunelerinin Değerlendirilmesi 42
4.2. CNC Freze ile Üretilen Numunelerin Değerlendirilmesi 45
5. SONUÇ 54
KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ 57

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
%	Yüzde
°	Derece
µm	Mikrometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
g/cm3	Gram santimetreküp
Gpa	Gigapaskal
kg	Kilogram
kj/m2	Kilojoule metrekare
nm	Nanometre
Ø	Çap
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
s	Saniye

Kısaltmalar	Açıklama
Eİ	Eklemeli imalat
3B	Üç boyutlu
FDM	Eriyik yığma metodu
DMD	Direkt malzeme yığma metodu
LOM	Lamine nesne imalatı
SLA	Tarayarak Işıkla Kürleme
DLP	Direkt lazer polimerizasyon (Fotopolimerizasyon metodu)
SLS	Seçici lazer linterleme
DMLS	Direkt metal lazer sinterleme
MJF	Çok Jetli Modelleme
Mm	Milimetre
ASTM	American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
PEEK	Polieter Eter Keton
PEI	Polieterimid
PMMA	Polimetil metakrilat
PC	Polikarbonat
PLA	Polilaktik asit
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CAM	Bilgisayar destekli üretim
CNC	Bilgisayar destekli numerik kontrol

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Talaş kaldırma işleminin kesit görüntüsü (Groover, M. P. 2007)	3
Şekil 2.2.	Talaşlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması	4
Şekil 2.3.	Torna tezgahı genel kısımları (Anonim, 2023)	5
Şekil 2.4.	Torlanamada kullanılan kesici takımlar (Kalemler)	6
Şekil 2.5.	Örnek torlanama metotları; (a) Alın tornalama, (b) Delme, (c) Tırtıl çekme (Anonim, 2023)	6
Şekil 2.6.	Freze tezgahı ve frezeleme işleminin şematik görünümü (Anonim, 2023)	7
Şekil 2.7.	(a) Çevresel frezeleme (b) Alın frezeleme işleminin şematik görünümü (Anonim, 2023)	7
Şekil 2.8.	(a) Vargelleme şematik görünüm (b) Planyalama şematik görünüm (Anonim, 2023)	8
Şekil 2.9.	Vargelleme ve planyalama ile uygulanabilen geometriler; (a) V kanal (b) Kare kanal, (c) T kanal (d) Kırlangıç kuyruğu kanal (Anonim, 2023)	9
Şekil 2.10.	Delme işlemi (Anonim, 2023)	9
Şekil 2.11.	(a) Düzlem taşlama, (b) Silindirik taşlama şematik gösterimi (Anonim, 2023)	10
Şekil 2.12.	Eklemeli imalat teknikleri (Suh ve ark. 2020)	11
Şekil 2.13.	Malzeme ekstrüzyonu yöntemi şematik gösterimi (Karagoz ve ark 2021)	12
Şekil 2.14.	Toz yataklı ergitme şematik gösterimi (Gueche ve ark 2021)	13
Şekil 2.15.	Fotopolimerizasyon tekniği şematik gösterimi (Mukhtarkhanov ve ark 2021)	14
Şekil 2.16.	Temizlik ve kürleme işlemi öncesi – sonrası fotopolimerizasyon tekniği ile üretilen numuneler	15
Şekil 2.17.	PMMA ve Fotopolimer reçine ürünlerinin ışık geçirgenliği kıyaslaması (Berglund ve ark. 2019)	16
Şekil 2.18.	Levha ve granül Polimetil Metakrilat malzemesi (Anonim, 2023)	17
Şekil 3.1.	Otomobil ön aydınlatma ürün maketi	19
Şekil 3.2.	Şeffaf PMMA Otomobil ön aydınlatma sinyal iç lensi	20
Şekil 3.3.	Şeffaf PMMA Otomobil ön aydınlatma iç lensi	20
Şekil 3.4.	3B Yazıcı parçaları için iş akışı	21
Şekil 3.5.	CNC Frezeleme yapılan numuneler için iş akışı	22
Şekil 3.6.	Formlabs Stereolitografi 3B Yazıcı Çalışma Prensibi (Anonim, 2024)	23
Şekil 3.7.	Formlabs Form3L Stereolitografi 3B Yazıcı	24
Şekil 3.8.	CNC kontrollü freze tezgahı	26
Şekil 3.9.	Yüzey Pürüzlülük Test Cihazı, Model : RTP80 + TL90	27
Şekil 3.10.	Zeiss Stemi 508 Mikroskop	28
Şekil 3.11.	Dalga boyları ve ışınlar (nm)	29
Şekil 3.12.	Görülebilir ışık bölgeleri (nm)	29
Şekil 3.13.	Kırınım ızgarası ile ışığın kendisini oluşturan dalga boylarına dağılımı (Anonim, 2024)	30

Şekil 3.14.	Işık geçirgenliği ölçüm metodolojisi	31
Şekil 3.15.	Stereolitografi 3B Yazıcı arayüz program görüntüsü	32
Şekil 3.16.	Stereolitografi 3B Yazıcı ile üretilen numuneler	33
Şekil 3.17.	Ultraviyole banyo uygulaması	34
Şekil 3.18.	Ardıl temizlik işlemleri tamamlanan fotopolimer yazıcı numuneleri	35
Şekil 3.19.	Yüzey iyileştirmesi yapılıp şeffaflık kazandırılan fotopolimer yazıcı numuneleri	36
Şekil 3.20.	Kesici takım kısımları (Anonim, 2024)	37
Şekil 3.21.	Frezelemede kullanılan bağlama aparatı	39
Şekil 3.22.	Programlamada kullanılan VISI arayüzü	39
Şekil 3.23.	Frezeleme sonrası oluşan yüzey profili	40
Şekil 3.24.	Ø Kesici takım ile frezelenen numune yüzeyler	40
Şekil 3.25.	Optik kontrolleri yapılan numuneler	41
Şekil 4.1.	Mikroskop altı görüntüler	42
Şekil 4.2.	SLA teknolojisi ile üretilen numuneler	43
Şekil 4.3.	SLA teknolojisi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri	44
Şekil 4.4.	SLA teknolojisi ile üretilen parçaların ışık geçirgenlikleri	44
Şekil 4.5.	SLA teknolojisi ile üretilen numunelerin renk koordinatları	45
Şekil 4.6.	CNC Freze ile üretilen parçaların ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	47
Şekil 4.7.	CNC Freze ile üretilen parçaların ışık geçirgenlikleri	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	PMMA Malzemesi teknik özellikleri (Anonim, 2024)	18
Çizelge 3.1.	Şeffaf reçine teknik özelliklerin karşılaştırılması (Anonim, 2024)	25
Çizelge 3.2.	PMMA dökme akrilik hammadde teknik özellikleri (Anonim 2024)	25
Çizelge 3.3.	Ø3 mm Küre takım ölçüleri (Anonim, 2024)	37
Çizelge 3.4.	Ø3 mm Küre takım ile işleme parametreleri	38
Çizelge 4.1.	SLA teknolojisi ile üretilen numunelerin test sonuçları	43
Çizelge 4.2.	Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin yüzey pürüzlülük ortalamaları (µm)	46
Çizelge 4.3.	Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin mikroskop altı resimleri	48

1. GİRİŞ

Günümüz imalat sanayinde eklemeli imalat teknolojileri gelişmiş olsa da talaşlı imalat yöntemleri vazgeçilmez yöntemlerin başında gelmektedir. Özellikle yüksek adetli plastik, sac ya da metal parça ihtiyaçlarında kalıp imalatı ve diğer gerekliliklerin yerine getirilmesinde talaşlı imalat metodları sıklıkla tercih edilmektedir. Her ne kadar eklemeli imalat ile elde edilen kalıplar ve kalıp çekirdekleri yapılabilse de, - geometrilere göre değişkenlik göstermek üzere - (Bagalkot ve ark. 2021) yüksek hacimli üretim gerekliliğinde, eklemeli imalat geleneksel üretim metotlarından daha maliyetli olmaktadır. Aynı zamanda havacılık, savunma ve sağlık gibi alanlarda kritik özel malzemeler ile çalışabilen yüksek çözünürlüklü üç boyutlu yazıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gibi durumlarda yüksek olan yatırım maliyetleri yeni teknolojilerin yaygınlaşmasına engel teşkil etmekte ve kullanımını kısıtlamaktadır. Hammadde çeşitliliğindeki kısıtlar, yazdırma boyutlarının sınırları, parçaların gözenekli oluşu, ardıl işlem uygulama zorunluluğu gibi detaylar üç boyutlu yazıcı teknolojisinde dezavantajlar olarak görülmektedir. (Dedeakayoğullari, & Kaçal 2020).

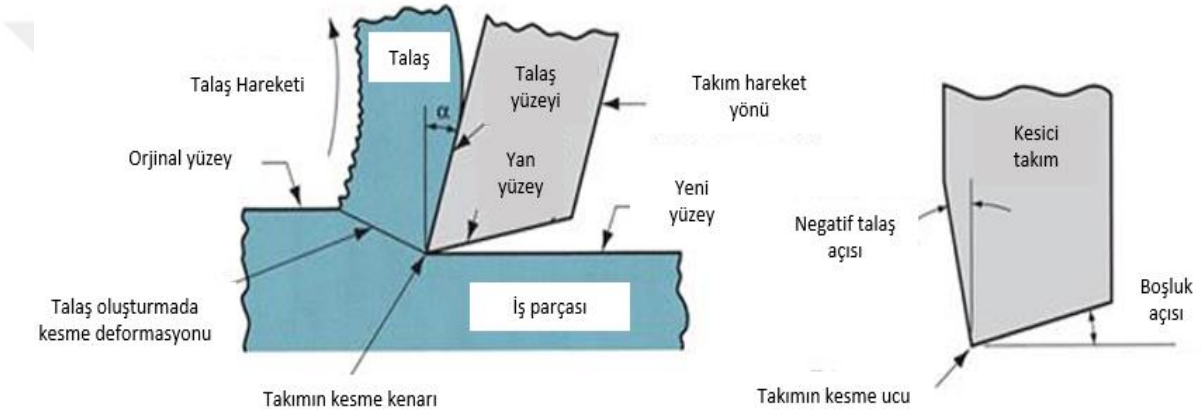
Endüstride prototip numune ve az adetli ürün ihtiyaçlarında eklemeli imalat yerine talaşlı imalatın tercih edildiği özel durumlar da bulunmaktadır. Örneğin otomotiv aydınlatma sektöründe sıkça kullanılan Polimetil Metakrilat ve Polikarbon malzemeler sahip oldukları optik geçirgenlik, yansıtıcılık, saydamlık vb. özellikleri sayesinde sektörde alternatifleri bulunmayan malzemelerdir. Bilindiği gibi bir çok sektörde geliştirme süreçlerinde tasarım doğrulama amaçlı prototip çalışmaları yapılmaktadır. Aynı şekilde otomotiv aydınlatma sektöründe de yüksek maliyetli çelik kalıplar üretilmeden önce, optik tasarım doğrulamak amaçlı saydam prototip parçalar üretilmektedir. Doğrulama aşamasında ihtiyaç duyulan az sayıdaki prototip ürünler için kalıp imalatı ve plastik enjeksiyon uygulaması maliyet ve zaman yönünden efektif olmamaktadır. Yüksek kalıp üretim ve modifikasyon maliyetleri, uzun terminler sebebiyle bu süreçlerde saydam PMMA ve PC malzemeler ile imalatına ihtiyaç duyulan prototip numuneler içi dolu kütük malzemeler kullanılarak talaşlı imalat ile elde edilmektedir.

Bu çalışmada ise saydam Polimetil Metakrilat malzemesi düzlem yüzeyde frezelenmiş ve frezeleme parametrelerinin yüzey kalitesine ve ışık dağılımına olan etkileri incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Talaşlı İmalat

Hammadde ya da yarı mamülden kesici takım ve ekipmanlar yardımıyla talaş kaldırarak istenilen şekle getirme işlemlerine talaşlı imalat adı verilir. Talaş kaldırma işlemi belirli bir ölçü, hassasiyet, yüzey kalitesine sahip parçalar elde etmek için ucu keskin takımlar ve ekipmanlar aracılığıyla hammadde üzerinden malzeme kaldırma işlemidir. Bu işlemler sırasında hammade artıkları meydana gelir, bu artıklara talaş adı verilir.



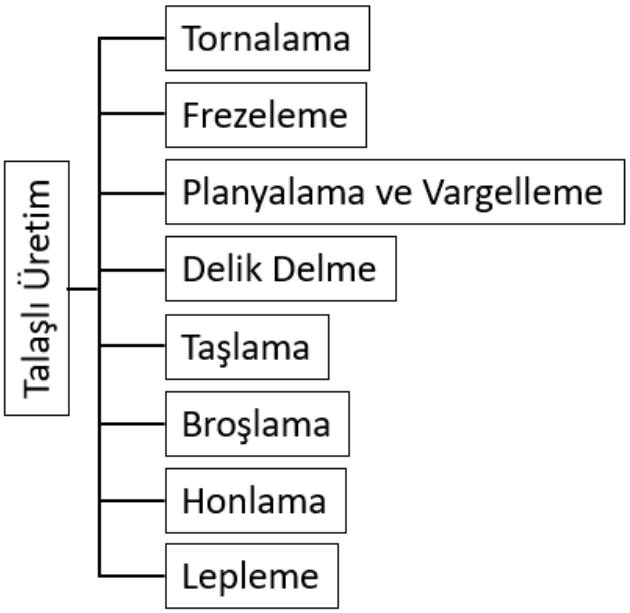
Şekil 2.1. Talaş kaldırma işleminin kesit görüntüsü (Groover, M. P. 2007)

Talaşlı imalatta kullanılan makinalar genel olarak takım tezgahları olarak adlandırılır. Her talaşlı imalat yönteminde kendine özel makinalar kullanılır. Bu işlemler sırasında güç kullanımı da söz konusudur. Çünkü makinaya bağlı takım ile hammaddeden talaş kaldırmak için güç uygulanmalıdır. Bu güç imalat teknolojisine göre dönme, öteleme, dönerek öteleme, sürtünme vb. olabilmektedir. Talaşlı imalatta parçalardan talaş kaldıran kesici uçlara takım denir. Kesici takımlar, kullanılacağı imalat metoduna göre farklı geometrilerde ve talaş kaldırılacak malzemenin özelliklerine göre farklı sertliklerdeki malzemelerden üretilirler. Talaşlı imalatta kesici takımların en önemli özelliği, takımların talaş kaldırılacak malzemeden sert olmasıdır. Bazı durumlarda yüzeyleri sert kaplama yapılmış takımlar da kullanılmaktadır.

Talaşlı imalat süreçlerinde birbirlerine temas eden hammadde ve takımların ısınması söz konusudur ve bu ısınma takımlarda aşınmaya ve imalatın ölçüsel hassasiyetine olumsuz etki etmesi sebebiyle soğutma sıvıları kullanılır. Bu sıvılar bazı özel mineral yağlardan ya da kimyasal bileşiklerden oluşabilir. Endüstride yoğun olarak belirli oranlarda su ile karıştırılmış bor yağı kullanılmaktadır.

2.2. Talaşlı İmalat Yöntemleri

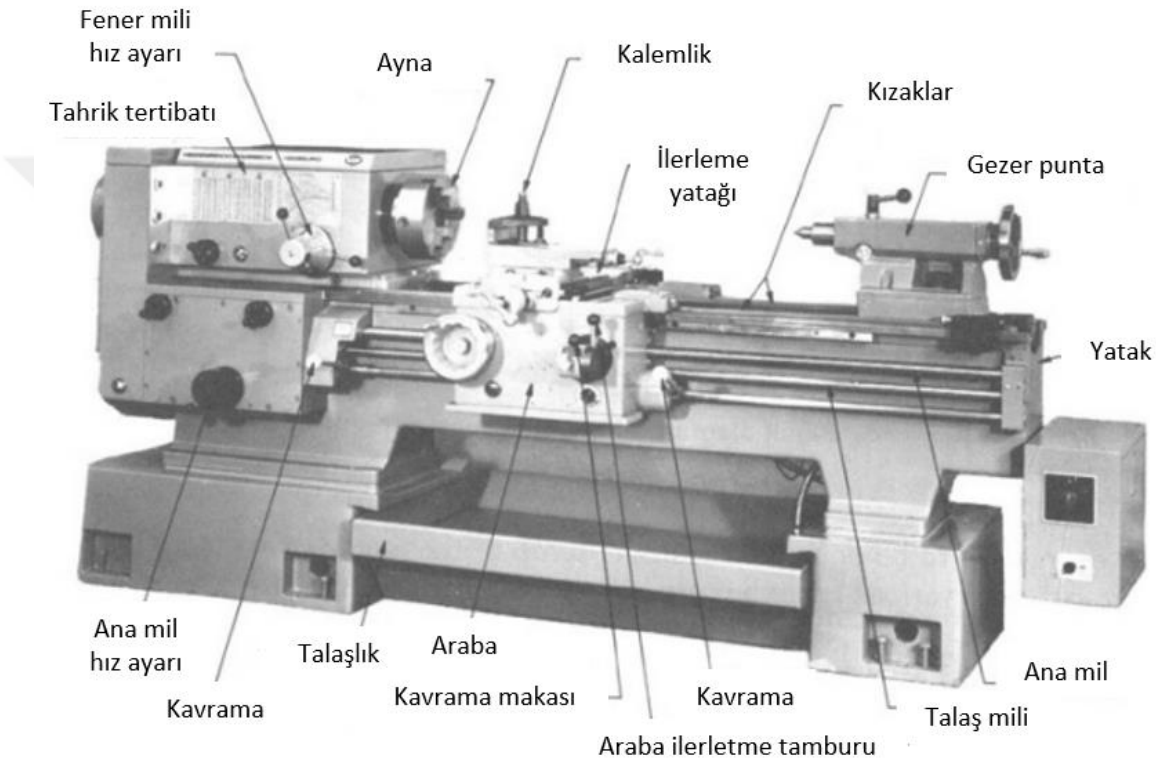
Talaşlı imalat yöntemleri, iş parçasına kazandırılmak istenen geometrik, boyutsal ve hassasiyet özelliklerine göre seçilebilir. Yöntemler kendi içlerinde gruplara ayrılmışlardır fakat her yöntem işlenecek parça ve takım arasındaki hareket farklılıklarına göre kendi içerisinde farklı özelliklere sahiptir.



Şekil 2.2. Talaşlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması

2.2.1. Tornalama

Tornalama, talaşlı imalatta en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Tornalamada iş parçası dönerken kesici takım ilerleme hareketi yapar. Bu ilerleme hareketi ile talaş kaldırma işlemi gerçekleşir.



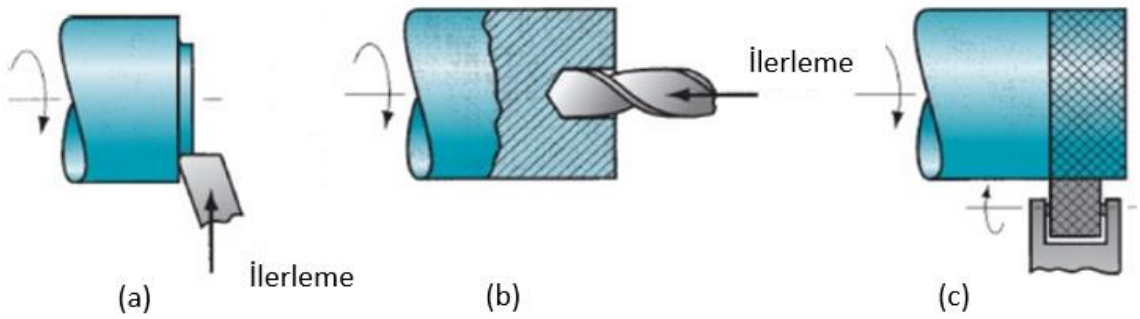
Şekil 2.3. Torna tezgahı genel kısımları (Anonim, 2023)

İmal edilmek istenen parça özelliklerine ve geometriye göre çok farklı kesici takımlar mevcuttur. İmalat öncesinde hesaplanan kesme hızı, devir sayısı gibi parametreler, elde edilecek ürünün yüzey kalitesini belirlemede etkili faktörlerdir. Ayrıca talaş derinliği de kullanılan kesici takımların aşınmasında önemli rol oynamaktadır. Tornalamada kullanılan kesici takımlara ‘kalem’ de denir.



Şekil 2.4. Torlanamada kullanılan kesici takımlar (Anonim, 2024)

İş parçasındaki geometrik değişiklik ve ihtiyaca göre farklı tornalama metodları vardır. Bunlar, alın tornalama, yüzey tornalama, delik delme vb metotlardır.

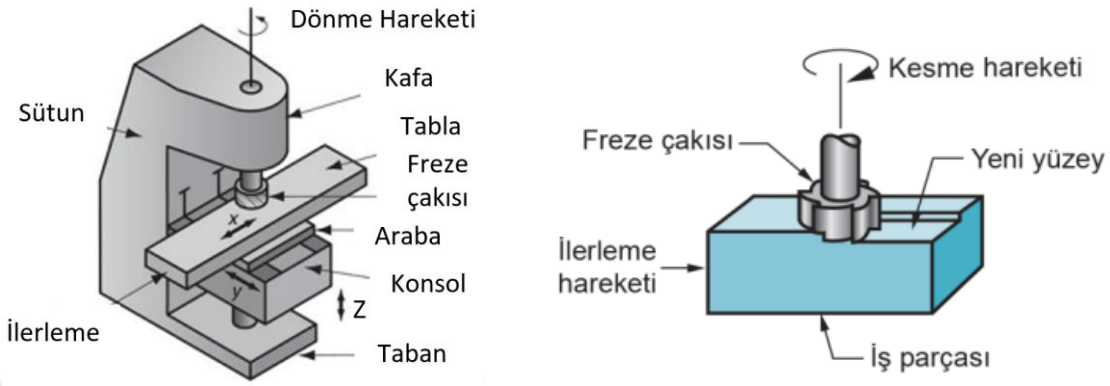


Şekil 2.5. Örnek torlanama metotları; (a) Alın tornalama, (b) Delme, (c) Tırtıl çekme (Anonim, 2023)

2.2.2. Frezeleme

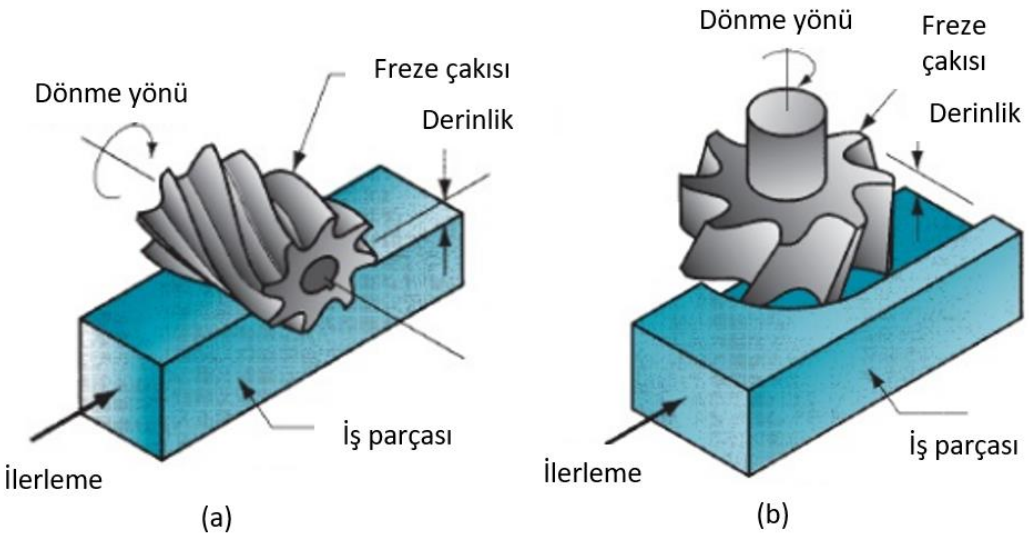
Frezeleme işleminde, tornalama işleminin tersine kesici takım kendi ekseni etrafında tanımlı devir sayısında dönerken iş parçasının eksenel hareketleri ile talaş kaldırılır. Frezeleme işlemi yapan makinalara freze tezgahı ya da freze denir. Bu talaşlı imalat

metodunda kesme hareketi genelde takımda, ilerleme hareketi eksenel hareket edebilen tabladadır. Frezelerin eksen sayısına göre farklı özellikleri olan modelleri de mevcuttur.



Şekil 2.6. Freze tezgahı ve frezeleme işleminin şematik görünümü (Anonim, 2023)

Frezeleme yöntemi genel olarak çevresel ve alın frezeleme olarak iki gruba ayrılabilir. Çevresel frezelemede kulanılan takımların çevrelerinde kesici dişler mevcuttur. Alın frezelemede ise takımların alın (uç) yüzeylerinde kesici dişler bulunur.



Şekil 2.7. (a) Çevresel frezeleme (b) Alın frezeleme işleminin şematik görünümü (Anonim, 2023)

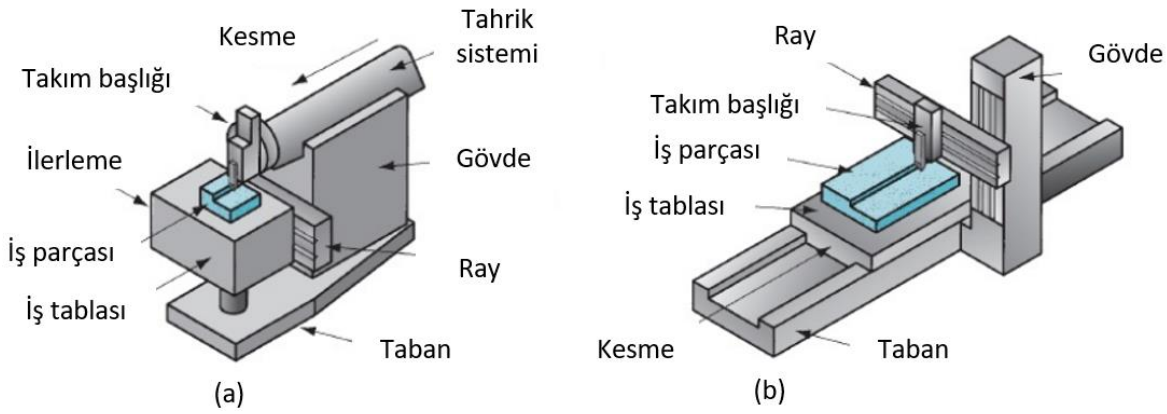
Frezeleme işleminde genellikle silindirik olmayan parçalar işlenir. Talaş kaldırma ve boyutsal doğruluğa ulaşma, pah kırme ve açılı işleme gibi işlemler frezeleme yönteminde

mümkündür. Dişli üretimi vb özel durumlarda bölüntü oluşturmak için divizör adı verilen aparat kullanılır.

Frezelemede ölçüsel doğruluğun yanı sıra yüzey kalitesi de dikkat edilen hususlardandır. Yüzey kalitesi beklentisi olan düzlemsel parçalarda frezeleme sonrası taşlama işlemi de uygulanabilir. Frezelemede yüzey kalitesi ve frezelemedeki hız, ilerleme hızı, diş derinliği ve talaş derinliğine bağlıdır. Frezelemede bu beklentiler bilinerek işlem parametreleri belirlenmelidir.

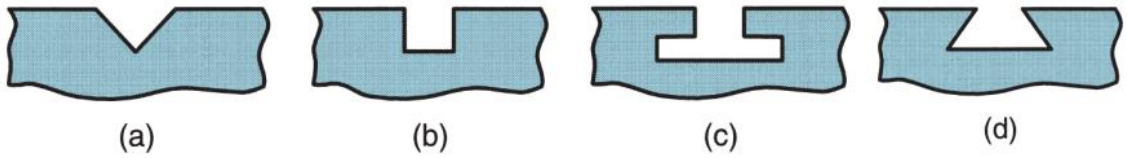
2.2.3. Vargelleme ve Planyalama

Bir kesme ağzı olan kesici takımın doğrusal hareketi sayesinde dikey, yatay ya da açılı talaş kaldırma işlemidir. Vargelleme ile planyalama arasındaki fark kesici takım ve iş parçasının hareketidir. Vargellemede kesici takım hareketli iş parçası sabitken, planyalamada kesici takım sabit iş parçası hareketlidir.



Şekil 2.8. (a) Vargelleme şematik görünüm (b) Planyalama şematik görünüm (Anonim, 2023)

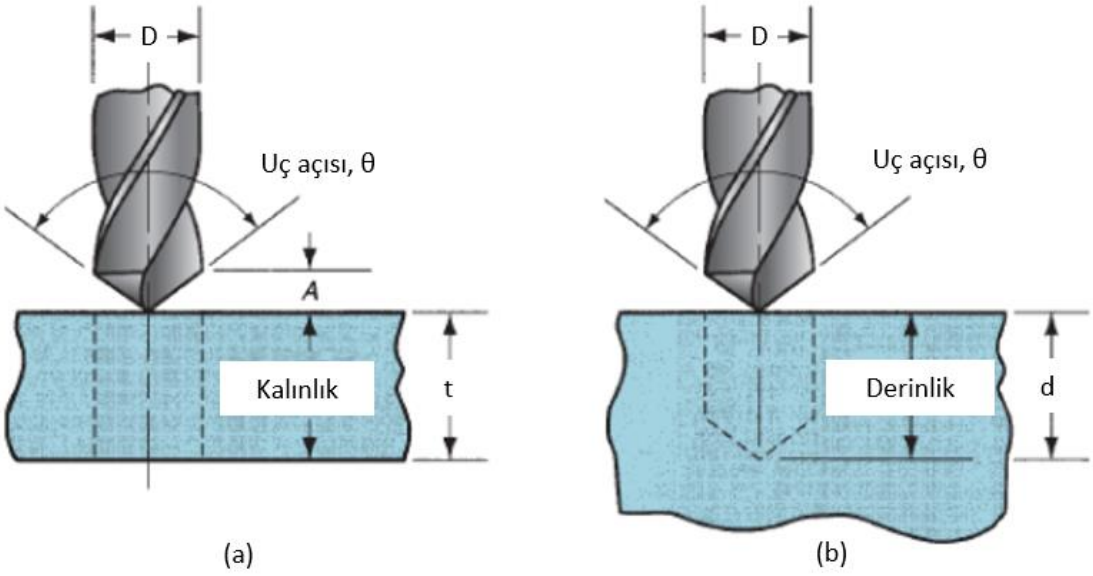
Her iki talaşlı imalat metodunda da tek ağızlı kesini takım kullanımı söz konusudur. Bu yöntemlerle V profiller, kırlangıç kuyruğu ve T kanallar işlenebilir.



Şekil 2.9. Vargelleme ve planyalama ile uygulanabilen geometriler;
(a) V kanal (b) Kare kanal, (c) T kanal (d) Kırlangıç kuyruğu kanal (Anonim, 2023)

2.2.4. Delik Delme

Delik delme, matkap adı verilen kesici takımlar vasıtası ile uygulanan talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntemde kesme ve ilerleme hareketinin her ikisi de kesici takım yani matkap ucu tarafından yapılır. İş parçası sabitken dönen ve ilerleyen matkap iş parçası üzerinde silindirik boşluklar oluşturur.

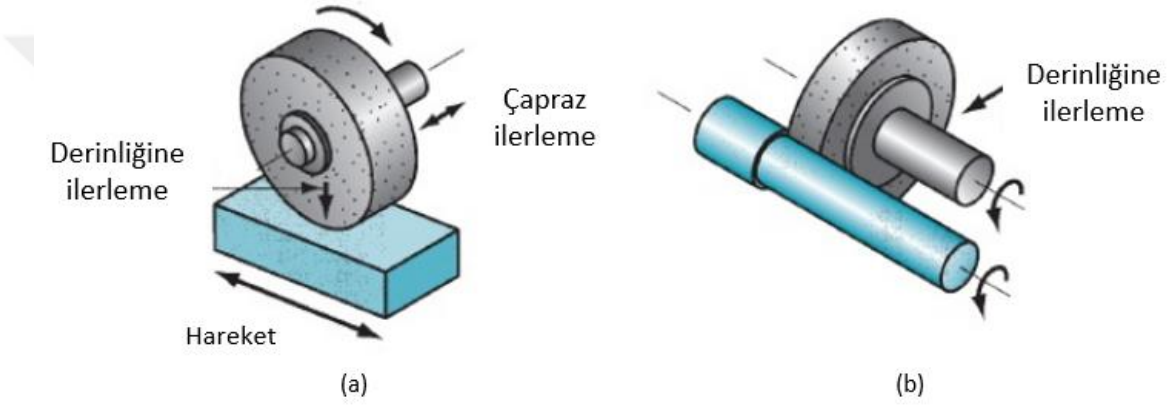


Şekil 2.10. Delme işlemi (Anonim, 2023)

Matkapla delik delme işlemi sonrası elde edilen yüzey pürüzlüküğü oldukça yüksektir. Ölçüsel hassasiyetin karşılanması ve pürüzlülüğün azaltılması için raybalama işlemi yapılır. Raybalama işleminin makina ya da el ile yapılması mümkündür.

2.2.5. Taşlama

Taşlama işleminde talaş kaldırma aşındırıcı takımlar vasıtasıyla yapılır. Aşındırıcı takımlar taş olarak da adlandırılır ve talaş kaldırma taşın dönmesi ve/veya ilerlemesi ile gerçekleşir. Taşlamada ilerleme hareketi tezgah tipine göre taş ya da tabla tarafından sağlanır. Bu işlem genellikle diğer talaşlı imalat yöntemleri ile elde edilmiş parçaların yüzey kalitesini arttırmak için uygulanır. Düzlem taşlama ve silindirik taşlama olarak ikiye ayrılır.



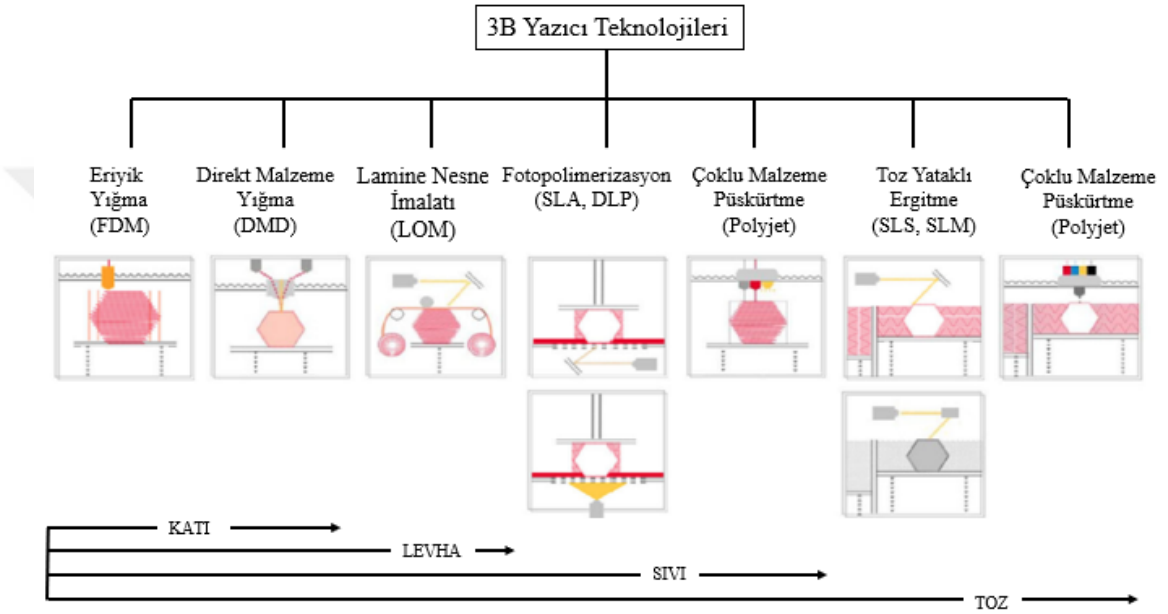
Şekil 2.11. (a) Düzlem taşlama, (b) Silindirik taşlama şematik gösterimi (Anonim, 2023)

Taşlama taşlarında, aşındırıcı olarak alüminyum oksit, silisyum karbür, bor nitrür veya elmas, bağlama maddesi olarak da reçine, seramik, silikat bulunur.

2.3. Eklemeli İmalat ve Yöntemleri

Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerinde uygulanan dolu malzemeden talaş kaldırılarak malzeme azaltılması esasının tersine, uzay boşluğunda sadece gerekli olan malzemenin üst üste katmanlar halinde eklenmesi ile ürünün elde edilmesi esasına dayanır. Bu yöntem henüz tam manasıyla geleneksel imalat metodlarına alternatif oluşturamamış olsa da geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen parçalar için en doğru yöntem olarak değerlendirilebilir. Son yıllarda eklemeli imalatta termoplastiklerin

yanı sıra toz metalurjisinin de tıp, havacılık, savunma, otomotiv vb. sektörlerde kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Eklemeli imalat metodlarında maliyet, ihtiyaç duyulan parça sayısı, parçaların geometrisi, malzemenin mekanik, termal ve optik vb özellikleri göz önünde bulundurularak yöntem seçimi yapılması en önemli kriterlerden bir tanesidir. Kabaca değerlendirildiğinde yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri aşağıdaki gibidir.

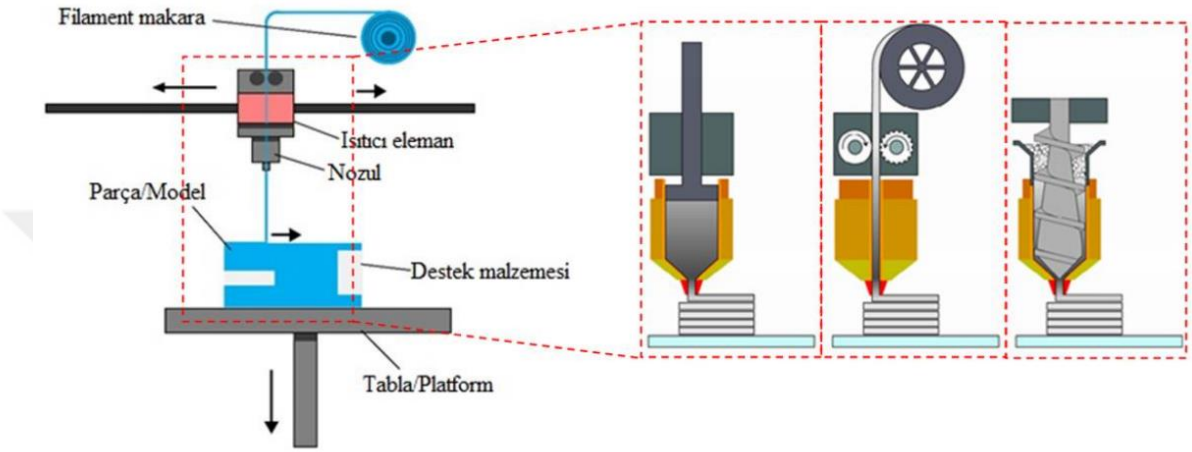


Şekil 2.12. Eklemeli imalat teknikleri (Suh ve ark. 2020)

2.3.1. Eriyik yığma yöntemi (FDM)

Termoplastik malzemelerin ekstürüde edilerek katmanlar halinde üst üste yığılması metoduna dayanan eklemeli imalat metodudur. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi en geniş kullanım alanına sahip olan yöntemdir. Bu yöntemde ısıtılan bir nozul ve filement ismi verilen bir hammadde mevcuttur. Bu hammadde ısıtılan nozulun içerisiden geçirilerek çapı düşürülür ve bu esnada uygun katmana yığılır. Bu işlem her katmanda tekrarlayarak üretim tamamlanana kadar devam eder. Tek malzemeli ve çift malzemeli olan modeller mevcuttur. Çift malzemeli olan modeller genellikle destek malzemesi ile üretim esnasında sarkmaların engellenerek, gerçeğe daha yakın ve karmaşık geometrilerdeki parçaların üretilmesine imkan sağlayan modellerdir. Bu modellerde üretim sonrası

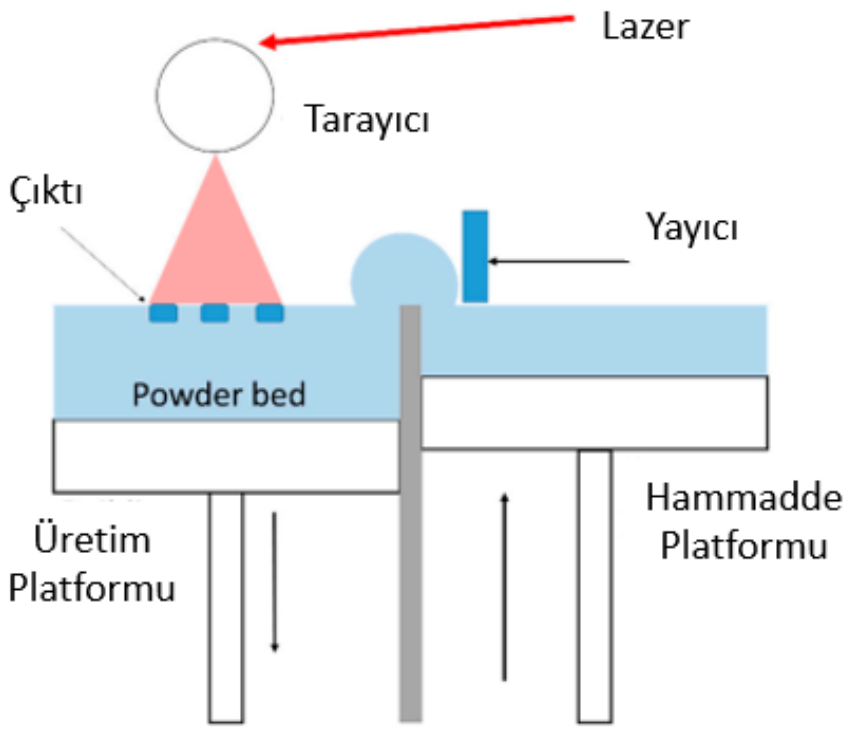
kimyasal işlem söz konusudur. Genel olarak malzeme ekstrüzyonu yöntemi, en geniş hammadde yelpazesine sahip eklemeli imalat yöntemidir. Hobi çalışmalarında tercih edilen Polilaktik Asit (PLA) malzemesinden, endüstriyel alanlarda tercih edilen polikarbonat (PC), ABS, havacılık, savunma ve uzay sanayiinde kullanılan Ultem, Peek, Pei gibi termoplastik hammaddeler bu yöntemde kullanılan malzemelerin bazılarıdır.



Şekil 2.13. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi şematik gösterimi (Karagoz ve ark 2021)

2.3.2. Toz yataklı ergitme

Toz yataklı eritme, multijet eritme (MJF), seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer eritme (SLM), direkt metal lazer sinterleme (DMLS) gibi yaygın kullanılan teknolojileri içermektedir. (Karagoz ve ark 2021) Genel çalışma prensibi itibariyle bu yöntemde toz hammadde lazer vasıtası ile ergitilerek sertleşmesi sağlanmaktadır. Bu ergitme ve sertleştirme üretimi planlanan matematik modelin dilimlenmesi ile ortaya çıkan katmanlardan ibarettir. Her katmanda geometri değişerek bir üst katman ergitilerek sertleştirilir. Bu işlem son katmana kadar tekrarlanır ve üretim tamamlanır. Bu yöntemde üretim sonunda hazne hacmi tamamiyle hammadde ile dolar. Bu hammadde, içerisinde gömülü halde olan sinterlenmiş parçanın soğumasında da rol alır. Dolayısıyla hammadde sarfiyatı yüksek, hammaddenin yeniden kullanım oranı düşük ve maliyetlidir.



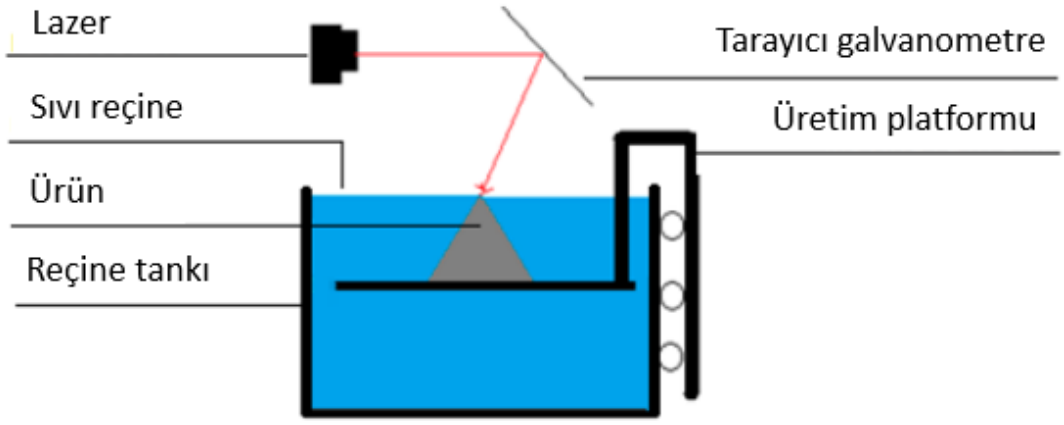
Şekil 2.14. Toz yataklı ergitme şematik gösterimi (Gueche ve ark 2021)

2.3.3. Fotopolimerizasyon (SLA, DLP)

Fotopolimerizasyon yöntemi, sıvı fotopolimer reçinenin bir havuz içerisinde lazer ışık kaynağından çıkan enerji aracılığı ile katmanlar halinde kürlenmenin gerçekleştirildiği eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde final üründe istenen özellikler çerçevesinde farklı malzemeler seçmek mümkündür. Son yıllardaki gelişmeler sayesinde çok farklı özelliklerde hammaddeler piyasada kolayca bulunabilir hale gelmiştir.

Fotopolimerizasyon yönteminde de toz yataklı sistemler gibi tek malzeme kullanımı söz konusudur fakat toz yataklı sistemlerdeki gibi hammadde atığı oluşmamaktadır. Havuz içerisinde bulunan ve üretim esnasında kürlenmeyen sıvı malzeme %100 kullanılabilir. Üretim hızı yüksek, ölçüsel doğruluğu diğer eklemeli imalat yöntemlerine nazaran oldukça iyidir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması ve genişleyen hammadde yelpazesi sayesinde biyomedikal, otomotiv ve uzay sanayiinde kullanımı popülerleşmektedir. Bütün bunların yanı sıra adıl işlemleri diğer teknolojilere kıyasla daha uzun süreli ve

zahmetlidir. Aynı zamanda şeffaf malzemelerin kullanımına izin veren eklemeli imalat yöntemidir. Açık kaynaklı makina ve ekipmanlar ile farklı hammadde üreticilerine ait transparan şeffaf reçineler kullanımı mümkün olmaktadır.



Şekil 2.15. Fotopolimerizasyon tekniği şematik gösterimi (Mukhtarkhanov ve ark 2021)

2.4. Eklemeli İmalatta Şeffaf Hammadde Kullanımı

Eklemeli imalat teknolojlerinin gelişimiyle birlikte, şeffaf malzemelerin kullanımı da önemli bir artış göstermiştir. Bu malzemeler, çeşitli endüstrilerde ve uygulama alanlarında geniş bir kullanım imkanı sunmaktadır. Şeffaf malzemelerin 3B yazıcılarda kullanılması, özellikle prototip üretiminden tasarım uygulamalarına kadar birçok alanda avantajlar sağlamaktadır.

İlk olarak, şeffaf malzemelerin kullanılması, tasarımcılara ve mühendislere üç boyutlu modellerin detaylarını daha iyi gözlemleme ve değerlendirme fırsatı tanır. Bu, özellikle mimari projeler, medikal prototipler, aydınlatma ürünleri veya elektronik cihazların geliştirilmesi gibi alanlarda tasarım sürecini optimize etmeye yardımcı olabilir.

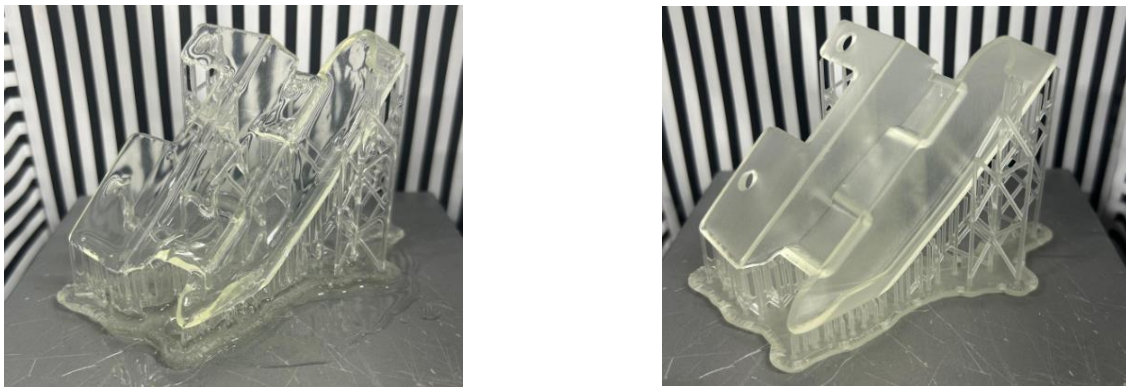
Ayrıca, şeffaf malzemelerin 3B yazıcılarda kullanılması, endüstriyel prototiplemenin yanı sıra eğitim amaçlı modelleme için de idealdir. Öğrenciler, şeffaf malzemeleri

kullanarak organik moleküllerin veya karmaşık iç yapıların daha iyi anlaşılmasını sağlayabilirler.

Ancak, şeffaf malzemelerin 3B yazıcılarla kullanımı beraberinde bazı teknik zorlukları da getirebilir. Malzemenin belirli kalınlıklarda olması ve baskı sırasında istenmeyen çatlakları önlemek için dikkatli bir kontrol gerektirir.

Bazı eklemeli imalat teknolojilerinde yarı şeffaf malzeme kullanımı söz konusu olabilir fakat bu hammaddeler ile elde edilen numuneler gerek ışık geçirgenliği gerekse yüzey pürüzlülüğü açısından SLA ve DLP gibi fotoplimerizasyon eseslı teknolojiler seviyesinde şeffaflık sunmamaktadır.

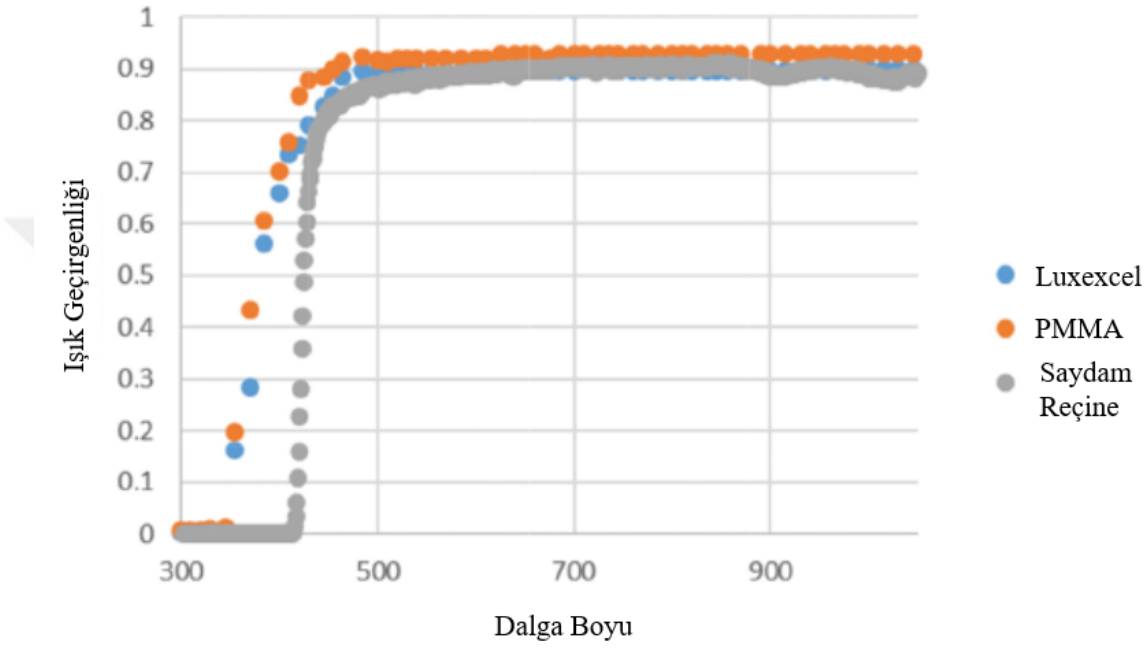
Fotopolimerizasyon ile elde edilen ürünlerde de ardıl işlem uygulamaları kaçınılmaz bir gerekliliktir. Bu teknoloji ile elde edilen ürünler, üretim sonrası şeffaf görünümdedir. Fakat kimyasal temizlik işlemi yapılmayan parçalar, üzerindeki yapışkan doku sebebiyle kullanılamaz durumdadır. Ardıl temizlik ve kürleme işlemleri sonrasında ise parçalar yarı transparan görünüme sahip olmaktadır.



Şekil 2.16. Temizlik ve kürleme işlemi öncesi – sonrası fotopolimerizasyon tekniği ile üretilen numuneler

Fotoğraflardan da görülebildiği gibi ortaya çıkan yarı transparan parçalar fotopolimer reçineli sistemlerden elde edilen parçaların ışık geçirgenliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple 3B yazıcılardan elde edilen ürünlerin üzerinde farklı ardıl işlem uygulamaları yapılmakta ve transparanlık seviyesinin arttırılması amaçlanmaktadır.

Her ne kadar bu ardıl işlemler ile ışık geçirgenliği en üst seviyelere çekilebilse de ulaşılabilen nokta aydınlatma sektörü için PMMA malzemesinin kullanımının önüne geçememektedir. Farklı fotopolimerizasyon teknolojileri ile çalışan 3B yazıcılar ile yapılan araştırmalarda da bu teknolojilerin optik olarak tatmin edici performansı sağlayamadığı görülmüştür. (Geisler ve ark 2022)



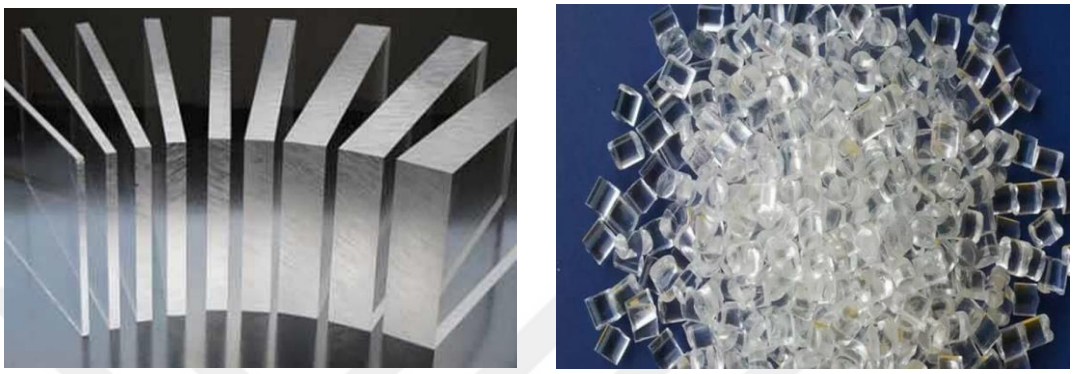
Şekil 2.17. PMMA ve Fotopolimer reçine ürünlerinin ışık geçirgenliği kıyaslaması (Berglund ve ark. 2019)

Sonuç olarak, eklemeli imalatta şeffaf malzeme kullanımı, çeşitli sektörlerde inovasyonu destekleyen bir potansiyele sahiptir. Ancak malzemenin özellikleri, baskı süreçlerinin iyileştirilmesi ve üretilen parçalarda yapılan ardıl işlemler üzerine yapılan çalışmalar, bu alandaki potansiyeli daha da artırabilir.

2.5. Polimetil Metakrilat Malzemesi (PMMA)

Polimetil Metakrilat (PMMA) adından da anlaşılacağı üzere çok sayıda monomerin bağlanması ile oluşan bir bileşiktir. Bu sentetik polimer piyasada genellikle akrilik olarak bilinmektedir. Genellikle levha ve granül şeklinde üretilen ve kolay ulaşılabilen

endüsriyel hammadde Plexiglass, Lucite, Akrylite gibi ticari isimlerle tanınır. Teknolojik ilerlemeler çerçevesinde kullanım alanı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Teknik özellikleri sayesinde dental - medikal uygulamalardan elektroniğe ve mimari konstrüksiyonlara kadar çok farklı alanlarda kullanımı söz konusudur.



Şekil 2.18. Levha ve granül Polimetil Metakrilat malzemesi (Anonim, 2023)

Akrilik adıyla anılan bu malzeme şeffaftır ve farklı renk seçenekleri mevcuttur. Düşük yoğunluğu (1,17-1,20 g/cm3), kırılmaya karşı dayanımı ve renklendirilebilme seçeneklerinin olması sayesinde cam ve polikarbonat malzemelere alternatif olarak tercih edilmektedir. Bu özellikler iç – dış mekan mimari ve mobilya uygulamalarındaki kullanımın önünü açmaktadır.

Medikal uygulamalarda ise yüksek biyouyumluluğu sayesinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Örneğin kemik çimentosu olarak protez uygulamalarında kemiğe yük iletimi sağlaması için kullanımı 1990 lı yıllarda başlamıştır (Kohn ve ark. 1992). Aynı zamanda göz içi lenslerde ve katarakt tedavisinde de kullanımı mevcuttur (Pawar E, 2016).

Mekanik özelliklerinin cam ve polikarbonat alternatifi olmasının yanı sıra optik özelliklerinin de tercih sebebi olmasından ötürü PMMA malzeme aydınlatma sektöründe sık kullanılan hammadde haline gelmiştir. Yüksek ışık iletkenliği (%92), düşük kırılma indisi (≈1,49) aydınlatma sektöründe tercih edilmesinin temel sebeplerindendir.

Genel olarak PMMA malzemesinin tek dezavantajı yüksek sıcaklıklarda yumuşama eğilimi göstermesidir. Bu durum mimaride iç mekan ve dış mekan aydınlatmada uygulamalarının yanı sıra otomotiv sektöründe ön – arka aydınlatma hammaddesi olarak kullanımını sınırlandırmaktadır.

Çizelge 2.1. PMMA Malzemesi teknik özellikleri (Anonim, 2024).

Polimetil Metakrilat (PMMA) Malzemesi Teknik Özellikleri		
Test Standardı / Metodu	Özellikler	Akrilik
	Fiziksel Özellikler	
D792	Yoğunluk (lb/in³) (g/cm³)	0,043 1,18
D570	Su emilimi – 24 saatte (%)	0,3
	Mekanik Özellikler	
D638	Çekme Direnci (psi)	8000 - 11000
D638	Çekme Modülü (psi)	350000 - 500000
D638	Çekme Uzaması (%)	2
D790	Eğilme Direnci (psi)	12000 - 17000
D790	Eğilme Modülü (psi)	350000 - 500000
D785	Sertlik, Rockwell	M80 – M100
D256	IZOD (ft-lb/in)	0,3
	Termal Özellikler	
D696	Doğrusal Genleşme Katsayısı (x 10^5 in/in/°F)	5 - 9
D648	Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (°F/°C) 264 psi	150 – 210 °F 65 – 100 °C
D3418	Erime Sıcaklığı (°F /°C)	265 - 285 / 130 - 140
	En yüksek Operasyon Sıcaklığı (°F /°C)	150 – 200 / 65 - 93
C177	Termal İletkenlik (x 10^{-4}cal/cm-sec-°C)	1,2
	Optik Özellikler	
-	Işık Geçirgenliği (En az %)	92
-	Kırılma İndisi	1,48 – 1,50

3. MATERYAL ve YÖNTEM

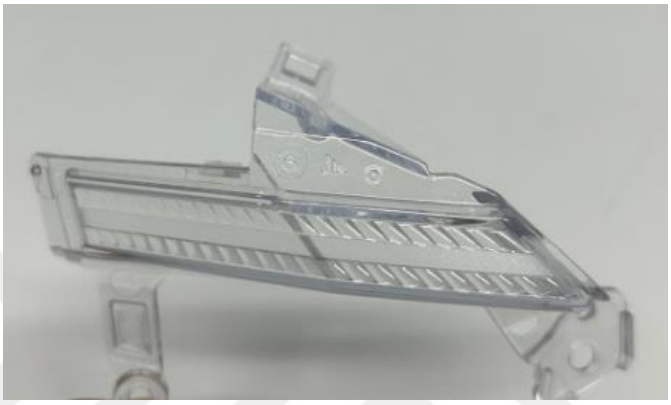
Bu tez çalışmasında otomotiv aydınlatma sektöründe sıklıkla kullanılan PMMA malzemesinden Arge / prototip ve numune süreçlerinde nasıl faydalanılabileceğine dair talaşlı imalat parametreleri çalışılmıştır. Otomotiv aydınlatma sektöründe polimetil metakrilat granül halde ve plastik enjeksiyon kalıpları vasıtası ile enjeksiyon yapılarak elde edilen mamüllerde görülmektedir. Yoğunlukla arka aydınlatma ürün gruplarında kırmızı renkli ve ön aydınlatma ürün gruplarında renksiz saydam hali tercih edilmektedir. Işık geçirgenliğinin ve iletkenliğinin yüksek olması, PMMA malzemesinin aydınlatma sektöründeki kullanımının temel sebeplerinden bir tanesidir.



Şekil 3.1. Otomobil ön aydınlatma ürün maketi

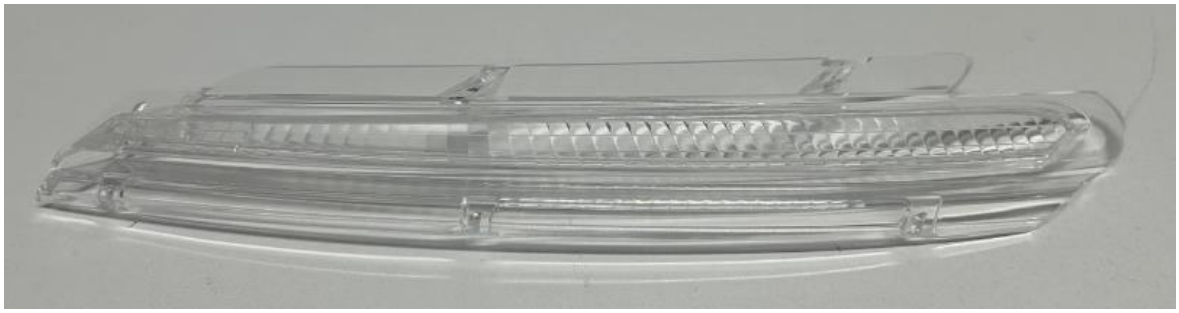
Şeffaf PMMA parçalar çok sayıda parça gerekliliğinin olduğu seri üretim süreçlerinde çelik kalıplar yapılarak bu kalıplara granül malzeme enjeksiyonu ile elde edilmektedir. Ürün geliştirme süreçlerinde tasarımı tamamlanan parçalar ise tasarım doğrulama fazında prototip – numune olarak az sayıda üretilmektedir. Farklı yöntemlerle üretilen ve ardıl işlemleri yapılarak istenen görselliğe kavuşturulan parçalar gerekli standartlardaki

testlere tabi tutulmaktadır. Tasarım analiz sürecinde elde edilen analiz sonuçları ile prototip - numune parçalar ile yapılan test sonuçlarının örtüşmesi büyük önem arz etmektedir. Test sonuçlarının güvenilirliği bu prototip parçaların görsel ve fonksiyonel olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu gereklilikler sebebiyle seri üretimdeki hammaddesinin PMMA olması planlanan parçaların da tasarım doğrulama sürecinde az sayıda üretilme gerekliliği oluşmaktadır.



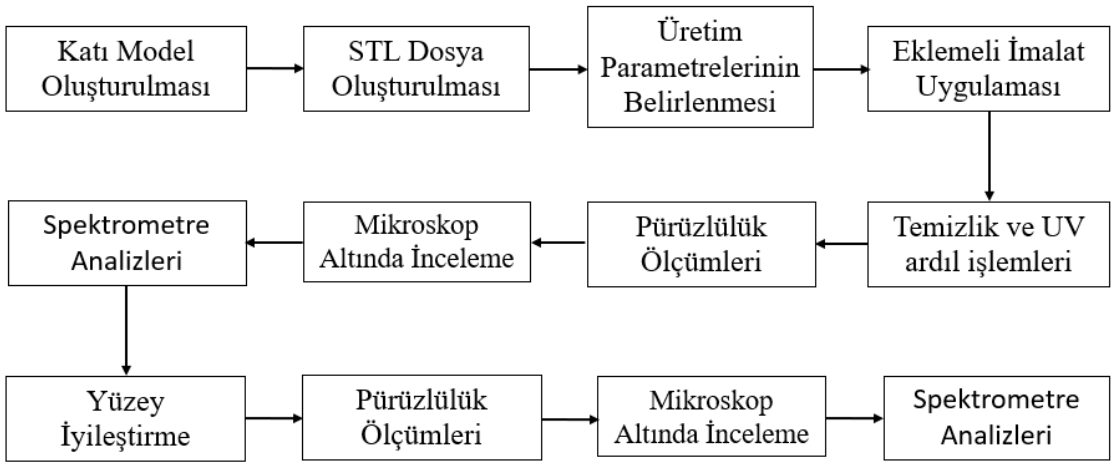
Şekil 3.2. Şeffaf PMMA Otomobil ön aydınlatma sinyal iç lensi

Seri üretimde kullanılacak kalıpların yüksek maliyetli olması ve 3B sistemler ile gerekli fonksiyonellikte optik ve termal özelliklere sahip transparan parçaların üretilememesi, otomotiv aydınlatma sektöründe PMMA malzemesinin talaşlı imalat uygulamalarında kullanımının gerekliliğini göstermektedir. PMMA hammadde ile yapılan talaşlı imalat uygulamaları, seri üretim için hazırlanan çelik kalıplarda oluşabilecek modifikasyon maliyetlerinin önüne geçmektedir.



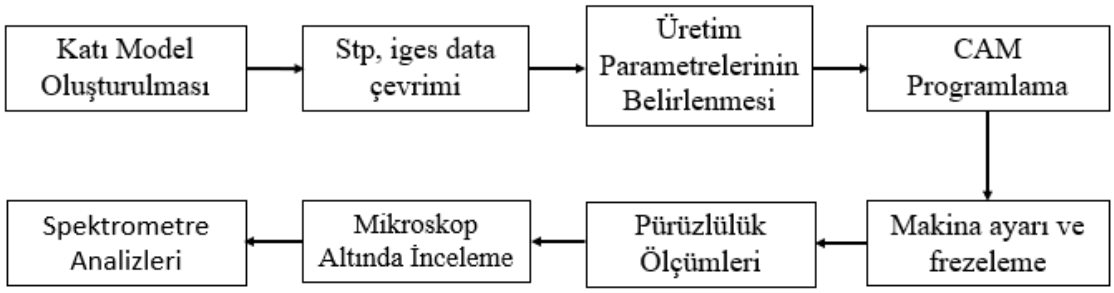
Şekil 3.3. Şeffaf PMMA Otomobil ön aydınlatma iç lensi

Fakat aydınlatma sektörüne hizmet verebilir nitelikteki üreticilerin genellikle yurt dışı menşeili olması sebebiyle PMMA frezeleme işlemlerinde uzun termin süreleri söz konusu olmaktadır. Bu kısıtın yanı sıra gümrükleme ve döviz bazlı ödemeler de maliyetin yükselmesine sebebiyet vermektedir. Aydınlatma sektörü için bu hammaddenin işleme parametrelerinin çözümlenmesi, uygulanması ve standartlaştırılması gereken ihtiyaçlara ekonomik ve hızlı cevap vermenin en uygun yoludur.



Şekil 3.4. 3B Yazıcı parçaları için iş akışı

Bu tez çalışmasında belirtilen ihtiyaçlar ve beklentiler sebebiyle 3 boyutlu yazıcılarda saydam reçineler kullanılarak düzlemsel yüzeylerde üretilen numune parçalar ile saydam dökme PMMA hammaddesinin 3 mm çapındaki küre takım kullanılarak farklı parametreler doğrultusunda frezelenmesi ile elde edilen numune parçalar analiz edilmiş, ortaya çıkan yüzeyler değerlendirilmiş ve gerekli optik kontrolleri yapılarak yorumlanmıştır. Çalışma kapsamında 3B yazıcı sislemleri ve konvansiyonel yöntemlerle elde edilecek parçalar için uygulanacak iş akışı Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 de gösterildiği gibi planlanmıştır;

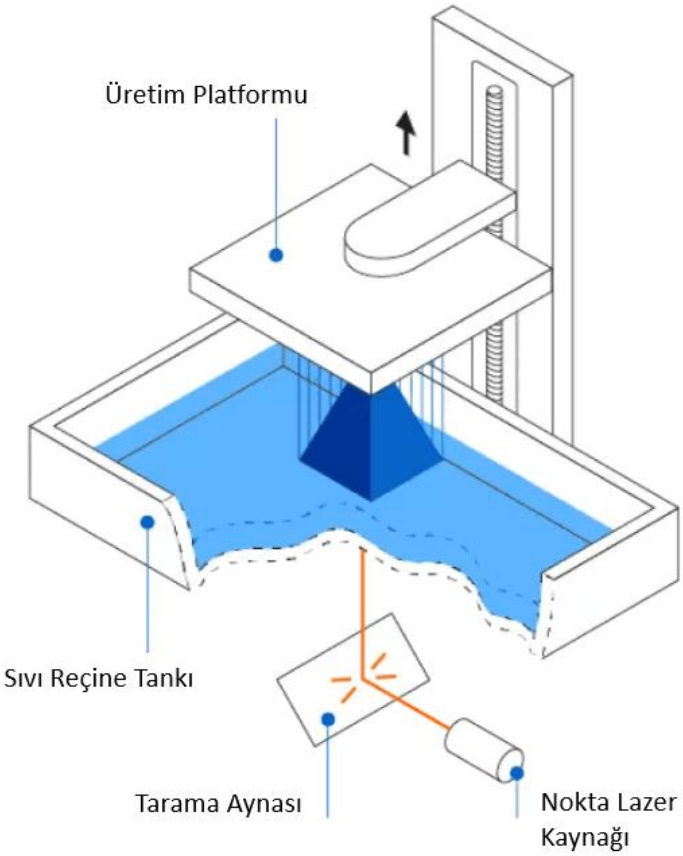


Şekil 3.5. CNC Frezeleme yapılan numuneler için iş akışı

3.1. Uygulamalarda Kullanılan Makina Ekipman ve Hammaddeler

3.1.1. Stereolitografi 3B Yazıcı ve Hammaddeler (Reçineler)

Stereolitografi teknolojisi, sıvı reçineli üretim yapan üç boyutlu üretim sistemlerinden bir tanesidir. DLP teknolojisi ile en önemli farkı polimerizasyon işlemini yapan lazer kaynağı farklılığıdır. SLA teknolojisinde nokta lazer kaynağı kullanılır ve bu kaynak katmanların fotopolimerizasyon işlemini yaparak reçineyi katılaştırır. Nokta lazer kaynaklı SLA teknolojisinde ise DLP teknolojisine kıyasla üretim süreleri daha uzun olmaktadır.



Şekil 3.6. Formlabs Stereolitografi 3B Yazıcı Çalışma Prensibi (Anonim, 2024)

Genel olarak teknolojisi itibariyle parametrelerin sabit olmadığı, kısıtlı raf ömrüne sahip malzemeler, makina kalibrasyon farklılıkları ve kullanıcı yetkinlikleri gibi değişkenler düşünüldüğünde şeffaf 3B yazıcı malzemeleri kullanılarak üretilen parçalarda tekrar edilebilir optik performans alınması mümkün görünmemektedir. Aynı zamanda şeffaf fotopolimer reçine üreticileri de reçinelerin optik performanslarını överken optik özelliklerin rakamsal olarak karşılıklarını vermemektedirler. Bu sebeple PMMA malzemesi ve 3B yazıcılar ile üretilen şeffaf parçaların kıyaslamasını yapmak zorlaşmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında şeffaf reçinelerin optik değerlerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Şeffaf reçine kullanımında 3B yazıcı olarak 25 mikrondan 100 mikrona kadar farklı çözünürlüklerde üretim hassasiyetine, 250 mW lazer gücüne, (xyz) 335 x 200 x 300 mm üretim hacmine sahip Formlabs Form 3L Stereolitografi yazıcısı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Formlabs Form3L Stereolitografi 3B Yazıcı

Fotopolimerizasyon teknolojileri kullanılarak üretilen parçalardan PMMA malzeme ile üretilen parçalara nazaran optik performans elde edilemediği bilinse de reçinelerin optik performanslarını belirleyebilmek ve PMMA malzeme ile kıyaslayabilmek amacıyla numuneler üretilecek ve optik analizleri yapılacaktır.

Stereolitografi teknolojisiyle üretilen parçalarda aşağıdaki şeffaf reçineler kullanılarak gerekli çalışmalar yapılması amaçlanmaktadır.

Dikkat edilirse hiçbir reçinede optik özellikler belirtilmemektedir. 3B teknolojilerinde değişken makina ekipman, ortam, kürleme ve ardıl işlem farklılıkları bunun sebeplerinden olabilir. Bu çalışma kapsamında Formlabs ve Envisiontech firmalarının şeffaf fotopolimer reçineleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Şeffaf reçine teknik özelliklerin karşılaştırılması (Anonim, 2024).

Teknik Özellikler / Malzeme tanımı	Formlabs Std Clear Resin	Envisiontech e-clear
Tensile Strenght	65 MPa	40-48 MPa
Tensile Modulus	2.8 GPa	2.2 – 3.2 GPa
Flextural Modulus	2.2 GPa	1.2 – 1.5 GPa
Izod Impact	25 J/m	30 J/m
Elongation at break	6 %	2 – 4 %

3.1.2. Polimetil Metakrilat (PMMA) Hammadde

Düzlem yüzeylerde frezeleme yapılan dökme akrilik PMMA hammaddesine ait teknik veriler aşağıdaki gibidir. 20 mm kalınlığındaki PMMA dökme malzeme Pia Akrilik tarafından üretilmiştir. Üreticinin çalışabildiği en yüksek kalınlıktaki akrilik malzeme 40 mm ölçüsünde olabilmektedir. Numune çalışmalarımızda ise optik cihazların çalışma kapasitesi çerçevesinde 20 mm kalınlığında olan dökme akrilik PMMA malzememize 10 mm kalınlığa kadar düzlem yüzey frezelemesi yapılmış ve sonrasında belirlemiş olduğumuz parametrelerde işlenmiştir.

Çizelge 3.2. PMMA dökme akrilik hammadde teknik özellikleri (Anonim 2024)

Genel Özellikler	Metod	Birim	Değer
Yoğunluk	ISO 1183 - 1	gr/cm^3	1,19
Su Emilimi	ISO 62	%	0,5
Rockwell Sertliği	ISO 2039-2	M	103
Mekanik Özellikler			
Çekme Esneklik Modülü	ISO 527-2/1B/1	MPa	3065
Çekme Mukavemeti	ISO 527-2/1B/1	MPa	78,1
Çekme Uzaması	ISO 527-2/1B/1	%	4,2
Eğilme Modülü	ISO 178	MPa	3610
Eğilme Mukavemeti	ISO 178	MPa	127,8
Izod Çentiksiz	ISO 180/U1	Kj/kg	14,8
Izod Çentikli	ISO 180/A1	Kj/kg	1,7
Charpy Çentiksiz	ISO 179 – 1FU	Kj/kg	19,8
Charpy Çentikli	ISO 179 – 1EA	Kj/kg	1,4
Termal Özellikler			
Vicat Yumuşama Sıcaklığı	ISO 306	°C	En az 110
Doğrusal Genleşme Kats.	ISO 11359 - 2	Mm/m°C	$7x10^{-5}$
Yük Altında Eğilme Sıc.	ISO 75-2/A	°C	104,58
Isıtma ile Boyut Değişimi	Annex A	%	2,4
Özgül Isı Kapasitesi	-	J/g-°C	1,46

Termal İletkenlik	-	W/mK	0,187
Optik Özellikler			
Işık Geçirgenlik	ISO1468	%	92
Pusluluk	ISO14782	%	0,5
Kırılma Indisi	ISO 489		1,49

3.1.3. CNC Freze

Dökme akrilik PMMA malzemelerin frezelenmesi için kullanılan makina aşağıdaki DMG Mori marka DMU 75 model nümerik kontrollü freze tezgahıdır.



Şekil 3.8. CNC kontrollü freze tezgahı

3.1.4. Pürüzlülük Test Cihazı

Frezelenmiş PMMA parçaların ve 3B polimerizasyon teknolojisi ile üretilen parçaların ardıl işlem öncesinde ve sonrasındaki optik olarak inceleme süreçlerinde pürüzlülüğün etkisinin bilinmesi ve kontrol altında tutulması sonuçların analizinde ve yorumlanlmasında büyük öneme sahiptir. Bu parametrenin düzenli olarak takip edilmesi ve yorumlamalarda dikkate alınması gereklidir. Bu işlemlerde yüzey pürüzlülük testleri için kullanılan cihaz RTP80 + TL90 modelidir.



Şekil 3.9. Yüzey Pürüzlülük Test Cihazı, Model : RTP80 + TL90

3.1.5. Mikroskop

Üretilen fotopolimer reçinelerin ve PMMA numunelerinin görüntülerini almak için Zeiss marka Stemi508 model mikroskop kullanılmıştır. Bu sayede üretim parametreleri ve takım yolları detayları kontrol edilmiştir.



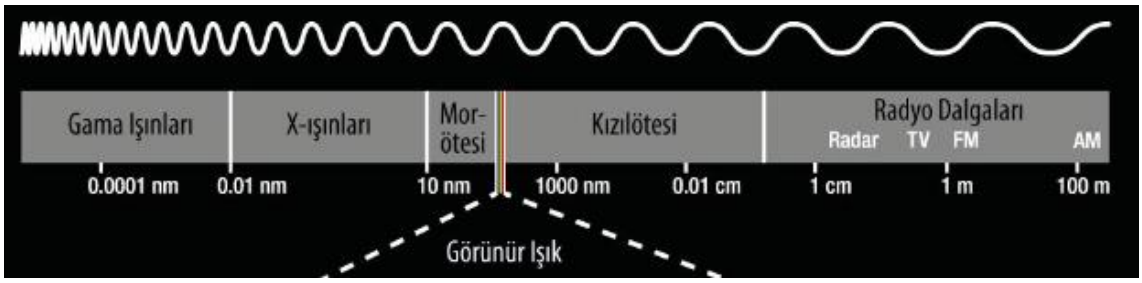
Şekil 3.10. Zeiss Stemi 508 Mikroskop

3.1.6. Spektrometre Cihazı

Spektrometre fiziksel bir özelliğin spektral bileşenlerini ayıran ve ölçen bir cihazı tanımlayan genel terimdir. Endüstride kullanılan farklı spektrometreler mevcuttur ancak en yaygın olanları nükleer manyetik rezonans (NMR) spektrometresi, kütle spektrometresi ve optik spektrometredir. Bu çalışmada çalışmalarımızda optik spektrometre kullanılmıştır. Dolayısıyla optik spektrometrelerden kısmen bahsedilecektir.

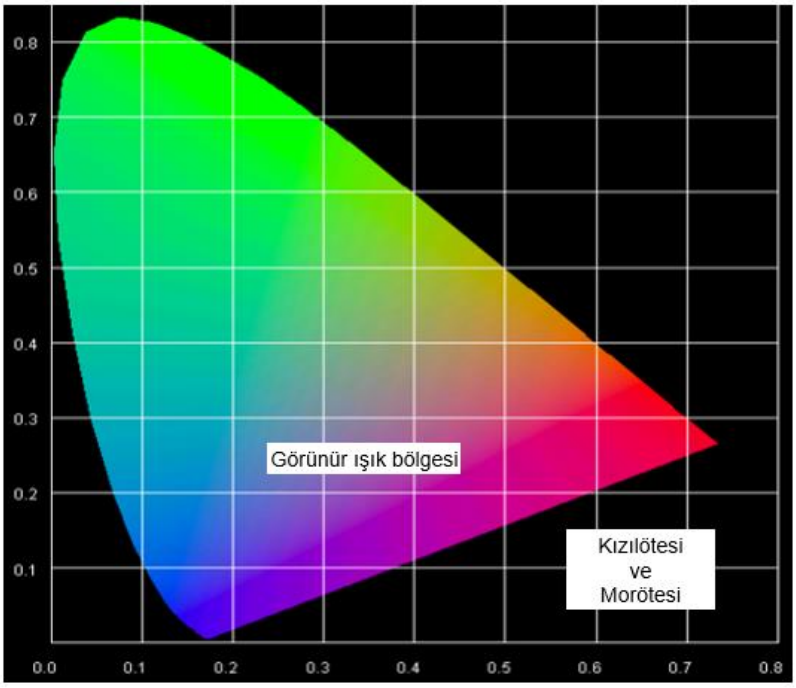
Optik spektrometre, elektromanyetik spektrumun belirli bir bölümü üzerindeki ışığın özelliklerini ölçmek için kullanılan ve tipik olarak spektroskopik analizde malzemeleri tanımlamak için kullanılan bir araçtır. Ölçülen değişken çoğunlukla ışığın yoğunluğudur ancak ışığın spektrumu ve spektrum değişimi de tespit edilebilir. Optik spektrometreler

ayrıca gama ışınları ve X ışınlarından uzak kızılötesine kadar geniş bir dalga boyu aralığında çalışabilir.



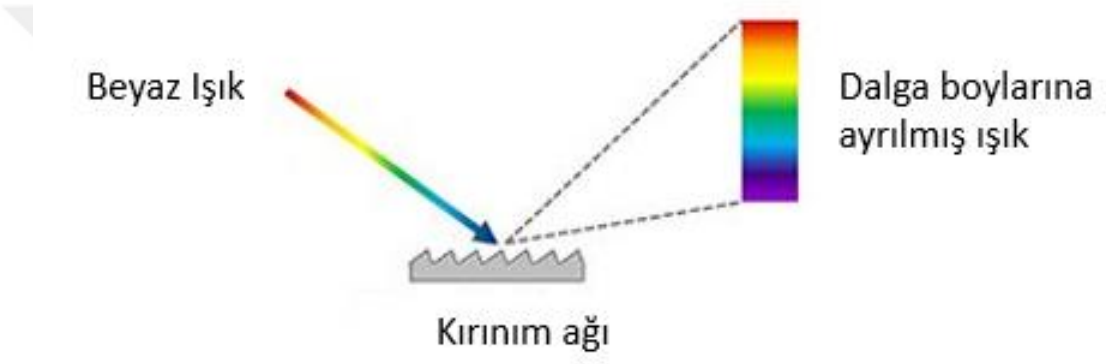
Şekil 3.11. Dalga boyları ve ışınlar (nm) (Anonim, 2024)

Optik spektrometrenin amacı, elektromanyetik radyasyonun bir numune ile etkileşimini (absorbsiyon, yansıma, saçılma) veya bir numuneden elektromanyetik radyasyonun emisyonunu (floresan, fosforesans, elektrolüminesans) ölçmektir. Optik spektrometreler, spektrumun ultraviyole, görünür ve kızılötesi dalga boyu bölgelerini kapsayan ışık olan elektromanyetik spektrumun optik bölgesi içine düşen elektromanyetik radyasyonla ilgilidir.



Şekil 3.12. Görülebilir ışık bölgeleri (nm)

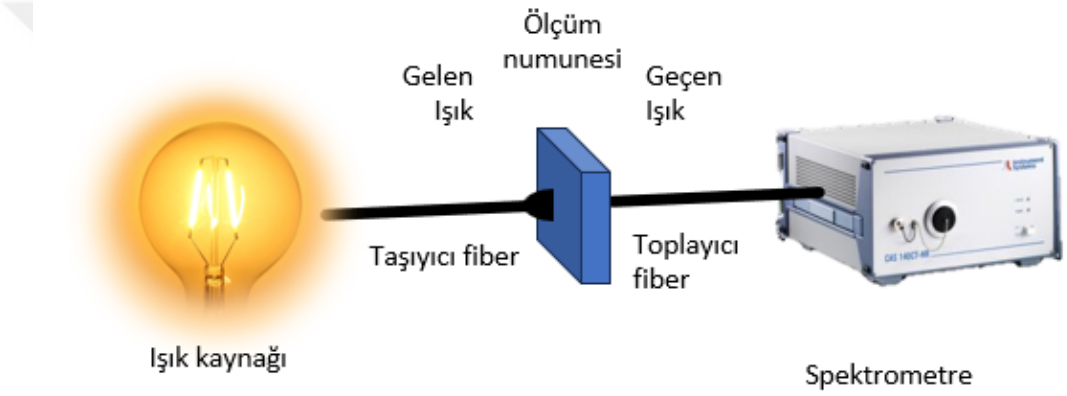
Işığın spektrumu hakkında maksimum bilgi elde etmek için ışığın etkileşimi veya emisyonu, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülmelidir ve bu nedenle tüm optik spektrometrelerin ortak özelliği, dalga boyu seçimi için bir mekanizmadır. Doğru dalga boyu seçimi ve spektrumların oluşturulması için ışığı kendisini oluşturan dalga boylarına ayıran bir dağıtıcı eleman gereklidir. Tüm modern spektrometrelerde bu dağıtıcı eleman, ızgaraya gelen çok renkli ışığı mekansal olarak ayırmak için yapıcı ve yıkıcı girişimin kullanıldığı bir kırınım ızgarasıdır.



Şekil 3.13. Kırınım ızgarası ile ışığın kendisini oluşturan dalga boylarına dağılımı (Anonim, 2024)

Kırınım ızgaraları, çok renkli bir ışık kaynağından ışığın belirli bir dalga boyunu seçmek için kullanılan bir cihaz olan monokromatörün önemli bir bileşenidir. Bir monokromatörde kırınım ızgarası, çıkış yarığına hizalanan ve bu yarıktan geçen dalga boyunu değiştirmek için döndürülür. Uyarma monokromatörleri, beyaz bir ışık kaynağından numuneye ulaşmak için istenen uyarma dalga boyunu seçmek için tüm spektrofotometrelerde bulunur ve spektrumlar, monokromatörü tarayarak ve sinyaldeki değişikliği bir fonksiyon olarak ölçülür.

Ayrıca, spektrometre yardımıyla bir malzemenin ışığı soğurma miktarı da ölçülebilir. Bunun için bir ışık kaynağından çıkan ışığın spektrumuna karşılık şiddeti ölçülür. Sonrasında da, ölçümü yapılacak malzeme spektrometrenin toplayıcı fiberi ile ışık kaynağından gelen fiber arasına yerleştirilerek, ölçülen spektrum aralığında malzemenin içinden geçen ışığın spektruma karşılık şiddeti ölçülür ve bu sayede malzemenin absorblaması ya da ışık geçirgenliği tespit edilir.

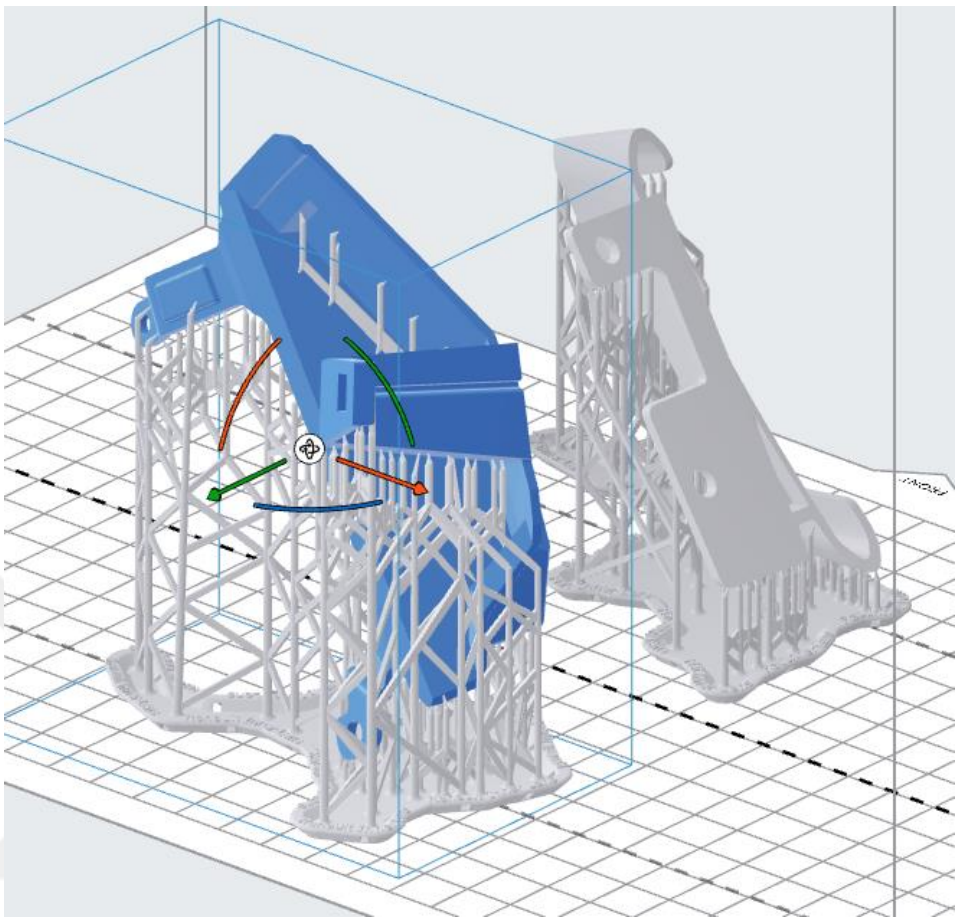


Şekil 3.14. Işık geçirgenliği ölçüm metodolojisi

3.2. Testlerde Kullanılan Numunelerin Üretim Uygulamaları

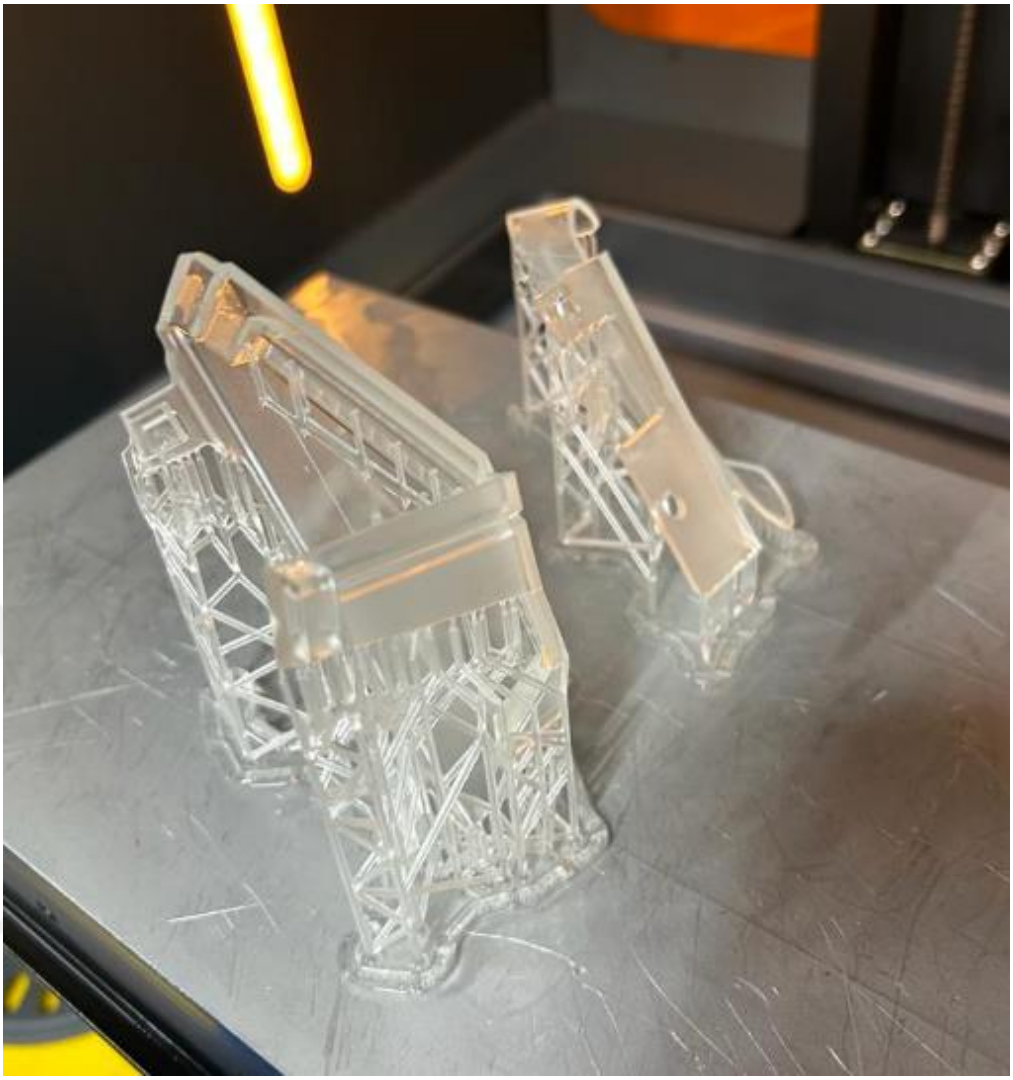
3.2.1. 3B Yazıcı Numunelerinin Oluşturulması ve Üretimi

Stereolitografi teknolojisiyle şeffaf malzeme kullanarak üretilmek üzere Catia Programı aracılığıyla 20 x 20 x 10 mm ölçülerinde parça oluşturulmuş ve STL formatına dönüştürülmüştür. 3B yazcılar kullanılarak üretilen parçaların STL data çözünürlüğü parça kalitesine etkimektedir. Özellikle düzlemsel olmayan parçalarda data format çevrimleri dikkat edilmesi gereken bir husustur.



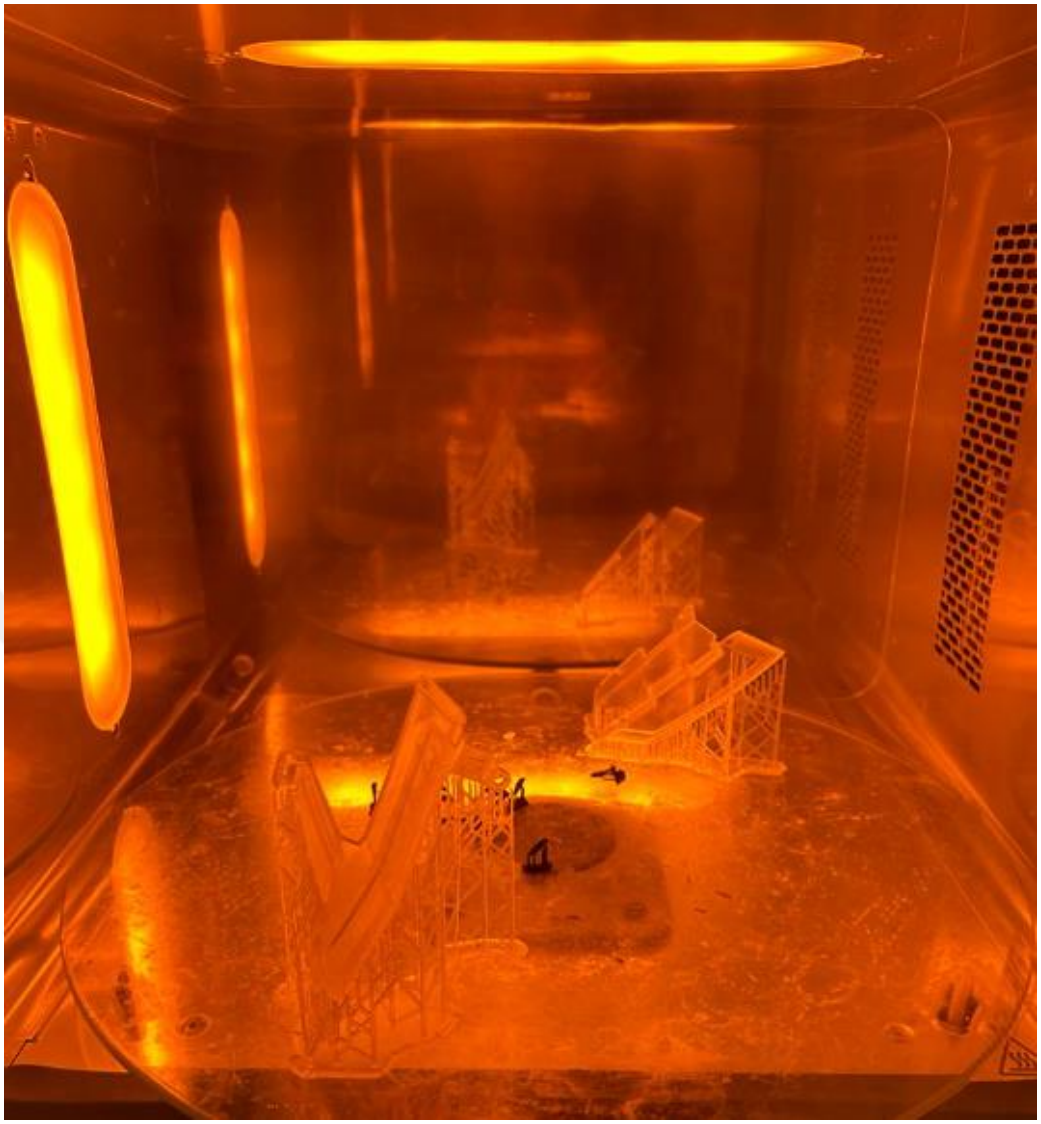
Şekil 3.15. Stereolitografi 3B Yazıcı arayüz program görüntüsü

Oluşturulan STL dosyası ve üretimi planlanan iç lens modelleri 3B yazıcı arayüz programına alınarak destek noktası ve uygun parametre atamaları yapılarak üretilmiştir.



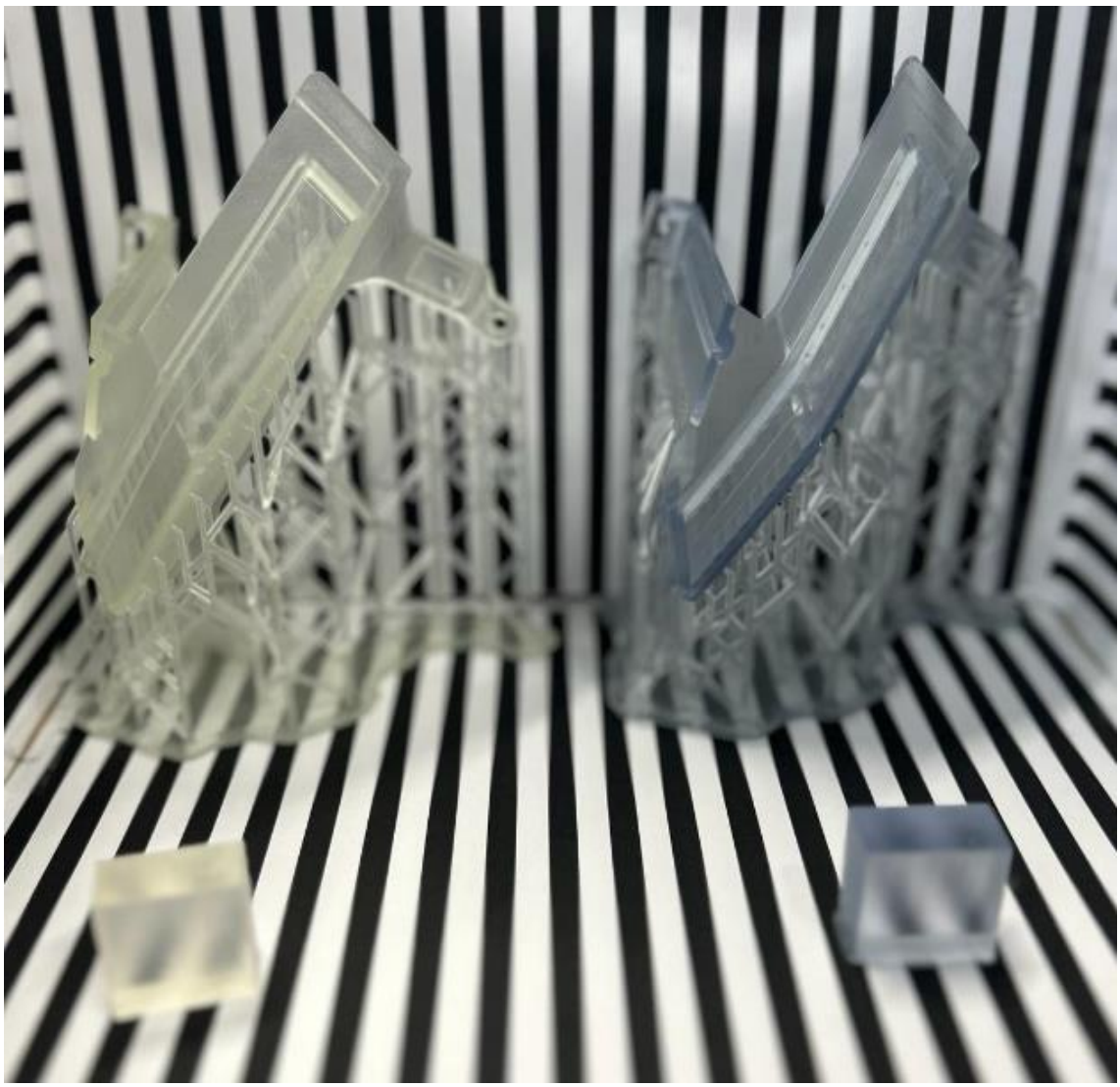
Şekil 3.16. Stereolitografi 3B Yazıcı ile üretilen numuneler

Fotopolimer reçineli sistemlerde üretimin tamamlanması parçaların hazır olduğu anlamına gelmemektedir. Yazdırılması tamamlanan parçalar, işlem bittiğinde üzerlerinde yapışkan reçine barındırırlar. Dolayısıyla izopropil alkol ya da üreticinin önerdiği kimyasallar vasıtasıyla temizlendikten sonra her hammaddenin kendine özel koşullarda ultraviyole ışığına maruz bırakılırlar. Üretilen parçalar bu ardıl işlemler sonrasında hammadde üreticisinin belirtmiş olduğu teknik özelliklere ulaşırlar.



Şekil 3.17. Ultraviyole banyo uygulaması

Bu üretim ve ardıl temizlik işlemleri sonrası mat yüzeylere sahip yarı şeffaf parçalar elde edilir. Şekil 3.9 dan da görüldüğü gibi ardıl temizlik işlemleri tamamlanan fotopolimer sistem çıktısı parçalardaki şeffaflık beklentileri karşılar seviyede değildir.



Şekil 3.18. Ardıl temizlik işlemleri tamamlanan fotopolimer yazıcı numuneleri

İki farklı üreticinin fotopolimer reçineleri ile üretilen parçalardaki yüzey pürüzlülük ortalamaları Formlabs Clear için 1,259 µm, Envisiontech e Clear için 0,952 µm olarak ölçülmüştür. Poliş ve benzeri yüzey iyileştirme işlemleri sayesinde şeffaflık arttırılabilse de proses itibariyle insan etkisinin yüksek olması süreci standart bir işlem haline getirmekten uzak tutmaktadır. Değişen geometriler ve parçalardaki optik beklenti sebebiyle her tasarımda uygulanabilirliği söz konusu değildir. Bu konuda yapılan çalışmalardan bir tanesinde de basit ve düzlemsel geometriler tercih edilerek kontrollü dip kaplama uygulaması yapılmış ve yapılan işlemlerin pürüzlülüğü ve yüzey kalitesini iyileştirdiği fakat yüzeydeki dalgalılığı arttırması sebebiyle istenen beklentiyi

karşılamadığı görülmüştür (Hart, 2018). Dip kaplama insan etkisinin olmadığı, yüzey açısına ve vizkoziteye bağlı akış gerçekleşecek olmasından ötürü poliş işlemleri ile aynı benzerlikte sonuç vermemesi beklenmektedir.



Şekil 3.19. Yüzey iyileştirmesi yapılıp şeffaflık kazandırılan fotopolimer yazıcı numuneleri

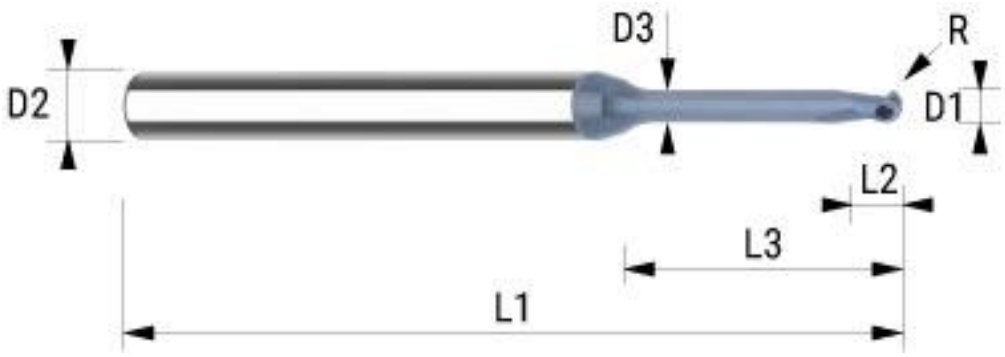
Yüzey iyileştirmesi ve şeffaflığın sağlanması için yapılan ardıl işlemler sonrasında yeni ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Formlabs Clear reçinesi için 0,135 µm, Envisiontech e Clear reçinesi ile üretilen parça için 0,112 µm olduğu görülmüştür.

Bu aşamaya kadar olan çalışmalar 3B yazıcı sistemleriyle elde edilen düzlemsel yüzeyler ve bu yüzeylerin iyileştirmesi sonrasında ortaya çıkan değişimleri içermekteydi. İkinci aşamada ise benzer çalışmalar gerçek mühendislik malzemesi olan dökme PMMA malzeme kullanılarak elde edilebilen yüzeyler üzerine olacaktır.

3.2.2. Polimetil Metakrilat Numunelerinin Oluşturulması ve Üretimi

PMMA malzemesi kullanılarak yapılan frezeleme çalışmalarında DMG Mori marka DMU 75 model nümerik kontrollü freze tezgahı ve soğutma sıvısı olarak bor yağı kullanılmıştır.

Minimum yüzey pürüzlülüğü elde etmek için gereken parametreleri belirlemeyi ve bu parametreler ile değişken formdaki optik yüzeyler içeren parçaların işlenebilirliğinin tekrarlanabilirliğini amaçlamamız sebebiyle farklı çaplarda Inova Tools marka küre takımlar kullanılmıştır. İlk deney çalışmasında kullanılan küre takıma ait katalog bilgileri şu şekildedir;



Şekil 3.20. Kesici takım kısımları (Anonim, 2024)

Çizelge 3.3. Ø3 mm Küre takım ölçüleri (Anonim, 2024)

Kesme çapı	D1	3 mm
Şaft çapı	D2	6 mm
Kesme kenarı uzunluğu	L2	2,5 mm
Tam boy	L1	55 mm

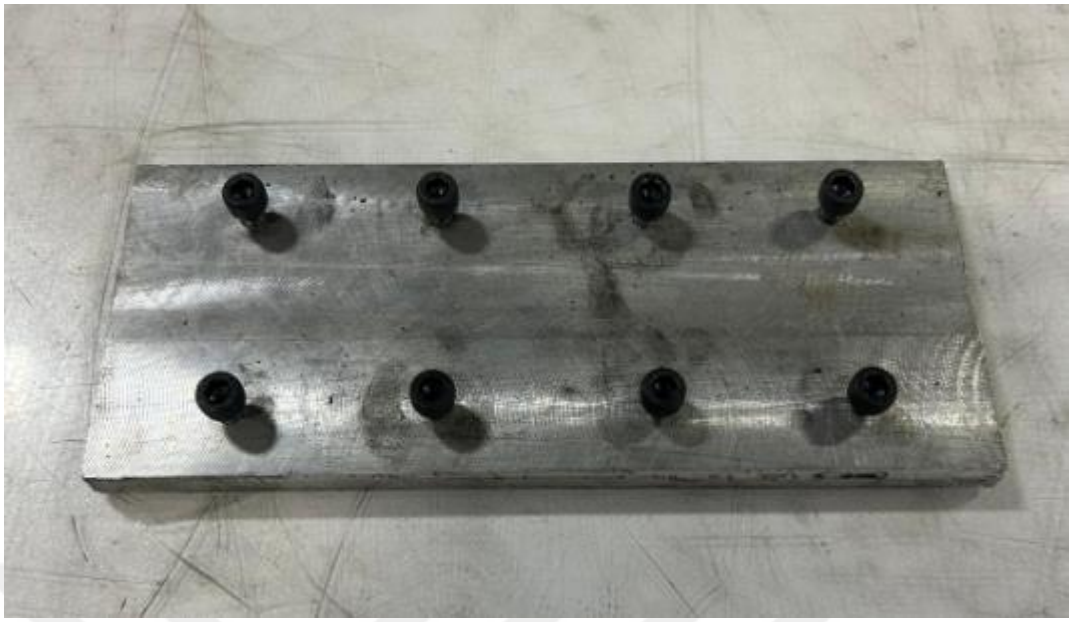
Serbest işleme çapı	D3	2,9 mm
Serbest işleme uzunluğu	L3	6 mm
Yarıçap	R	1,5 mm
Diş sayısı	Z	2
Şaft tasarımı		HA
Kaplama		ALTiN

Talaşlı imalat sürecinde ilk aşamada Ø 3 mm küre takım ile farklı parametrelerde 9 adet düzlemsel yüzey numunesi işlenmiştir. Numunelerin ölçüleri optik testlerin yapılacak olduğu cihazların kapasitesi sebebiyle 30 x 30 mm' lik yüzeyler olarak belirlenmiştir. İşleme parametreleri ise aşağıdaki gibidir;

Çizelge 3.4. Ø3 mm Küre takım ile işleme parametreleri

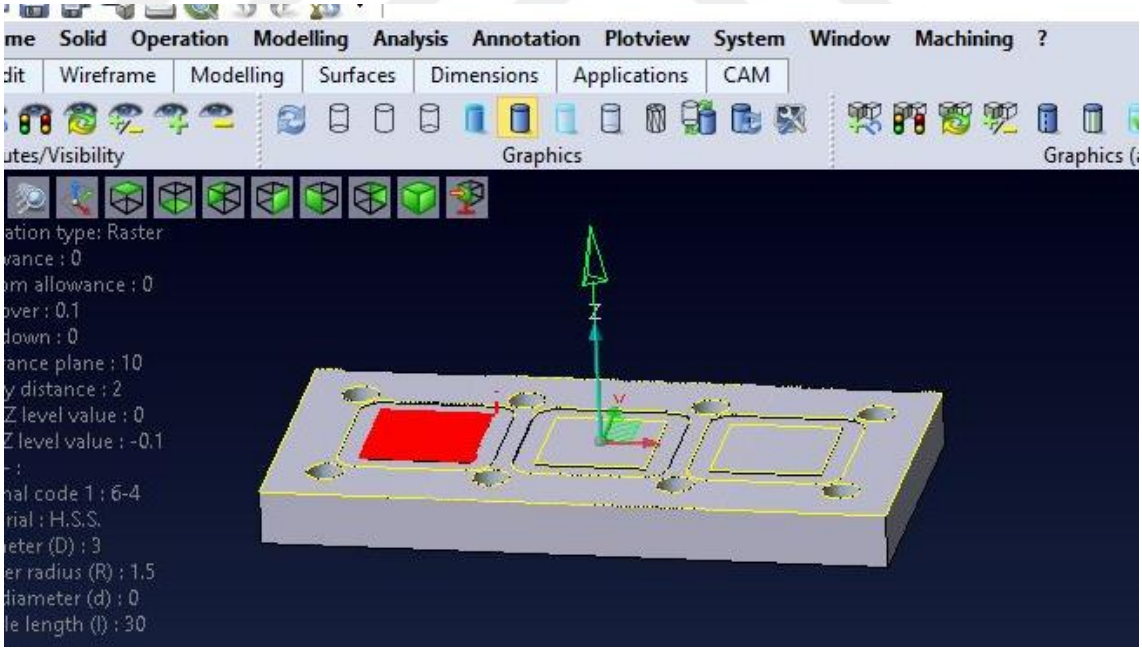
Parça No	**Takım Çapı (mm)**	**Ağız - Diş sayısı Z**	**Yanal Kayma**	**Kesme Hızı (m/min) V**	**Devir (n) (rev/min)**	**Fz (mm)**	**İlerleme Hızı (mm/min)**	**Talaş Derinliği (mm)**	**İşleme yönü**
1	3	2	0,1	18,84	2000	0,005	20	0,1	Çift Yönlü
2						0,01	40		
3						0,02	80		
4				37,68	4000	0,005	20		
5						0,01	40		
6						0,02	80		
7				75,35	8000	0,005	20		
8						0,01	40		
9						0,02	80		

Numunelerin üretimi esnasında atıklık ve tırlama gibi durumları engellemek ve bağlama işlemlerini kolaylaştırmak adına sabitleme aparatı üretilmiştir. Bu aparat mengeneye bağlanarak parçanın işlem için paralelliği sağlanmıştır.



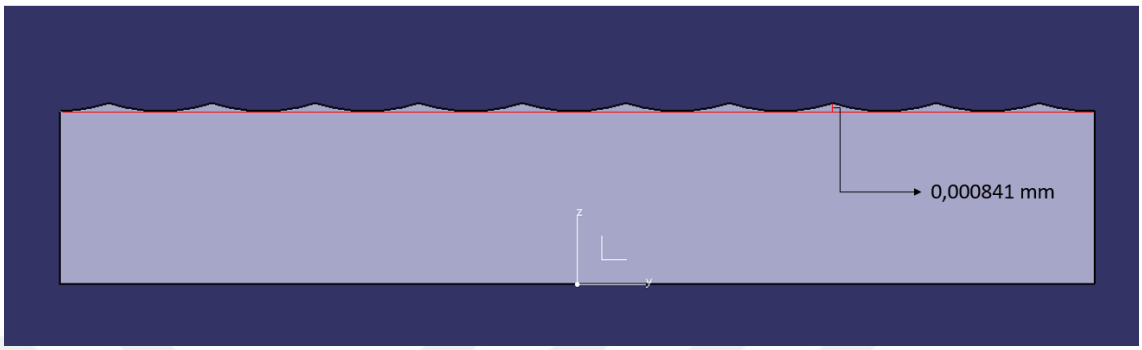
Şekil 3.21. Frezelemede kullanılan bağlama aparatı

Numunelerin nümerik kontrollü programlaması için VISI Programından yararlanılmıştır.

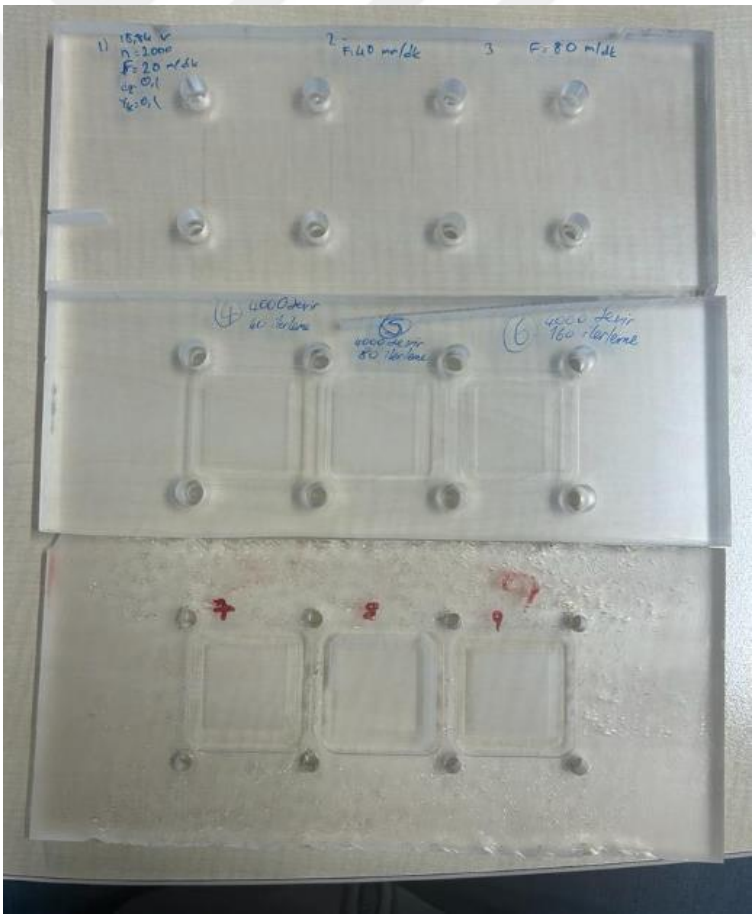


Şekil 3.22. Programlamada kullanılan VISI arayüzü

Talaşlı imalat için 2 paso işlem uygulanmıştır. Bu işlem için ilk pasoda 89,75 mm³, 2nci pasoda ise 90 mm³ talaş kaldırılmıştır. Bu işlem sonrası oluşan yüzey profili ise aşağıdaki gibidir. Talaşlı imalat sonrası yüzeydeki en yüksek nokta 0,000841 mm yüksekliğindedir.



Şekil 3.23. Frezeleme sonrası oluşan yüzey profili



Şekil 3.24. Ø 3 mm kesici takım ile frezelenen numune yüzeyler

Ardından 3 erli gruplar halinde üretilen numuneler yüzeyleri korumaya alınarak kesilip numaralandırılmış ve test - kontroller için uygun hale getirilmiştir.

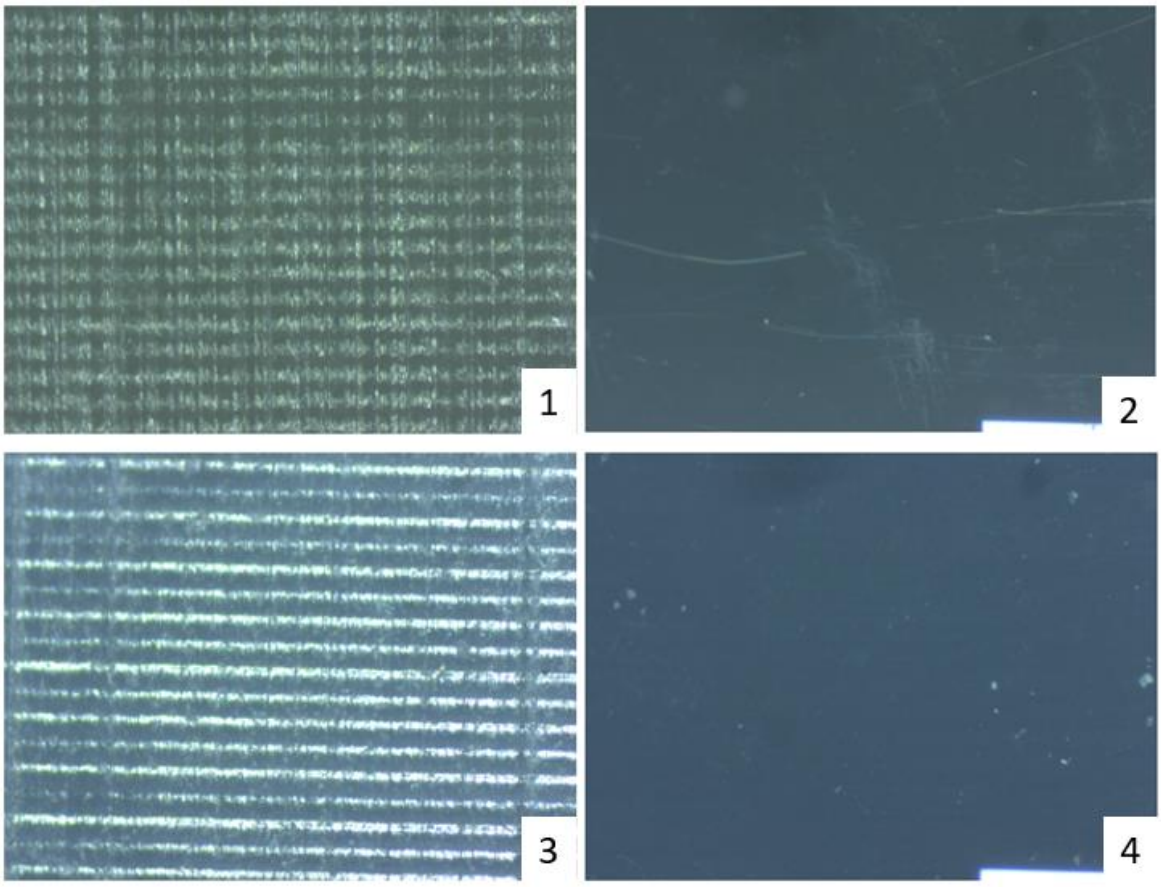


Şekil 3.25. Optik kontrolleri yapılan numuneler

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

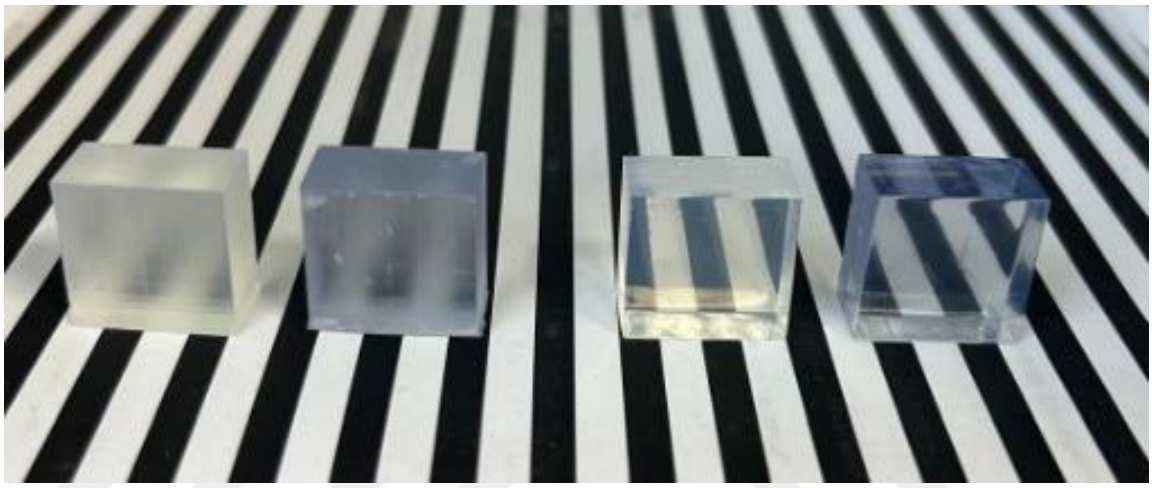
4.1. 3B Yazıcı Numunelerinin Değerlendirilmesi

Fotopolimer reçineli stereolitografi teknolojisi ile elde edilen numunelerde yapılan yüzey iyileştirmesi sonrasında ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişim ve saydamlıktaki artış çıplak göz ile bile görülebilmektedir. Poliş işlemi ile 1 ve 3 numaralı işlemsiz yüzeylerdeki katman izleri yok edilerek parlak 2 ve 4 numaralı yüzeyler elde edilmiştir. Yüzeydeki dalgalılık seviyesi de optik sonuçlara olumlu etkiyebilecek seviyede iyileşme göstermiştir. İnsan etkisi ile yapılan yüzey iyileştirme işlemleri, dip kaplama ile paralel sonuç vermediğini göstermektedir.



Şekil 4.1. Mikroskop altı görüntüler,
1 ve 2- Yüzey işlemi yapılmamış ve yapılmış Formlabs numuneleri,
3 ve 4- Yüzey işlemi yapılmamış ve yapılmış Envisiontech numuneleri

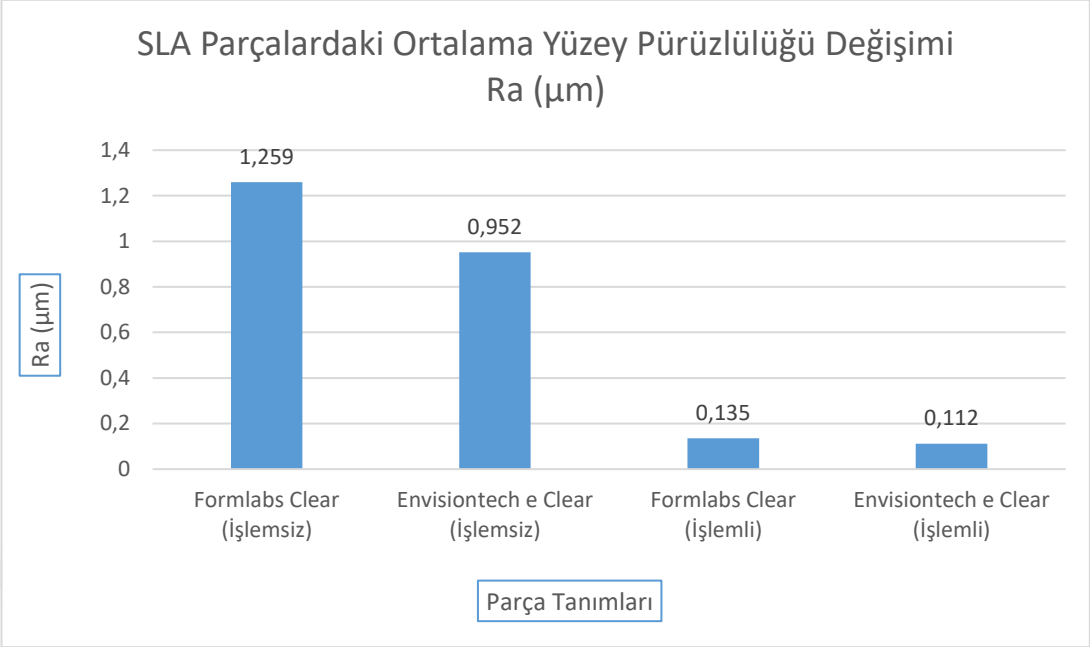
Aynı parametreler, konum ve üretim programı kullanılarak üretilmesine rağmen termizlik ve kürlenme işlemleri sonrası 2 farklı reçine ile üretilen numunelerden alınan yüzey pürüzlülük ortalamalarının arasındaki % 32 lik fark dikkat çekicidir. Benzer bir çalışmada bu farklılık aynı üreticiye ait siyah ve beyaz renkli numunelerde de görülmüştür. (Sevilgen ve ark. 2023). Bu ve benzeri sonuçlar fotopolimer 3B yazıcı teknolojilerindeki kullanıcı, hammadde, makina, çevresel faktörler vb. değişken parametrelerin üretim kalitesinde ve sürdürülebilirliğinde büyük etkisinin olduğu kanaatini desteklemektedir.



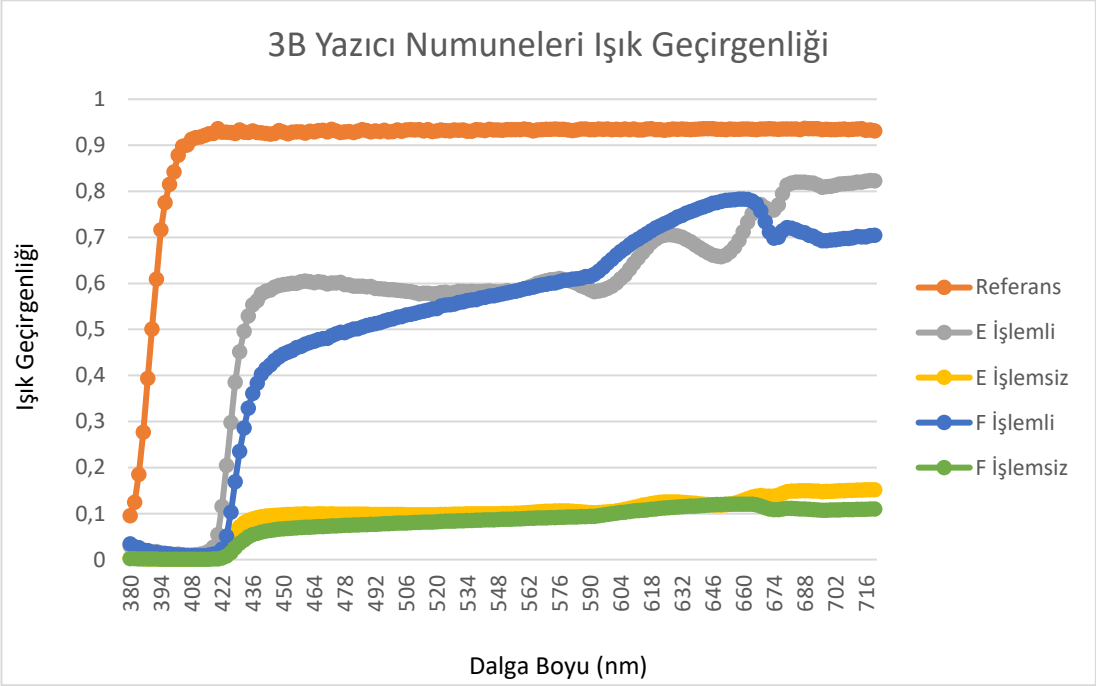
Şekil 4.2. SLA teknolojisi ile üretilen numuneler

Çizelge 4.1. SLA teknolojisi ile üretilen numunelerin test sonuçları

Tanım	Temizlik ve kürleme sonrası		Yüzey işlemleri sonrası	
	Formlabs Clear Reçine	Envisiontech e Clear Reçine	Formlabs Clear Reçine	Envisiontech e Clear Reçine
Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	1.259	0.952	0,135	0,112
Ortalama Yüzey Dalgalılığı Wa (µm)	1.544	3.289	0,452	0,516



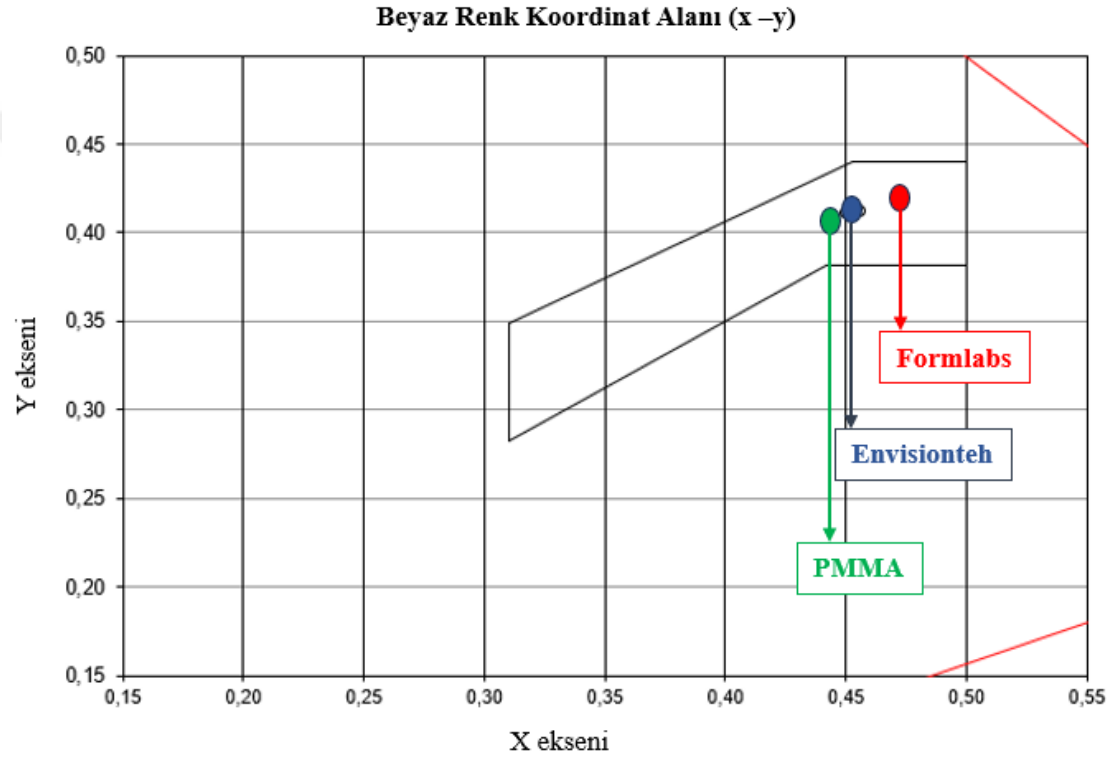
Şekil 4.3. SLA teknolojisi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülük kıyaslaması



Şekil 4.4. SLA teknolojisi ile üretilen parçaların ışık geçirgenlikleri

Resim, çizelge ve şekillerden anlaşıldığı gibi SLA teknolojisi ile üretilen parçalara yapılan yüzey iyileştirme işlemleri sonrasında yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve

ışık geçirgenliği iyileşmektedir. Ana hedef olan ışık geçirgenliğindeki artışın ise yaklaşık %400 olduğu görülmektedir. Her ne kadar optik performansta gözle görülür artış elde edilse de aydınlatma sektörüne hitap edecek performans karşılanamamış ve referans ışık geçirgenliğine ulaşılamamıştır. Bu ve benzeri hammaddelerin ürün geliştirme ve optik beklentinin olmadığı maket, model - prototip çalışmalarında kullanılabilir olduğu görülmüştür. 10 mm kalınlığındaki numuneler beyaz renk bölgesinde ve koordinatlarının birbirine yakın seviyelerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.5. SLA teknolojisi ile üretilen numunelerin renk koordinatları

4.2. CNC Freze ile Üretilen Numunelerin Değerlendirilmesi

CNC Freze ile üretilen numunelerde ana hedef, imalat tamamlandığı gibi parçaların küçük tesviye işlemleri sonrası kullanılabilir durumda olmasıdır. Özellikle otomotiv aydınlatma sektöründe optik performans beklentisi olan parçaları insan etkisinden uzak tutarak, sürecin standart hale getirilmesidir. Bu sebeple CNC ile elde edilen yüzeylerde iyileştirme uygulanmamıştır. Mekanik yüzey iyileştirme işlemleri parçaları kozmetik

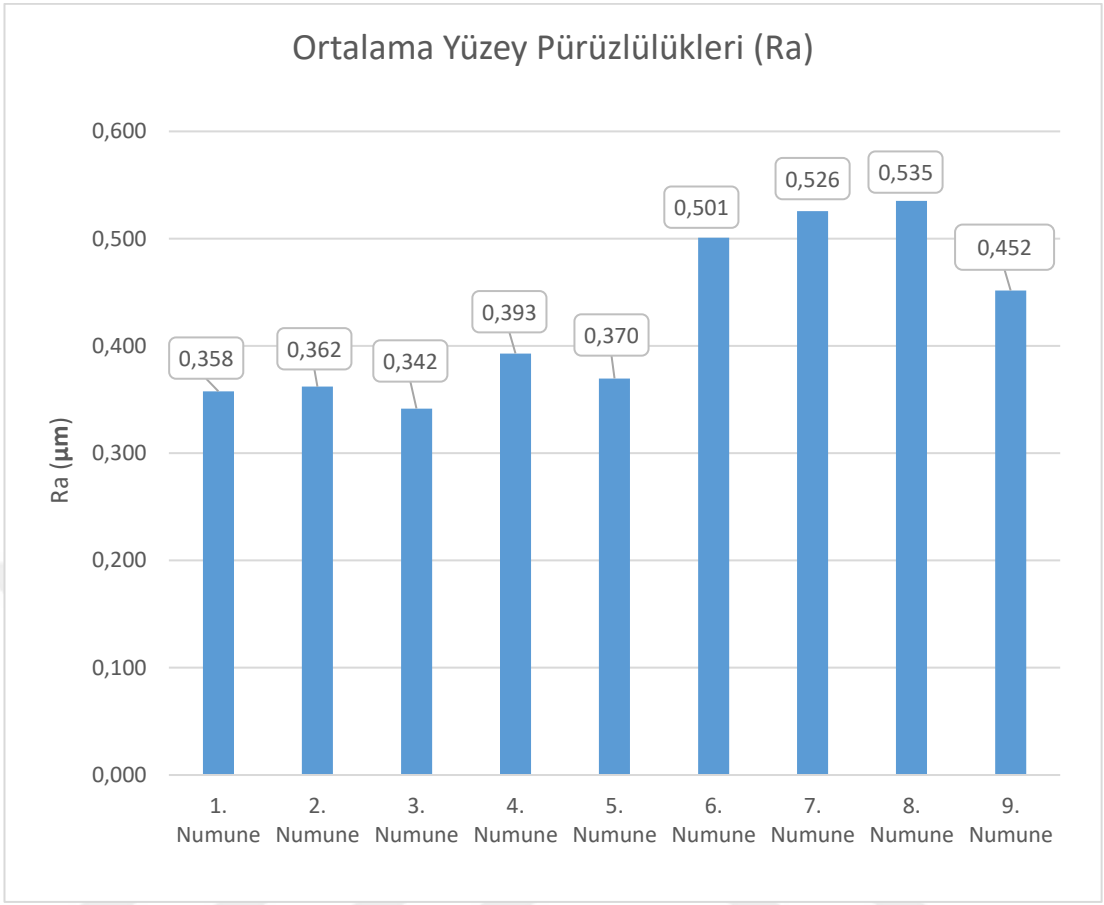
olarak uygun hale getirse de optik olarak performansını bozabilmektedir. Bu konu farklı metodlar uygulanarak ilerleyen dönemde çalışılabilecek konulardandır.

Talaşlı imalatı tamamlanan parçalara ait yüzeylerin mikroskop altındaki görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.2. Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin yüzey pürüzlülük ortalamaları (µm)

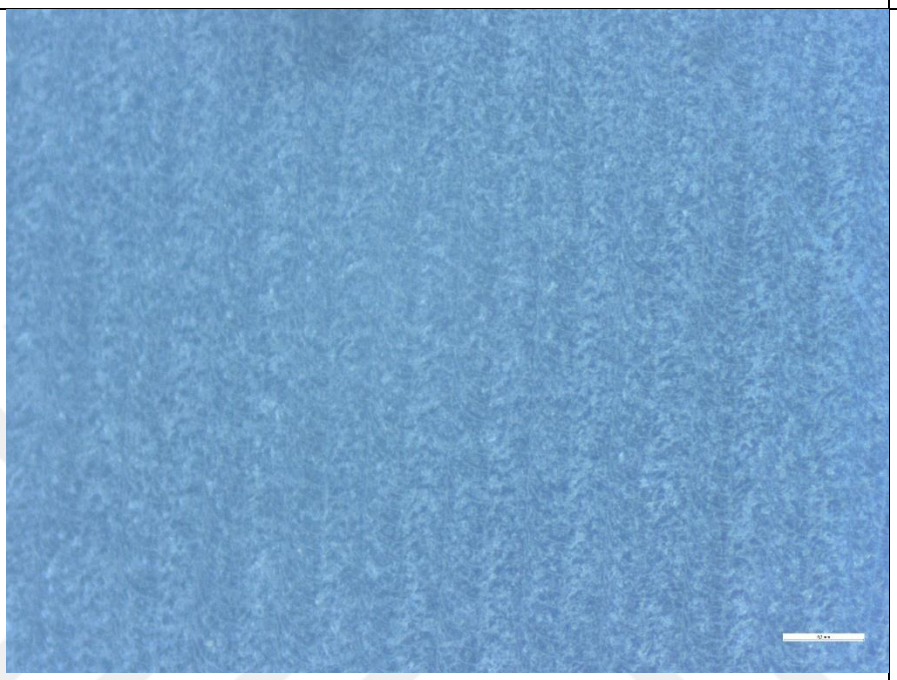
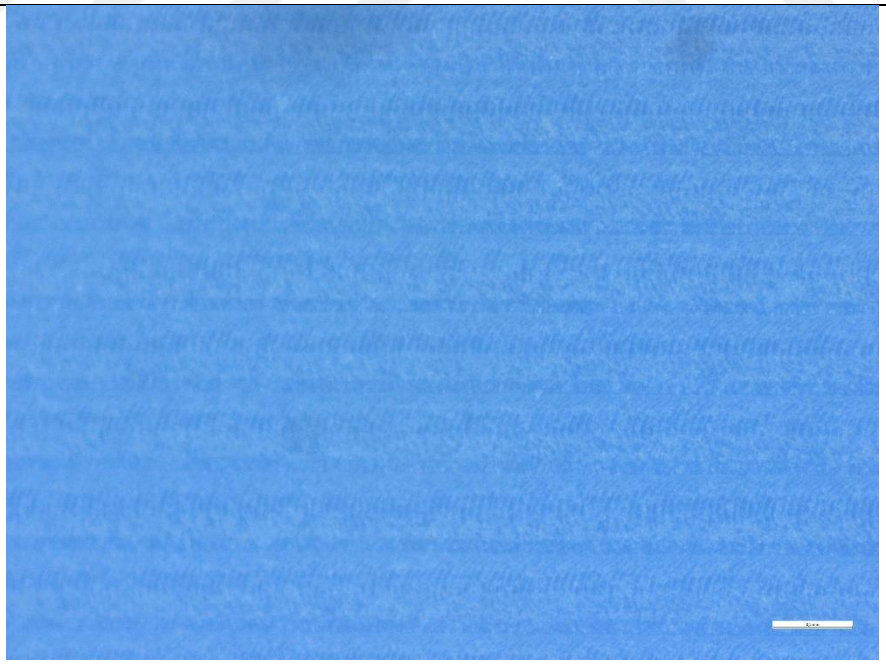
Numune No	1. ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	Ra (ort)
1. Numune	0,347	0,36	0,366	0,358
2. Numune	0,388	0,33	0,368	0,362
3. Numune	0,364	0,337	0,324	0,342
4. Numune	0,356	0,373	0,45	0,393
5. Numune	0,412	0,393	0,304	0,370
6. Numune	0,497	0,471	0,535	0,501
7. Numune	0,511	0,594	0,472	0,526
8. Numune	0,481	0,538	0,587	0,535
9. Numune	0,446	0,48	0,429	0,452

Pürüzlülük ölçümleri her numune için 3 farklı bölgeden alınmıştır.

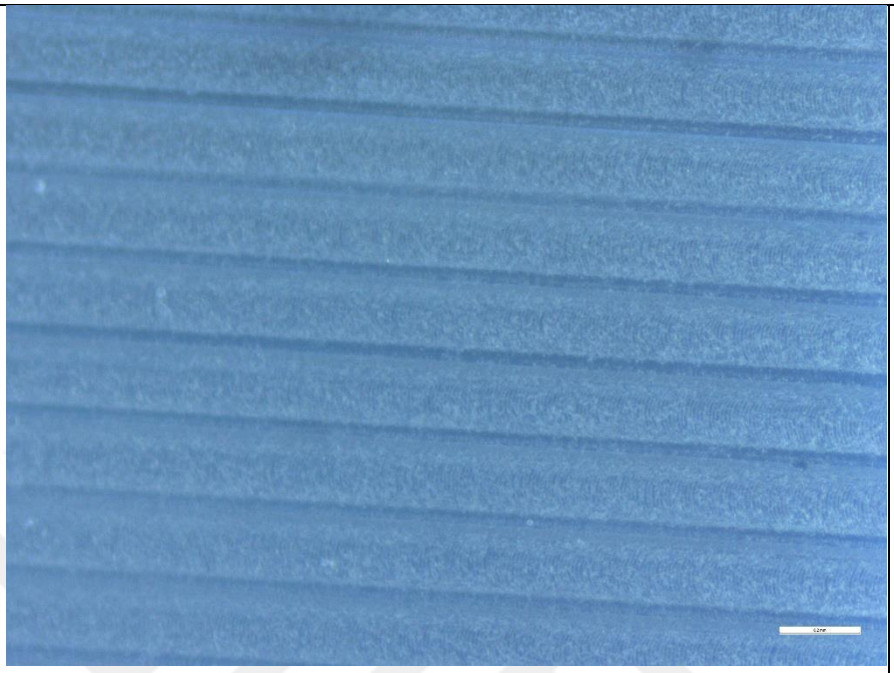
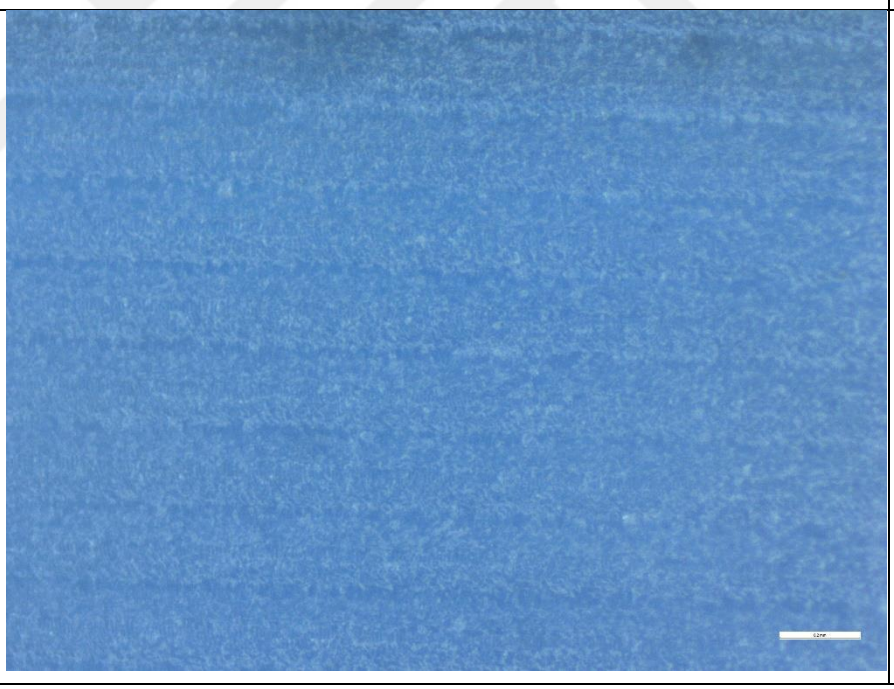


Şekil 4.6. CNC Freze ile üretilen parçaların ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

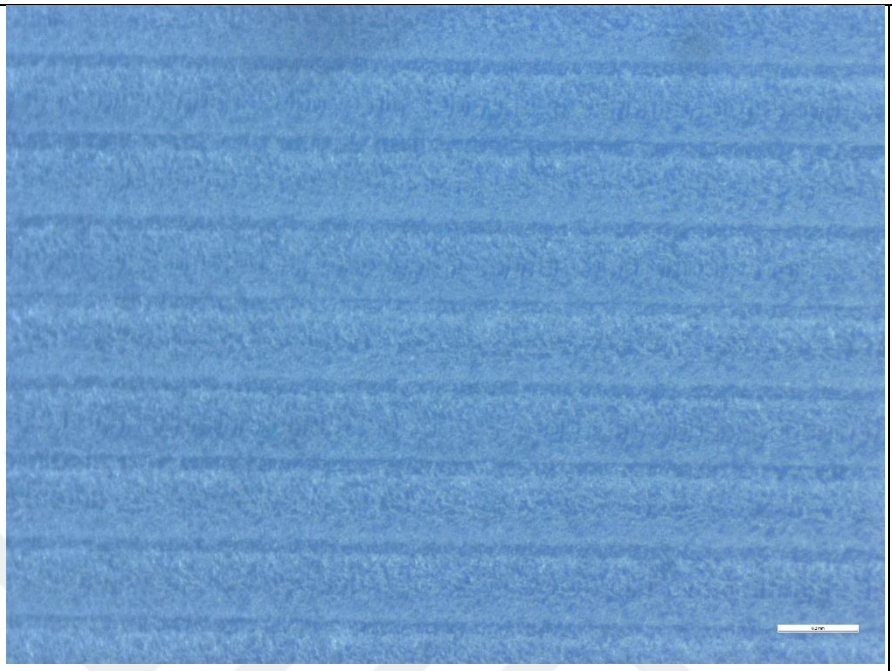
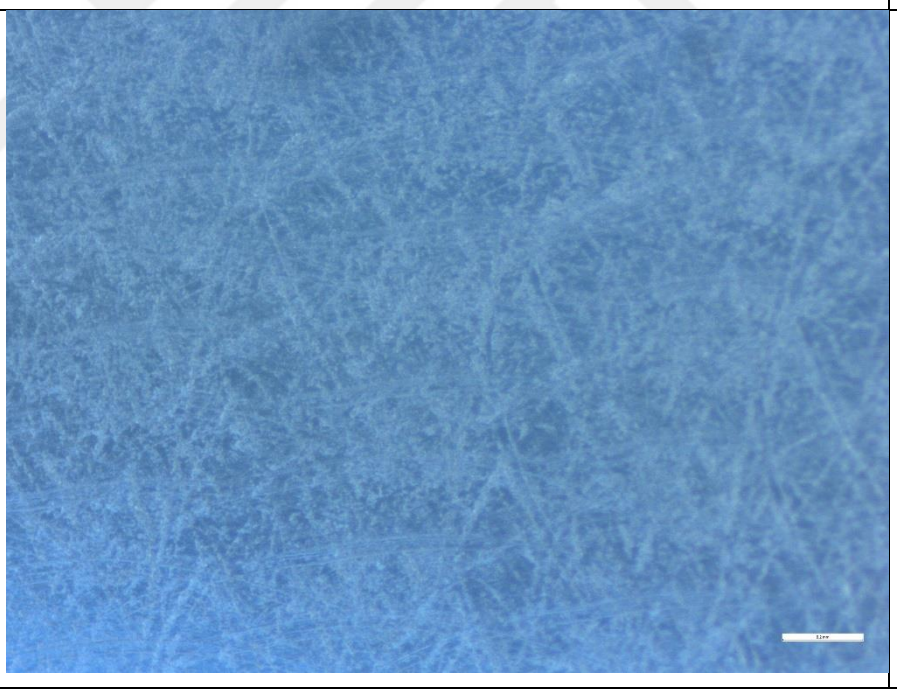
Çizelge 4.3. Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin mikroskop altı resimleri

Parça No	**Mikroskop görüntüsü Ölçek 5X**	**Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)**
1		0,357
2		0,362

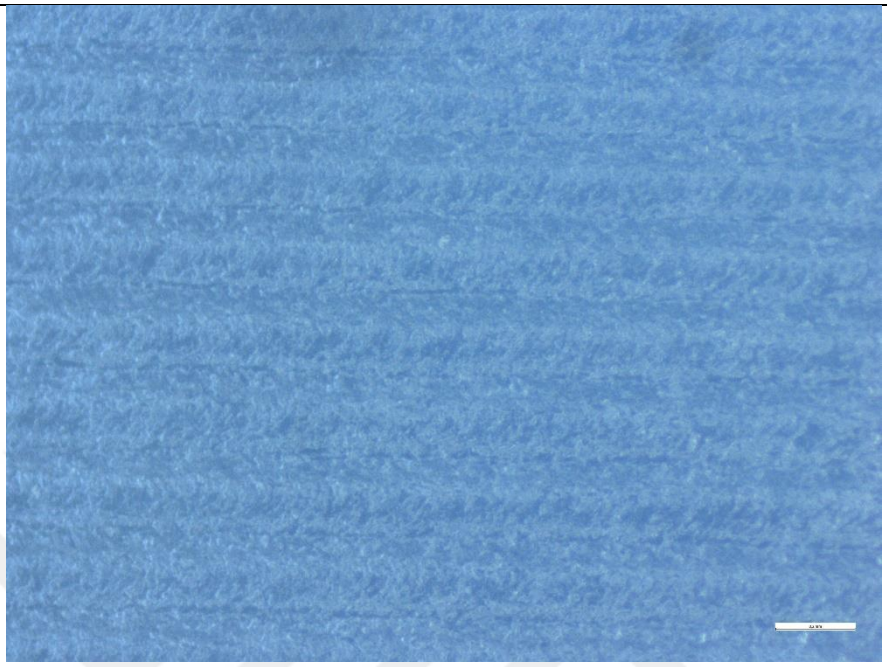
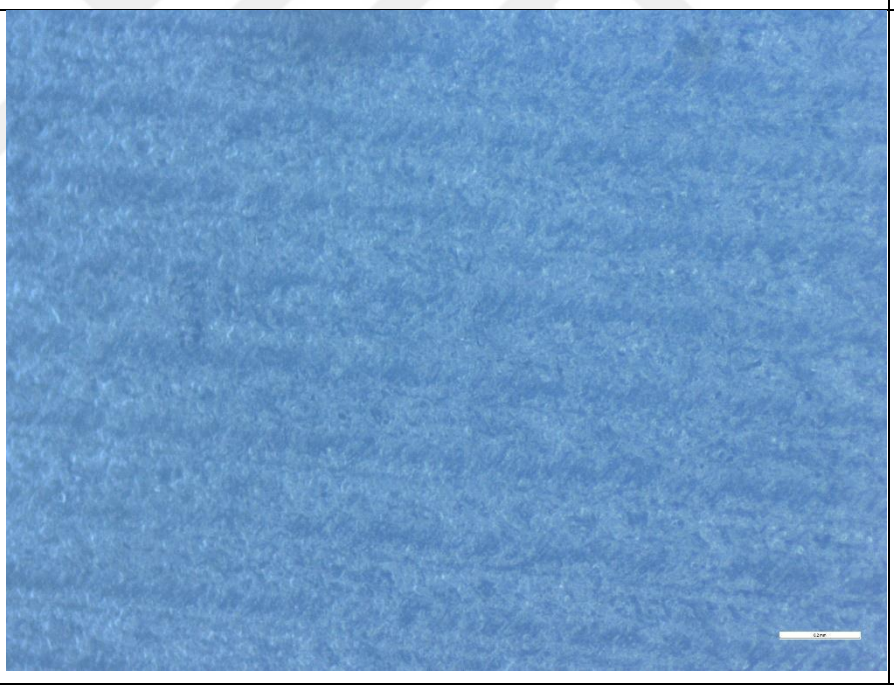
Çizelge 4.3. Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin mikroskop altı resimleri (devam)

3		0,341
4		0,393

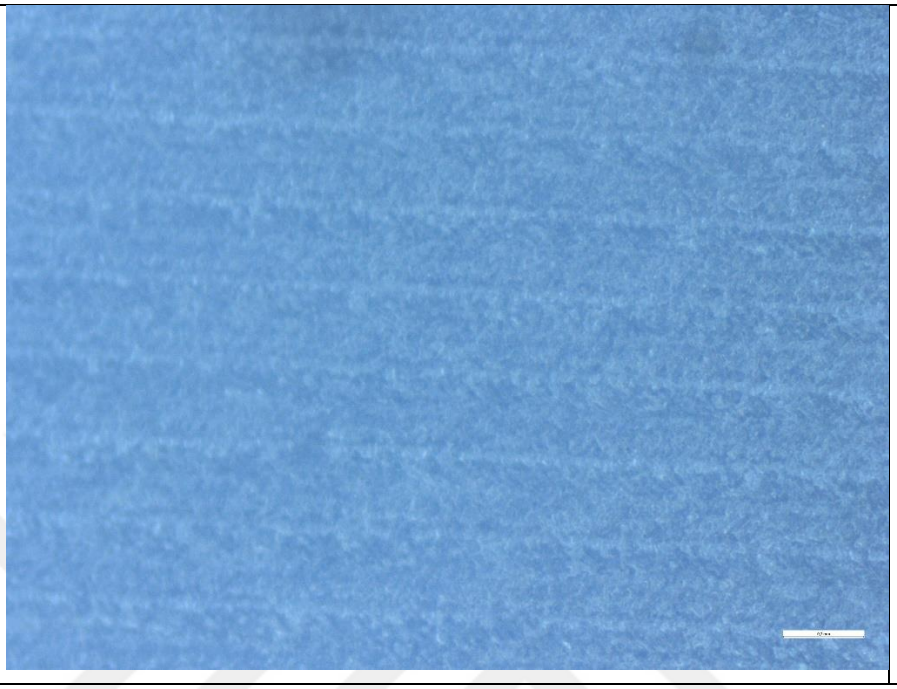
Çizelge 4.3. Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin mikroskop altı resimleri (devam)

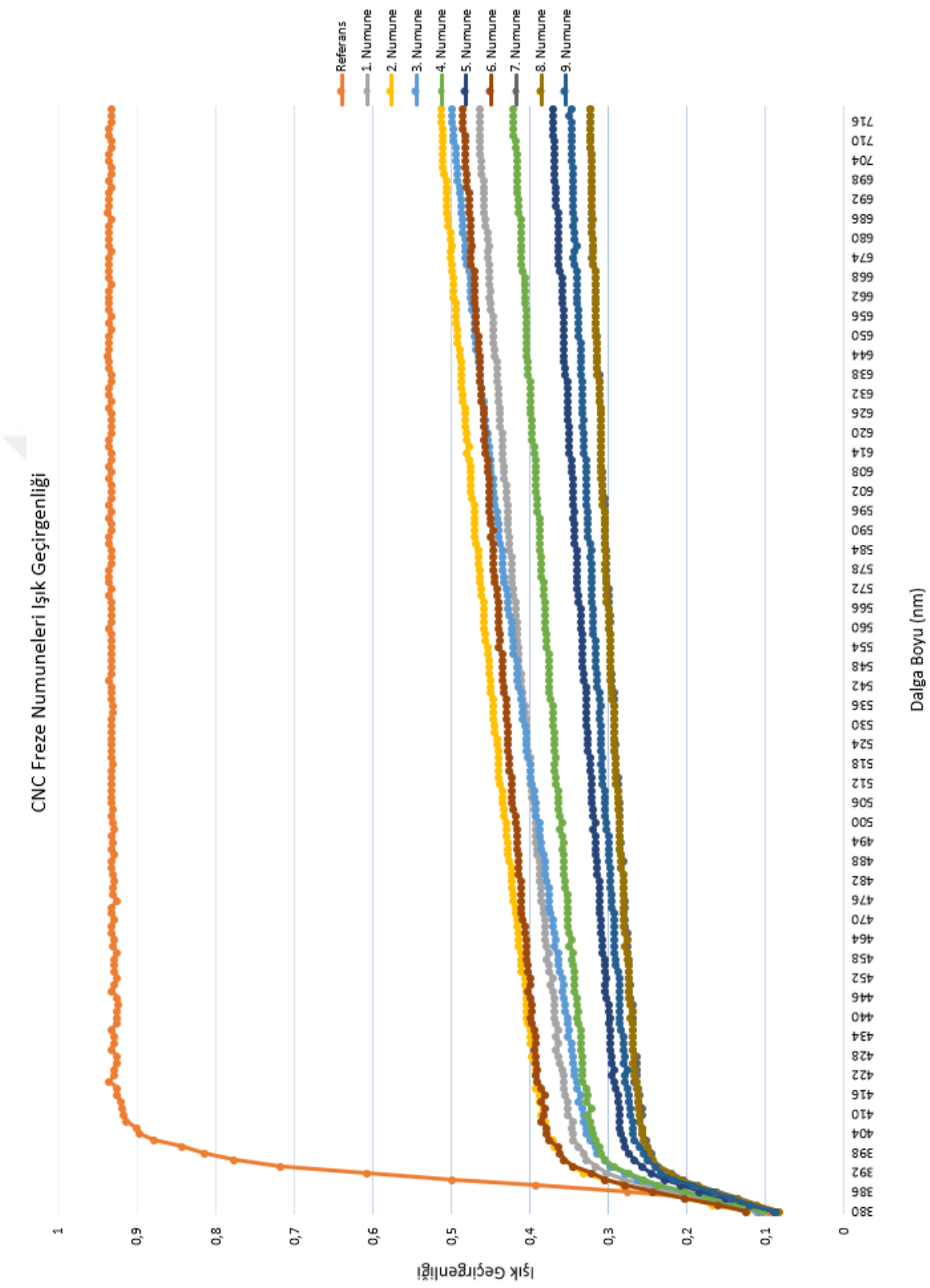
5		0,37
6		0,501

Çizelge 4.3. Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin mikroskop altı resimleri (devam)

7		0,525
8		0,535

Çizelge 4.3. Ø3 mm Küre takım ile işlenen numunelerin mikroskop altı resimleri (devam)

9		0,451



Şekil 4.7. CNC Freze ile üretilen parçaların ışık geçirgenlikleri

5. SONUÇ

Sıvı reçineler ile üretilen numuneler yüzey iyileştirmesi sonrasında çıplak göz ile görülebilir iyileşmeye kavuşsa dahi renk ve geçirgenlik sonuçları incelendiğinde, otomotiv aydınlatma sektörü için optik fonksiyonel amaçlarla kullanılamazlar.

CNC ile üretilen numuneler 3 erli gruplar halinde değerlendirildiğinde;

Her grubun kendi içerisinde yüzey pürüzlülükleri ve ışık geçirgenlikleri benzer olduğu ve ilerleme hızı etkisnin göz ardı edilebilecek seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Yüzey pürüzlülük artışının optik performansın azalışı anlamına geldiği de sonuçlardan görülebilmektedir.

İlk üç numune en iyi yüzey pürüzlülüğüne sahiptir ve en iyi optik performansı göstermiştir.

Her grup bir önceki gruba göre ortalama 0,07 µm daha fazla pürüzlülüğe sahiptir. Bu pürüzlülük farkı her grup arasında yaklaşık %20 optik performans düşüşüne takabül etmektedir.

Gruplar arası değişkenin kesme hızı olduğu bilindiğinden, beklenenin aksine kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de artmış ve optik performansın azalmış olması dikkat çekicidir.

Kesme hızı ve devir sayısının en yüksek olduğu 7-8-9 numaralı numuneler gerek yüzey gerekse optik olarak en kötü performansı sergilemiştir.

KAYNAKLAR

Bagalkot, A., Pons, D. J., & Symons, D. (2021). Analysis of raised feature failures on 3D printed injection moulds. Polymers, 13(10), 1541.

Dedeakayoğullari, H., & Kaçal, A. (2020). Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi. İmalat Teknolojileri Ve Uygulamaları, 1(1), 1–12. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1081223

Groover, M. P. (2007). Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems

Anonim, 2023. Ünite Makina ve Teçhizat İçindekiler. Prof. Dr. Ayhan ÇELİK Hedefler Talaşlı Üretim Yöntemleri - pdf -(E.T. : 01.10.2023).

Anonim, 2024. Torlanamada kullanılan kesici takımlar https://www.makinaegitimi.com/gerec-ve-kullanma-yerlerine-gore-torna-kalemleri/- (E.T. : 20.05.2024).

Suh, Y. J., Lim, T. H., Choi, H., Kim, M. S., Lee, S. J., Kim, S. H., & Park, C. H. (2020b). 3D printing and NIR fluorescence imaging techniques for the fabrication of implants. Materials, 13(21), 4819.

Karagöz, İdris, Ayşe Daniş Bekdemir, and Özlem Tuna. 2021. "A Review of Used Methods and Developments in 3D Printer Technologies." Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi 9(4):1186–1213.

Gueche, Y. A., Sanchez–Ballester, N. M., Cailleaux, S., Bataille, B., & Soulairol, I. (2021). Selective laser sintering (SLS), a new chapter in the production of solid oral forms (SOFs) by 3D printing. Pharmaceutics

Mukhtarkhanov, M., Perveen, A., & Talamona, D. (2020). Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting. Micromachines, 11(10), 946.

G. D. Berglund, T.S. Tkaczyk, "Fabrication of optical components using a consumergrade lithographic printer", Optics Express 30405 27(21), (2019).

KOHN, DH., DUCHEYNE, P., "Materials for Bone and Joint Replacement", In: Williams DF, ed. Medical and Dental Materials. Weinheim, VCH:33-109, 1992

Geisler, E., Lecompère, M., & Soppera, O. (2022). 3D printing of optical materials by processes based on photopolymerization: materials, technologies, and recent advances. Photonics Research, 10(6), 1344.

Pawar, E. & PRMIT&R, MECHANICAL/ SGBAU, INDIA. (2016). A review article on acrylic PMMA. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 13(2), 01–04.

Anonim, 2024. Technical Data Sheet Acrylic (PMMA) (Polymethyl-Methacrylate) https://laminatedplastics.com/acrylic.pdf -(Erişim tarihi: 29.01.2024).
Anonim, 2024. Numune üretiminde kullanılan PMMA teknik özellikleri https://www.castplas.com.tr/teknik-bilgi-formu.html -(Erişim tarihi: 29.01.2024).

Anonim, 2024. Formlabs Form3L Stereolitografi 3B Yazıcı https://formlabs.com -(Erişim tarihi: 01.02.2024).

Hart, A. J. (2018). Improving surface quality of SLA 3D printed parts via controlled dip-coating. http://hdl.handle.net/1721.1/119948

Anonim, 2024. Kesici takım kısımları https://schnittdaten.eu/v4/?bmecat=on&products_model=55430109#detailansicht- (Erişim tarihi: 01.02.2024).

Anonim, 2024. Formlabs Stereolitografi 3B Yazıcı Çalışma Prensibi https://proto3000.com/formlabs-sla-materials/ (Erişim tarihi: 29.01.2024).

Anonim, 2024. Kırınım ızgarası ile ışığın kendisini oluşturan dalga boylarına dağılımı https://www.edinst.com/blog/what-is-a-spectrometer/ (Erişim tarihi: 30.04.2024).

Anonim, 2024. Dalga boyları ve ışınlar (nm) https://www.asvonlus.net/ (Erişim tarihi: 30.04.2024).