

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMERİK KOMPOZİT  
MALZEMELERDE LAZERLİ KESME VE DELME  
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

**MEHTAP TÜRKMEN**

**KOCAELİ 2018**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ




ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMERİK KOMPOZİT  
MALZEMELERDE LAZERLİ KESME VE DELME  
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

MEHTAP TÜRKMEN

Pof. Dr. Ersin KAYAHAN  
Danışman, Kocaeli Üniv.  
Pof. Dr. Özcan GÜNDOĞDU  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.  
Pof. Dr. Ahmet Yavuz ORAL  
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2018

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Ülkemizde ve dünyada kompozit malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu ilgi kompozit malzemelerde sürekli iyileştirme ve geliştirme çalışmalarını da beraberinde getirmektedir. Kompozit malzemelerde üretim sonrası uygulanması gereken yöntemlerin en önemlisi de kesme, delme vb. işlemlerinde ki süreçlerdir. Bu süreçler, zaman-maliyet-iş sağlığı ve güvenliği gibi etkenleri büyük oranda etki etkilemektedir.

CTP kompozit malzemelerde üretim sonrası operasyonlarda çok fazla kesme-delme işlemleri yapılmaktadır. Bu sektörlerde faaliyet gösterenler, üretimi olanlar için bu malzemede (zaman-maliyet-iş sağlığı-çevre döngülerinde) ctp-lazer kesme ve lazer delme bir ihtiyaçtır. Dolayısıyla bu işlemlerin yapılabilir ve iletilebilir olması oldukça önem arz etmektedir.

Hayatım boyunca bilimsel çalışmalara olan hevesimi hayalden gerçeğe dönüştüren ve bu konuda bana çalışma fırsatı veren, bilgi-birikim ve tecrübelerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ersin KAYAHAN' a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneyisel uygulamalar sürecinde desteklerini esirgemeyen Sn. Levent CANDAN' a, Sn. Mustafa ARAS' a, Direktörüm Sn. Ali CANSUN, Müdürüm Sn. Serçin BASUT ve Polin Waterparks ailesine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çocuklarım Mehmet Reşat TÜRKMEN ve Ahmet Berat TÜRKMEN' e sevgilerimi, beni büyütüp bu günlere gelmemde emeği olan annem ve babama teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak hayatta her daim yanımda olan hayat arkadaşım, çok değerli saygıdeğer eşim Mustafa TÜRKMEN' e sonsuz teşekkürler.

Temmuz - 2018

Mehtap TÜRKMEN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
GİRİŞ .....	1
1. KOMPOZİT MALZEMELER .....	3
1.1. Cam Elyafı .....	6
1.2. Cam Elyafı Özellikleri .....	7
1.3. Cam Elyafı Üretim Aşamaları .....	7
1.3.1. Harman hazırlama sistemi .....	7
1.3.2. Camın eritilmesi (Fırın Sistemi) .....	7
1.3.3. Elyaf sarım ve bağlayıcı püskürtme sistemi .....	8
1.3.4. Elyafın işleme sistemleri .....	8
1.4. Cam Elyafı Çeşitleri .....	9
1.4.1. A (Alkali) camı .....	9
1.4.2. C (Korozyon) camı .....	9
1.4.3. E (Elektrik) camı .....	10
1.4.4. S (Mukavemet) camı .....	10
1.5. Cam Elyafı Mekanik Özellikleri .....	10
1.6. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemeler (CTP) .....	11
1.7. CTP' nin Avantajları .....	15
1.8. CTP Üretiminde Kullanılan Malzemeler .....	16
1.9. Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	16
1.9.1. Islak kalıplama .....	16
1.9.1.1. El yatırması .....	17
1.9.1.2. Püskürtme yöntemi .....	19
1.9.2. Reçine enjeksiyon yöntemi (RTM-Resing Transfer Moulding) .....	20
1.9.3. Köpük rezervuar kalıplama .....	22
1.9.4. Soğuk pres yöntemi .....	22
1.9.5. Elyaf sarma yöntemi .....	23
1.9.6. Savurma döküm .....	24
1.9.7. Levha devamlı üretimi .....	25
1.9.8. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon) .....	27
1.9.9. SMC/BMC Hazır kalıplama bileşimleri .....	27
1.10. Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....	30
1.10.1. Otomotiv-deniz ve taşıma sektörleri .....	30
1.10.2. Uzay-havacılık ve savunma sanayii .....	31
1.10.3. İnşaat sanayii .....	31
1.10.4. Elektrik-elektronik sektörleri .....	31

1.10.5. Eğlence-spor sektörü, şehir mobilyaları .....	32
1.10.6. Diğer .....	32
2. LAZERLER .....	34
2.1. Lazer Çalışma Prensibi .....	34
2.2. Lazer Özellikleri .....	35
2.3. Lazerin Bileşenleri .....	36
2.4. Lazer Parametreleri .....	36
2.5. Lazerlerde Çıkış Gücü ve Yoğunluğu .....	37
2.6. Lazer Çeşitleri .....	38
2.6.1. Nd:YAG lazerler .....	38
3. MALZEME VE YÖNTEM .....	40
3.1. CTP Malzemedeki Kesme ve Delme İşlemi Deney Düzenekleri .....	40
3.2. Lazerli Kesme ve Delme İşleminde Kullanılan CTP Plaka .....	42
3.3. Lazerli Kesme ve Delme İşleminde Kullanılan Hızlı Kamera Sistemi .....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	56
4.1. CTP Malzemenin Lazerli Delme İşlemleri .....	56
4.2. CTP Malzemenin Lazerli Kesme İşlemleri .....	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	63
KAYNAKLAR .....	64
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	64
ÖZGEÇMİŞ .....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mühendislik malzemeleri ile kompozit malzemeler arasındaki ilişki .....	5
Şekil 1.2. Kompozitlerin özelliklerini etkileyen saçınmış faz parçacıklarının çeşitli geometrik ve konumsal özelliklerinin şematik gösterimi (a) yoğunluk, (b) boyut, (c) şekil, (d) dağılım, (e) yönlendirme .....	5
Şekil 1.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....	6
Şekil 1.4. Farklı cam elyaf türleri (a) Keçe, (b) Kırpma, (c) Fitol .....	6
Şekil 1.5. Cam elyafı harman-fırın sistemi yandan kesiti .....	8
Şekil 1.6. Cam elyafı üretim şeması .....	9
Şekil 1.7. Fiber takviyeli kompozitler için temel yapı blokları .....	13
Şekil 1.8. CTP malzeme kullanılarak yapılmış ilk yerli otomobil (ANADOL) .....	14
Şekil 1.9. Tipik bir el yatırma laminat yapısı .....	17
Şekil 1.10. El yatırması üretim yöntemi ile CTP üretim yöntemi .....	19
Şekil 1.11. Püskürtme üretim yöntemi ile CTP üretim yöntemi .....	20
Şekil 1.12. Reçine enjeksiyon yöntemi (RTM) ile CTP üretimi .....	21
Şekil 1.13. Köpük rezervuar yöntemi ile CTP üretim yöntemi .....	22
Şekil 1.14. Elyaf sarma yöntemi ile CTP üretimi .....	24
Şekil 1.15. Savurma döküm yöntemi ile CTP üretimi .....	25
Şekil 1.16. Levha devamlı yöntemi ile CTP üretimi .....	26
Şekil 1.17. Profil çekme yöntemi ile CTP üretimi (Reçine Banyolu) .....	27
Şekil 1.18. Profil çekme yöntemi ile CTP üretimi (Reçine Enjeksiyonu) .....	28
Şekil 1.19. SMC pres kalıplama yöntemi ile CTP üretimi .....	28
Şekil 1.20. SMC hazır kalıplama bileşimi üretimi .....	29
Şekil 1.21. BMC pres kalıplama yöntemi ile CTP üretimi .....	29
Şekil 1.22. BMC hazır kalıplama bileşimi üretimi .....	30
Şekil 2.1. Lazerin temel prensiplerinden biri olan uyarılmış ışımının şematik gösterimi .....	34
Şekil 2.2. Lazer çalışma prensibi .....	35
Şekil 2.3. Lazer sisteminin bileşenleri .....	36
Şekil 2.4. Lazer çeşitleri .....	38
Şekil 2.5. Nd:Yag lazer sistemi ve çalışma prensibi .....	39
Şekil 3.1. ms-atımlı Nd:Yag lazer ile CTP malzeme kesimi şematik gösterimi (Dalga boyu 1064 nm) .....	40
Şekil 3.2. ms-atım süreli Nd:YAG lazer ile kesme ve delme işlemi için kurulan deneysel düzenek (Dalgaboyu 1064 nm) .....	41
Şekil 3.3. ns-atım süreli Nd:YAG lazer ile kesme ve delme işlemi için kurulan deneysel düzenek (Dalgaboyu 532 nm) .....	41
Şekil 3.4. RTM yöntemi ile üretilmiş 5mm et kalınlığında ki mavi renkli CTP plaka .....	42
Şekil 3.5. RTM yöntemi ile üretilmiş 5mm et kalınlığında ki kahverengi renkli CTP plaka .....	42
Şekil 3.6. RTM yöntemi ile üretilmiş 5mm et kalınlığında şeffaf CTP plaka .....	43

Şekil 3.7. ms-atımlı Nd:Yag lazer ile yapılan kesim işlemi mavi renkli CTP plaka (ms-atımlı lazer) .....	44
Şekil 3.8. ms-atımlı Nd:YAG lazer ile yapılan kesim işlemi kahverengi CTP plaka (ms-atımlı lazer) .....	45
Şekil 3.9. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığındaki kahverengi CTP plaka lazer kesim görüntüleri .....	46
Şekil 3.10. ms-atımlı Nd:YAG lazer ile yapılan kesim işlemi şeffaf CTP plaka (ms-atımlı lazer) .....	47
Şekil 3.11. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş şeffaf 5 mm et kalınlığındaki CTP plaka .....	48
Şekil 3.12. Hızlı Kamera (Integrated Design-IDT Y3S1-C-16) .....	49
Şekil 3.13. ms-atımlı Nd:YAG lazer ile yapılan kesme işlemi deney düzeneği (Hızlı kamera ile birlikte) (a) Lazer kafası, (b) CTP Plaka, (c) Hızlı Kamera Sistemi, (d) Makro lens .....	50
Şekil 3.14. ms atımlı Nd:Yag lazerle CTP malzemesinin etkileşimi .....	51
Şekil 3.15. ms-lazer ile delme işlemi hızlı kamera görüntüleri .....	52
Şekil 3.16. ns-atımlı Nd:YAG lazeri ile yapılan delme işlemi deney düzeneği (Hızlı kamera ile birlikte) (a) Lazer kafası, (b) CTP Plaka, (c) Hızlı Kamera Sistemi, (d) Makro lens .....	53
Şekil 3.17. ns-atımlı Nd:YAG lazeri ile yapılan delme işlemi deney düzeneği .....	54
Şekil 3.18. ns-atımlı Nd:YAG lazeri ile yapılan delme işlemi deney düzeneği .....	54
Şekil 3.19. ns-lazer ile delme işlemi hızlı kamera görüntüleri .....	55
Şekil 4.1. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığındaki şeffaf CTP plaka lazer delme görüntüleri (Dalga boyu 532 nm, ns-atımlı) .....	56
Şekil 4.2. ns-atımlı lazer-80 s işlem süresili farklı lazer güçlerindeki delme işlemi Dalga boyu $\lambda=532$ nm .....	58
Şekil 4.3. (a) ms-atım süreli lazer kullanarak 8 s işlem süreli farklı lazer güçlerindeki 1 bar basınçta delme işlemi (b) ms-atım süreli lazer kullanarak 7 s işlem süreli farklı lazer güçlerindeki 4 bar basınçta delme işlemi .....	59
Şekil 4.4. ns-atımlı lazer kullanarak delme işleminin yapıldığı numunelerin kesit görüntüleri .....	61
Şekil 4.5. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığındaki kahverengi CTP plaka lazer kesim görüntüleri .....	62

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Cam elyafı çeşitlerinin mekanik özellikleri .....	10
Tablo 1.2. Cam çeşitlerinin % ağırlık olarak bileşenleri .....	11
Tablo 1.3. Bazı kompozitler ve metallerin karşılaştırmaları .....	11
Tablo 2.1. Lazer tipleri ve ürettikleri ışınların dalga boyları .....	38
Tablo 3.1. CTP plakanın mekanik özellikleri .....	43
Tablo 3.2. IDT marka, Y3-S1serisi hızlı kamera teknik özellikleri .....	49
Tablo 3.3. ms-atımlı lazer-ctp etkileşiminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 1064 nm) (Kesme gazı kullanılmamış) .....	52
Tablo 3.4. ms-atımlı lazer-ctp etkileşiminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 1064 nm) (Kesme gazı kullanılmış) .....	53
Tablo 3.5. ns-atımlı lazer ile yapılan delme işleminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 532 nm) .....	55
Tablo 4.1. ns-atımlı lazer ile yapılan delme işleminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 532 nm) .....	57
Tablo 4.2. Kesme işleminde kullanılan lazer parametreleri .....	62



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$Al_2O_3$	: Alüminyum oksit
Ar	: Argon
$E_p$	: Atım enerjisi
$f_p$	: Atım süresi
Atm	: Atmosfer basıncı
$Ba_2O_3$	: Bor oksit
bar	: Gaz basıncı
$\lambda$	: Dalgaboyu
$Fe_2O_3$	: Demir oksit
GPa	: Gigapaskal
$g/cm^3$	: Gram\santimetreküp
Hz	: Frekans
J	: Joule
CaO	: Kalsiyum oksit
$kg/cm^2$	: Kilogram\santimetrekare
kW	: Kilowatt
km/saat	: Kilometre\saat
MgO	: Magnezyum oksit
MPa	: Megapascal
$P_{peak}$	: Max. güç
m	: Metre
$\mu m$	: Mikrometre
mJ	: MiliJoule
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
mW	: Miliwatt
nm	: Nanometre
ns	: Nanosaniye
$N/mm^2$	: Newton\milimetrekare
devir	: Periyod zamanı
$K_2O$	: Potasyum oksit
S	: Saniye
$^{\circ}C$	: Santigrad derece
cm	: Santimetre
$SiO_2$	: Silika
$Na_2O$	: Sodyum dioksit
I	: Yoğunluk
W	: Watt

### Kısaltmalar

BMC	: Sheet Molding Compound (Toplu Kalıplama Bileşimi)
CTP	: Glass Fiber Reinforced Polyester (Cam Elyaf Takviyeli Polyester)
CW	: Continuous Wave Mode (Sürekli Dalga Modu)

- LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Uyarılmış Radyasyon Yayılımı İle Işığın Güçlenmesi)  
Nd:YAG : Neodyum Yitrium Alüminyum Garnet Laser (Neodyum Yitrium Alüminyum Garnet Lazer)  
PW : Pulsed Wave Mode (Aralıklı Dalga Modu)  
RTM : Resin Transfer Moulding (Reçine Enjeksiyonu Yöntemi)  
Ort : Average (Ortalama)  
SMC : Sheet Molding Compound (Sac Kalıplama Bileşimi)



## **CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMERİK KOMPOZİT MALZEMELERDE LAZERLİ KESME VE DELME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

### **ÖZET**

Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi malzemelerden üretilir. Bu hammaddeler cam fırınlarında yüksek sıcaklıkta harman edilerek basınç altında mikron seviyesinde ki küçük deliklerden akıtılarak cam elyafı üretimi yapılır. Cam elyafı, elyaf takviyeli polimerik kompozit üretiminde en çok kullanılan elyaf çeşididir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Isıl dirençleri oldukça düşüktür. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler. Nem absorbe etme özelliği yoktur. Elektrik iletkenliği yoktur.

Cam elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemeler, takviye malzemesi ve taşıyıcı olarak kullanılan reçinenin (matriks) birlikte kalıplanması yöntemiyle elde edilmektedir. Bu kalıplama işlemi birçok farklı şekilde yapılmaktadır. Bu kalıplama işleminde önemli olan cam elyafı ile matriksin uygun şekilde ıslatılabilmesidir. Bu kalıplama işleminde matris; kuvvetin elyafa iletilmesi ve düzgün dağılım sağlanması, liflerin ortamın etkilerinden ve darbelerden korunması, kompozit malzemenin tokluğunun artırılması ve malzemelerde oluşan çatlak, kırılma vb. engellenmesi görevi üstlenmektedir.

Cam elyaf takviyeli polimerik kompozit malzeme mukavemeti yüksek, oldukça hafif olmasından dolayı havacılık, uzay teknolojisi, otomotiv, gıda, inşaat, eğlence, teknoloji vb. birçok sektörde kullanılmaktadır.

Cam elyaf takviyeli polimerik kompozit üretiminde, kalıplama işlemi sonrası fazlalıkların kesilmesi, parçanın üretim prosesi gereği tesviyesi, mekanik olarak yapılmaktadır. Bu durum yüksek maliyet, zaman kaybı oluşturmakta ve hata oranlarını arttırmaktadır. Bu çalışmada lazer kullanarak kesme ve delme işlemleri yapılmıştır. Optimum lazer parametreleri, kesme hızları belirlenmiştir. Farklı renklerde 5 mm kalınlığındaki cam elyaf takviyeli polimerik kompozit plakalar Nd:YAG lazerleri kullanılarak kesme ve delme çalışmaları başarıyla gerçekleştirilmiş ve optimum lazer parametreleri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Cam Elyafı, Cam Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozit, Lazerli Delme, Lazer Kesim, Nd:Yag Lazerleri.

## **DETERMINATION OF CUTTING AND DRILLING PARAMETERS OF FIBERGLASS REINFORCED POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS USING LASER**

### **ABSTRACT**

Fiberglass is produced from the materials such as silica, colemanite, aluminum oxide and soda. These materials are blended at high temperatures in glass furnaces and then flowed through small holes (micron level) under high pressure to produce fiberglass. Fiberglass is most used in fiber reinforced polymer composite production. Strength of the materials is very high, the thermal resistances are very low and high resists against to chemicals. It is also no absorbs humidity and have high electrical resistivity.

Fiberglass reinforced polymeric composite materials are obtained by molding together the reinforcing material and the resin (matrix) used as the carrier. The molding process is carried out in many different ways. The important thing in the process is that the matrix can be wetted properly with fiberglass. In the molding process, the matrix is used for transmission and distribution of force to the fibers, protection of the fibers from the environmental effect sand damages, increase of the toughness of the composite material and blocking cracks and broken.

Fiberglass reinforced polymeric composites have high abrasion resistance and are very lightweight, therefore, it is used in many sectors such as aerospace, space technology, automotive, food, construction, entertainment, technology and so on.

In the used production process of glass fiber reinforced polymeric composites, cutting of burrs forms after the molding process and smoothing which is part of production processes are performed mechanically. This processes high cost, time loss and increases error rates. In this work, therefore, laser cutting and drilling operations were performed on this material. Optimum laser parameters and cutting speeds are determined. The glass fiber reinforced polymeric composite plates with 5 mm thickness were successfully cut and drilled by Nd: YAG lasers which have different pulse width. The optimum laser parameters were also determined.

**Keywords:** Fiberglass, Fiberglass Reinforced Polymeric Composite, Laser Drilling, Laser Cutting, Nd:Yag Lasers.

## **GİRİŞ**

Cam elyaf takviyeli plastik malzemeler (CTP), polyester reçine ile bir araya getirilerek oluşturulan kompozit malzemedir. Bu malzemeler günümüzde birçok farklı alanlarda kullanılması, maliyetinin oldukça düşük olması ve mukavemet değerlerinin eşdeğer olarak kullanılan malzemelerden üstün olmasından dolayı birçok farklı sektörde tercih edilen, yaygın olarak kullanılan bir malzeme haline gelmiştir.

Sanayi de özellikle kalıp malzemesi olarak kullanılan CTP malzemeler, kalıplardan çıkarıldıktan sonra birçok kesitine kesme ve delme işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemler hâlihazırda mekanik olarak yapılmaktadır. Mekanik kesim, kompozit malzemelerde maliyet açısından pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. Ayrıca üretim sonrası uygulanan bu işlemler tozlu bir ortamda gerçekleştiğinden dolayı çevre ve iş güvenliği açısından olumsuz bir durum olmaktadır. Bu durum tozlu ortamlardan kaynaklı makine-takım bakım ve onarım maliyetini de artırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; CTP malzemedeki üretimi yapılan yüksek kesitli polimer kompozit malzemelerde lazerli kesme ve delme işlemlerinin uygulanabilirliği belirlemektir. Yapılan literatür araştırması neticesinde CTP malzemesi kullanılarak lazerli kesme ve delme çalışmalarına karşılaşılmamıştır. Bu sebepten yenilikçi bir çalışmadır. Çalışmada CTP kompozit malzemenin lazer kesme ve delme parametreleri belirlenerek, hızlı kamera görüntüleri alınmış ve lazer-ctp malzeme etkileşimi açıklanmaya çalışılmıştır.

1. bölümde, kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler anlatılmıştır. Ülkemizde ve dünyadaki kompozit malzemelerin tarihsel ve gelişimsel süreçlerinden bahsedilmiş ve kompozit malzeme yapısının oluşumu hakkında bilgiler verilmiştir. Devamında cam elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemeler hakkında detaylı bilgiler verilmiş, cam elyafı üretimi, cam elyaf takviyeli polimerik kompozit malzeme kalıplama teknikleri ve bu malzemelerin sanayii de kullanım alanları anlatılmıştır.

2. bölümde, lazerler ve lazer sistemleri hakkında detaylı açıklamalara yer verilmiştir. Lazerin ülkemizde ve dünyadaki tarihsel gelişimi, lazer çeşitleri, lazerlerin kullanım alanları, lazerlerin ülkemizde ve dünyadaki sanayii için önemi belirtilmiştir. Devamında hızlı kamera sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

3. bölümde, bu çalışmada kullanılan malzeme ve yöntemi hakkında deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Deneysel çalışmaların en uygun parametreleri, deney düzenekleri, deney parametre ve tabloları eklenmiştir.

4. bölümde, çalışmanın bulguları ortaya konarak, ctp kompozit malzemelerde lazer kesim ve lazer delme işlemlerinin en uygun lazer ve lazer parametreleri hakkında açıklamalarda bulunulmuştur.

5. ve son bölümde ise yapılan çalışmanın sonuçları ortaya konarak, işlemin sanayide ve birçok sektörde hangi sistemler üzerinde uygulanabilirliği açıklamalarına yer verilmiştir.

Ülkemizde ve dünyada lazerlerin farklı amaçlar için kullanımı her geçen gün artmaktadır. Dördüncü sanayi devrimi (Endüstri 4.0) ve buna bağlı olarak otomasyon sistemlerindeki gelişmeler lazer teknolojilerinin kullanımını vazgeçilmez kılmaktadır. İlk defa 1960' lı yıllarda kullanılmaya başlanan lazer sistemleri başlangıçta endüstri alanında çok da tercih edilmemiştir. Fakat 1970' li yıllarda geliştirilen lazerler ise kesme, delme, ölçme amaçlı kullanılarak ilk defa sanayi uygulamalarına girmiştir.

Bu çalışmanın amacı; CTP kompozit malzemelerin üretimi sonrası uygulanan operasyon işlemlerini lazerle gerçekleştirerek üretim-maliyet-zaman değerlerinde istenilen seviyelere ulaşmak, hem makine-ekipman ve bakım-onarım maliyetlerini azaltmak, hem de iş güvenliği ve çevre açısından daha uygun ortamlarda çalışabilme imkanı sağlamaktır.

CTP kompozit malzemelerle kesim işlemi, bu sektörlerde faaliyet gösterenler, üretimi olanlar için bir ihtiyaçtır. Dolayısıyla bu işlemlerin geliştirilebilirliği oldukça önem arz etmektedir. Ülkemize ve sanayiye birçok etkende (zaman-maliyet-çevre-iş güvenliği) tasarruf sağlayacak yenilikçi bir çalışmadır.

## 1. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozitlerin ayrı bir malzeme sınıfı olarak gelişmesi, cam elyaf takviyeli polimerler gibi çok fazlı kompozitlerin 20.yüzyılın ortalarında, tasarım ve mühendislik çalışmalarına uygun şekilde üretilmesiyle başlamıştır. Ahşap, saman takviyeli kilden yapılan kerpiç, deniz kabukları ve hatta çelik gibi alaşımlar binlerce yıldır bilinen çok fazlı malzemeler olmasına rağmen, farklı malzemeleri üretim sırasında bir araya getirme kavramının herkesçe kabul edilmesinden sonra kompozitler, metal, seramik ve polimerlerin yanında yeni bir malzeme grubu olarak sayılmaya başlanmıştır. Artık günümüzde bu çok fazlı kompozit yaklaşımın, hiçbir monolitik (tek bileşenli) metal alaşımı, seramik ve polimerlerin sahip olmadığı geniş bir malzeme özelliği kombinasyonları imkânı sağladığı kabul edilmiştir [1, 14].

İleri teknoloji uygulamalarında özel ve sıra dışı özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu uygulamalar özellikle havacılık, sualtı, biyomühendislik ve taşımacılık endüstrilerinin ihtiyaçlarıdır. Örneğin uçak mühendisleri artan bir şekilde düşük yoğunluklu, yüksek dayanımlı, rijit, aşınma ve darbeye dayanıklı ve aynı zamanda korozyona uğramayacak yapısal malzemelere ihtiyaç duyarlar. Bunlar çoğunlukla bir araya gelemeyecek özellik kombinasyonlarıdır. Monolitik malzemelerde dayanımı yüksek oranların yoğunluğu nispeten daha yüksek iken, artan dayanım ve rijitlikle genellikle tokluk düşer [1].

Malzeme özellik kombinasyonu ve aralıkları, kompozit malzemelerdeki gelişmeye bağlı olarak genişlemiş ve hala daha genişlemeye devam etmektedir. Genel olarak bir kompozit malzeme, her iki bileşene ait özelliklerin birleşmesiyle daha iyi özellikteki kombinasyonların elde edildiği çok fazlı bir malzeme olarak düşünülebilir [1, 10-14].

Bu birleşik etki prensibine göre, iki veya daha fazla malzemenin daha iyi özellikler sunması amacıyla uygun kombinasyonlarda bir araya getirilmesidir. Ancak bazı özelliklerde iyileşme sağlanırken, bazılarında kötüleşeceği her zaman göz önünde tutulmalıdır [1, 10-17].

Bir çeşit kompozit olan çok fazlı metal alaşımları, seramikler ve polimerler daha önce incelenmiştir. Örneğin perlitik çelik  $\alpha$ -ferrit ve sementitin katmanlarından

oluşan bir mikroyapıya sahiptir. Ferrit fazı yumuşak ve sünek, sementit ise sert ve kırılğan fazdır. Perlitin mekanik özellikleri (oldukça sünek ve dayanıklıdır), kendini oluşturan fazların her ikisinden de iyidir. Tabiatta doğal halde de kompozit malzemeler bulunmaktadır. Örneğin ağaç, selüloz elyaf ve ligninden (odun özü) oluşur. Güçlü ve esnek selüloz elyafı, lignin deneni daha rijit bir bileşenle bir arada tutulup desteklenir. Kemik de güçlü ve yumuşak protein kolojeni ile sert ve gevrek apatit mineralinden oluşan bir kompozittir [1, 21].

Yukarıda yapılan tanımlamaya göre bir kompozit malzeme, doğal olarak meydana gelenlerin aksine yapay olarak üretilmiş çok fazlı bir malzemedir. Ayrıca, yapıyı oluşturan fazlar kimyasal olarak birbirinden farklı ve belirgin bir arayüzde birbirinden ayrılmıştır [1, 21].

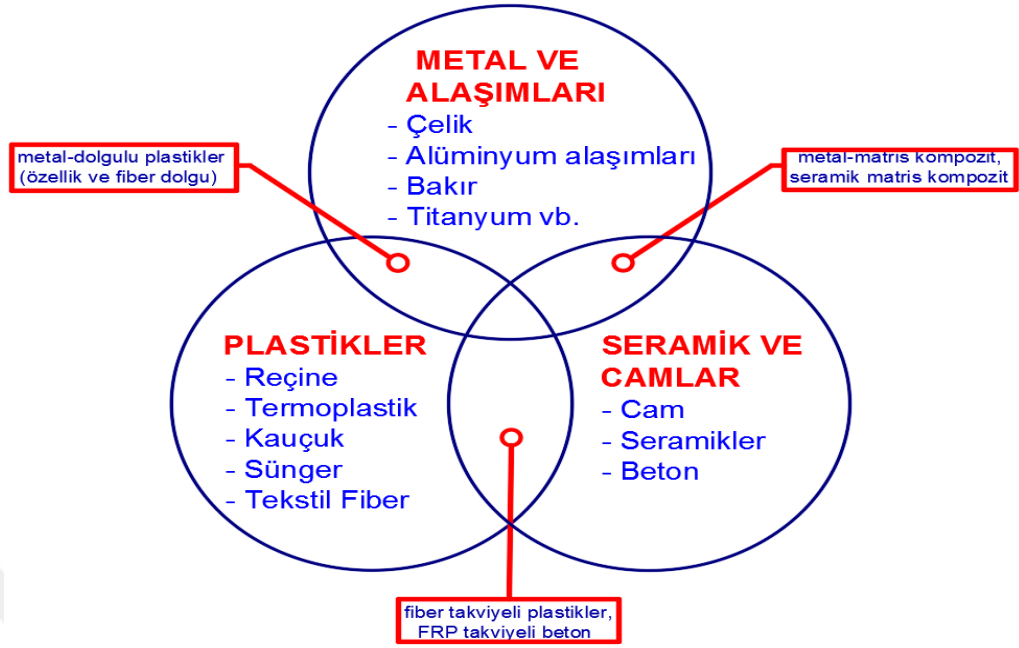
Bir malzemenin kompozit malzeme olabilmesi için;

1. İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,
2. Kimyasal bileşenleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzleri ayrılmaz en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
3. Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
4. Bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olması [11, 14-16].

Kompozit malzeme tasarımında bilim adamları ve mühendisler, sıra dışı özelliklere sahip yeni nesil malzemeler üretmek için metal, seramik ve polimerleri akıllıca bir araya getirmişlerdir. Birçok kompozit, rijitlik, tokluk, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi mekanik özelliklerin kombinasyonlarını geliştirmek için tasarlanmıştır [1].

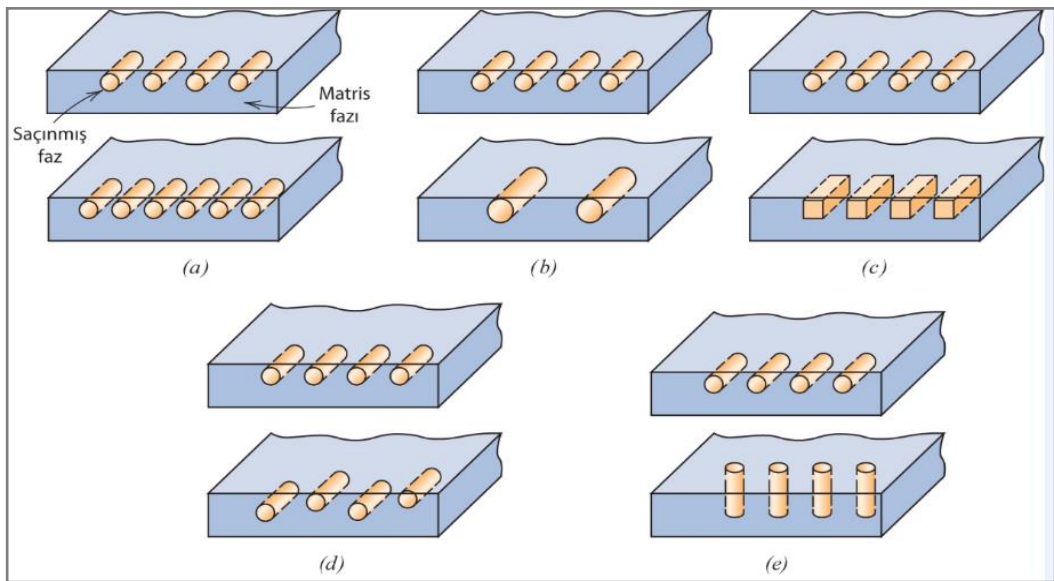
Şekil 1.1.' de kompozit malzemelerin mühendislik malzemeleri (metal ve metal alaşımları, plastikler, seramik ve camlar) ile olan ilişkilerinin şeması verilmiştir.



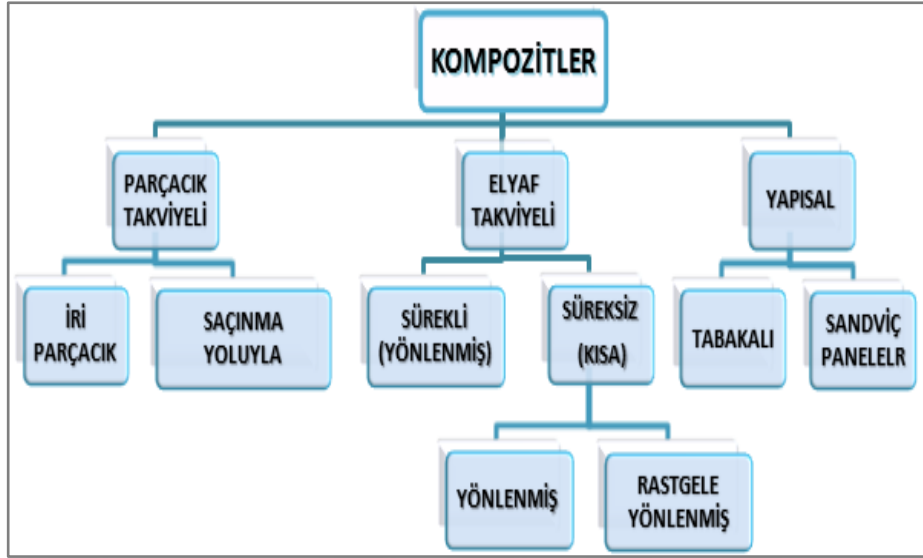


Şekil 1.1. Mühendislik malzemeleri ile kompozit malzemeler arasındaki ilişki [12, 13]

Çoğu kompozit malzeme yalnızca iki fazdan oluşur. Matris adı verilen birinci faz, genellikle saçınmış faz olarak adlandırılan diğer fazı sarar ve sürekliliğini sağlar. Kompozitlerin özellikleri, bileşimi oluşturan fazların özelliklerine, bağlı miktarlarına ve saçınmış fazın geometrisine bağlı olarak değişir. Saçınmış faz geometrisi burada, Şekil 1.2.' de gösterildiği üzere, parçacıkların şekli, boyutu, dağılımı ve yönlenmesini ifade eder [1].



Şekil 1.2. Kompozitlerin özelliklerini etkileyen saçınmış faz parçacıklarının çeşitli geometrik ve konumsal özelliklerinin şematik olarak gösterimi (a) yoğunluk, (b) boyut, (c) şekil, (d) dağılım, (e) yönlenme [1]



Şekil 1.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [12, 17-20]

### 1.1. Cam Elyafı

Cam elyafı yaklaşık %50' si silika ( $\text{SiO}_2$ ), geri kalanı bor, kireçtaşı, kolemanit, alüminyum oksit, boraks, soda vb. gibi hammaddelerin harman edilip eritilmesi sonucu elde edilir. Bu hammaddelerin her birinin çp malzemeye kattığı özellik farklıdır. Örneğin kireçtaşı (kalker) ergime sıcaklığının düşmesinde etkilidir. Boraks vb. hammaddeler oluşan malzemenin kimyasal direnç özelliklerinde etkilidir [8, 36-37].

Cam elyafı plastik malzemelerin takviyesinde kullanılır. Kırılgan yapıda ve düşük sıcaklıkta bozulma özellikleri gösteren plastiklerin hızlı erime, eğilme dayanımları, çekme mukavemetleri, fiziksel vb. özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır [15, 16].



Şekil 1.4. Farklı cam elyaf türleri (a) Keçe, (b) Kırpma, (c) Fıtıl [2]

## **1.2. Cam Elyafı Özellikleri**

Cam elyafı çekme mukavemeti oldukça yüksek bir malzemedir. Birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir. Isıl dirençleri düşük olmakla birlikte, yanmaz özelliği vardır. Ancak yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında yumuşama özellikleri vardır. Nem absorbe etme özelliği yoktur [8, 37].

Fakat cam elyafı kompozit malzemelerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisiyle bir çözünme meydana gelebilmektedir. Bu çözünmeyi ortadan kaldırmak için de özel elyaf kaplama işlemleri uygulanır. Cam elyafı kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler. Elektrik iletkenlikleri yoktur. Bu özelliği sayesinde elektrik yalıtımının önemli olduğu ortamlarda cam elyafı kompozit malzemelerin önemi büyük ölçüde artmaktadır [8, 37].

## **1.3. Cam Elyafı Üretim Aşamaları**

### **1.3.1. Harman hazırlama sistemi**

Cam lifi hammaddelerinin karıştırılma işleminin yapıldığı sistemdir. Hammaddelerin kaliteli malzeme elde edilebilmesi açısından, düzgün şekilde karıştırılması (harman edilmesi) önem arz etmektedir. Harman sistemlerinde karıştırılan hammadde fırına gönderilerek eritme işleminin gerçekleştirilmesi sağlanır.

### **1.3.2. Camın eritilmesi (Fırın Sistemi)**

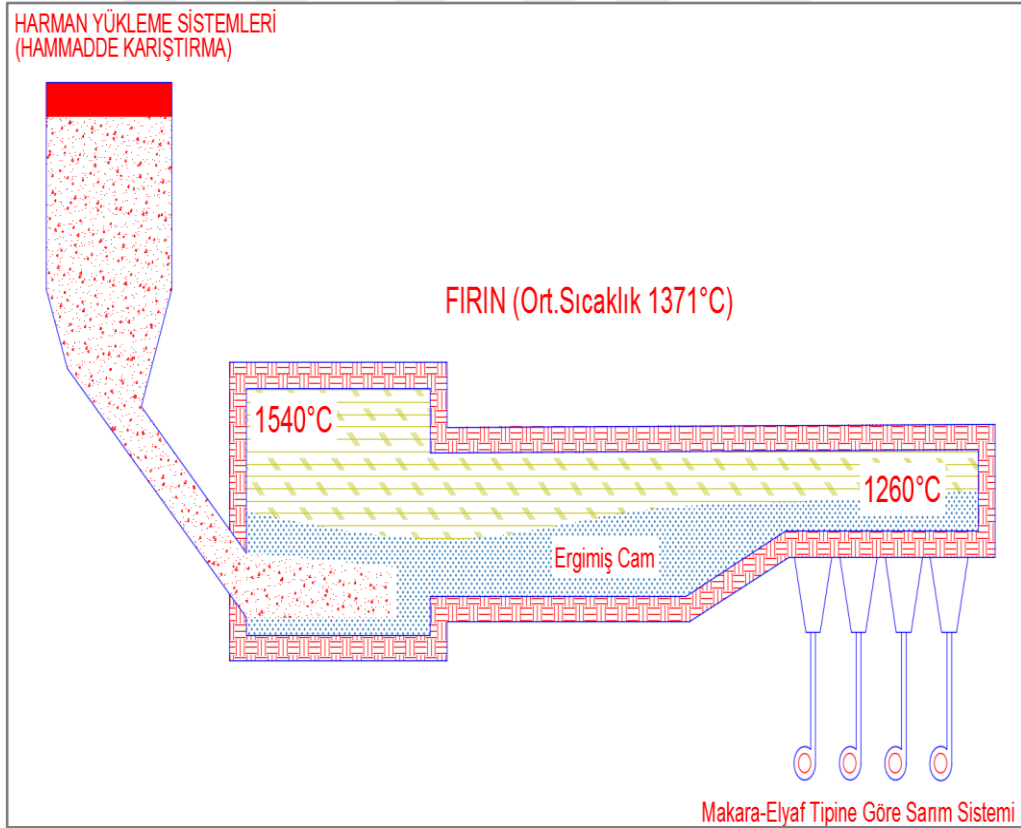
Harman sistemlerinde karışımı yapılan ve fırına yönlendirilen hammadde yüksek sıcaklıkta ki (Ort. 1200°C-1400°C) ortalama sıcaklığın 1371°C ideal kabul edildiği fırın sistemlerine gönderilerek eritme işlemi gerçekleştirilir. Fırının her bölgesi farklı sıcaklık etkilerine göre tuğla sistemi, taşıyıcı olarak mekanik askı sistemleri ve konstrüksiyondan oluşmaktadır. Yavaş yavaş sıvı hale dönüşen cam eriyiği, platin/rodyum alaşımlı kovanlardan, bir sarma sistemi ile, yüksek hızda çekilmekte ve 10-25 mikron çapında elyaf olarak bobin haline getirilmektedir. Fırın elektrik, doğalgaz ve farklı yakıt sistemleri kullanılarak çalışmaktadır. Elektrik sarfiyatı oldukça maliyetli olmasından dolayı doğalgaz tercih sebebi olmaktadır. Akan cam lifinin kalitesi için fırın sıcaklığının belli değerlerde tutulması çok önemli bir etkidir.

### 1.3.3. Elyaf sarım ve bağlayıcı püskürtme sistemi

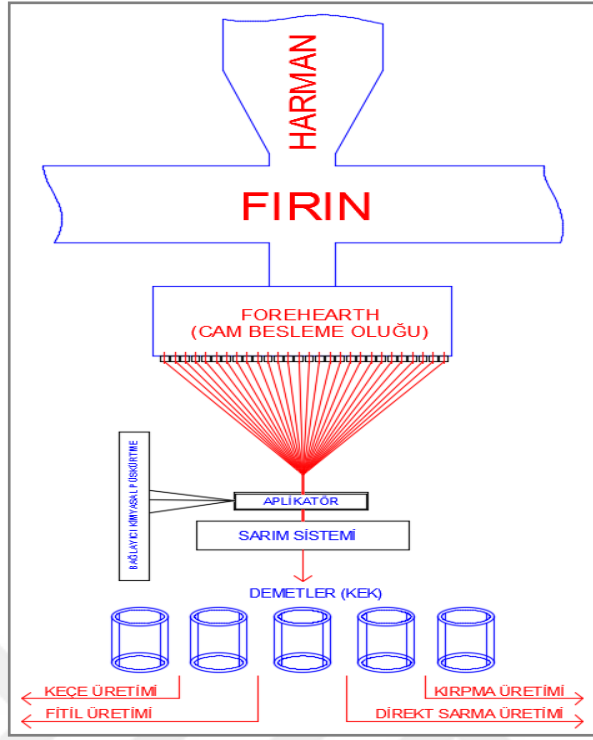
Erime işlemi bittikten sonra basınç altında mikron seviyesinde ki küçük deliklerin olduğu mekanik sistemlerden (forehearth) cam lifi olarak akıtılır. Akıtılan camın kalitesini arttırmak amacıyla bağlayıcı adı verilen kimyasal sıvı püskürtme işlemi yapılır. Bağlayıcı kimyasal malzeme, kompozit malzemelerde cam elyafının kalitesini ve performansını önemli ölçüde etkileyen, kimyasal bir bileşim olan özel sıvıdır. Bağlayıcının içeriği film oluşturucu, bağlama grupları plastifiyan vb. gibi malzemelerin karışımından meydana gelmektedir. Bağlayıcı kimyasalı alan cam lifleri diğer üretim proseslerine doğru yol alırlar.

### 1.3.4. Elyafın işleme sistemleri

Mikron seviyesinde ki akan elyaf lifler, farklı sarma sistemleri kullanılarak sarım işlemi gerçekleştirilir. Bu farklı sarma sistemleri sayesinde oluşan ve keçe, fitil, kırpma gibi adlandırılan ürünler kompozit hammaddesi olarak farklı sektörlerde yerini almak için hazırdır.



Şekil 1.5. Cam elyafı harman-fırın sistemi yandan kesiti



Şekil 1.6. Cam elyafı üretim şeması

#### 1.4. Cam Elyafı Çeşitleri

Cam elyafı üretiminde hammadde içinde bulunan silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır [36]. Matris malzemelerin kullanım amaçlarına uygun olarak birçok cam elyaf türü geliştirilmiştir. E-cam, C-cam ve S-cam bunların arasında en yaygın olarak kullanılan cam elyaf türleri arasında yer almaktadır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur.

##### 1.4.1. A (Alkali) camı

İlk üretilen cam fiber çeşidi olmakla birlikte yüksek oranda alkali içerir. Bu oran elektriksel yalıtkanlık özelliğinin kötü olmasına sebep olmaktadır. Kimyasal direnci yüksektir. Pencerelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz [36, 37].

##### 1.4.2. C (Korozyon) camı

Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksek olmasından dolayı depolama tankları, vb. yerlerde kullanılır [36, 37].

### 1.4.3. E (Elektrik) camı

Ana maddesi alümina, kireç ve borosilikattır. Düşük oranda alkali içermesi, elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre oldukça iyi olmasına neden olmaktadır. Darbe dayanımı düşük olmakla birlikte, mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı oldukça iyi değerlerde direnç göstermesi, su emiş oranı düşük olması vb. özelliklerde olması nemli ortamlarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır [36, 37].

Türkiye’ de Şişecam Grubuna bağlı olan Cam Elyaf Sanayii A.Ş. tarafından E camı elyafı üretilmektedir. 1976’ dan beri faaliyet gösteren firma Avrupa’nın önemli elyaf üreticilerinden biridir [2, 36].

### 1.4.4. S (Mukavemet) camı

S camı yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar [8, 37].

## 1.5. Cam Elyafı Mekanik Özellikleri

Tablo 1.1. Cam elyafı çeşitlerinin mekanik özellikleri [8, 37]

Özellikler	A-CAMI	C-CAMI	E-CAMI	S-CAMI
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,49	2,54	2,48
Elastik Modülü (GPa)	-	69,0	72,4	85,5
Çekme Mukavemeti (MPa)	3033,0	3033,0	3048,0	4585,0
Isıl Genleşme Katsayısı (mm/°Cx10 <sup>6</sup> )	8,6	7,2	5,0	5,6
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	726,0	749,0	841,0	970,0

Tablo 1.2. Cam çeşitlerinin % ağırlık olarak bileşenleri [3-5]

Bileşen	E-cam (%)	C-cam (%)	S-cam (%)
SiO <sub>2</sub>	52,4	64,4	64,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	0,8	9,6	0,3
Ba <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	4,7	-

Cam elyafların çekme dayanımları ve birim ağırlık başına düşen dayanımları çelikten daha yüksek olmakla birlikte, ısı dayanımları çelikten daha düşüktür. S-cam elyaf, E-cam elyaf takviyeli ve epoksi matrisli kompozit malzemelerin, epoksi matrisli ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin, alüminyum, titanyum ve çeliğin; çekme dayanımı, elastiklik modülü ve yoğunlukları Tablo 1.3.' te verilmiştir [3, 5].

Tablo 1.3. Bazı kompozitler ve metallerin karşılaştırmaları [3-5]

	Epoksi S-cam Elyaf	Epoksi E-cam Elyaf	Epoksi Karbon Elyaf	Alüminyum (7075T6)	Titanyum (6Al-4V)	Çelik (4130)
<b>Çekme Dayanımı [N/mm<sup>2</sup>]</b>	1751	1103	1482	572	1103	1300
<b>Elastiklik Modülü [GPa]</b>	59	52	145	69	114	207
<b>Yoğunluk [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,99	1,99	1,55	2,7	4,43	8,01

Tablo 1.3.' te gösterildiği gibi; cam elyafların düşük yoğunluk ve yüksek dayanımları, maliyetlerinin düşük oluşu, üretim parametrelerinden; sıcaklık, viskozite ve çekme hızının değiştirilmesiyle farklı çaplarda üretilebilmeleri cam elyafların plastik esaslı kompozitler de yaygın olarak kullanılmalarının başlıca sebeplerindendir [3].

### 1.6. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemeler (CTP)

Cam liflerinin dünya da sanayide kullanılmaya başlanması 1877 yıllarına dayanmaktadır. Liflere takviye edilen takviye malzemelerin kullanımı ise 1950 'li

yıllara dayanmaktadır. Bu malzemeler içinde en önemli yere sahip malzeme ise cam elyaf takviyeli plastik malzemedir.

Genellikle yeterli basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılğan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılğanlığın giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla bu özellikleri iyileştirecek nitelikte elyaflarla donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir. Elyaf tanımı, makroskobik açıdan homojen, boyu kesitinin en az 100 katı olan esnek malzemeler şeklinde yapılır ve değişik elyaflar kompozitlerde takviye amacıyla kullanılır. Elyaf takviyeli kompozitlerde dışarıdan yapılan yüklemeleri karşılayan ana bileşen elyaftır, polimer matris ise elyafları istenilen geometride bir arada tutan çevreyi oluşturur [6, 7].

Elyaf takviyeli polimerik kompozitler hazırlanırken elyaflar açısından bazı temel noktalara dikkat edilmesi gerekir. Bu noktalar: elyafın mekanik özellikleri, elyaf miktarı, elyaf kalınlığı, elyafın yönlenme biçimi [7, 21].

Elyafın mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Genel bir kural olarak kompozitlerin mekanik dayanımı içlerindeki elyaf miktarı arttıkça yükselir, elyaf oranı belli bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bunun nedeni, artışına bağlı olarak kompozit içerisindeki polimer miktarının azalmasıdır. Polimer, kompozit içerisindeki oranı belli bir değer altına düştüğünde matris işlevini kaybeder ve lifleri bir arada tutamaz [7, 19].

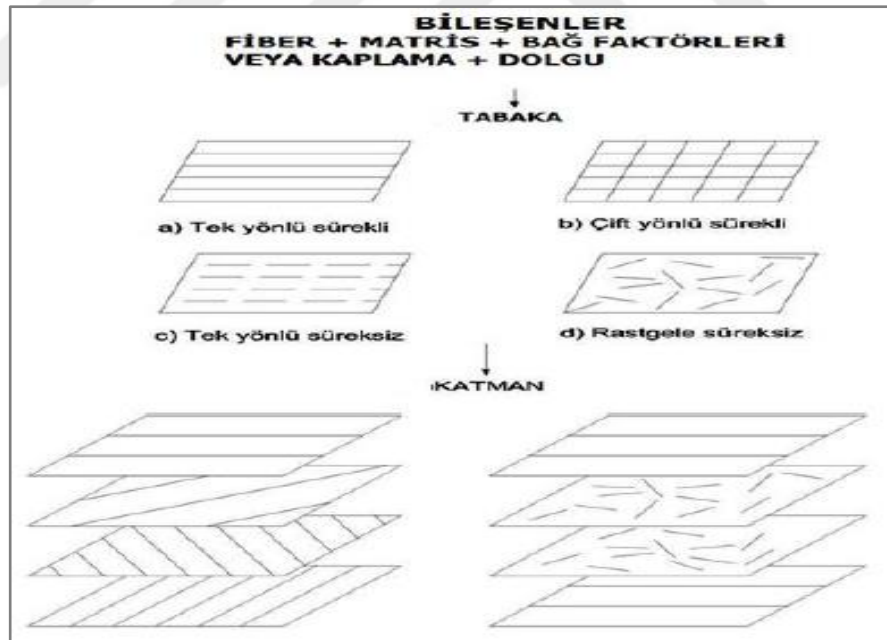
Elyaf kalınlığı kompozit özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. İnce liflerle hazırlanan kompozitlerde polimerin lifi ıslattığı alan büyüktür. Elyaf-polimer değme yüzeyinin artması, elyaf-polimer etkileşimleri arttırarak kompozit içerisinde yük (enerji) dağılımını kolaylaştırır. Bu nedenle aynı kütlede ince ve kalın elyaflarla takviye edilen kompozitlerden, ince elyaflarla takviye edileni daha dayanıklıdır [7].

Elyaf demet haline getirildiklerinde her zaman yapımlarında kullanılan polimerin yığın haline göre daha dayanıklıdır. Elyaf demeti üzerine dışarıdan bir etki yapıldığında, demette bulunan elyaflardan bazıları kopabilir veya yüzeylerinde çatlama, çizilme vb. kusurlar oluşabilir. Demetin dış kuvvetler karşısında aldığı bu tür zararlar, yalnız etkilenen elyaflarla sınırlı kalır ve demet içerisindeki diğer elyaflara aktarılmaz. Yığın halindeki bir maddenin (cam parçası, polimer parçası



vb.) herhangi bir bölgesinde oluşan kusur malzeme içerisinde ilerler ve sonuçta malzemeyi kullanılamaz hale getirebilir. Bu özellik elyaf takviyeli kompozitlerin üstünlüklerinden birisidir [7].

Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyaflar kompozit içerisine uygun geometrilerde yerleştirilerek, kompozitin çekme gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanır (anizotropi). Örneğin kompozitin kopma dayanımı, elyafların yönlendirildiği eksene  $90^\circ$  lik açıdan yapılan yüklemelerde en büyük olacaktır. Benzer şekilde vurma dayanımı, ısı iletkenlik, ısı genleşme gibi davranışlar da elyafların yönlenme eksenine açısal olarak bağlıdır. Elyaflarla yapılan takviye, elyaf yönlenmesi ayarlanarak sözü edilen özellikler yöne bağlı kontrolüne olanak sağlar [7].



Şekil 1.7. Fiber takviyeli kompozitler için temel yapı blokları [18, 19]

Fiberglass olarak tanınan bu malzeme, genellikle tüm dünyada belli kısaltmalarla ifade edilmektedir. Türkçe ifadesi ise Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) olarak yerleşmiş bulunmaktadır. Genel olarak cam elyafı ile takviye edilmiş polyeşter reçineleri ifade etmektedir. Ancak polyeşter yerine diğler termoset ve termoplastik

reçineler de kullanılabilir [8].

Elyaf takviyeli reçine sistemi, takviye elemanının termoset reçine içerisine yayılmasından oluşan bir kompozit malzemedir. Ayrıca, dolgu maddeleri ve pigmentler gibi bazı maddeler de bünyede bulunmakla birlikte kompozit malzemenin esasını oluşturmaz. Genel olarak kullanılan reçine, uygun bir katalist sistemi ilavesi ile şebeke yapısı (cross-link) oluşturan ve ısı ile eritilmez bir katı cisim haline gelebilen şurup kıvamında bir sıvıdır [8].

Keçe veya dokuma şeklindeki elyafli malzemenin katalizlenmiş reçine ile ıslatılıp sertleşmesi beklenerek, kompozit malzeme elde edilir. Bu işlem açık veya kapalı bir kalıpta yapılır ve elde edilen ürün kalıbın tüm şekillerini ters olarak gösterir [8].

Cam elyaf takviyeli plastik kompozit (CTP) malzeme yüksek özgül dayanım, yüksek özgül sertlik, ve hafiflik özelliklerinin bileşimine sahiptirler. Bu özellikleri bilhassa uzay uygulamaları ve havacılık için bu malzemeyi ilgi çekici kılar [9, 17-19].

Cam elyaf takviyeli polyester malzemenin ülkemizde kullanılmaya başlanması ise 1960' lı yıllara dayanmaktadır. Bu yıllardan itibaren sıvı tankları, çatı levhaları, küçük boy deniz tekneleri gibi elemanların imalatında kullanılmıştır [10]. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan "ANADOL" un kaportası da bu malzemedendir.



Şekil 1.8. CTP malzeme kullanılarak yapılmış ilk yerli otomobil (ANADOL) [10]

Kısa bir tanımlama ile kompozit kavramı,

- Birkaç matriksin bir araya gelmesi,
- Her matriksin kendi fiziksel özelliklerinin avantajlarını taşıması,

- Ortak matriksin [12, 38], fiziksel özellik bileşkesini oluşturması olarak ifade edilebilir.

CTP üretiminde en yaygın olarak kullanılan doymamış polyester reçineler, takviyeli plastikler içinde termoset grubunda yer alan bir reçinedir. El yatırması gibi basit kalıplama tekniklerden en karmaşık makineleşmiş kalıplama tekniklerine kadar her tür kalıplama tekniğine hitap eder. Polyester reçineler, çok geniş bir kimyasal aileyi kapsar ve genel olarak dibazik asitlerle polihidrik alkollerin kondensasyon reaksiyonu sonucunda elde edilirler [8, 12-38].



Kullanılan dibazik asit türüne bağlı olarak, doymamış polyester reçineler, kompozitin genel amaçlı, kimyasal dayanımlı veya yüksek kimyasal dayanımlı olmasını sağlayacak şekilde “ortoftalik”, “izoftalik” veya “bisfenolik” olarak adlandırılır [8-12, 38].

### 1.7. CTP' nin Avantajları

CTP malzemenin tercih edilmesinde en önemli etken, malzemenin özgün nitelikleridir [38]. Bu nitelikler kısaca;

- Yüksek özgül mukavemet,
- Mükemmel elastikiyet,
- Hafiflik,
- Yüksek korozyon dayanımı,
- Mükemmel dielektrik nitelikler,
- Üstün boyutsal stabilite,
- Tasarım esnekliği,
- Kalıplama esnekliği (değişik metodlarla üretilebilme esnekliği),
- Kolay tamir edilebilirlik,
- Yüksek kimyasal dayanım,
- Yüksek ısı dayanım,
- Kendinden renklendirilebilme olanağı,
- Alev geciktirici katkı ile alev direnci niteliği sağlanması,
- İstenildiğinde ışık geçirgenlik özelliği sağlanması,
- Düşük araç-gereç maliyeti,
- Yüksek amortisman süreleri olarak özetlenebilmektedir [15, 38].

## 1.8. CTP Üretiminde Kullanılan Malzemeler

- Polyester reçineler,
- Hızlandırıcılar,
- Dolgu maddeleri,
- Boyalar,
- Katalizörler,
- Kalıp ayırıcılar,
- Takviye malzemeleri [15]

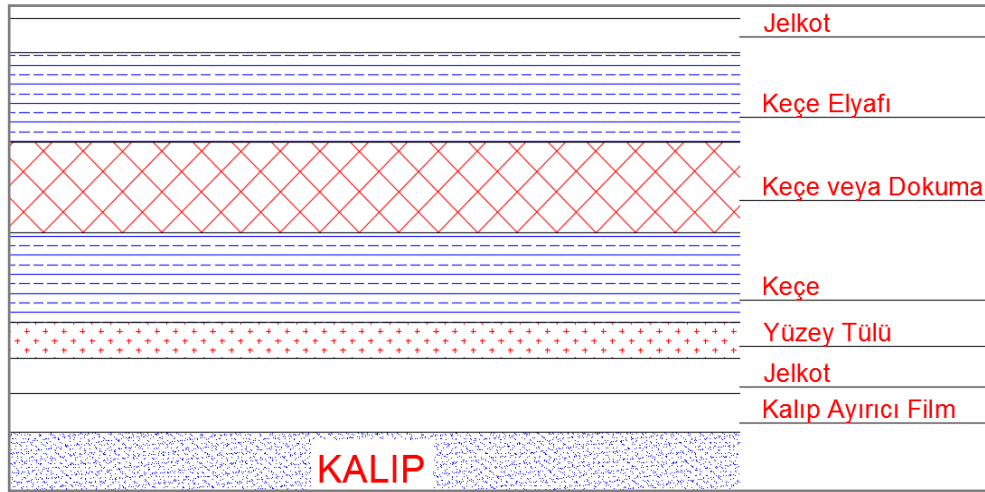
## 1.9. Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Cam elyaf takviyeli plastik malzemelerin birçok üretim yöntemi vardır. Bu üretim yöntemi bu malzemenin kullanılacağı yere göre, üründen beklenen özelliklere, kullanılacak takviye oranlarına veya yönlerine kadar birçok faktör etki etmektedir. Her üretim yönteminin ortaya çıkan malzemenin mekanik özelliklerine de önemli ölçüde etki etmektedir. CTP üretiminde kullanılan başlıca yöntemler:

1. Islak Kalıplama
2. Reçine Enjeksiyonu Yöntemi (RTM)
3. Köpük Rezervuar Kalıplama
4. Soğuk Pres Yöntemi
5. Elyaf Sarma Yöntemi
6. Profil Çekme Yöntemi (Pultrüzyon)

### 1.9.1. Islak kalıplama

Bu yöntem, tek yüzü düzgün küçük çapta üretim için uygundur. Genellikle CTP kalıp kullanılır. Kalıp yüzeyi ile temas eden CTP yüzeyi düzgün, diğer yüzeyi pürüzlü olur. Genellikle 2-10 mm kalınlıklar için bu yöntem kullanılır. Büyük boyutlu parçalarda kalınlık daha fazla olabilir, ancak 2 mm' nin altında kalıplama tavsiye edilmez. Tipik bir yatırma örneği Şekil 1.9.' da verilmiştir [8].



Şekil 1.9. Tipik bir el yatırma laminat yapısı [8]

Genellikle tekne, oto kaportası, cephe kaplama elemanları, depo ve tank gibi ürünlerin yapımında kullanılan bu kalıplama yöntemi iki teknikle yapılır. El yatırması ve püskürtme olarak iki şekilde yapılır. Kalıp hazırlaması ve jelkot uygulaması iki teknik içinde aynıdır. Kalıp önce silikonsuz kalıp ayırıcı vaks ile parlatılır, jelkot uygulanır. Jelkot uygulaması fırça ile veya püskürtme ile yapılabilir. Toplam jelkot kalınlığı 0,3-0,6 mm ( $400-500 \text{ gr/cm}^2$ ) civarında olmalıdır [8].

CTP ürünlerde görülen hataların büyük bir çoğunluğu jelkot uygulaması sırasında yapılan yanlışlıklardan kaynaklanır. Bu nedenle jelkot uygulamasına özel bir özen gösterilmesi gereklidir. Örneğin gereğinden ince uygulanan jelkot, strien monomerinin uçması nedeni ile sertleşeceği yerde kurur. Jelkot tabakası yeterli sertliğe ulaşmadan üzerine CTP işlenirse buruşmalar oluşabilir. Jelkotun çok kalın sürülmesi halinde, ürün kalıptan çıktıktan birkaç ay sonra çatlaklar oluşur [8]. Islak kalıplama yöntemi iki şekilde yapılmaktadır. Bu yöntemler el yatırması ve püskürtme yöntemidir.

#### 1.9.1.1. El yatırması

El yatırması cam elyaf takviyeli kompozit malzeme üretiminde en bilindik ve basit yöntemdir. Daha çok geniş yüzeyli veya büyük hacimli CTP malzemesi elde etmek için kullanılır. Maliyeti diğer üretim yöntemlerine göre oldukça düşük olmakla birlikte, malzeme için özel kalıp ve bekleme süreleri nedeniyle üretim sayısı oldukça düşüktür. Ayrıca reçinenin homojen bir şekilde yedirilmesi, malzeme kalitesi açısından çok önemlidir [29].

Jelkot sürülmüş kalıp üzerine önce 300 gr/m<sup>2</sup> lik çam keçe ile uygulama yapılır. CTP ürün yüzeyinin çok düzgün olması veya ürünlerin kimyasal maddelerle teması isteniyorsa, jelkot üzerine cam keçeden önce yüzey tülü kaplanması gerekir. Cam elyafının polyesterle ıslanması için yeterli miktarda (2/-2 veya 5/1) polyester fırça veya yün rulo ile cam elyafına yedirilir. Cam elyafı kalıp şeklini aldığı zaman, yatırma amacı ile yatay dişli rulolarla, hava kabarcığı giderme amacı ile de dikey dişli rulolarla elde edilen laminatın rulolanması gereklidir [8].

Cam elyafının yan yana yerleştirilmesi gereken büyük kalıplarda her iki şerit birbirine en az 5 cm bindirilmelidir. Diğer katlarda bu bindirme noktalarının yer değiştirmesine dikkat edilmelidir. Bindirmelerin hep aynı yerde olması, aşırı bir kalınlık meydana getirir [8].

İstenildiği takdirde polyester reçinenin renklendirilme olanağı vardır. Renklendirme renk pastaları ile sağlanabilir. Ancak polyesterin renkli olması halinde, hava kabarcıklarının giderilip, giderilmediğini saptamak olası değildir [8, 29].

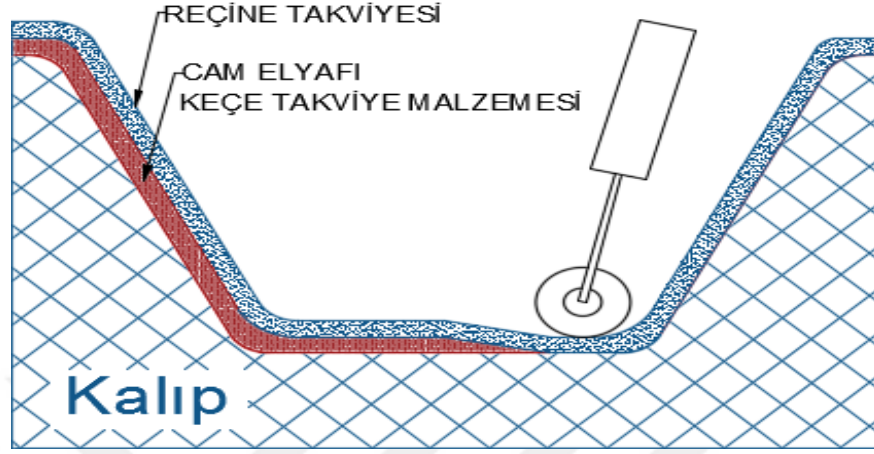
Kalıplama sırasında zorlukla karşılaşmamak ve malzeme zayıflığını önleme amacı ile cam elyafının belli bir şablon ile önceden kalıba en uygun kesilmesi tavsiye edilir [8].

İlk kat keçe uygulamasından sonra diğer keçe tabakası arasına yerleştirilmesine dikkat edilmelidir. Bütün tabakalar birbiri ardından işlenebilir. Ancak dört kattan daha kalın ürünlerde, egzotermik reaksiyondan ötürü oluşan ısının dışarı atılması için belli bir süre beklenip, diğer katların bu beklemeden sonra işlenmesine dikkat edilmelidir [8].

CTP bünyesine gömülecek takviye elemanlarının herhangi bir deformasyona neden olmaması için, ürün kısmen sertleştikten sonra yerleştirilmesi gerekir. Tam sertleşme beklendiği takdirde sonradan eklenen parçaların bünyeye tam intibakı sağlanamaz. Kenarların kesimi henüz tam sertleşme olmadan keskin bir bıçak aracılığı ile yapılabilir. Tam sertleşme halinde elmas testere veya kesme taşı ile kesim yapılması gerekir. Kesim bu durumda zor gerçekleştirilir [8].

Ürünün kalıptan alınması oldukça uzun zaman alır. Kalıptan çıkartma işleminin çabuklaştırılması amacı ile kalıplanan ürün hemen 60°C' lik bir fırına konarak 1 saat süre ile beklenirse, kalıbın soğumasından sonra ürün kalıptan alınabilir. Kalıptan çıkartma işleminde basınçlı hava kullanılması, işlemi büyük ölçüde kolaylaştırır [8].

CTP ürünün tam sertliğe ulaşması için bir ısıtma sistemi işlemi daha gereklidir. Oda sıcaklığında 24 saat veya 60°C' de 1 saat süre ile ön sertleştirilmesi bitirilen ürün 80°C' de 3 saat süre ile bekletilirse tam sertleşmeye ulaşır [8].



Şekil 1.10. El yatırması üretim yöntemi ile CTP üretim yöntemi [8]

#### 1.9.1.2. Püskürtme yöntemi

Jelkot uygulanmış kalıp üzerine cam elyafını ve polyesteri püskürterek işleme yöntemidir. Hava ile çalışan bir püskürtme tabancası bir taraftan cam elyafını kırarak püskürtür, diğer taraftan katalizlenmiş polyesteri püskürtür [8].

Kalıp yüzeyinde cam elyafı ve polyesterin bir laminat oluşturması için rulolanır. Genellikle püskürtme tabancaları üç grupta toplanır [8].

1. Hızlandırıcısı katılmış polyester ve miktarı belirlenmiş katalizörün tabanca içinde karışarak,
2. Hızlandırıcısı katılmış polyester ve miktarı belirlenmiş katalizörün tabanca dışında karışarak,
3. Çift kap sistemi adı verilen, hızlandırıcı katılmış polyester ile katalizör katılmış polyestere tabanca dışında karışarak püskürtüldüğü grup [8].

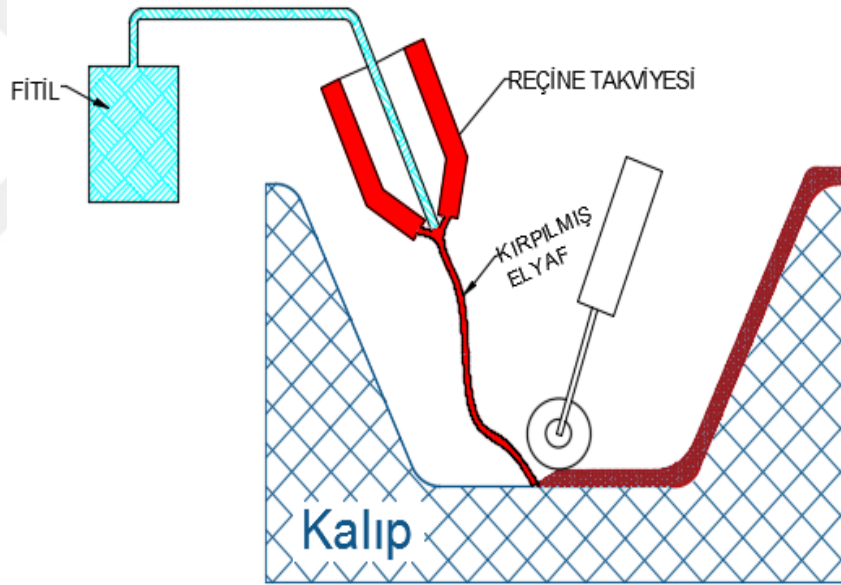
Hangi tür tabanca kullanılırsa kullanılsın, kullanımdan hemen sonra tabancanın temizlenmesi gereklidir. Aksi halde polyester tabancanın kanalları içinde jelleşebilir ve tıkanıklıklara neden olabilir [8].

Cam elyafının ve polyesterin kalıp üzerine püskürtülmesinden hemen sonra bir rulo ile polyester ile ıslanmış cam elyafı kalıp üzerine yatırılmalı ve hava kabarcığı kalmamalıdır. Yatırılan cam elyafı ve polyester püskürtmeye devam edilmelidir [8].

El yatırması yönteminde olduğu gibi, püskürtme yöntemi ile çalışırken de fitil dokuma kullanılabilir. Ancak, dokumanın kalıp üzerine yatırılması sırasında el yatırması yöntemi kullanılmaya zorunluluğu vardır. Dokuma katı üzerine yeniden elyaf ve polyester püskürtmek mümkündür. Çok kalın uygulamalarda dikkat edilmesi gereken konu, polyester reçinenin jelleşmesinden önce rulolama işleminin tamamlanması gereğidir. Bu gereğin yerine getirilebilmesi için de her püskürtülen tabaka rulolandıktan sonra bir diğer tabakanın püskürtülmesi yeterlidir [8].

Püskürtme yönteminde reçine/cam oranı genellikle 2/1 veya 3/1 arasında değişir. Püskürtme makinalarının kapasiteleri de genellikle 2-10 kg/dakika arasında değişmektedir [8].

CTP ürünün sertleşmesi, kalıptan çıkartma, "post cure" işlemleri, el yatırması yönteminde olduğu gibidir [8].



Şekil 1.11. Püskürtme üretim yöntemi ile CTP üretim yöntemi [8]

### 1.9.2. Reçine enjeksiyon yöntemi (RTM- Resing Transfer Moulding)

Reçine enjeksiyonu yöntemi, ıslak kalıplama ile soğuk pres yöntemi arasında bir yöntemdir. CTP ürününün her iki yüzeyinin de düzgün olmasını sağlar [8, 12].

Prensibi basittir. Çift cidarlı bir kalıp içerisine cam elyafı yerleştirilir ve bir veya birkaç enjeksiyon deliğinden reçine yaklaşık 1 atm basınçla kalıba verilir. Cam elyafının reçine ile ıslanması tamamlanınca reçine fazlası, tahliye borularından çıkar [8].

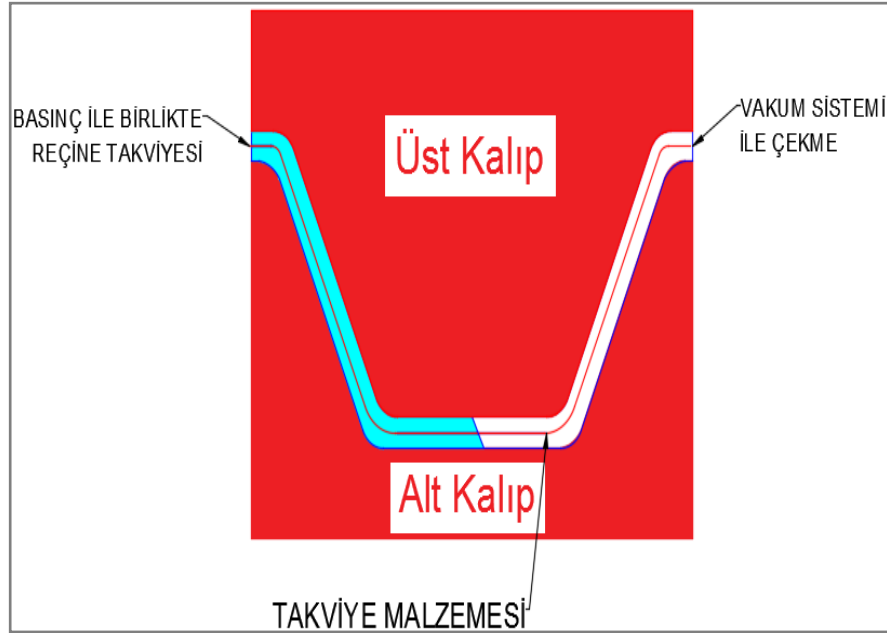


Kullanılan kalıplar genel olarak takviye elemanları ile takviye edilmiş CTP' dir. Bu yöntemde kullanılan cam elyafı ise, ya bağlayıcısı geç çözünen keçe olmalı, ya da devamlı elyafli keçe olmalıdır. Aksi halde enjeksiyon noktası etrafındaki cam elyafı, polyester ile sürüklenebilir [8].

Reçine enjeksiyonu yönteminde de ortalama cam oranı %30 mertebesindedir. Enjeksiyon işlemi, püskürtme makinasına benzeyen bir makine ile yapılır. Kullanılan reçinenin de düşük viskoziteli olması, cam elyafının çabuk ıslanması açısından gereklidir. Reçine enjeksiyonu yönteminin avantajları şöyle sıralanabilir:

1. Her iki yüzü düzgün ürün elde etme olanağı,
2. Sabit şekil ve ağırlıkta ürün elde etme olanağı,
3. Tek kalıpta üretilen ürünlerden daha kaliteli ürün elde etme olanağı,
4. Takviye elemanları ve diğer parçaların tek işlemde eklenebilme olanağı,
5. Kapalı kalıp kullanılması nedeniyle sitren buharlaşmasının azalması,
6. Sertleşmenin ortam sıcaklığından fazla etkilenmemesi,
7. Daha temiz ve az fire verme olanağı,
8. İşçilik maliyetinde azalma,

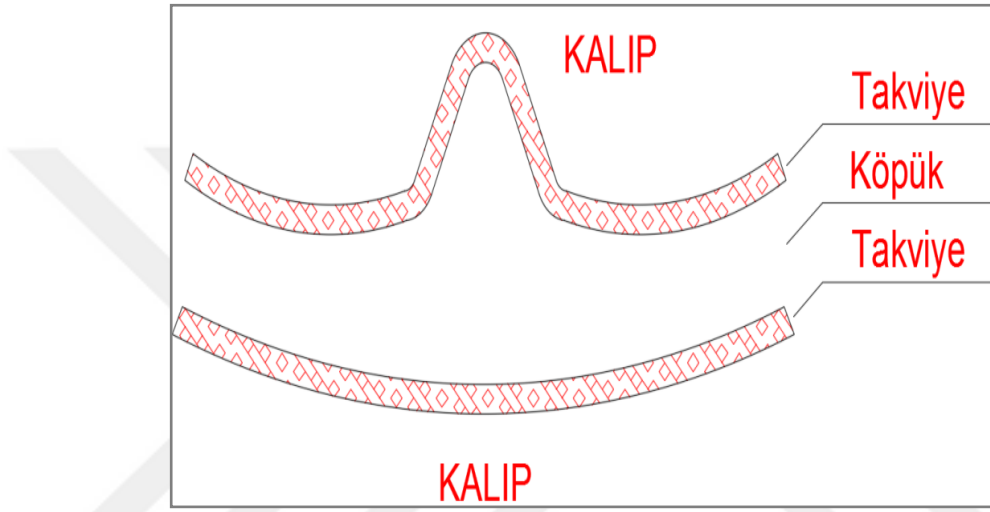
Bu yöntemin dezavantajı ise, ilk maliyetin daha yüksek olması ve kalıpların büyük özenle hazırlanması gerekli olmasıdır [8].



Şekil 1.12. Reçine enjeksiyon yöntemi (RTM) ile CTP üretimi [36]

### 1.9.3. Köpük rezervuar kalıplama

Bu yöntem de, çift kalıp ile her iki yüzü düzgün ürünlerin yapımında kullanılır. Prensibi çok basittir. Yumuşak köpük bir malzemeye (örneğin 12-15 dansiteli poliüretan köpük) polyester emdirilir ve kuru cam elyafı yerleştirilmiş iki kalıp parçası arasında sıkıştırılır. Köpüğe emdirilmiş polyester, sıkışma nedeniyle cam elyafını da kullanılan cam elyafı ve köpük kalınlığına bağlı olarak değişik mekanik özellik sağlanması mümkündür.



Şekil 1.13. Köpük rezervuar yöntemi ile CTP üretim yöntemi [8]

### 1.9.4. Soğuk pres yöntemi

Bu yöntem, ıslak kalıplama işle sıcak pres arasındaki boşluğu doldurmak için kullanılır. Kalıplar genellikle CTP' den yapılır. Basıncın eşit ve tekdüze olarak kalıbın her yanına ulaşması amacı ile takviyeler kullanılır. Takviye malzemesi olarak ahşap, çelik, beton kullanılabilir [8].

Dişi ve erkek kalıplar arasında ürünün kalınlığı kadar boşluk bırakılması ve basınç uygulanması sırasında reçinenin kalıp içerisinde yürüyebilmesi için hava tahliye deliklerinin bulunması gereklidir [8].

Ayrıca, kalıp kenarlarından reçine sızmasının önlenmesi ve kalıbın kapatılması sırasında cam elyafı takviyesinin sıyrılarak iç kısımlara kaçmasını engellemek amacı ile kalıp flanşlarında bir set bulunması gereklidir. İlk kalıplama sırasında meydana gelen egzotermik reaksiyon sonucu kalıp içi belli miktar ısınarak kalıplama süresinin kısalmasını sağlar [8].

Bu yöntemde uygulanması gereken basınç çok yüksek değildir; (~0,5 Mpa ~5 kg/cm<sup>2</sup>) basit bir pres ile bu basınç kolaylıkla sağlanabilir [8].

Yüksek üretim miktarı için oldukça ekonomik bir üretim yöntemidir. Her iki yüzü düzgün ürün verir. Kalıp maliyetinin yüksekliği nedeni ile küçük çaplı üretimler ekonomik değildir [8].

Islatılmış metal kalıplarda ve hız kontrollü otomatik hidrolik preslerde üretilmesi mümkündür. Kalıp yüzeyinin çok düzgün olması ve krom ile kaplanması gereklidir. Böyle bir kalıptan 100.000 civarında ürün alınabilir. Kalıbın tüm yüzeyinde ısı farklılığı 2-5°C' yi geçmemelidir [8].

Kalıplama süresi, parçanın kalınlığına bağlı olarak 1 ile 8 dakika arasında değişir. Kullanılan 100-170°C arasında, kullanılan basınç ise 0,5-15 MPa arasında değişmektedir. Sıvı pres için dört ayrı yöntem vardır:

1. Sıvı reçine/cam keçe,
2. Sıvı reçine/önceden şekil verilmiş cam elyafı,
3. Hazır kalıplama bileşimli levha (SMC),
4. Hazır kalıplama bileşimli hamur (BMC),

#### **1.9.5. Elyaf sarma yöntemi:**

Elyaf sarma yöntemi, boru, tüp, silindir, küre gibi özel üretimlerde yüksek basınca dayanım sağlamak için kullanılır. Prensibi, polyester banyosundan geçen cam elyafının döner bir kalıp üzerine belli açılarla sarılması ve kalıp üzerinde sertleşmesinin sağlanmasından ibarettir [8].

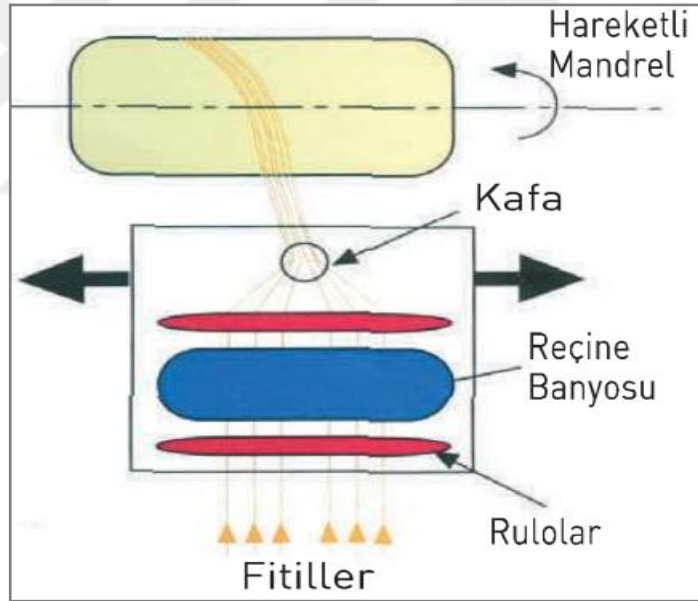
Bu proseste kullanılan cam elyafı, devamlı E camından oluşan fitillerdir. Sarma makinasının kapasitesine göre 10-90 bobin cam elyafı sisteme yerleştirilir ve bütün bobinler bir bant oluşturacak şekilde polyester banyosuna yerleştirilir. Polyester banyosu, iki yönde hareket eden bir araba üzerinde oturtulmuştur [8].

Kalıbın dönmesi ile polyester banyosundan geçen cam elyafı kalıp üzerine sarılmaya başlar. Arabanın hareketi ise, elyafın kalıp üzerine belirli bir açı ile sarılmasını sağlar. Cam elyafının sarım açısı kalıbın dönme hızına ve arabanın hareket hızına bağlıdır [8].

Arabanın birkaç kez gidip gelmesi sonunda tüm kalıp yüzeyi elyaf ile sarılmış olur. Reçine banyosuna reçine beslemesi, elle veya otomatik olarak yapılabilir. Ayrıca reçine banyosunda cam elyafını ıslatmak için değişik sistemler uygulanabilir [8].

Ürünün kalıptan kolay çıkabilmesi için, kalıbın küçülebilir nitelikte olması gerekmektedir. Sarım açısı, son üründen beklenen mekanik mukavemet özelliklerine bağlı olarak seçilmeli ve ayarlanmalıdır [8].

Cam elyafı/reçine oranı bu yöntemde oldukça yüksek değerlere ulaşabilir. (Yaklaşık %70-80) Cam elyafının yüksek oranda olması mekanik dayanımı arttırıcı bir etkidir. Ancak, kimyasal dayanım konusunda aynı başarıyı göstermez. Bu nedenle kimyasal dayanım aranan uygulamalarda kalıp üzerine önce kırılmış cam elyafı ve polyester uygulanır. (Cam/reçine oranı %25-30) Bu uygulamadan sonra elyaf sarımına geçilir. Böylece hem kimyasal dayanım hem de mekanik dayanım sağlanmış olur [8].



Şekil 1.14. Elyaf sarma yöntemi ile CTP üretimi [11]

#### 1.9.6. Savurma döküm

Savurma döküm yöntemi, homojen bir et kalınlığı aranan silindirik cisimlerin yapımında kullanılır. Başlıca kullanım alanı 5 m' ye kadar geniş çaplı boruların üretimidir. Polyester, vinil ester veya epoksi reçine kullanılarak üretim yapılabilir. Bu yöntem uygulanarak yapılan borularda hava kabarcığı bulunmaz ve her iki yüzü düzgün ürün elde edilir [8].

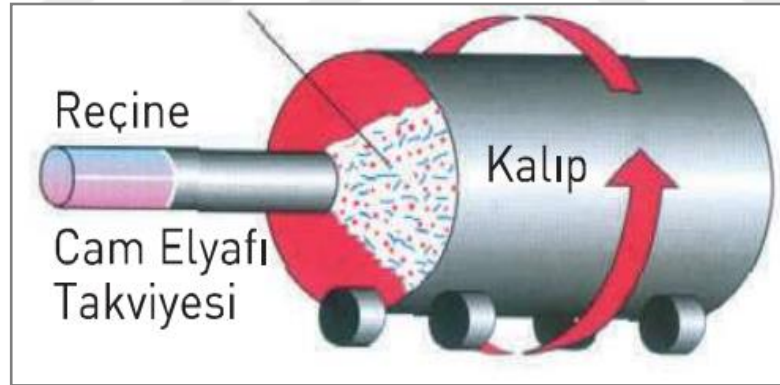
Yöntemin prensibi, metalik döner bir kalıbın içerisine cam elyafının yerleştirilmesi ve polyester reçinenin kalıp boyunca püskürtülerek dönmeden kaynaklanan merkezkaç kuvvet etkisiyle reçinenin kalıp yüzeyine homojen olarak dağılmasını sağlamaktan ibarettir [8].

Bir diğer yöntem, cam elyafı ve polyesterin aynı zamanda kalıp yüzeyine püskürtülmesi ile aynı sonucun elde edilmesine olanak verir. Kalıbın dışardan su buharı ceketini ile kalıplanmış olması halinde, su buharı ile kalıbın ısıtılması veya iç kısımdan sıcak hava geçirilmesi ile çabuk sertleşme sağlanabilir [8].

Kalıbın dönüş hızı kalıp çapı ile bağlantılıdır. Yaklaşık 2 m. çapında bir ürün için dakikada 180 devir yeterlidir. Böylece çevresel hız da yaklaşık 70 km/saat' e ulaşır. Kalıbın döndürülmesine ürün sertleşinceye kadar devam edilir [8].

Bu yöntem ile elde edilen ürünün sertliğini sağlamak üzere kullanılan takviye arasında kum dolgulı polyester ile ayrı bir tabaka elde etmek ve bu tabakanın üzerine cam elyafı ile takviye edilmiş bir polyester tabakası daha uygulamak da mümkündür [8].

#### Kırpılmış Fitol



Şekil 1.15. Savurma döküm yöntemi ile CTP üretimi [11]

#### 1.9.7. Levha devamlı üretimi

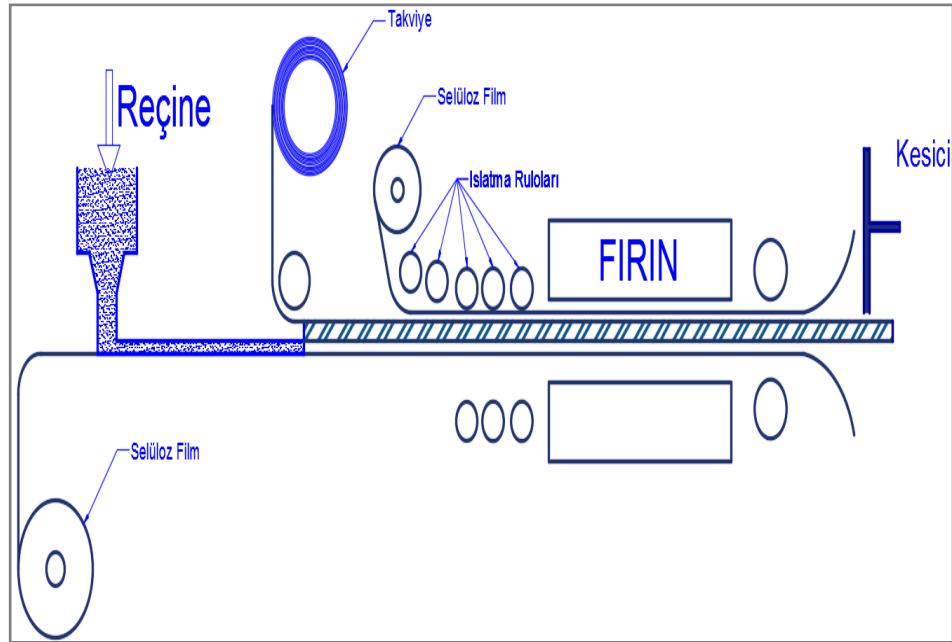
Levha devamlı üretimi yöntemi, genellikle oluklu veya düz çatı ve sera örtülerinin üretiminde kullanılır. Bu amaçla kullanılan makineler değişik tip ve boyuttadır. Üretim prensibi basittir. Reçine ve cam elyafı iki ayırıcı film tabakası arasında sıkıştırılır ve ısıtılmış kalıplar arasından geçirilerek sertleştirilir. Ayırıcı film olarak polyester film veya selofan film kullanılabilir [8].

Reçine, ayırıcı film tabakası üzerine düzgün bir kalınlık oluşturacak şekilde yayılır ve üzerine cam takviyesi keçe olarak veya kırılmış cam elyafı olarak yayılır. Bu tabaka üzerine yayılan ikinci tabaka ayırıcı film ile birlikte tamamı rulolar arasından geçerek oluşmuş hava kabarcıkları giderilir ve levhanın sabit kalınlıkta olması sağlanır. İkinci kademede tüm sistem, verilecek şekle göre hazırlanmış kalıplardan ısıtılmış bir bölge içerisinden geçer ve bu fırınlama sırasında reçinenin sertleşmesi sağlanır [8].

Sertleşmiş levhaların kesimi ile üretim tamamlanır. Devamlı levha üretim makinalarında dakikada 12 m' lik bir hız elde edilebilir [8].

Işık geçirgen levha üretimi için cam takviyesinin toz bağlayıcılı keçe olarak veya kırılmış cam elyafı olarak kullanılması ve polyester reçinenin de cam elyafı kırılma indisi ile eş değerde bir kırılma indisine sahip olması gereklidir. Bu amaçla özel polyester geliştirilmiştir [8].

Cam takviyesi olarak, özel hallerde dokunmuş cam elyafı da kullanılabilir. Böyle bir uygulamada cam dokumanın önce polyester banyosundan geçirilip, reçine fazlası ayrıldıktan sonra ayırıcı film tabakaları arasında sıkıştırılması tavsiye edilir. Hava koşulları ile temas edecek levhaların özellikle reçine/cam oranının yüksek olması gereklidir. Bu oran 3/1' den aşağı olmamalıdır. Özel amaçlı polyesterler kullanılarak, CTP levhaların uzun yıllar sararmadan, bozulmadan kullanılması mümkündür [8].



Şekil 1.16. Levha devamlı yöntemi ile CTP üretimi [8]

### 1.9.8. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon)

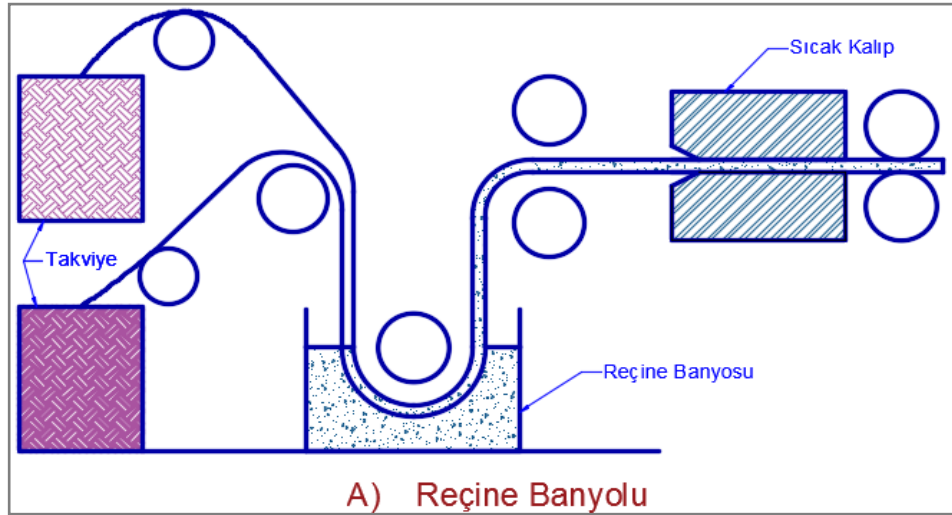
Bu yöntem, istenilen şekilde profillerin üretimi için kullanılır. Profil şekilleri tamamen kullanılan kalıba bağlıdır ve ürünlerde boyuna mukavemet çok yüksektir. Yaklaşık % 60-65 oranında cam elyafı kullanılabilir [8].

Cam takviyesi olarak devamlı fitil, dokunmuş fitil, keçe veya bunların kombinasyonları kullanılabilir. Bu seçim, son üründe mukavemet ve sertlik özelliklerine bağlıdır. Çekme yönteminde genellikle iki yöntem söz konusudur [8].

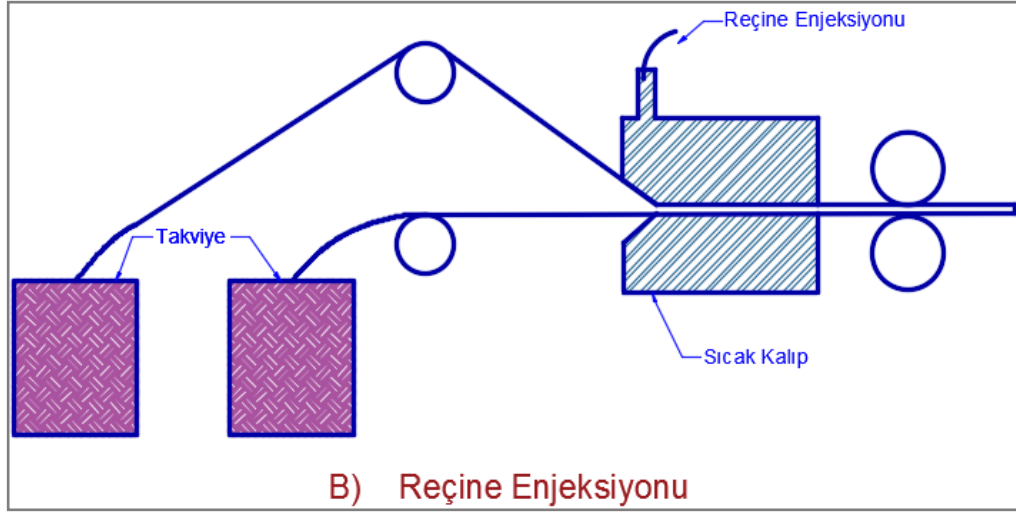
Birinci sistemde, çekilecek cam elyafı önce katalizlenmiş polyester banyosundan geçirilir ve sonra ıslatılmış kalıplardan polyester fazlası sıyrılarak çekilir. Kalıplar aynı zamanda profilin şeklini belirler [8].

İkinci yöntemde cam elyafı belli bir gerilim ile kuru olarak ıslatılmış kalıplardan geçirilir ve kalıp içerisinde reçine enjekte edilir. Reçine enjeksiyon basıncı 0,1-0,5 MPa arasındadır. (1 MPa~10 kg/cm<sup>2</sup>) Sertleşmeyi çabuklaştırmak açısından cam elyafı, kalıp içerisine sokulmadan önce 100°C' ye kadar ısıtılabilir. Üretim hızı olarak dakikada 1 m erişilebilecek bir hızdır [8].

Çekme sisteminin iyi yapılması halinde düzgün profiller elde edilir. Ayrıca "post cure" işlemi için kalıptan sonra ürünün bir tünel fırından geçirilmesi tavsiye edilir [8].



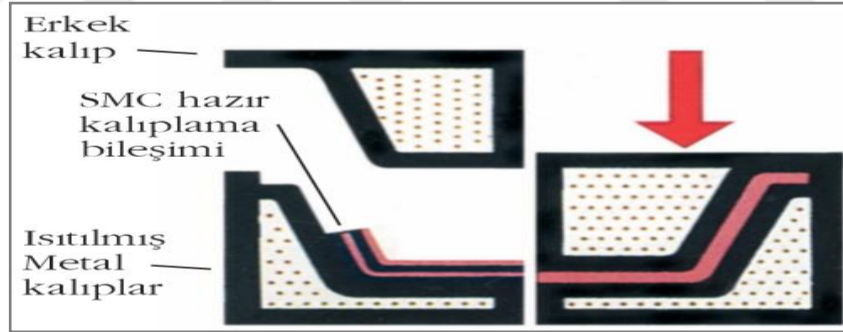
Şekil 1.17. Profil çekme yöntemi ile CTP üretimi (Reçine Banyolu) [8]



Şekil 1.18. Profil çekme yöntemi ile CTP üretimi (Reçine Enjeksiyonu) [8]

### 1.9.9. SMC/BMC Hazır kalıplama bileşimleri

Ürün boyutuna göre 3-6 dakikalık bir kalıplama süresi sağlayan hızlı, seri bir kalıplama metodudur. Önceden hazırlanmış, pestil veya hamur haldeki cam elyafı-polyester-dolgu ve katkı malzemeleri karışımının 150-170°C sıcaklıkta, 50-120 kg/cm<sup>2</sup> basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmesi metodudur [11, 12].

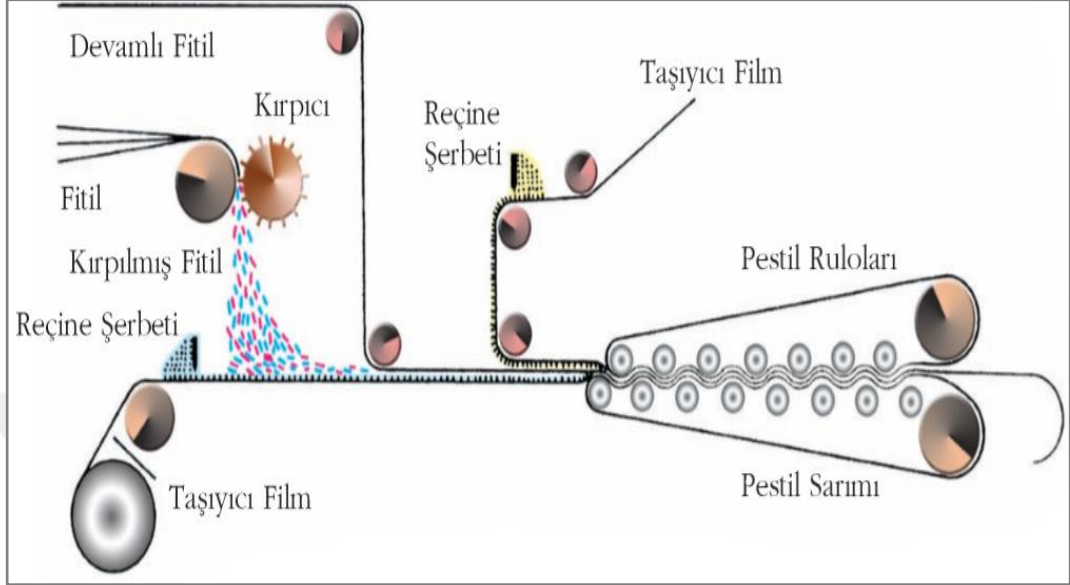


Şekil 1.19. SMC pres kalıplama yöntemi ile CTP üretimi [11, 12]

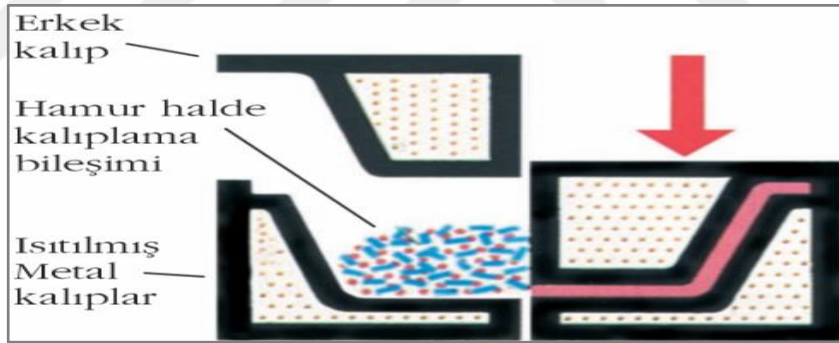
SMC (Sheet Molding Compound) sıcak pres kalıplama pestili olarak adlandırılır. Cam elyafı takviyesi dışında sıvı ve toz halindeki tüm SMC girdileri, devamlı ve kesikli olarak mikserlerde karıştırılır. Elde edilen karışım sıvı kıvamlı bir macundur. Bu macun halindeki malzeme, üzerine kırılan belirli miktarlardaki cam elyafı ile birlikte, üstten e alttan gelen, genellikle naylon ve polietilen plastik malzemedan yapılmış taşıyıcı filmler tarafından kapatılarak sandviç yapıda bir bileşim haline gelir. Sandviç yapıdaki bu görünüm, konveyör band üzerinde ilerleyerek, sıkıştırma ruloları arasında geçirilerek pestil haline getirilmektedir. Daha sonra pestil halindeki hazır kalıplama bileşimi, uygun uzunluklarda rulo haline getirilip, reçinenin



uçuculuğunu önlemek üzere naylon ambalajda paketlenerek, sıcaklık kontrollü bir ortamda depolanır. Malzeme daha sonra, uygun kalıplama vizkositesine ulaşılan kadar olgunlaştırılır [12, 37].



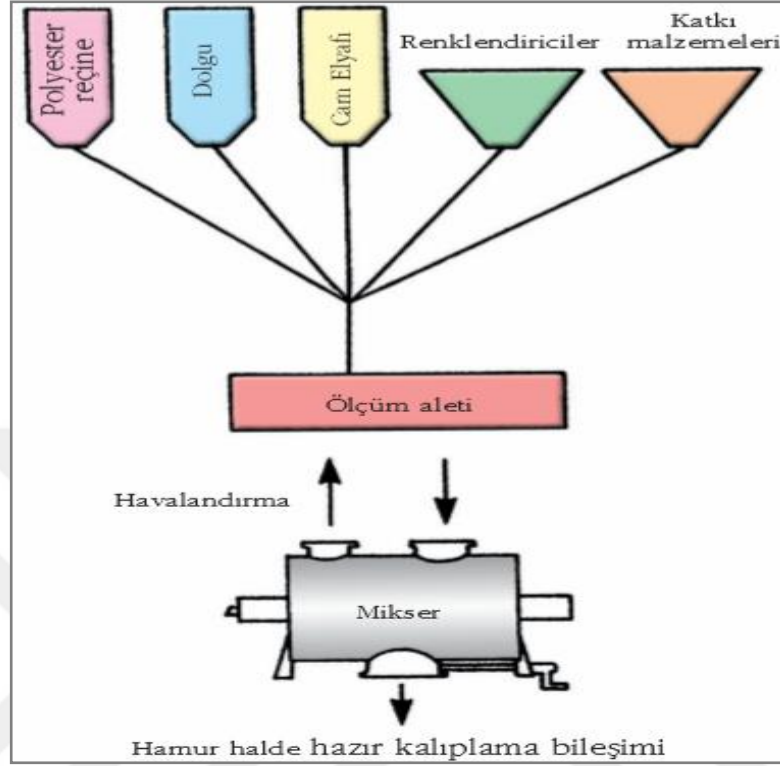
Şekil 1.20. SMC hazır kalıplama bileşimi üretimi [11, 12]



Şekil 1.21. BMC pres kalıplama yöntemi ile CTP üretimi [11, 12]

BMC (Bulk Molding Compound) sıcak pres kalıplama hamuru olarak adlandırılan, polyester hazır kalıplama kompozit malzemesidir. Polyester BMC nin ilk uygulamaları 1940' ların ortalarında başlamıştır. Hamur şeklindeki kalıplama bileşimi; reçine, katalizör veya katalizörler, toz halindeki dolgu malzemeleri, kırılmış fitil, pigment, kaydırıcı, ve diğer performans artırıcı malzemelerin harmanlanması ile oluşur. Malzeme yüksek ısı dayanımı, boyutsal stabilite, elektriksel özellikler, mukavemet ve rijitlik özellikleri ile tanımlanabilir. BMC, ayrıca yüksek sıcaklıklarda renk değişimi meydana gelmeyecek, korozyona, yanmaya ve UV etkisine dayanıklılık gösterecek şekilde formüle edilebilir. Malzemeler; enjeksiyon, basınç veya transfer kalıplama ile uygulanabilir. BMC' lerde ki en önemli nokta, CTP

uygulamasındaki taleplere uyacak en uygun maliyetle en iyi performansı sağlayabilecek özelliklerin ayarlanabilmesidir [12, 37].



Şekil 1.22. BMC hazır kalıplama bileşimi üretimi [12]

### 1.10. Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Elyaf takviyeli kompozitler, özellikle uzay ve havacılık alanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiş malzemelerdir. Uzay ve havacılık alanlarında ilk kullanılan kompozitler alüminyum alaşımlarından hazırlanmış ve uçakların bazı parçaları yüksek mekanik dayanımları ve hafifliklerinden dolayı alüminyum kompozitlerden yapılmıştır. Ancak alüminyum alaşımları korozyona ve metal yorulmasına uğrayabilen maddelerdir ve bu zayıf özelliklerin iyileştirilmesi pahalı işlemler gerektirir. Elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde korozyon söz konusu değildir ve malzeme yorulması metallerdeki kadar hızlı gelişmez [7]. Başlıca cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

#### 1.10.1. Otomotiv-deniz ve taşıma sektörleri

Otomotiv sektöründe kullanılan CTP malzemeler genellikle araç gövde parçalarının yapımında kullanılır. Otomotiv sektöründeki CTP malzeme kullanımı her geçen gün giderek artmakta, bu artışa bağlı olarak CTP malzemelerde üretim hızı vb. işlemler

oldukça önem kazanmaktadır. Ayrıca son zamanlarda tren, metro vb. ulaşım araçları iç ve dış mekanik aksam parçaları da CTP malzemedan yapılmaya başlanmıştır. Ayrıca mukavemetinin yüksek ve hafif malzeme olmasından dolayı deniz taşıma araçları ve marin sektöründe CTP oldukça yaygın kullanılan bir malzemedir.

#### **1.10.2. Uzay- havacılık ve savunma sanayii**

CTP malzemeler savunma sanayinde de oldukça yoğun kullanılmaktadır. Havacılık araç gereçlerinde, uzay araç gereçlerinde ve savunma sanayiinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bunun ana sebeplerinden birisi ise oldukça hafif olmasının yanı sıra yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [38].

Ülkemizde ve dünyada savunma ve uzay sanayisinin gitgide önem kazanmasıyla bu malzemelerinde önemini daha çok arttırmaktadır.

#### **1.10.3. İnşaat sanayii**

İnşaat sanayiinde oldukça yaygın olarak kullanılan CTP malzemeler, kaset beton kalıp, çatı kaplamalar, kiremit görünümlü çatı kaplamaları ve bina alınlıkları, cephe kaplamaları, izolasyon malzemeleri, prefabrik yapılar, ctp kalıplar ve profiller, kapalı ve açık alanlarda cephe ve çatı panelleri olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [15-20, 38].

Kapalı ve açık mekanlarda, CTP giydirme panelleri, özellikle eski yapıların restorasyonunda önem kazanmaktadır. Ayrıca, üstü kapalı mekanlar oluşturmak üzere, gerek ışık geçirgen, gerek opak renklerde CTP malzeme çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konuda en önemli uygulama, kapalı yüzme ve spor salonlarının ışık geçirgen çatı kaplamalarının yapımıdır. Ayrıca, yüzme havuzunun kendisi de tek parçalı veya çok parçalı olarak CTP malzemedan yapılmaktadır [38].

Bir diğer önemli konu, yaya yürüme yollarının tavan ve yan cidar panellerinin CTP malzeme ile yapılmasıdır. Bu panellerin üretiminde de çift cidarlı ve ısı izolasyonlu paneller kullanılabilir [38].

#### **1.10.4. Elektrik-elektronik sektörleri**

CTP malzeme yalıtkanlık özelliğinin iyi olması sebebiyle elektrik ve elektronik sektöründe de oldukça yaygın olarak kullanılması sebebiyle büyük öneme sahiptir.

Aydınlatma malzemeleri, hatların taşıyıcı sistemleri, özellikle son yıllarda rüzgar turbünü kanatları da CTP malzemeden üretilmeye başlanmıştır [15-20, 38].

Elektrik sektöründe bir diğer uygulama örneği, yeraltı kablolarının döşenmesi sırasında kullanılan CTP kılavuz çubuklarıdır. İç mekanda ve dış mekanda kullanılan elektrik armatürleri de CTP malzemeden yapılmaktadır [38].

Elektrik sektöründe CTP kullanım alanları arasına son yıllarda katılan bir diğer önemli uygulama, rüzgar enerjisinden elektrik üretimini sağlayan rüzgar jeneratörleridir. Bu jeneratörlerde, hem taşıyıcı direk, hem de pervane kanatları CTP olarak yapılabilmektedir [15, 38].

#### **1.10.5. Eğlence-spor sektörü, şehir mobilyaları**

CTP malzeme, yüksek mukavemet ve hafif olmasından dolayı eğlence sektöründe özellikle güvenlik açısından oldukça tercih edilen bir malzemedir. Ayrıca buna maliyet açısından düşük değerlerde olması da büyük bir etkidir. Oyun parkları, eğlence ve oyun parkurları, spor malzemeleri vb. alanda büyük öneme sahip bir malzemedir [15-20, 38].

#### **1.10.6. Diğer**

Sanayii de kullanılan silo, tank, boru sistemlerinde oldukça tercih edilen malzemedir. Ayrıca altyapı sistemlerinde de uzun yıllardır kullanılmaya başlanmıştır [15-20, 38].

CTP malzeme, savunma sanayiinde de kullanılmaktadır. Özellikle hücum botları ve mayın tarama gemilerinin gövdeleri CTP' den yapılmakta, manyetik alan oluşturmaması sayesinde büyük avantaj sağlamaktadır [15-20, 38].

CTP malzeme ile yapılan bir diğer uygulama, ahşap taklidi kapılardır. Böylece, hem sağlam bir kapı elde edilmekte, hem de ağaçlar korunarak doğaya zarar verilmemektedir [38].

Roketatar gövdeleri de CTP' den yapılmaktadır. Havan toplarının sahradaki birliklere havadan gönderilmesinde kullanılan sandıklar da CTP malzeme kullanılarak yapılmaktadır. Bu sandıklar, paraşüt ile uçaktan atılmakta ve ihtiyacı olan birliklere lojistik destek sağlanmasında yararlı olmaktadır [15-20, 38].

CTP malzeme, şehir içi ve şehir dışı karayollarında kenar dikmesi, trafik işaret

levhaları, ışık perdeleri, baş üstü levhaları ve özellikle şehir içinden geçen otoyolların kenarlarına yerleştirilerek gürültü kirliliğini önleyen ses yalıtım duvarları olarak kullanılmaktadır [38].

Su taşıma, isale ve kanalizasyon hatlarında kullanılan borular, binlerce metreküp hacimli büyük modüler su depoları, üstü kapalı yaya geçitlerinin kaplama panelleri, şehir içi ve parklarda kullanılan çöp kutuları, yüzme havuzları, otobüs durakları, büfeler, iletişim panoları, pazar yerleri ve haller, yaya köprüleri, köprü korkulukları, iskeleler, şantiye ve afet barınakları, toplu konutlar için saniter malzemeler, arıtma tesisleri, korozif ortamlardaki yürüme platformları, stadyum, açık hava tiyatrosu gibi toplu oturma birimleri, çocuk bahçesi ve parklar, plajlar ve tatil beldelerinde kullanılan aksesuarlar, telefon kabinleri, profiller bunların başlıca kullanılan CTP malzemeler arasında yer almaktadır [38].

CTP malzemelerin önemli olduğu diğer uygulama ise profil olarak, endüstriyel inşaatların taşıyıcısı sistemlerinde kullanılmasıdır. Bu profillerle yapılan yüksek gerilim hattı direkleri, manyetik alan taşımaması nedeni ile önem taşımaktadır. CTP profiller, dış mekanda kullanıldığı gibi, iç mekanlarda da yer döşemesi olarak kullanılmaktadır. Kapılar CTP malzeme ile yapılan bir diğer uygulama, ahşap taklidi kapılardır. Böylece, hem sağlam bir kapı elde edilmekte, hem de ağaçlar korunarak doğaya zarar verilmemektedir [38].

CTP malzemenin önemli bir kullanım alanını, bağımsız panellerden oluşan prefabrike konutlar oluşturmaktadır. Bu uygulamanın avantajı, hazır modüllerin, somun civata ile kısa sürede birleştirilerek monte edilebilmesidir. Böylece, modüler yapı çok kısa bir süre sonunda kullanıma hazır hale gelebilmektedir [38].

CTP' nin değişik üretim teknikleri kullanılarak yapılan birkaç köprü örneği verilecek olursa; Hollanda ' da Harlingen limanında kullanılmak üzere 1997 yılında üretilmiş yolcu köprüsüdür. Gemi ile iskele arasında yolcu naklini sağlayan bu köprü, 2x16 metre ve toplam 3 ton ağırlığındadır. El yatırması metodu kullanılarak yapılmıştır. 30 ton yük altında yalnızca birkaç santim sehim vermektedir. Bağlantı için kullanılan somun civatalar dışında tamamen CTP profillerden yapılan soldaki köprü, Danimarka'nın Kolding kentinde, tren yolu üzerinden 520 m' lik bir aşık aralığı ile geçiyor. CTP malzeme ile yapılan köprü inşaatı için pultrüzyon metodu dışındaki metodlar da kullanılabilir [38].

## 2. LAZERLER

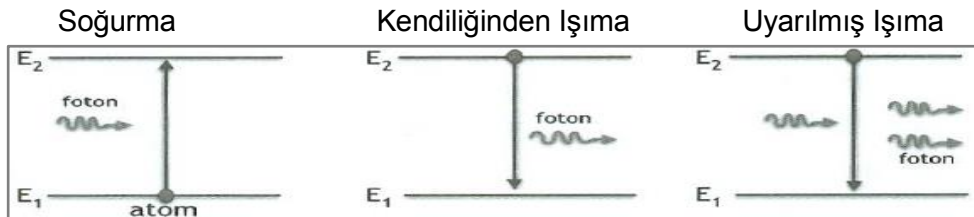
Lazer kelimesi 1957 yılında Gordon Gould tarafından türetilip bilim dünyasına katılmıştır. Uyarılmış ışımaya ile kuvvetlendirilmiş ışık anlamına gelir. İngilizcesi LASER olup "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" tanımının baş harflerinden oluşan bir sözcüktür [22, 23].

1916 yılında Albert Einstein'ın önerdiği uyarılmış ışımaya teorisi, lazerin temelini oluşturmuştur. Einstein'ın bu teorisine göre uyarılmış ışımaya enerji seviyesindeki bir atom, düşük enerji seviyesine indiğinde foton yayması gerekir, yayılan fotonlar aynı yönlü, aynı kuvvetli, tek renkli, polarize bir ışık hüzmesi üretirler. Bunun sonucunda ise enerji ortaya çıkar. Einstein'ın önerisi ile temellenen lazerlerin tarihsel gelişimi, sırası ile 1928'de Rudolph W. Landenburg tarafından, uyarılmış ışımaya varlığının kanıtlanması, 1940'da Valentin A. Fabri-Kant'ın sayı yoğunluğu tersiniminin olma olasılığını, 1947'de Willis E. Lamb ve Rutherford'un uyarılmış ışımaya ilk gösterimini başarmaları ile ivme kazanmıştır [22-24, 40].

1960'ların sonuna kadar endüstriyel alanda pek kullanılmayan lazer, 1970'lerin ortalarında kesme, kaynak, delme ve markalama işlerinde, ölçme ve daha birçok alanda yerini almıştır. Daha sonraki yıllarda boya lazerleri, excimer ve iyot lazerleri bulunarak ve geliştirilerek lazer teknolojisi bugün, savunma sanayinden endüstriye, tıp alanından, haberleşme, bilgisayar ve hatta eğlence sektörüne kadar birçok alanda kullanılabilir hale gelmiştir [40, 41].

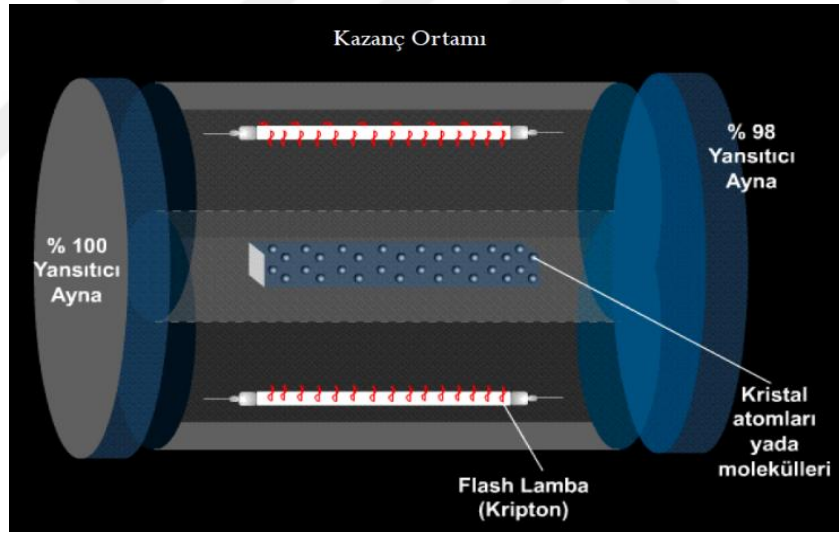
### 2.1. Lazer Çalışma Prensipleri

Lazer üretebilmek için belirli şartlar gereklidir. Bunların en önemlisi uyarılmış ışımaya (lazerin çalışma prensibi olarak da bilinir) ve sayı yoğunluğu tersinimidir [22].



Şekil 2.1. Lazerin temel prensiplerinden biri olan uyarılmış ışımaya şematik gösterimi [22]

Lazer eldesinin temeli olan uyarılmış ışımaya prensibine bağlı olarak reaksiyon optik saydam bir lazer tüpü içerisinde gerçekleşir. İçerisi katı, sıvı veya gaz bir madde ile doldurulan lazer tüpünün bir ucunda tam yansıtıcı ayna, diğer bir ucunda ise kısmen yansıtıcı ayna mevcuttur. Lazer tüpünde dışarıdan enerji verilerek ortamda bulunan atomlara bu enerji ulaştırılır. Lazer tüpünde dışarıdan enerji verme olayı, ortamdaki elektrik akımı geçirerek, kimyasal bir yolla ya da dışarıdan ışık ile uyarılma şeklinde gerçekleştirilebilir. Atomların bir kısmı bu enerjiyi soğurur, fazla enerji fotonu kararsız hale getirir. Kararsız ve uyarılmış haldeki atomlara çarpan fotonlar sonucu bu atomlar da foton yayarlar ve karalı hale geçmeye çalışırlar. Yayılan bu fotonlar tüpün içerisindeki aynalardan yansiyarak döner ve reaksiyonu hızlandırır. Bu arada uyarılma ve tahrikler sonucu ortamdaki fotonların sayısında artış meydana gelir. Atomların büyük çoğunluğunun foton yaymasıyla ışık kuvvetlenir, kuvvetlenen bu ışık kısmen yansıtıcı aynalı uçtan dışarı çıkar [22, 25]. Şekil 2.1.' de uyarılmış ışımaya şematik gösterimi, Şekil 2.2.' de lazerin çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2.2. Lazer çalışma prensibi [26, 27]

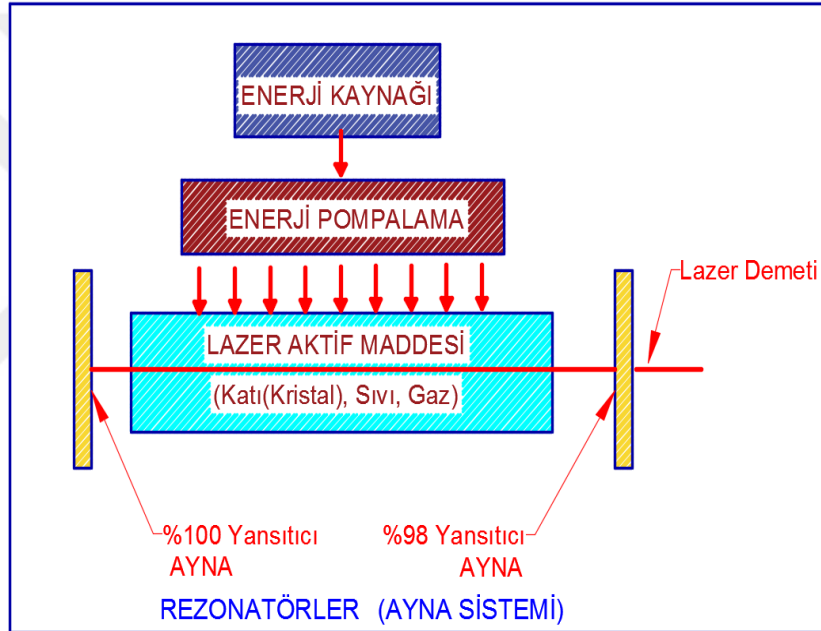
## 2.2. Lazer Özellikleri

- Tek renkli (monokromatik) olması (tek dalga boyu içermesi),
- Uyumlu (Koherent), lazer demeti kendi içerisinde mükemmel uyumlu olması (faz farkı olmaması),
- Yönelimlilik, rezonans kovut içerisinde gelmesi ve dalganın sadece optik eksen boyunca ilerleyip güçlenmesinin bir sonucu olarak lazer demeti yüksek derecede yönelimlidir [22, 28].

Günümüzde, dalga boyları, güçleri, ışın kalitesi, çalışma şekilleri ve darbe uzunlukları açısından birbirinden farklı binlerce lazer türü vardır. Genel olarak lazerler fiziksel süreçlerine göre gaz lazerler, katıhal lazerleri ve sıvı lazerler olarak ayrılırken, geçici özelliklerine göre de sürekli, atımlı ve atım sürelerine göre sınıflandırılabilir [22, 23-28].

### 2.3. Lazerin Bileşenleri

Lazer sistemi bileşenleri, lazer aktif maddesi (katı, sıvı, gaz), lazer güç kaynağı, %100 ve %98 olmak üzere yansıtıcı ayna sistemlerinden (rezonatörler) oluşur [22, 28]. Lazer sistemi bileşenleri şematik gösterimi Şekil 2.3.'tedir.



Şekil 2.3. Lazer sisteminin bileşenleri [22]

### 2.4. Lazer Parametreleri

- Lazer ışınının gücü,
- Dalga boyu,
- Atım süresi,
- Tekrarlama süresi,

Lazer işlemi uygulanan malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile lazer parametreleri seçimi amaca uygun olarak değişiklik gösterebilir. Malzeme işleminde yukarıdaki belirtilen lazer parametrelerinin her biri ayrı öneme sahiptir.



## 2.5. Lazerlerde Çıkış Gücü ve Yoğunluğu

Lazer gücü, birim zamanda (saniyede) lazer ışığı formunda yayılan toplam enerjidir. Lazer ışın yoğunluğu ise, gücün lazerin yoğunlaştırıldığı alana bölünmesiyle elde edilen bir parametredir. Yüksek ışın yoğunluğu kesme uygulamaları için istenilen bir özelliktir. Çünkü bu özellik kerf aralığının çok kısa zamanda hızlı bir şekilde ısınmasını sağlar ve böylece yüksek kesme hızları ve mükemmel kesme kalitesi elde edilmiş olur. Çoğu metalin yansıtma özelliği, düşük ışık yoğunluğunda yüksektir ve yüksek ışık yoğunluğunda düşüktür. Malzeme kalınlığı arttıkça yoğunluğunda artması gerekir. İşlem geliştirme sırasında optimum güç değerleri belirlenir. Çünkü aşırı güç, geniş bir kerf aralığı ve artık malzemenin artışı ile sonuçlanırken, yetersiz güç ile ise kesme işlemi başlatılamaz [29-31].

Lazer güç hesabı;

$$\text{Atım süresi } f_p = \frac{1}{T_p}$$

$$\text{Max. Güç } P_{\text{peak}} = \frac{P_a}{t_p f_p}$$

$$\text{Yoğunluk } I = \frac{P_{\text{peak}}}{A} = \frac{E_p}{A t_p}$$

$$\text{Akış } W = \frac{E_p}{A} = \frac{P_{\text{peak}} t_p}{A}$$

$$\text{Atım enerjisi : } E_p = P dt = P_{\text{peak}} \times t_p$$

$$t_p = \text{Pulse width} \quad : \text{Puls genişliği}$$

$$P_a = \text{Average power} \quad : \text{Ortalama güç}$$

$$A = \text{Area} \quad : \text{Alan}$$

$$P_{\text{peak}} = \text{Peak power} \quad : \text{Pik güçü}$$

$$E_p = \text{Peak energy} \quad : \text{Pik enerjisi}$$

## 2.6. Lazer Çeşitleri

Lazer ışın demetini elde etmek için kullanılan aktif malzemeye bağlı olarak aşağıdaki sınıflara ayrılabilir [32]. Şekil 2.4.' te lazer çeşitleri kullanılan aktif maddeye göre, Tablo 2.1.' de ise lazer tiplerinin ürettikleri ışınların dalga boyları listelenmiştir.



Şekil 2.4. Lazer çeşitleri [32]

Tablo 2.1. Lazer tipleri ve ürettikleri ışınların dalga boyları [32]

Lazer Tipi	Dalgaboyu, $\lambda$ (nm)	Çıkış Gücü (W)
He-Ne	632,8	0,1-1x10 <sup>-3</sup>
Argon	488	0,3-50
He-Cd	441,6	0,01-0,2
Bakır(CVL)	510,5	10-100
CO	10600	0,2-45x10 <sup>3</sup>
Excimer	248	40-120
Boya (Rh6G)	577	10-100
Yarı-iletken	800	1-40
Nd:Yag	1064,1	6000
Nd:Cam	1062,3	850

### 2.6.1. Nd:YAG lazerler

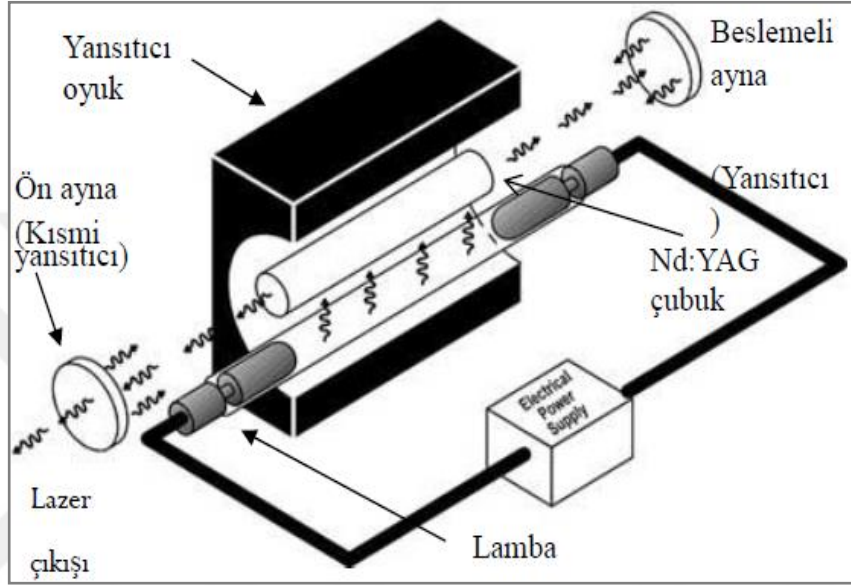
YAG (Yttrium-Aluminium-Garnet) lazer birçok açıdan yakut lazerin benzeridir. Bu lazer flaş lamba ile pompalanır. Silindir çubuk kristal malzemedendir yapılmıştır. Burada alüminyum oksit yerine itriyum, alüminyum ve garnet (lal taşı) kullanılmaktadır [27].

Yakut lazerde olduğu gibi, YAG lazerde de çubuğa lazer malzemesi olan neodimyum (Nd) ilave edilir. Neodimyum nadir bir malzemedir ve ağırlık olarak %3 civarında YAG kristale ilave edilmektedir [27].

Nd:YAG lazer işlemi pompalamanın sürekli veya aralıklı olmasına bağlı olarak sürekli dalga (CW) veya darbe oluşumlu olarak iki şekilde yapılır. Sürekli dalgada güç çıkışı 150 W ile 6 kW arasında değişir. Yüksek güçlü CW lazerler (2 kW' a kadar) üç adet Nd:YAG çubuğun tek osilatör şeklinde kullanılıp çubuğun

pompalamasıyla gerçekleştirilir [27].

Şekil 2.5. Nd:YAG lazerinin genel görüntüsünü ve çalışma şeklini göstermektedir. Burada Nd:YAG çubuğunun uyarılmasıyla ortaya çıkan lazer ışını yansıtıcı oyuk içerisinde %100 yansımali ayna ve %98 yansımali aynalar arasında defalarca gidip gelerek yönlendirilir. Sonuçta düz ve tek bir dalga boyuna sahip olan lazer ışını %98 yansıtıcı aynadan geçerek ortama verilir [26, 28].



Şekil 2.5. Nd:Yag lazer sistemi ve çalışma prensibi [26, 27]

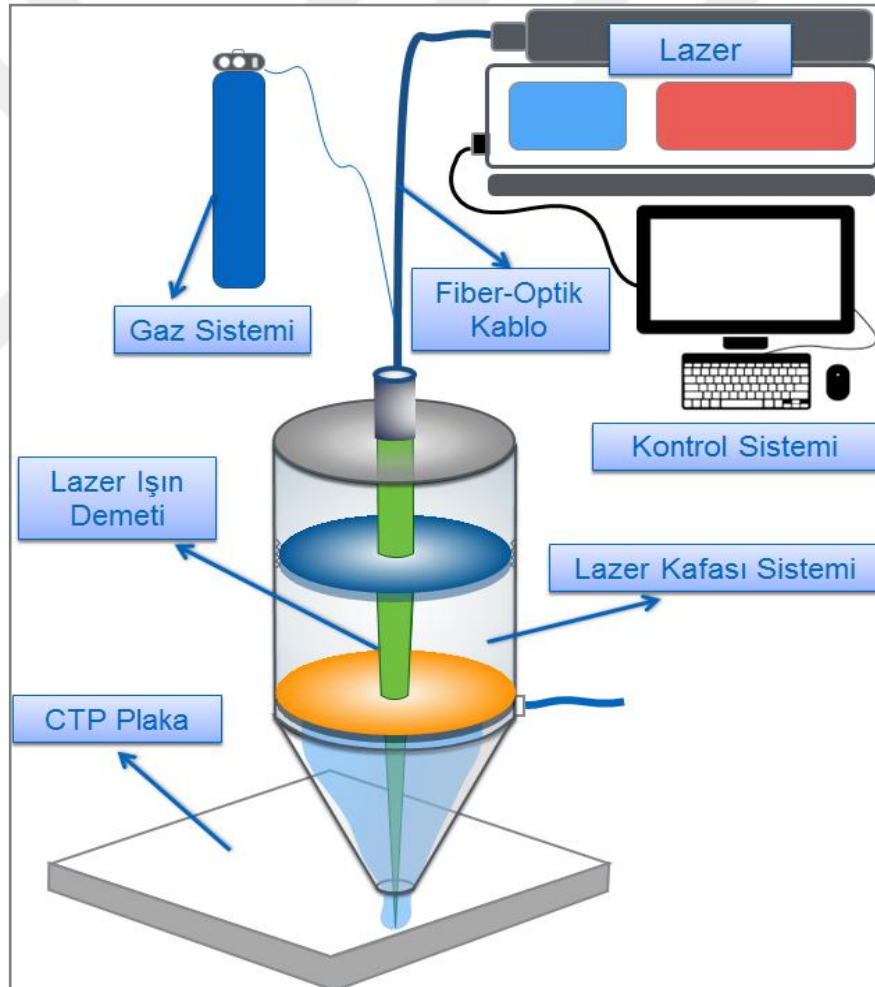
Çok yüksek güçlü lazerler (6 kW' a kadar) diyot lazerin pompalanmasıyla elde edilir. [27, 33]. Nd:YAG lazerin ışınması optik fiber yoluyla çalışılacak parça üzerine taşınabilir. Bu taşıma işlemi, kullanımı kolaylaştırır ve demet anahtarlaması, bölüştürülmesi ve şekillendirilmesi için olasılıkları oluşturur.

Nd:Yag lazerler lazer ışınının fiber optik kablo yardımıyla istenilen bölgeye taşınabilmesi ve hareket kabiliyetinin sınırlı olmamasından dolayı birçok farklı sektörde en çok tercih edilen lazer sistemleri arasındadır. Özellikle tıp alanında, ölçme sistemlerinde oldukça tercih edilmektedir. Metalleri özellikle de yansıtıcı metalleri kesme, delme işlemlerinde tercih edilir. Seramik gibi metal olmayan materyalleri işlemede de kullanılır. Ayrıca Nd:YAG lazerler küçük parçaların veya ince malzemelerin kaynak işlemlerinde kullanım avantajına sahiptir [32].

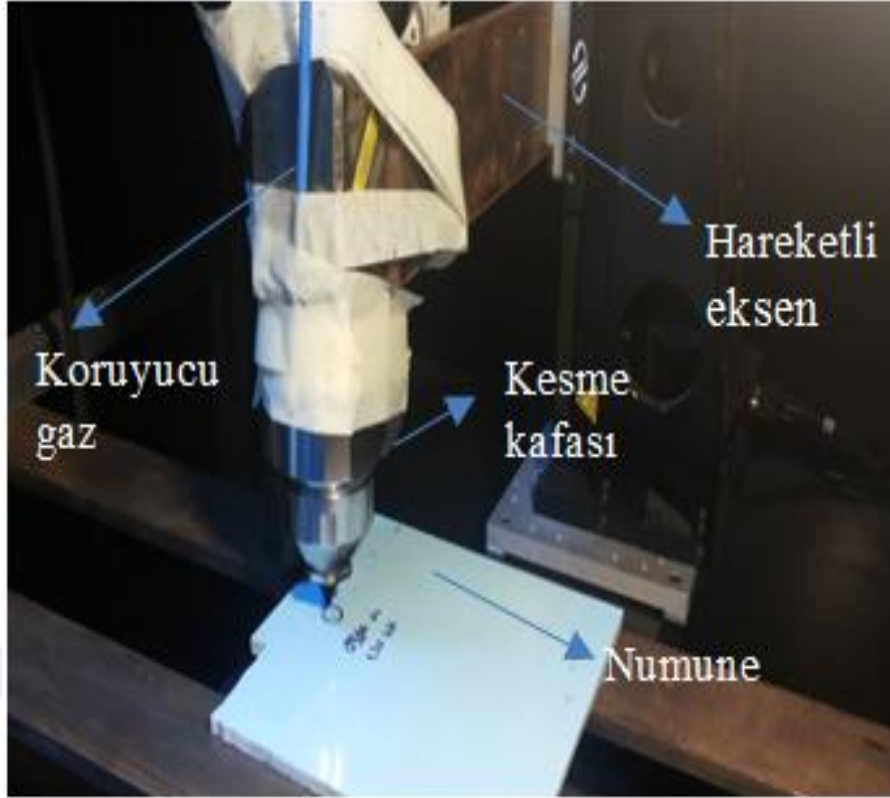
### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. CTP Malzemedeki Kesme ve Delme İşlemi Deneysel Düzenekleri

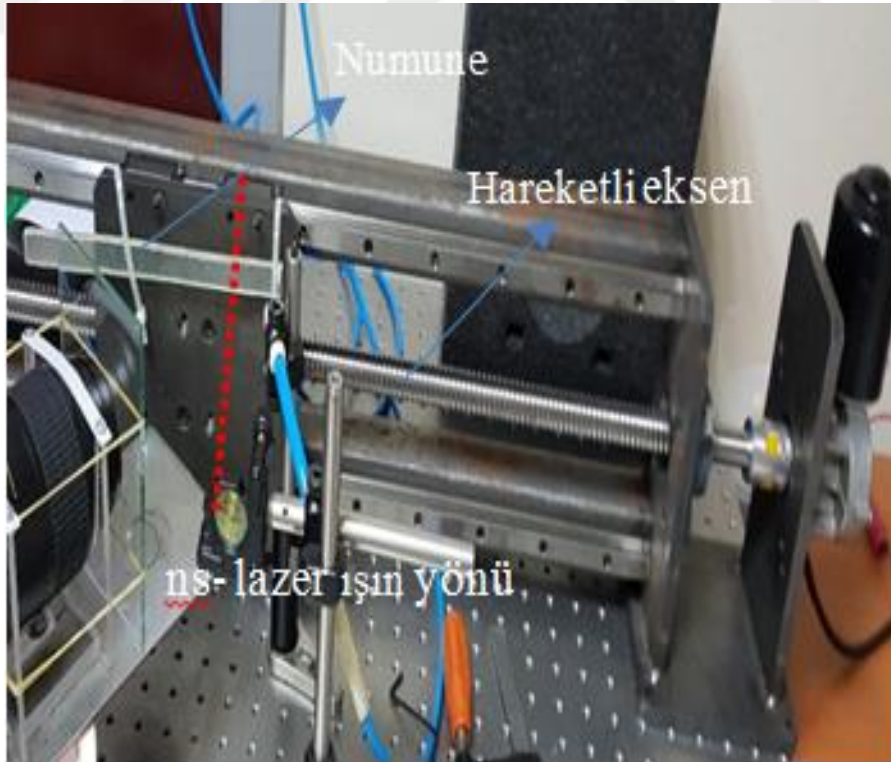
Deneysel çalışmalar Kocaeli Üniversitesi LATARUM (Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi)'da Nd:Yag lazer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ND:Yag lazerin iki farklı dalga boyunda (1064 ve 532 nm) ve farklı atım süreli (ns-atımlı ND:Yag lazer ve ms-atımlı ND:Yag lazer) lazerleri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.1. ms-atımlı Nd:Yag lazer deneysel düzeneği şematik gösterimidir.



Şekil 3.1. ms-atımlı Nd:Yag lazer ile CTP malzeme kesimi şematik gösterimi (Dalga boyu 1064 nm)



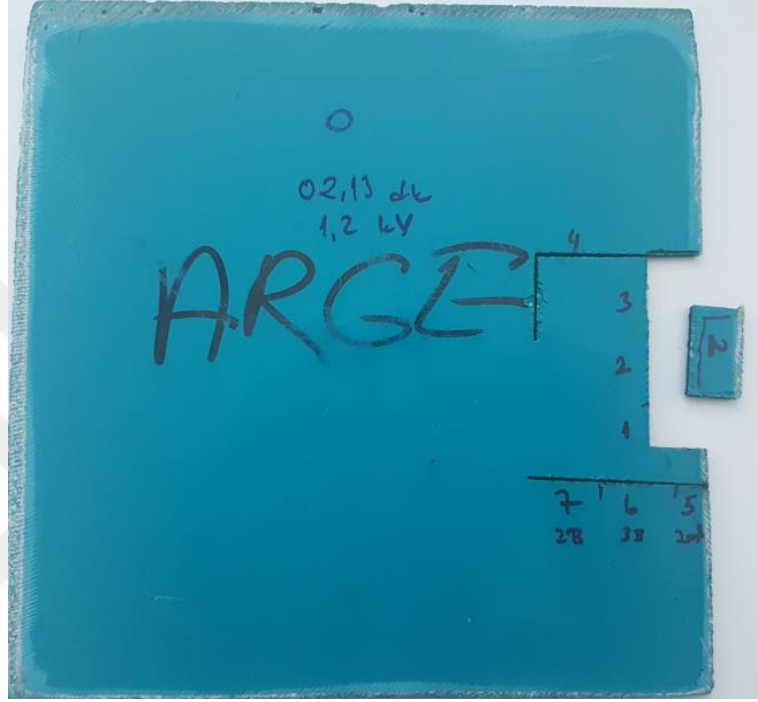
Şekil 3.2. ms-atım süreli Nd:YAG lazer ile kesme ve delme işlemi için kurulan deneysel düzenek (Dalgaboyu 1064 nm)



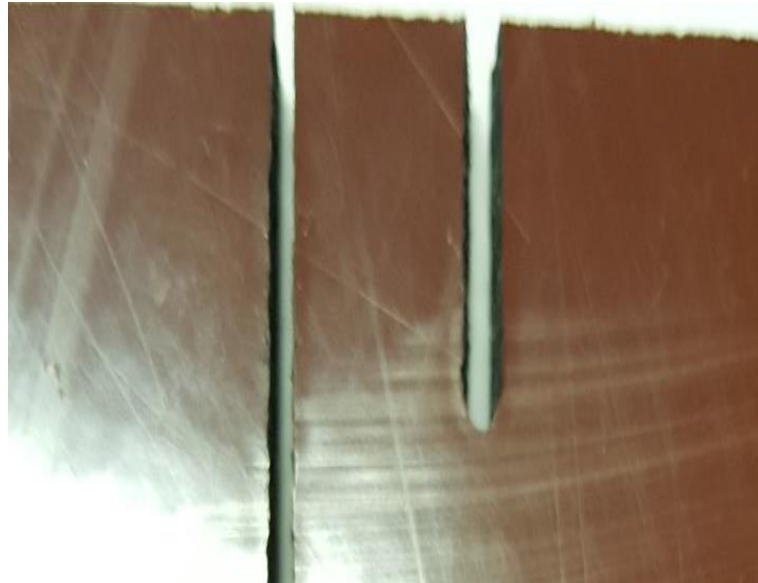
Şekil 3.3. ns-atım süreli Nd:YAG lazer ile kesme ve delme işlemi için kurulan deneysel düzenek (Dalgaboyu 532 nm)

### 3.2. Lazerli Kesme ve Delme İşleminde Kullanılan CTP Plaka

Bu çalışmada 5 mm et kalınlığındaki RTM yöntemi ile üretilmiş mavi, şeffaf ve kahverengi renk kodlu cam elyaf takviyeli polimerik kompozit plakalar kullanılmıştır. Tablo 3.1.' de lazer kesme ve lazer delmede kullanılan ctp kompozit plakanın mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.4. RTM yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığında ki mavi renkli CTP plaka



Şekil 3.5. RTM yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığında ki kahverengi renkli CTP plaka





Şekil 3.6. RTM yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığında ki şeffaf CTP plaka

Tablo 3.1. CTP plakanın mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Değer
Çekme Dayanımı (MPa)	90,00
Çekme Modülü (Mpa)	7800,00
Eğme Dayanımı (MPa)	160,00
Eğme Modülü (MPa)	7800,00
Basma Dayanımı (Mpa)	100,00

Deneylerde kullanılan CTP malzemeler su kaydıraklarında ve aquapark tesislerinde kullanılan kaydıрак malzemeleridir.



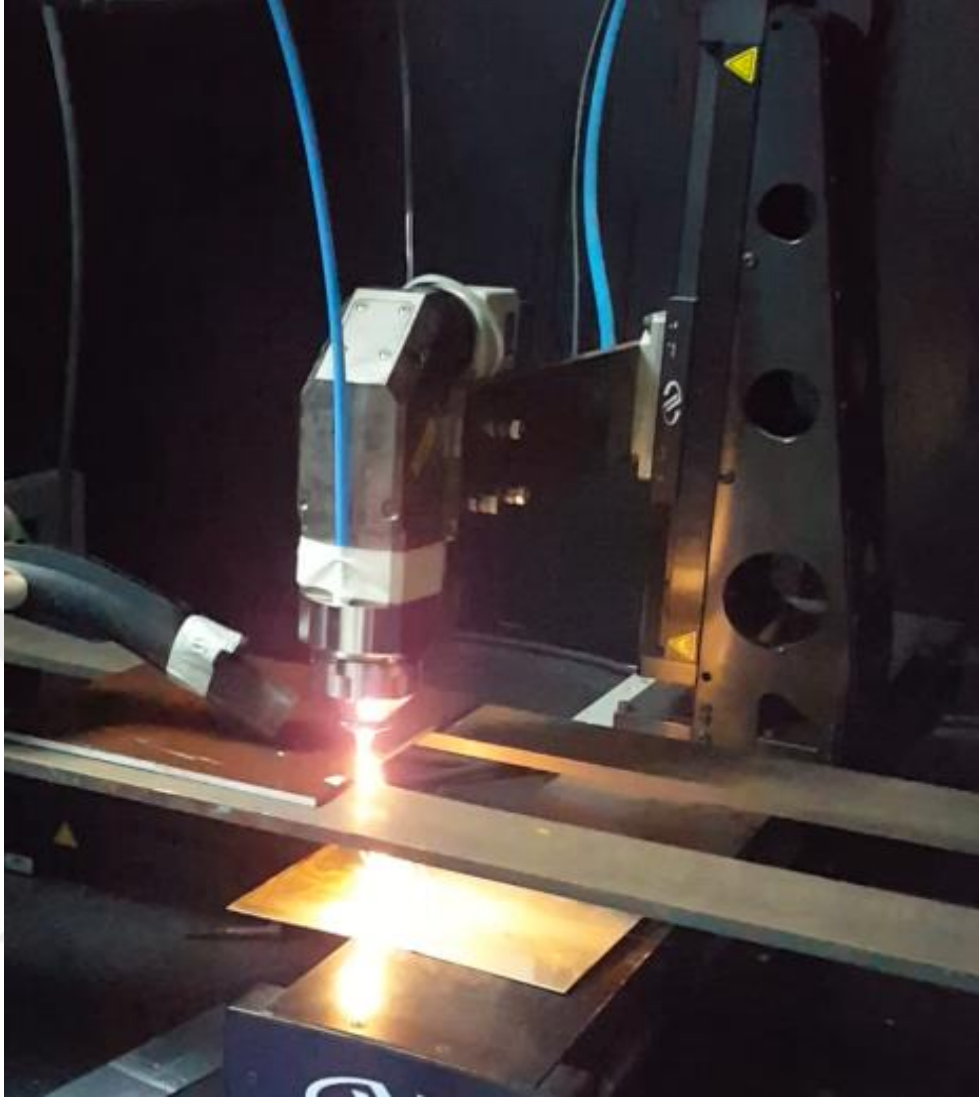
Şekil 3.7. ms-atımlı Nd:Yag lazer ile yapılan kesim işlemi mavi renkli CTP plaka (ms-atımlı lazer)

İlk lazer kesim denemesi gerçekleştirilen CTP plaka Şekil 3.4.' de, deneysel düzeneği ise Şekil 3.7.' dedir. Plakaya ilk olarak lazer kesim işlemi uygulanmıştır. Farklı parametreler kullanılarak ctp kompozit malzemede lazer kesme işlemi denemeleri gerçekleştirilmiştir.

İlk kesim işlemlerinde (Şekil 3.4., Şekil 3.5., Şekil 3.6.) enerji seviyeleri sabit tutulup, atım süreleri ve gaz basıncındaki parametreler değiştirilerek lazer kesim işlemleri yapılmıştır. Mavi plaka lazer kesimde işlemin gerçekleştirilebilirliğinin belirlenmesi açısından ilk kesimde kesit vs. dikkate alınmamıştır.

Mavi plaka üzerindeki daire içerisine alınan kısımda da mikron seviyesinde delme işlemi gerçekleştirilmiştir.





Şekil 3.8. ms-atımlı Nd:YAG lazer ile yapılan kesim işlemi kahverengi CTP plaka (ms-atımlı lazer)

Lazer kesim denemesi gerçekleştirilen kahverengi CTP plaka Şekil 3.5.' te, deneysel düzeneği ise Şekil 3.8.' dedir. Mavi renk kodlu ctp plakaya uygulanan parametreler, bu plakaya da uygulanarak lazer kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.9. (a)' da plakanın ön yüzü lazer ışınının verildiği yüzdür. Şekil 3.9. (b) ise lazer ışınının verildiği arka yüzdür. 1064 nm dalgaboyu, ms-atımlı Nd:Yag lazerde kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.



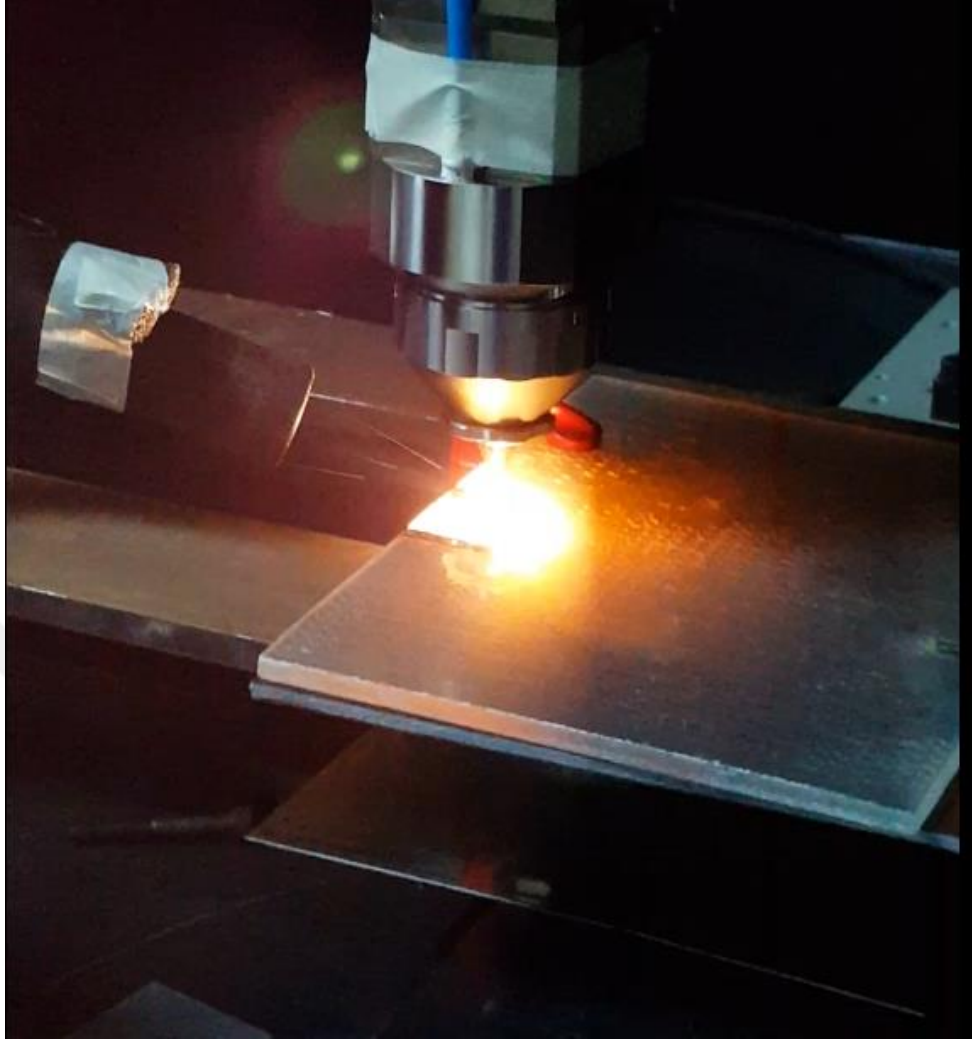
(a)



(b)

Şekil 3.9. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığındaki kahverengi CTP plaka lazer kesim görüntüleri

(a) CTP plakanın lazer ışını ile etkileşime girdiği yüzü, (b) ise CTP plakanın lazer ışını verilmeyen arka yüzüdür. Kesim işleminin her iki yüzde de gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.10. ms-atımlı Nd:YAG lazer ile yapılan kesim işlemi şeffaf CTP plaka (ms-atımlı lazer)

Lazer kesim denemesi gerçekleştirilen şeffaf CTP plaka Şekil 3.6.' da, deneysel düzeneği ise Şekil 3.10.' dadır. Mavi ve kahverengi plakaya uygulanan parametreler şeffaf plakaya da uygulanarak, lazer kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Üç farklı renkli plakada da enine yaklaşık 2 mm kanallar açılmıştır. Boyuna kesitte istenilen mesafede ilerleme yapılabilmektedir. 1064 nm dalgaboyu, ms-atımlı Nd:Yag lazerde kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş şeffaf 5 mm et kalınlığındaki CTP plaka

Malzemelerde kesme ve delme işlemleri yapabilmek için Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.' te verilen deneysel düzenekler kullanılmıştır. İki farklı atım süreli ve güçteki lazerler kullanılarak kesme ve delme işlemi denemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2.' de verilen düzenekte (mili saniye atımlı lazer-dalga boyu 1064 nm) ağırlıklı olarak kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3.' te verilen düzenekte (nano saniye atımlı lazer-dalga boyu 532 nm.) ise delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan düzeneklerin tamamı hassas ve kontrollü hareket eden sistemlerden oluşmaktadır. Mikroskobik görüntüler Olympus marka mikroskoptan alınmıştır. Tüm kesme ve delme işlemlerinde koruyucu gaz olarak Argon (Ar) kullanılmıştır.

### 3.3. Lazerli Kesme ve Delme İşleminde Kullanılan Hızlı Kamera Sistemi

Hızlı kameralar günlük hayatımızda çok hızlı hareket eden objelerin görüntülenmesi için kullanılan cihazlardır. Yüksek fotoğraf çekme özelliklerinden dolayı bilimsel amaçlı çalışmalarda da kullanılabilir [34].

Lazerle yapılan kesme ve delme işlemlerinin fiziksel süreçlerini ve olaylarını gözlemleyebilmek için deney sistemimize hızlı kamera yerleştirilmiştir. Yakın çekim yapabilmesi için kamaranın önünde makro lens (EF 100 mm, f/2,8 makro USM) kullanılmıştır. Kullanılan hızlı kameranın teknik özellikleri Tablo 3.6.' da verilmiştir.

Tablo 3.2. IDT marka, Y3-S1 serisi hızlı kamera teknik özellikleri [25]

Teknik Özellikler	Değer
Marka	IDT (Y3-S1 serisi)
Max. Çözünürlük	1024x1024 piksel (3,750 fps' de )
Maksimum FPS	110.000 @ 1280 x 8
Çalışma sıcaklığı	-40 + 50 ° C / -40 + 122 ° F



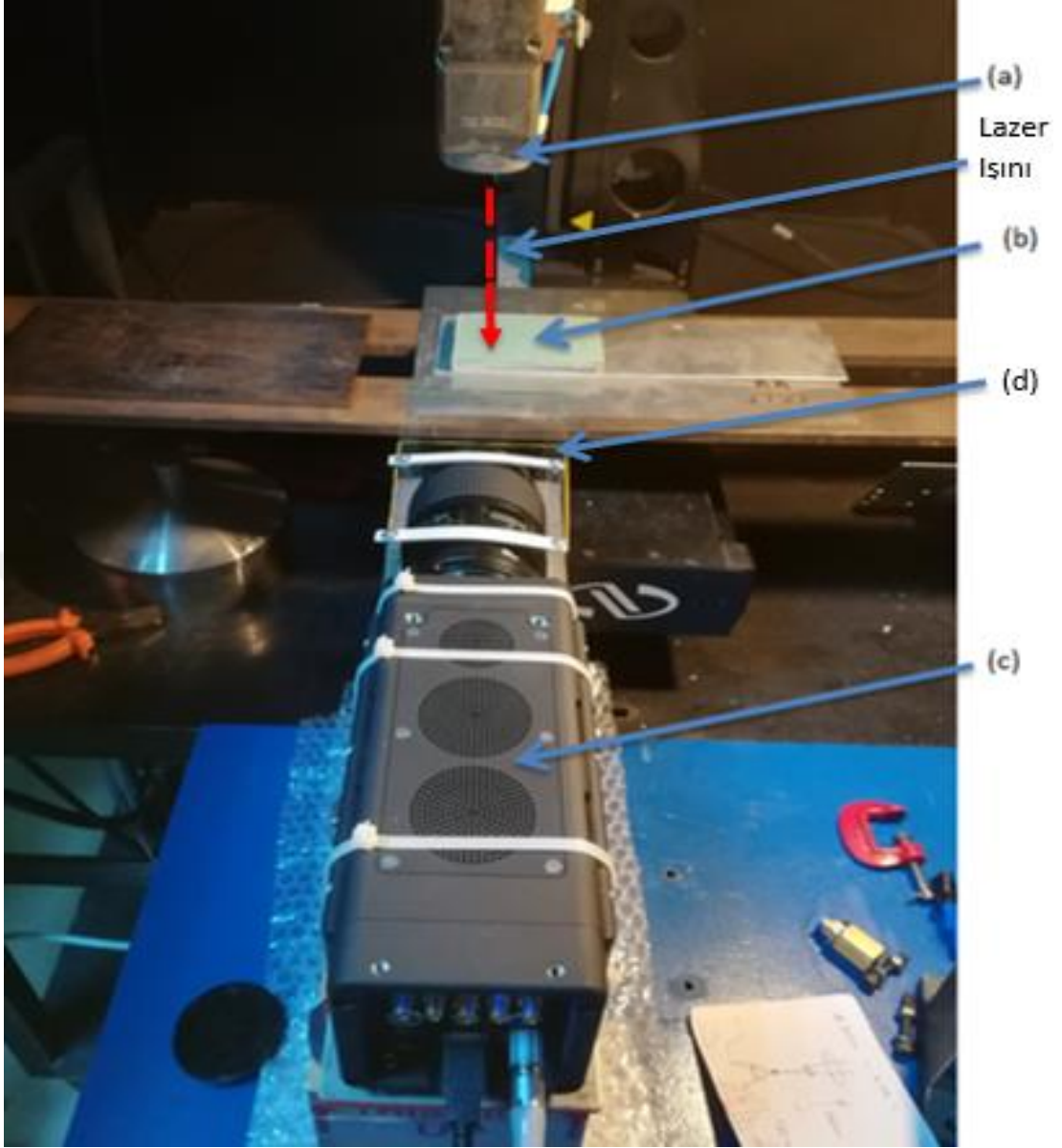
Şekil 3.12. Hızlı Kamera (Integrated Design-IDT Y3S1-C-16) [35]

Kullanılan hızlı kamera saniyede 110.000 adet fotoğraf alabilme yeteneğindedir. Böylelikle CTP malzemesinin lazerle yapılacak kesme ve delme işlemlerinde gerçekleşen fiziksel mekanizmalar daha iyi anlaşılacaktır.

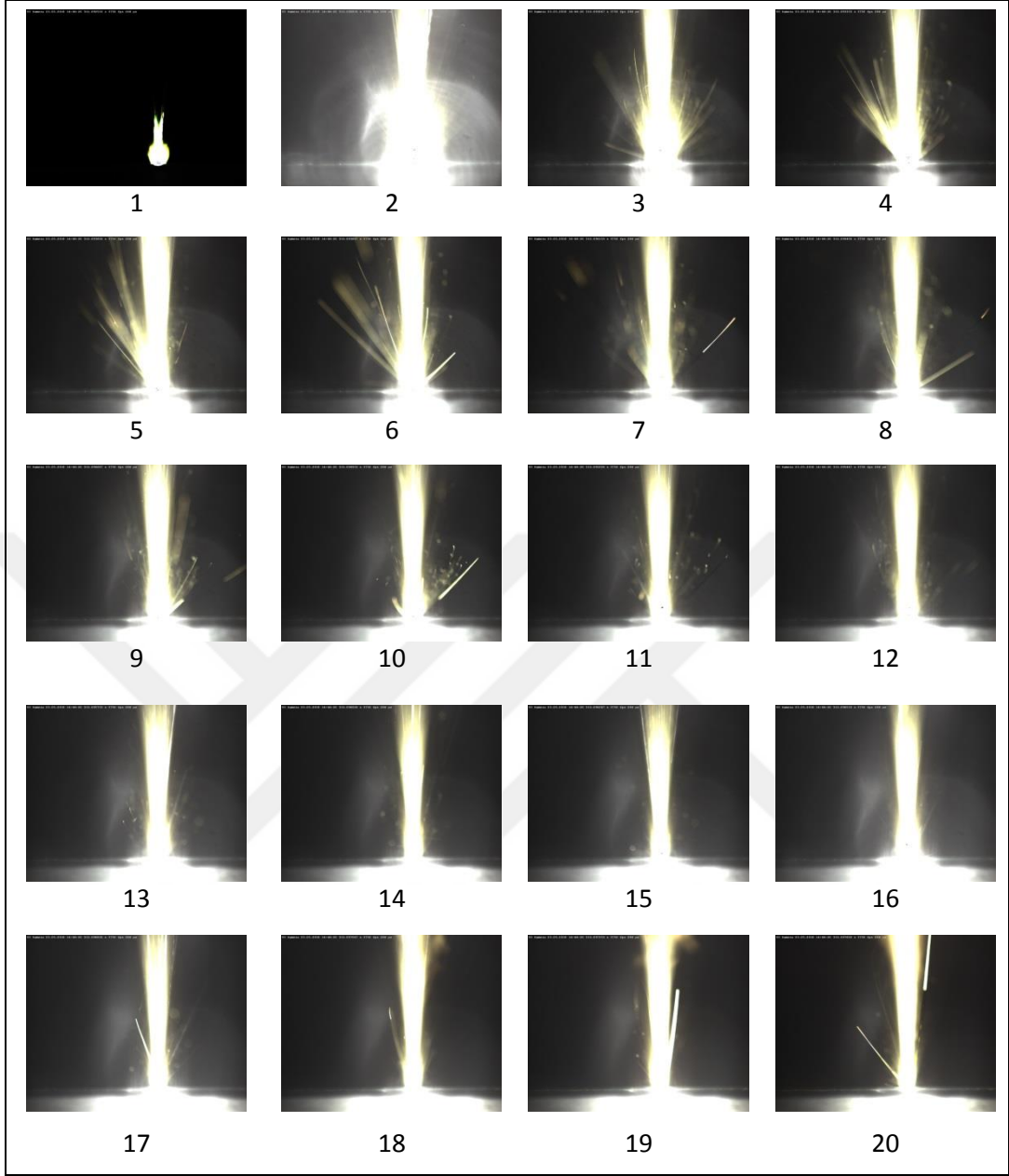
Tasarlanan deneysel düzenekler Şekil 3.13. ve Şekil 3.16.' da verilmiştir. Elde edilen fotoğraflar ise Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.' te ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Deneysel çalışmalarımızda saniyedeki frame sayısı (FPS) 10.000 olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla bir adet fotoğrafın çekilme zaman  $10^{-4}$  mili saniyedir. Bu zaman miktarı fiziksel olayların gözlenebilmesi için yeterli bir zamandır. Görüntüleme açısı olarak 45 derece ve yatay görüntüleme (0 derece) kullanılmıştır.





Şekil 3.13. ms-atımlı Nd:YAG lazer ile yapılan kesme işlemi deney düzeneği (Hızlı kamera ile birlikte) (a) Lazer kafası, (b) CTP Plaka, (c) Hızlı Kamera Sistemi, (d) Makro lens



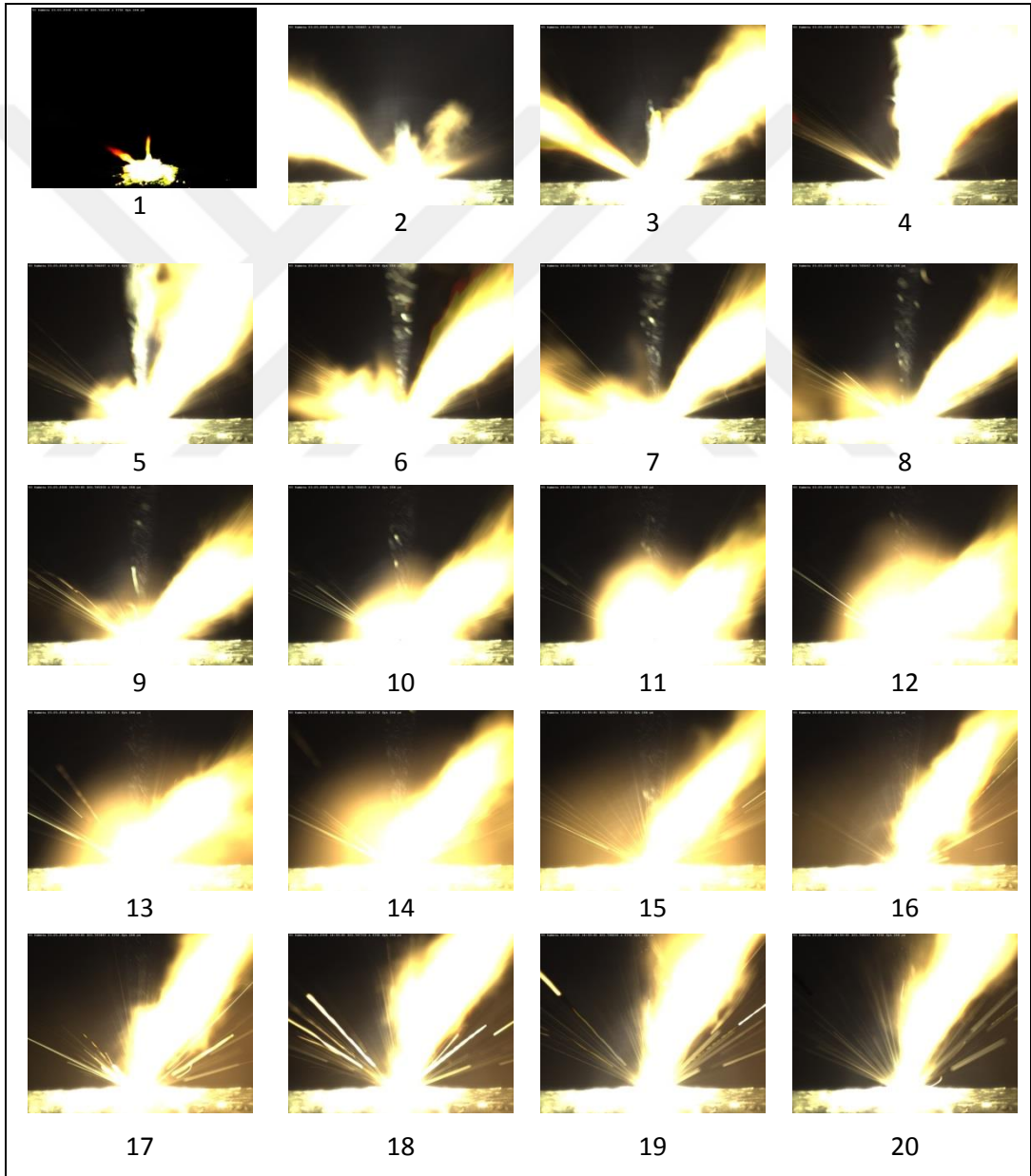
Şekil 3.14. ms atımlı Nd:Yag lazerle CTP malzemesinin etkileşimi

ms atımlı lazer ile yapılan plakada delme işlemi hızlı kamera görüntülerinde toplam da 10000 adet görüntü alınmıştır. Bu 10000 adet görüntü içinden sadece 50 adedi görülebilir şekildedir. Şekil 3.14.' te ms-atımlı lazerin CTP malzemesinin lazer-Madde etkileşimi hızlı kamera görüntülerinin ilk 20' si gösterilmiştir. 1.frame için  $t=0$  s. (Başlangıç), 20.frame için  $t=5$  ms. (Bitiş) işlem süreleridir. İşlemden herhangi bir gaz kullanılmamıştır. Kullanılan lazer parametreleri ise Tablo 3.3.' te verilmiştir.

Tablo 3.3. ms-atımlı lazer-ctp etkileşiminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 1064 nm)

Enerji miliJoule	Atım Süresi ms	Frekans Hz	Odak mm	Hız mm/s	Kalınlık mm
12	5	10	0	5	5

Lazer ışının yüzeye çarpması sonucunda (1.frame) plazma oluşumu gözlemlenmektedir. Ardından bu süreç plazma oluşumu ve küçük parçacıkların ortama saçılması ile devam etmektedir. Plazma oluşumu 10-4 saniyeler civarında meydana gelmektedir.



Şekil 3.15. ms-lazer ile delme işlemi hızlı kamera görüntüleri (1-20 adet görüntü)



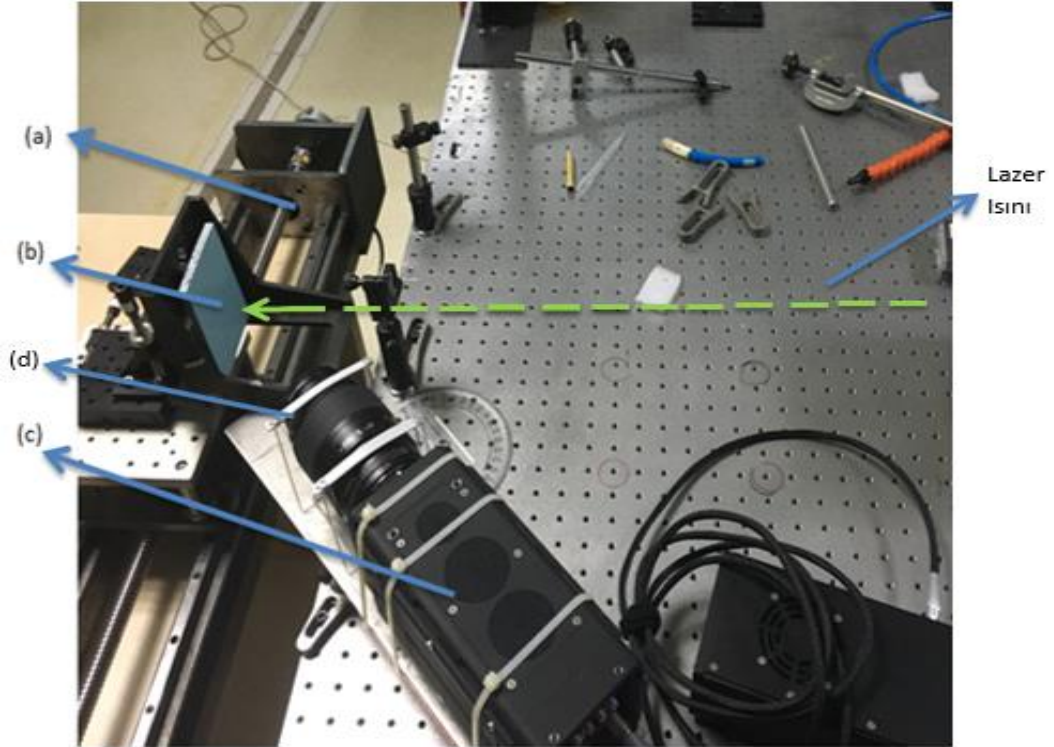
ms atımlı lazer ile yapılan kahverengi jelkotlu delme işlemi hızlı kamera görüntülerinde toplam da 10000 adet görüntü alınmıştır. Bu 10000 adet görüntü içinden sadece 50 adedi görülebilir şekildedir.

Şekil 3.15.' te CTP malzemesinin lazer-madde etkileşimi hızlı kamera görüntülerinin ilk 20' si gösterilmiştir. 1.frame için  $t=0$  s. (Başlangıç), 20.frame için  $t=5$  ms. (Bitiş) işlem süreleridir. İşlemden önce 1 bar Argon gazı kullanılmıştır. Kullanılan lazer parametreleri Tablo 3.4.' te verilmiştir.

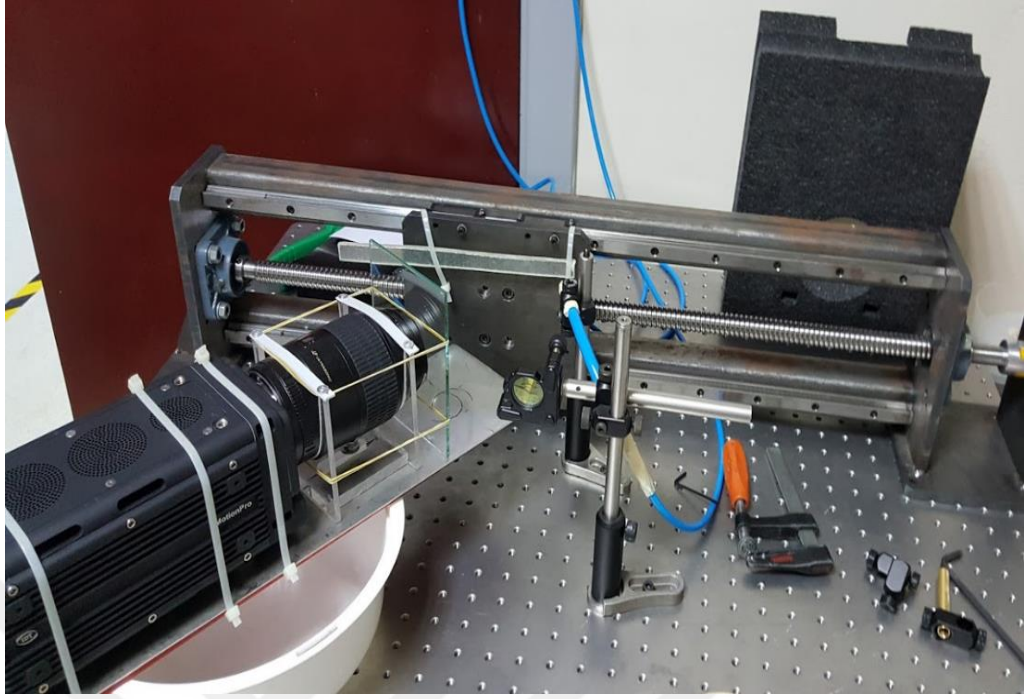
Tablo 3.4. ms-atımlı lazer-ctp etkileşiminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 1064 nm) (Kesme gazı kullanılmış)

Enerji miliJoule	Atım süresi ms	Frekans Hz	Gaz tipi	Gaz br	Odak mm	Hız mm/s	Kalınlık mm
12	5	20	Argon	1	0	5	5

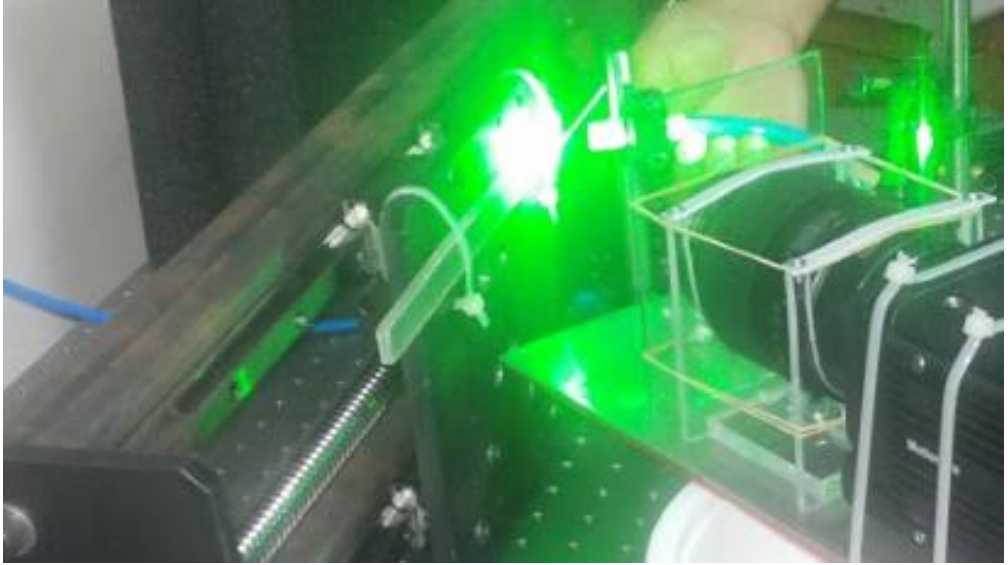
Gaz kullanılmadan yapılan delme işlemine benzer olarak hızlı bir şekilde (yaklaşık  $10^{-4}$  saniye) plazma oluşmuş, kullanılan gazın etkisiyle plazmada yönelmeler meydana gelmiştir. Yoğunluklu olarak parçacıkların yüzeyden ayrılması 1.7 ms' den sonra oluşmaktadır.



Şekil 3.16. ns-atımlı Nd:YAG lazeri ile yapılan delme işlemi deney düzeneği (Hızlı kamera ile) (a) Lazer kafası, (b) CTP Plaka, (c) Hızlı Kamera Sistemi, (d) Makro lens



Şekil 3.17. ns-atımlı Nd:YAG lazeri ile yapılan delme işlemi deney düzeneği



Şekil 3.18. ns-atımlı Nd:YAG lazeri ile yapılan delme işlemi deney düzeneği



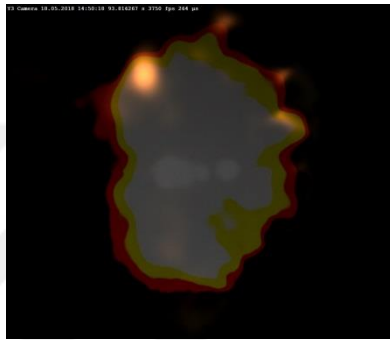
(1)



(2)



(3)



(4)

Şekil 3.19. ns-lazer ile delme işlemi hızlı kamera görüntüleri

ns atımlı lazer ile yapılan delme işleminde pulse genişliği (ns) kullanılan FPS sayısından çok küçük (milyonda biri) olduğundan dolayı, burada meydana gelen yanma işlemi gözlenebilmektedir.

Kullanılan lazer parametreleri Tablo 3.5.' te verilmiştir.

Tablo 3.5. ns-atımlı lazer ile yapılan delme işleminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 532 nm)

Enerji	Atım Süresi	Frekans	Gaz	Odak	Kalınlık
miliJoule	ms	Hz	tipi	br	mm
44	6	10	Argon	1	15
					5

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. CTP Malzemenin Lazerli Delme İşlemleri

Kocaeli Üniversitesi LATARUM' da (Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi) var olan ns-atım ve ns-atım genişliğindeki iki farklı lazer kullanılarak cam elyaf katkılı kompozit malzemedeki delme işlemi denemeleri gerçekleştirilmiştir.

Delme işlemi için kullanılan CTP malzemesi Şekil 4.1.' de, bu işlem için kullanılan lazer parametreleri ise ayrıntılı olarak Tablo 4.1.' de (ns lazer için) verilmiştir.



Şekil 4.1. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığındaki şeffaf CTP plaka lazer delme görüntüleri (Dalga boyu 532 nm, ns-atımlı)

Tablo 4.1. ns-atımlı lazer ile yapılan delme işleminde kullanılan lazer parametreleri (Dalga boyu ( $\lambda$ ) 532 nm)

<b>Enerji = 44 mJ, <math>\lambda</math>= 532 nm</b>									
Deney no	Enerji		İşlem Süresi s	Atım Süresi ns	Frekans Hz	Gaz		Odak mm	Delme Süresi s
	kW	Mili Joule				Tipi	bar		
1	1,2	44	80	6	10	Argon	1	15	300
2	1,2	44	160	6	10	Argon	1	15	
3	1,2	44	240	6	10	Argon	1	15	
4	1,2	44	300	6	10	Argon	1	15	

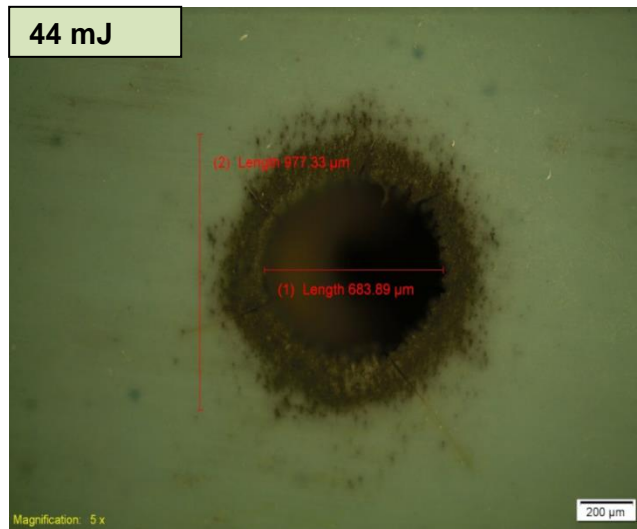
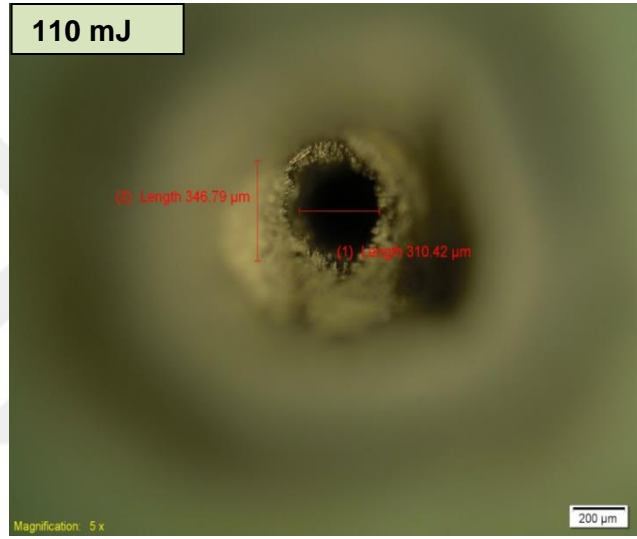
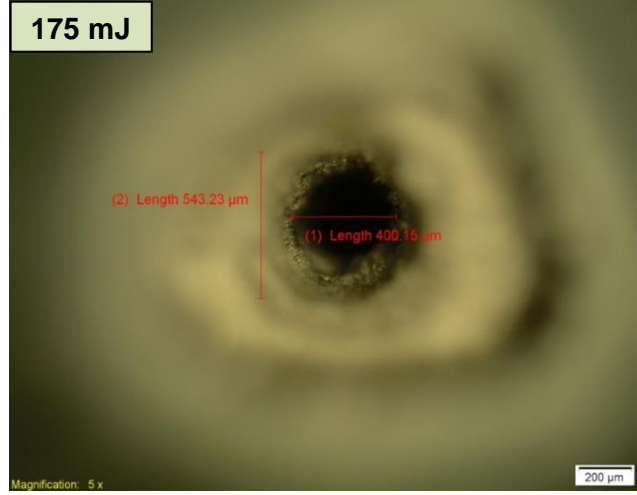
<b>Enerji = 110 mJ, <math>\lambda</math>= 532 nm</b>									
Deney no	Enerji		İşlem Süresi s	Atım Süresi ns	Frekans Hz	Gaz		Odak mm	Delme Süresi s
	kW	Mili Joule				Tipi	bar		
1	1,27	110	80	6	10	Argon	1	15	280
2	1,27	110	160	6	10	Argon	1	15	
3	1,27	110	240	6	10	Argon	1	15	
4	1,27	110	280	6	10	Argon	1	15	

<b>Enerji = 175 mJ, <math>\lambda</math>= 532 nm</b>									
Deney no	Enerji		İşlem Süresi s	Atım Süresi ns	Frekans Hz	Gaz		Odak mm	Delme Süresi s
	kW	Mili Joule				Tipi	bar		
1	1,32	175	80	6	10	Argon	1	15	225
2	1,32	175	160	6	10	Argon	1	15	
3	1,32	175	225	6	10	Argon	1	15	

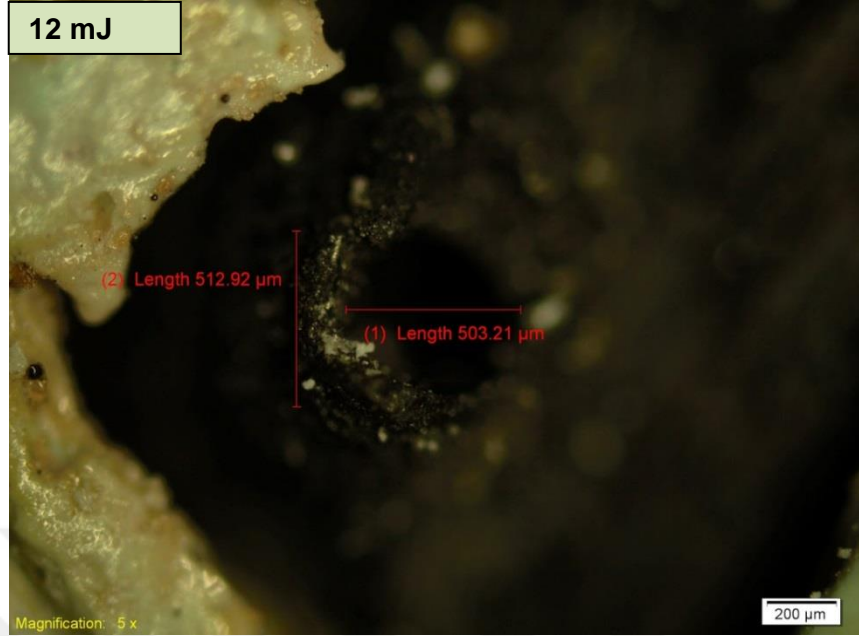
Tablo 4.1.' de görüldüğü üzere, CTP plaka üzerinde ns-atımlı 532 nm dalga boyunda Nd:Yag lazer kullanılarak 80 s. işlem süresi, 44 mJ, 110 mJ ve 175 mJ enerji seviyeleri ile delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan lazer-ctp delme işlemi üç farklı enerji seviyesine göre belirlenmiştir. İşlemden önce 1 bar argon gazı kullanılmıştır. Yapılan delme işlemi mikroskopik görüntüleri Şekil 4.2.' dedir.



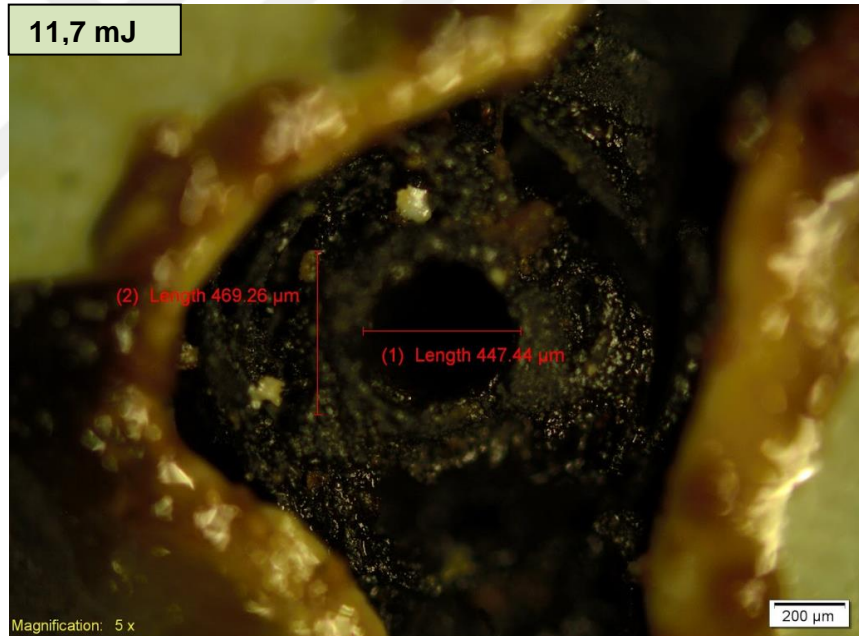


Şekil 4.2. ns-atımlı lazer-80 s işlem süresi için farklı lazer güçlerindeki delme işlemi Dalga boyu  $\lambda=532$  nm

(a)



(b)



Şekil 4.3. (a) ms-atım süreli lazer kullanarak 8 s işlem süreli farklı lazer güçlerindeki 1 bar basınçta delme işlemi. (b) ms-atım süreli lazer kullanarak 7 s işlem süreli farklı lazer güçlerindeki 4 bar basınçta delme işlemi.

İşlemdede ms-atımlı lazer, 1064 nm dalga boylu ışınlar kullanılmıştır. Delme işleminde işlem süreleri ve gaz basınç değerleri değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.2.' de CTP plaka üzerinde ns-atımlı lazer kullanılarak 80 s. işlem süresi ve 1 bar gaz basıncında 44 mJ, 110 mJ ve 175 mJ enerji ile gerçekleştirilen delme işlemi mikroskopik görüntüleri verilmiştir. 532 nm dalga boyunda, ns-atımlı Nd:Yag lazer kullanılmıştır. Delme işleminde denemeleri gerçekleştirilen üç farklı enerji seviyesine göre, lazer delme sürelerinin değiştiği görülmüştür.

Şekil 4.3. (a) CTP plaka üzerinde ms-atımlı lazer kullanılarak 8 s. işlem süresi ve 1 bar gaz basıncında 11,7 mJ ve 12 mJ enerji ile gerçekleştirilen delme işlemi mikroskopik görüntüsü verilmiştir. 1064 nm dalga boyunda, ms-atımlı Nd:Yag lazer kullanılmıştır.

Şekil 4.3. (b) CTP plaka üzerinde ms-atımlı lazer kullanılarak 7 s. işlem süresi ve 4 bar gaz basıncında gerçekleştirilen delme işlemi mikroskopik görüntüsü verilmiştir. 1064 nm dalga boyunda, ms-atımlı Nd:Yag lazer kullanılmıştır.

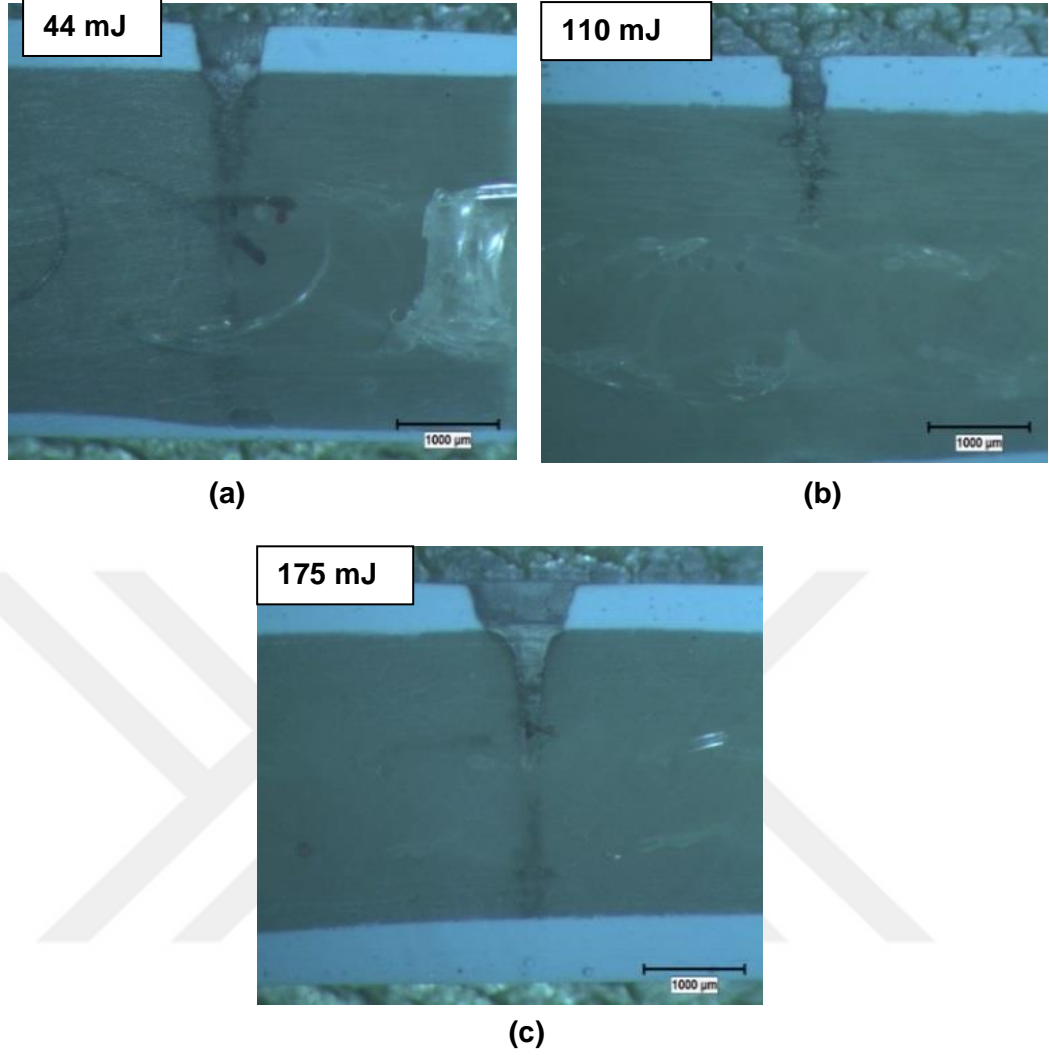
Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.' ten de anlaşılacağı üzere ns-atımlı lazer kullanılarak yapılan delme işleminde yanma işlemi gerçekleşmeden malzeme üzerinde delme işlemi yapılabilmektedir. ms-atımlı lazerle yapılan delme işleminde ise yanma işlemi gerçekleşmiştir. Bunun sebebi darbe süresinin uzun olmasından kaynaklanan enerji aktarımının büyüklüğüdür.

Lazer gücü arttıkça delik çapında yaklaşık bir değişiklik olmamakta, fakat jel kısmında oluşan HAZ (ısıdan etkilenmiş bölge) bölgesinin çapı artmaktadır. Bu durum Şekil 4.3.' te daha açıkça görünmektedir.

Şekil 4.4.' te ns-atımlı lazer kullanılarak farklı lazer güçlerinde delme işleminin yapıldığı numunelerin kesit görüntüleri verilmektedir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere jel bölgesinde artan enerji ile oluşan kraterin çapı artmaktadır. Kompozit içinde oluşan delik çapı malzeme içerisine girdikçe azalmaktadır. Malzeme içerisinde yaklaşık 200 µm çaplı düzgün delikler oluşmuştur.





Şekil 4.4. ns-atımlı lazer kullanarak delme işleminin yapıldığı numunelerin kesit görüntüleri

ns-atımlı lazer ile yapılan delme işleminin kesit görüntüleri 44 mJ, 110 mJ, 175 mJ farklı enerji seviyelerine denk gelen farklı işlem sürelerinde lazer delmenin gerçekleştirildiği plakanın kesit görüntüleri Şekil 4.4.' te verilmiştir. İşlemde gaz basıncı sabit tutulmuştur.

#### 4.2. CTP Malzemenin Lazerli Kesme İşlemleri

Şekil 3.7., Şekil 3.8. ve Şekil 3.10. ms-atımlı (1064 nm dalga boyu) lazer kullanarak yapılan kesme işlemi deney düzeneklerini göstermektedir. 5 s. işlem süresi ve 5 bar gaz basıncı kullanılan parametrelerde en ideal lazer kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.

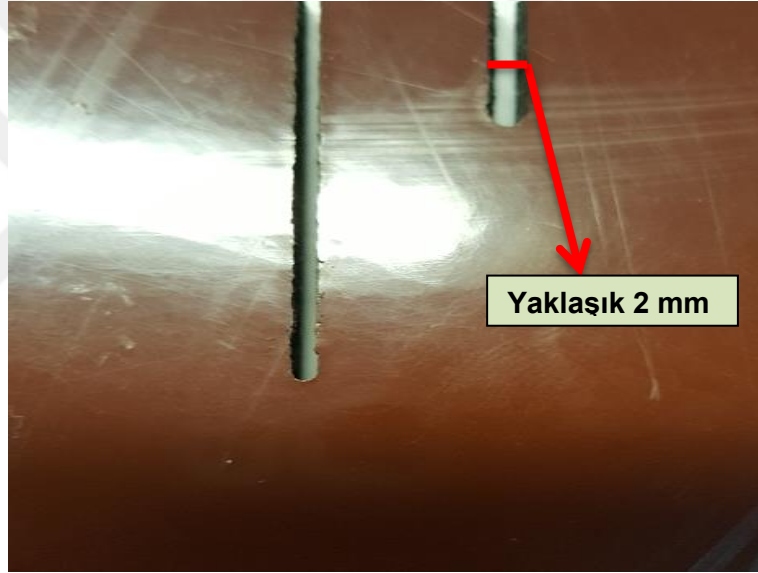
Şekil 4.5.' te görüleceği üzere yaklaşık 2 mm kalınlığında keskin kenarlı kanallar

açılarak malzemede düzgün bir kesim işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Enine kesitte kanallar açılmış olan plakada, boyuna kesitte istenilen mesafede ilerleme yapılabilmektedir.

Tablo 4.2.' de ise kesme işleminin yapıldığı lazer parametrelerini belirtmektedir.

Tablo 4.2. Kesme işleminde kullanılan lazer parametreleri

Lazer Kesim Parametreleri						
Enerji	Atım Süresi	Frekans	Gaz		Hız	Kalınlık
Joule	s	Hz	tipi	bar	mm/s	mm
12,4	5	20	Argon	5	3	5



Şekil 4.5. RTM üretim yöntemi ile üretilmiş 5 mm et kalınlığındaki kahverengi CTP plaka lazer kesim görüntüleri (Dalga boyu 1064 nm, ms-atımlı)

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 5 mm et kalınlığında ki cam elyaf katkılı mavi, kahverengi ve şeffaf renkli CTP kompozit malzemeler kullanılmıştır. Malzemeler üzerinde farklı dalga boylu lazerler kullanılarak lazerli kesme ve delme çalışmaları başarıyla gerçekleştirilmiş ve optimum lazer parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda liste halinde verilmiştir.

Çalışmada Nd:YAG lazerin nano-saniye ve mili-saniye atımlı olarak iki çeşidi kullanılmıştır.

1. Her iki lazerde de kompozit malzemenin boyalı tabaka üzerinde 500 µm çaplı delikler başarıyla oluşturulmuştur. ns-atımlı lazer kullanılarak yapılan delme işleminde jel kısmının yandığı gözlenmiştir.
2. ns-atımlı lazerler cam elyaf katkılı kompozit malzemelerde yapılacak mikron seviyedeki delme işlemleri için daha uygundur. Kompozit malzeme içerisinde yaklaşık 200 µm çapında düzgün kanallar başarıyla oluşturulmuştur.
3. ms-atımlı lazerler polimerlerde yapılacak lazerli kesme işlemi için daha elverişlidir.
4. Polimerlerin lazerle yapılacak işlemlerinde toksit gaz çıkışı oluşmaktadır. Bu sebepten yapılacak çalışmalar havalandırılmalı ortamlarda yapılmalıdır.
5. Birçok polimer kolayca yanabildiğinden atım süresi düşük lazerle çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Çalışmada CTP kompozit malzemeleri için (CTP malzemenin yüzeyinde uygun sertlik, aşınma direnci ve pürüzlük elde etmek için) en uygun lazer ve lazer parametre (güç, tekrarlama frekansı, ışın yarıçapı vs.) ve optimum ilerleme hızı elde edilmiş ve bu parametreler CTP ile üretilen ürünlerde üretim sonrası işlemler için uygun olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma birçok farklı sektörde kullanılmasından dolayı çok geniş bir uygulama alanına sahip olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Callister D.W., Rethwisch G D., *Materials Science and Engineering*, 8rd., ed., Techbooks/GTS., ABD, 2007.
- [2] <http://www.sisecamkimyasallar.com/tr/faaliyet-alanlarimiz/cam-elyaf> (Ziyaret tarihi: 21 Şubat 2018)
- [3] Yalçın E., B., Farklı Kumaş ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş Ctp Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 322681.
- [4] [www.matweb.com](http://www.matweb.com), (Ziyaret tarihi: 05 Mayıs 2018)
- [5] Durgun İ., El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, 7. *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 15-16 Mayıs 2014.
- [6] Ersoy H., Y., *Kompozit Malzeme*, 1.Basım, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul, 2001.
- [7] Saçak M., *Polimer Kimyası*, 1.Basım, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
- [8] Elyaflı Kompozit Malzemeler Grubu, *CTP Teknolojisi Cam Elyafı Takviyeli Reçine Sistemleri*, Cam Elyaf Sanayii A.Ş., İstanbul, 16-27, 1984.
- [9] Smith WF., *Principles of Materials Science And Engineering.*, 1th ed, MacGraw- Hill, ABD, 1990.
- [10] Zor M., *Kompozit Malzemeler Mekaniği Ders Notları.*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir, 2018.
- [11] <http://www.plasto.com.tr>, (Ziyaret Tarihi: 25 Mayıs 2018).
- [12] Yurddaş Ç., *CTP Teknolojisi, Cam Elyaf Sanayii A.Ş.*, İstanbul, 2008.
- [13] Asyalı M., H., Kara S., Yılmaz B., Bölüm 17, Editörler: Ülgen A., Tabakoğlu H., Ö., *Biyomedikal Mühendisliğin Temelleri*, 1.Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 623-653, 2014.
- [14] [www.turkcadcam.net](http://www.turkcadcam.net), (Ziyaret Tarihi: 05 Mayıs 2018).
- [15] Turhan M., CTP' lerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007, 199901.
- [16] Broutman L.J., Krock R.H., *Modern Compozite Materials*, 1rd ed., Addison-Wesley Publising Company, Massachusetts, 1967.

- [17] Callister W.D., *Materials Science and Engineering*, 5rd ed., John Wiley ve Sons Inc., Singapore, 1990.
- [18] Özkavak H., Dikdörtgen Kesitli Kompozit Malzemeler İçin Eğilme Yorulması Test Cihazının Tasarımı Ve Örnek Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2014, 353438.
- [19] Mallick P., K., *Fiber-Reinforced Composites, Materials Manufacturing and Spring Design*, 3rd ed., Taylor & Francis Group, New York, 2008.
- [20] Karcı A., Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi Malzemelerin Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2009, 246864.
- [21] Harris B., *Fatigue In Composites, Science And Technology Of The Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics*, 1rd ed., Woodhead Publishing Limited, England, 2003.
- [22] Asyalı M., H., Kara S., Yılmaz B., Bölüm 17, Editörler: Ülgen A., Tabakoğlu H., Ö., *Biyomedikal Mühendisliğin Temelleri*, 1.Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 641-642, 2014.
- [23] Naqavi I., Z., Conduction and Non-Conduction Limited Laser Heating Process Mathematical Simulation, Master of Science Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, College of Graduate Studies, Dhahran, Saudi Arabia, 2001.
- [24] Dahotre N B., Sudarshan T S., *Lasers in Surface Engineering*, 1rd ed., ASM International, Ohio, 1998.
- [25] Tekin S., Osilator Sel Sisteminde Optik Kavite Yapıları Ve Lazer Kazanç Mekanizmaları, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 233002.
- [26] Kannatey E., Asibu Jr., *Laser Fabrication and Machining Materials*, 1rd ed., Springer Science, ABD, 2009.
- [27] Güneş C., Benzinli Enjektörlerin Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 322627.
- [28] Billings W., C., Tabak J., Çeviri: Tanrıöver G., *Lazerler İşlenmiş Işığın Teknolojisi ve Kullanımı*, 1.Basım, Tübitak Yayınevi, İstanbul, 2011.
- [29] John C. Ion., *Laser Processing of Engineering Materials*, 1rd ed., Butterworth-Heinemann Massachusetts, Oxford, 2005.
- [30] B Joachim., F. Mark., *Facts About: Laser Cutting Techniques*, Linde Gas AG, Syf. 4-12.
- [31] M Ürgüplü., Köksal S., Lazer İle Kesme İşlemlerinde Kesim Kalitesine Etki Eden Parametreler, 3.Rd. International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science, Valencia, Spain, 2015.

- [32] Tarakçıoğlu N., Özcan M., Bölüm 2, Bölüm 3, Editör: Kahramanlı Ş., *Lazerler ve Materyal İşleme Uygulamaları*, 1.Baskı, Nobel Basımevi, Ankara, 29-88, 2004.
- [33] Kannatey E., Asibu Jr., *Principles of Laser Materials Processing*, 1rd ed., Published by John Wiley & Sons, Inc., ABD, 2008.
- [34] <http://viskam.com.tr>, (Ziyaret Tarihi:24 Mayıs 2018).
- [35] [https://idtvision.com/support/specifications-sheets/?idt\\_id=Y3-S1](https://idtvision.com/support/specifications-sheets/?idt_id=Y3-S1), (Ziyaret Tarihi: 25 Mayıs 2018).
- [36] Enşici A., Endüstriyel Tasarımda Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler, *TMMOB Gemi Mühendisleri Odası Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 2008, **178**, 6-15.
- [37] <http://www.fibercamelyaf.com>, (Ziyaret Tarihi: 29 Mayıs 2018).
- [38] <http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/05/CTP-Uyguluma-Ornekler.pdf>), (Ziyaret Tarihi:24 Mayıs 2018).
- [39] Çavdar K., Tanrısever T., Farklı Malzemelerin Lazerle Kesilmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013, **18(2)**, 79-99.
- [40] Tunç M., Co2 Lazer Kesim Tezgâhlarında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2015, 405899.
- [41] Erdoğan Ş., Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 201077.

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

### Yayınlar

- [1] **Türkmen M.**, Kayahan E., Candan L., Cansun A., Basut S., Cam Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozit Malzemelerde Lazerli Kesme Ve Delme Parametrelerinin Belirlenmesi, *Putech & Composites*, 2017, **36**, 10-16.
- [2] **Türkmen M.**, Kayahan E., Candan L., Basut S., Lazerlerin Endüstriyel Uygulamalarındaki Son Gelişmeleri, *Putech & Composites*, 2018, **40**, 20-24.

### Bildiri Sunumları

- [1] **Türkmen M.**, Kayahan E., Candan L., Cansun A., Basut S., Cam Elyaf Takviyeli Polimerik Kompozit Malzemelerde Lazerli Kesme Ve Delme Parametrelerinin Belirlenmesi, *V. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Çalıştayı*, İzmir, 2-5 Kasım-Aralık 2017.
- [2] **Aras M.**, Türkmen M., Kayahan E., Candan L., Yüksek Yoğunluklu Polimer Malzemelerin (PE1000) Lazer İle Delme Parametrelerinin Belirlenmesi, *Uluslararası İleri Araştırmalar ve Mühendislik Kongresi*, Osmaniye, Türkiye, 2017.

## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Kocaeli-Gebze' de doğdu. 1987 yılında Çerkeşli Nuh Çimento İlköğretim Okulu' nda eğitim-öğretim hayatına başladı ve devamında 1998 yılında Körfez Hereke Nuh Çimento Teknik Lisesi-Bilgisayar Yazılımı bölümünden mezun oldu.

2001-2003 yılları arasında önlisans öğrenimini, Uludağ Üniversitesi-Orhangazi Meslek Yüksek Okulu Bilgisayar Destekli Tasarım bölümünden, 2003 yılında başladığı lisans öğrenimini Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği bölümünde tamamlayarak 2006 yılında mezun oldu.

Aktif iş hayatına 2008 yılında Gebze Organize Sanayii Bölgesi Halil Yılmaz Makine' de Mekanik Tasarımcı olarak başladı. Devamında Gebze İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü' nde Teknik Öğretmen olarak görev aldı. 2011-2016 yılları arasında Şişecam grubu Cam Elyaf Sanayii A.Ş. Mühendislik Hizmetleri ve Proje Müdürlüğü bölümünde Konstrüktör Ressam, 2016-2017 yılları arası Kaynes Kariyer Akademi Eğitim' de kısmi süreli Teknik Öğretmen olarak devam etti.

2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' nde Elektro-Optik Sistem Mühendisliği Anabilim Dalı' nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

2017 yılı başlarında Polin Waterparks Arge-Mekanik bölümünde yeni görevine başlamış ve halen devam etmektedir. C Sınıfı İş Güvenliği Uzmanıdır. 2006 yılından bu yana evli ve iki çocuk annesidir.