

**YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER SİSTEMLERİNİN
GERÇEK ZAMANLI ANALİZİ İLE VERİMLİLİĞİ
ARTIRAN YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

Uğur KARANFİL



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER SİSTEMLERİNİN GERÇEK ZAMANLI
ANALİZİ İLE VERİMLİLİĞİ ARTIRAN YENİ BİR YÖNTEM
GELİŞTİRİLMESİ**

Uğur KARANFİL
0000-0002-1483-962X

Prof. Dr. Uğur YALÇIN
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Uğur KARANFİL tarafından hazırlanan “YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER SİSTEMLERİNİN GERÇEK ZAMANLI ANALİZİ İLE VERİMLİLİĞİ ARTIRAN YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Uğur YALÇIN

Başkan	:	Prof. Dr. Güneş YILMAZ 0000-0001-8972-1952 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Uğur YALÇIN 0000-0002-4160-9774 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU 0000-0002-9555-6903 Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen - Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü	İmza
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Ekrem DÜVEN 0000-0003-4957-6126 Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği	İmza
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Bahadır HIÇDURMAZ 0000-0002-4610-1400 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13/02/2023

Uğur KARANFİL

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Uğur YALÇIN
13/02/2023

Uğur KARANFİL
13/02/2023

ÖZET

Doktora Tezi

YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER SİSTEMLERİNİN GERÇEK ZAMANLI ANALİZİ İLE VERİMLİLİĞİ ARTIRAN YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

Uğur KARANFİL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Uğur YALÇIN

Fiber lazer teknolojisi yüksek ortalama güçleri, eşsiz ışın kalitesi ve yüksek verimlilikleri sebebiyle endüstriyel uygulama pazarlarındaki paylarını hızla artırmanın yanı sıra literatürde de ilgi odağı olmuş durumdadır. Özellikle malzeme işleme sırasında meydana gelen etkileşimlerin matematiksel olarak modellenmesi zor olduğu için yeni simülasyon ve izleme yöntemleri üzerine yapılan çalışmalara doğan ihtiyaç artmıştır. Tez çalışmasında literatürdeki bu açığı kapatmak ve sürece müdahale edebilen bir yapıyla gerçek zamanlı izlemenin potansiyelini ortaya koymak için gelişmiş bir çözüm sunulmuştur. Kesim kafasında yer alan fotodiyot tabanlı sensörlerle, malzeme işleme sırasında anlık olarak elde edilen sinyallerin algoritmalarda kullanılmasıyla delme prosesinin son aşaması ve kesim sırasında oluşabilen problemler algılanarak sürece müdahale eden yazılım geliştirilmiştir. Önerilen yöntem sırasıyla 4,6,8 ve 10 kW lazer güçlerinde yumuşak çelik, paslanmaz çelik, alüminyum gibi endüstride en çok kullanılan malzemeler üzerinde test edilmiştir.

Sürece etki eden parametreler arasındaki ilişki, ölçümlerle ortaya konmuş ve literatürdeki diğer bağımsız çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Metodun kattığı yenilikler arasında süreç iyileştirme, malzeme analizi yapabilme, kesim ve delme parametrelerini iyileştirme olanakları bulunmaktadır. Tez çalışmasında ayrıca yüksek güçlü iterbiyum katkılı fiber lazerlerin temel özelliklerinden bahsedilmiş, prosese etki eden parametreler özetlenmiş ve günümüze dair en son gelişmeler gözden geçirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fiber lazer, gerçek zamanlı izleme, lazer kesim, delme
2023, xvi + 107 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPING A NEW METHOD THAT INCREASES EFFICIENCY WITH REAL-TIME ANALYSIS OF HIGH-POWER FIBER LASER SYSTEMS

Uğur KARANFİL

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Uğur YALÇIN

Fiber laser technology has become the focus of attention in the literature, as well as rapidly increasing its shares in the industrial application markets due to its high average powers, unique beam quality and high efficiencies. Especially since the interactions that occur during material processing are difficult to model mathematically, the need for studies on new simulation and monitoring methods has increased. In the thesis study, an advanced solution is presented to close this gap in the literature and to reveal the potential of real-time monitoring with a structure that can interfere with the process. With the photodiode-based sensors located in the cutting head, the signals that are obtained instantly during material processing are processed in algorithms, last stage of the piercing and the problems that may occur during the cutting are detected and software that intervenes in the process has been developed. The proposed method has been tested on the most commonly used materials in the industry such as mild steel, stainless steel, aluminum at laser powers of 4, 6, 8 and 10 kW, respectively.

The relationship between the parameters affecting the process was demonstrated by measurements and compared with other independent studies in the literature. Among the innovations of the proposed method are process improvement, material analysis, cutting and piercing parameters improvement. In the thesis study, the basic properties of high-power ytterbium-doped fiber lasers are also mentioned, the parameters affecting the process are summarized and the latest developments are reviewed.

Key words: Fiber laser, real-time monitoring, laser cutting, piercing
2023, xvi + 107 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle akademik alıőmalarım ve tez yönetimi boyunca yaőadığım problemlerin özümünde desteğini hiç esirgemeyen sayın danıőmanım Prof. Dr. Uğur YALIN'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez oluşumu sırasında tavsiye ve yardımlarda bulunan Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a ve Prof. Dr. Muhittin AHMETOğLU'na katkılarından dolayı teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Durmazlar Makina Aő'ye doktora eğitim hayatım boyunca bana sağladıkları maddi ve manevi destekler için teőekkürlerimi sunarım.

İő ve okul hayatım arasındaki dengeyi sağlamamda yardımlarını hiç esirgemeyen sevgili eőim Seray KARANFİL'e, tez yazım süresince bana varlığı ile çalışma enerjisi veren kızım Serenay KARANFİL'e tüm hayatım boyunca beni destekleyip yanımda bulunan babam Abdil KARANFİL, annem őeyma KARANFİL ve kardeőim Gülnur KARANFİL'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Uğur KARANFİL
13/02/2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1 Lazer Kavramı ve Tarihçesi	4
2.2 Lazer Çeşitleri	6
2.2.1 Gaz lazerler	7
2.2.2 Katı hal lazerler	9
2.2.3 Sıvı lazerler	10
2.2.4 Yarı iletken lazerler.....	10
2.2.5 Fiber lazerler	11
2.3 Optik Fiberlerin Temelleri	13
2.4 Amplifikatör Sistemleri.....	15
2.4 Yüksek Güçlü Fiber Lazerler	20
2.5 Fiber Lazerlerin Güç Ölçeklendirmesi.....	22
2.5.1 Optik fiberde lineer olmayan etkiler	23
2.5.2 Uyarılmış Brillouin Saçılması.....	24
2.5.3 Uyarılmış Raman Saçılması.....	24
2.5.4 Öz Faz Modülasyonu	25
2.5.5 Dört Dalga Karışımı.....	26
2.6 Lazer Kesim Proses İzleme ile İlgili Yapılan Çalışmalar	27
2.7 Lazer Kesim Prosesine Etki Eden Parametreler.....	30
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1 Kullanılan Komponent ve Test Materyalleri	37
3.2 Odak ve Lazer Kontrol Sinyal Akış Diyagramları.....	45
3.3 Anlık Gözlem Sistemi ve Algoritma Yapısı	50
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	55
5. SONUÇ.....	81
KAYNAKLAR	85
EKLER.....	93
EK 1 Dünyada en çok kullanılan lazerlerin dalga boyları (Danlı, 2009).	93
EK 2 Labview platformunda geliştirilen veri toplama yazılımı.....	94
EK 3 Kullanılan CompactRIO cihazı ve Labview platformunda geliştirilen veri işleme yazılımı.....	95
EK 4 Odak Kontrolü ile İlgili PLC Blokları	96
EK 5 Güç Kontrolü ile İlgili PLC ve NC Kodları.....	97
EK 6 Önerilen Sistem kontrolü ile ilgili PLC ve NC kodları	98
EK 7 8mm paslanmaz çelik numunesinin SEM görüntüleri	99
EK 8 12 mm alüminyum numunesinin SEM görüntüleri	100
EK 9 20 mm yumuşak çelik numunesinin SEM görüntüleri.....	101
EK 10 6 kW ile kesimleri gerçekleştirilen 12mm AL, 10mm SS ve 25mm ST37 ölçüm grafikleri.....	102

EK 11 8 kW azot kullanılarak kesilen 3 mm yumuşak elik malzemesinin iyi ve kötü kalitedeki ölçüm grafikleri	103
EK 12 8 kW azot kullanılarak kesilen 8 mm yumuşak elik malzemesinin iyi ve kötü kalitedeki ölçüm grafikleri	104
EK 13 Kesim numunelerinin yüzey kaliteleri (Yalçın ve Karanfil, 2022).....	105
ÖZGEÇMİŞ	106

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
α	Fiber zayıflama katsayısı
β	Yayımla sabiti
β_0	ω_0 açısal frekansındaki yayılma sabiti
γ	Fiberin doğrusalsızlık katsayısı
$\Delta\beta$	Yayımla sabitleri farkı ya da faz uyumsuzluk değişkeni
ϵ_0	Boşluğun elektrik geçirgenliği
θ	Yarı çaplı ışın sapması
κ	Etkili faz uyumsuzluğu
λ	Çalışma dalga boyu
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
ν	Normalize frekans
ν_p	Pompa frekansı
ν_s	Stokes frekansı
ν_a	Akustik dalga frekansı
$\sigma(\nu)$	Geçiş kesiti
τ	Normalizeli zaman
ϕ	Foton akı yoğunluğu
ϕ_s	Doymuş foton akı yoğunluğu
$\chi^{(j)}$	j. derece doğrusal olmayan elektrik alınganlığı
ω	Açısal frekans
ω_0	Optik darbenin merkez açısal frekansı
c	Işığın boşluktaki hızı
\mathbf{E}	Elektrik alan vektörü
$g(\nu)$	Normalize edilmiş çizgi şekli fonksiyonu
h	Plank sabiti
k_a	Akustik dalga vektörü
k_p	Pompa vektörü
k_s	Stokes vektörü
L	Sistemin toplam fiber uzunluğu
M^2	Işın kalite faktörü
N	Popülasyon farkı
N_0	Kararlı durum popülasyon farkı
n	Fiberin toplam kırılma indisi
n_0	Fiberin doğrusal kırılma indisi
n_2	Fiberin ikinci dereceden doğrusal olmayan kırılma indisi
n_{cl}	Fiber kılıf kırılma indisi
n_{co}	Fiber çekirdek kırılma indisi
n_{eff}	Efektif mod indisi
\mathbf{P}	Kutuplanma vektörü
P	Optik darbenin güç yoğunluğu
t	Zaman
t_{sp}	Öz yaşam süresi
v_g	Grup hızı

w	Fiberin mod alan yarıçapı
w_i	Olasılık yoğunluğu
z	Yayıma uzaklığı

Kısaltmalar	Açıklama
BPP	Işın Parametre Ürünü
CNC	Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol
CW	Sürekli Dalga
DPSS	Diyot Pompalı Katı Hal Lazer
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Yükseltici
FWM	Dört Dalga Karışımı
NA	Nümerik Açıklık
NC	Nümerik Kontrol
PLC	Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
SBS	Uyarılmış Brillouin Saçılması
SMF	Tek Modlu Fiber
SPM	Öz-Faz Modülasyonu
SRS	Uyarılmış Raman Saçılması
XPM	Çapraz Faz Modülasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Helyum – Neon lazer yapısı (Helium–neon laser. 2023'ten değiştirilerek alınmıştır).....	8
Şekil 2.2	Yakut lazer yapısı (Types of lasers, 2023'ten değiştirilerek alınmıştır)..	9
Şekil 2.3	Lazer diyot yapısı.....	11
Şekil 2.4	Fiber lazer yapısı	12
Şekil 2.5	Bir optik fiber ve enine kırılma indisi dağılımı (Hagop ve Gregory 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	13
Şekil 2.6	Enerji seviye diyagramı	15
Şekil 2.7	Enerji seviyeleri ve geçiş süreleri (Saleh ve Teich, 2019'dan değiştirilerek alınmıştır).....	16
Şekil 2.8	a) Pompalamanın mevcudiyetinde, çevredeki daha yüksek ve daha düşük enerji seviyeleri ile enerji seviyeleri 1 ve 2. b) Enerji seviyeleri 1 ve 2 ve bunların geçiş süreleri (Saleh ve Teich, 2019'dan değiştirilerek alınmıştır).....	17
Şekil 2.9	Fiber lazerlerde yaygın olarak kullanılan Yb3+, Er3+ ve Tm3+ ile ilgili enerji seviyelerinin gösterimi (Dong ve Samson, 2017'den değiştirilerek alınmıştır).....	21
Şekil 2.10	Optik bir darbe tarafından üretilen SPM ve ilgili cıvıltı (Hagop ve Gregory, 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	26
Şekil 2.11	Farklı odak uzunlukları (Laser Focus – Pulse Laser Systems, 2023'ten değiştirilerek alınmıştır).....	31
Şekil 2.12	Odak yapısı ve malzeme yüzeyindeki konumları (Fiber Laser Machine Terminology, 2021'den değiştirilerek alınmıştır).....	32
Şekil 3.1	Testler için kullanılan ekipmanların şematik diyagramı.....	35
Şekil 3.2	Lazer kesim sürecinin blok diyagramı	36
Şekil 3.3	Geliştirilen veri toplama ve işleme yazılımının ana sayfası.....	39
Şekil 3.4	Geliştirilen veri toplama ve işleme yazılımının insan makine arayüzü.	39
Şekil 3.5	PLC topoloji konfigürasyon sayfası.....	40
Şekil 3.6	NCU 730.3 ile oluşturulmuş sistem topolojisi (Siemens AG 2016'dan değiştirilerek alınmıştır).....	42
Şekil 3.7	Gerilime karşılık gelen odak mesafesi.....	45
Şekil 3.8	Odak değişimi sinyal diyagramı (Precitec 2019'dan değiştirilerek alınmıştır).....	47
Şekil 3.9	Lazer çıkış gücüne karşılık gelen analog kontrol gerilimi.....	47
Şekil 3.10	Lazer kontrol sinyal akış diyagramı (IPG Laser 2022'den değiştirilerek alınmıştır).....	49
Şekil 3.11	Yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde akıllı delme izleme algoritması (Yalçın ve Karanfil, 2022)	50
Şekil 3.12	Delme işlemi sırasında sensörler tarafından kaydedilen tipik sinyal....	52
Şekil 3.13	Yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde kesme izleme algoritması (Yalçın ve Karanfil, 2022)	53
Şekil 4.1	8 mm paslanmaz çelik malzemesinde sensörden alınan azotlu kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	56

Şekil 4.2	8 mm paslanmaz çelik malzemesinin köşe dönüş kısmının SEM görüntüleri. a) Zayıf kaliteli kesim b) Önerilen sistemin müdahalesi sonrası yapılan kesim (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	57
Şekil 4.3	12 mm alüminyum malzemesinde sensörden alınan azotlu kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	58
Şekil 4.4	12 mm alüminyum malzemesinin köşe dönüş kısmının SEM görüntüleri. A) Zayıf kaliteli kesim B) Önerilen sistemin müdahalesi sonrası yapılan kesim (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	59
Şekil 4.5	20 mm yumuşak çelik malzemesinde sensörden alınan oksijenli kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	60
Şekil 4.6	20 mm yumuşak çelik malzemesinde sensörden alınan oksijenli kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	61
Şekil 4.7	20 mm yumuşak çelik malzemesinin köşe dönüş kısmının SEM görüntüleri. a) Zayıf kaliteli kesim b) Önerilen sistemin müdahalesi sonrası yapılan kesim (Karanfil ve Yalçın, 2019).....	62
Şekil 4.8	4 mm paslanmaz çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	63
Şekil 4.9	4 mm paslanmaz çelik malzemesinin zayıf kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	64
Şekil 4.10	8 mm alüminyum malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri.....	64
Şekil 4.11	8 mm paslanmaz çelik malzemesinin azotlu kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	65
Şekil 4.12	20 mm ST37 malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	66
Şekil 4.13	20 mm ST37 malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	66
Şekil 4.14	10 mm AL malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	68
Şekil 4.15	5 mm AL malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	68
Şekil 4.16	15 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri (Yalçın ve Karanfil, 2022)	69
Şekil 4.17	20 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	69
Şekil 4.18	25 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri (Yalçın ve Karanfil, 2022)	70
Şekil 4.19	12 mm paslanmaz çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	71
Şekil 4.20	12 mm paslanmaz çelik malzemesinin zayıf kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	71

Şekil 4.21	12 mm alüminyum malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	72
Şekil 4.22	12 mm alüminyum malzemesinin zayıf kalitedeki kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	72
Şekil 4.23	3 mm yumuşak çelik malzemesinin azotlu kesimleri a) Kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri b) Zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	73
Şekil 4.24	4 mm yumuşak çelik malzemesinin azotlu kesimleri a) Kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri b) Zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	74
Şekil 4.25	6 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	74
Şekil 4.26	6 mm yumuşak çelik malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	75
Şekil 4.27	6 mm yumuşak çelik malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerlerinin yakın görüntüsü	75
Şekil 4.28	20 mm alüminyum malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	76
Şekil 4.29	20 mm alüminyum malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri	76
Şekil 4.30	20 mm alüminyum malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerlerinin yakın görüntüsü	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Yaygın kullanımı olan lazerlerin karakteristikleri	7
Çizelge 3.1. Model YLS 4000 CUT teknik özellikleri	38
Çizelge 3.2. Kesim kafasının teknik özellikleri	38
Çizelge 3.3. Veri toplama komponentlerinin teknik özellikleri	40
Çizelge 3.4. ET200SP modüllerinin teknik özellikleri	41
Çizelge 3.5. YLS 6000 U modelinin teknik özellikleri	42
Çizelge 3.6. YLS 8000 U modelinin teknik özellikleri	42
Çizelge 3.7. YLS 10000 CUT modelinin teknik özellikleri	43
Çizelge 3.8. İkinci jenerasyon kesim kafasının teknik özellikleri	43
Çizelge 3.9. İkinci jenerasyon zoom model kesim kafasının teknik özellikleri	44
Çizelge 4.1. 6kW testlerinde kullanılan delme prosesinin ilk adım parametreleri	62
Çizelge 4.2. 6kW testlerinde kullanılan kesme prosesinin örnek parametreleri	63
Çizelge 4.3. 8kW testlerinde kullanılan delme prosesinin ilk adım parametreleri	67
Çizelge 4.4. 8kW testlerinde kullanılan kesme prosesinin örnek parametreleri	67
Çizelge 4.5. 10 kW testlerinde kullanılan delme prosesinin ilk adım parametreleri	73
Çizelge 4.6. 10 kW testlerinde kullanılan kesme prosesinin parametreleri	73
Çizelge 4.7. Önerilen Sistemin Delme Algılama Performans Tablosu	77
Çizelge 4.8. Azotlu yumuşak çelik kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi	78
Çizelge 4.9. Oksijenli yumuşak çelik kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi	79
Çizelge 4.10. Paslanmaz çelik kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi ...	80
Çizelge 4.11. Alüminyum kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi	80

1. GİRİŞ

Lazerler enerji depolama uygulamaları (Zang ve diğeri, 2019), savunma (Eichorn, 2010), paketlenme (Sparkes ve Steen, 2018), ile büyük ölçekte (Booth, 2010) ve küçük ölçekte (Francis ve Bian, 2019; Majumdar ve Manna, 2003) endüstriyel uygulamaları olan temassız özel bir tekniktir. Bu uygulamalara ek olarak lazerli kesme (Pocorni ve diğeri, 2017; Karanfil ve Yalçın, 2016), kaynak prosesi (Chen ve diğeri, 2019), kaplama (Shepeleva ve diğeri, 2000), delik açma (Balasubramaniam ve diğeri, 2019) ve markalama (Thieme, 2007) prosesleri de yer almaktadır. Fiber lazerler, düşük enerji tüketimi, kompakt yapıları, düşük bakım maliyeti ve iyi termal özelliklere sahip oldukları için özellikle malzeme işlemede tercih edilmektedirler (Zervas, 2014).

Yüksek güçlü lazer sistemleri ise günümüz sac şekillendirme yöntemleri içerisinde vazgeçilmez bir imalat tercihi haline gelmiştir (Nane ve diğeri, 2020). Gelişen lazer güç kaynağı teknolojileri ile havacılık, elektronik, otomobil ve yapılar gibi imalat sanayilerinde geniş uygulamalar sunan lazer ışınının son yıllarda malzeme işleme yöntemleri arasında kullanım oranı artmaktadır. Proses, 1960 yılında, monokromatik radyasyonun güçlü darbe üreteçleri oluşturulduğunda geliştirilmiştir. Ancak, içsel kısıtlamaları, birbirinden ayrılan ışın profili ve metalik yüzeylere yansıtıcı doğası nedeniyle lazer kesimi, yenilikçi ve çekici bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu sebeple literatürde lazer kesim uygulamaları, üretim metotları ve kesim teknolojileri ile ilgili teorik ve pratik birçok çalışma yapılmaktadır.

Farklı materyal ve kalınlıklarla yapılan önceki çalışmalar malzeme karakteristiğine göre delme ve kesme prosesinin değişken olduğu ortaya çıkarmıştır. Uygulanan lazer gücü arttıkça özellikle yumuşak çelikte ısınmanın etkisiyle malzemenin verdiği erime tepkisinin oldukça arttığı ortaya çıkmaktadır. Paslanmaz çelik ve alüminyumda kesim sırasındaki bozulmaların verdiği tepkimenin, yumuşak çeliğe oranla daha fazla olduğu yapılan araştırmalarla ortaya çıkmaktadır. Sac işlemeye etki eden birçok etmen mevcutken aynı parametrelerle farklı malzemelerin işlenemeyeceği sonucuna varılmaktadır (Karanfil ve Yalçın, 2019).

Lazer kesim prosesi endüstrinin yanı sıra akademide de kullanılan bir malzeme işleme tekniğidir. Süreç sonucunda kesilen parçanın nihai kalitesini düşürebilen çizgi veya cüruf kusurları oluşabilir. İşlem sırasında oluşan hafif madde etkileşimlerin lineer olmaması ve matematiksel olarak modellenmesi zor olduğundan inceleme yapabilmek için yeni simülasyon ve izleme yöntemleri geliştirmeye ihtiyaç vardır (Courtier ve diğerleri, 2021).

Lazer kesim işlemlerinde hatalı üretimlerin en yaygın nedenlerinden biri kesim hatasıdır. Arızalar birkaç faktör tarafından başlatılabileceğinden, kesme arızası olaylarının izlenmesi son derece karmaşıktır, en belirgin olanı muhtemelen modern standartların gereksinimi olan yüksek üretim hızlarıdır (Peghini ve diğerleri, 2021). Literatürde şu ana kadar kesim kalitesinin değerlendirilmesi için, kesim tarafında yayılan ışığın bir optik fiberle ölçülmesi, akustik ve optik sinyallerin analizi ile kalite kontrolü, NIR (Near Infrared) ve fotodiyotlar yardımıyla prosesin gerçek zamanlı izleme sistemi gibi birçok gelişme bildirilmiştir. Son yıllarda lazer kesim sürecini anlık olarak izleyebilmek için fotodiyot kullanımında bir artış gözlenmiştir. Kullanımlarındaki bu artış, temel olarak bu sensörlerin güçlü potansiyeline, kolay montajlarına ve endüstriyel uygulamalarda izleme sistemlerini dahil etme talebine dayanmaktadır (Garcia, 2020).

Proses sırasında arızaları otomatik ve zamanında tespit edebilmek, üretim sürecinde önemli miktarda zaman, enerji ve malzeme tasarrufu sağlayabilir. CNC'de uygulanan kontrol döngüsü genellikle yakınlık sensörlerinden malzeme yüzeyine olan mesafe ve kodlayıcılardan gelen eksen konumları gibi sınırlı bilgileri dikkate alır. Fotodiyot tabanlı sensörler, farklı dalga boylarında malzeme yüzeyinden yansıyan ışığın yoğunluğunu ölçerek kesme işlemlerinin durumunu değerlendirmek için kullanılabilir. İlgili sinyallerinin doğru ve güvenilir şekilde yorumlanması, CNC'ye sağlanacak geri bildirim bilgilerinin tamamlanmasına ve kaynaştırılmasına yardımcı olacaktır. Bu geri bildirim bilgisi yeterince zamanındaysa ve derhal kullanılabilirse, üretim süreci riske atılmadan önce CNC makine doğru şekilde kontrol edilebilir.

Bu tez çalışmasında anlık gözlem ile sensörlerden alınan sinyaller veri toplama sistemi ile toplanmıştır. Toplanan sinyaller çeşitli algoritmalar kullanılarak merkezi bir karar yazılımı içinde değerlendirilmiştir. Elde edilecek veriler ile insandan bağımsız, otomatik çalışan bir yapı tasarlanacaktır. İlgili çalışma sonucunda yapılacak analiz ve algoritmalar sayesinde verimliliği artıran bir yöntem geliştirilmek hedeflenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Lazer Kavramı ve Tarihçesi

Uyarılmış ışınım yayımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi anlamına gelen lazerlerin temeli 1917 yılında Albert Einstein tarafından atılmıştır. Lazerler temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilki bir enerji kaynağıdır ve ışığın bir kazanç ortamına pompalanmasını sağlar. Lazer çeşidine göre kimyasal reaksiyon, lazer diyotu, elektriksel etki ve hatta farklı bir lazer olabilir. İkinci bileşen ise kazanç ortamıdır uyarıldığında belirli bir dalga boyunda ışık yayar. Lazerler genellikle kazanç ortamlarından sonra adlandırılır. Üçüncü bileşen olan rezonatör ise optik kazancı yükseltir ve bunu kazanç ortamını çevreleyen aynalar aracılığı ile gerçekleştirir. Katı hal lazerlerinde bulk aynaları, lazer diyotlarında bölünmüş veya kaplanmış fasetleri ve fiber lazerlerde Bragg reflektörlerini içermektedir.

Geçmişten günümüze lazerlerin gelişimini inceleyecek olursak, 1917 yılında uyarılmış emisyonlar keşfedilse bile görünür bölgede lazer üretmenin mümkün olduğu ancak 1958 yılında Charles Towns ve Arthur Schawlow'un yayınladığı makale ile teorik olarak gösterilmiş oldu. 1960 yılına gelindiğinde ise Ted Maiman tarafından ilk defa yakut lazer üretildi. Yine aynı yıl sürekli dalga lazer ışınları geliştirildi ve fiber optik terimi ilk defa kullanıldı.

1961 yılına gelindiğinde lazer çıkışında sağlam bir tek uzamsal mod sağlamak için bir lazer boşluğunda nadir toprak katkılı tek modlu optik fiber kullanmanın yararı ilk olarak Snitzer tarafından gerçekleştirilmiştir. Bir flaş lambası ile pompalanan neodimiyum katkılı çok modlu silika optik fiber lazerlerde yüksek kazanç, birkaç yıl sonra Koester ve Snitzer tarafından gösterildi. Diyot pompalı neodimiyum çok modlu optik fiber lazer 1970'lerin başında Stone ve Burrus tarafından Bell Laboratuvarlarında sunuldu. Buhar fazı biriktirmeye dayalı modern optik fiber üretim proseslerini kullanan nadir toprak doping yöntemlerinin geliştirilmesinden sonra, 1980'lerin ortalarında tek modlu optik fiber lazerler üzerindeki çalışmalar başlamış oldu. Kısa bir süre sonra, 1980'lerin sonlarında iki temel teknolojinin birleşmesi sayesinde fiber lazerlere ve amplifikatörlere ilgi arttı. Bu teknolojilerden ilki 1.55 μm 'de çok önemli telekomünikasyon penceresi için

benzersiz bir kazanç ortamı sağlayan erbiyum katkılı tek modlu fiberlerin mevcudiyetiydi; erbiyum katkılı fiber amplifikatörler (EDFA'lar), 1980'lerin sonlarında fiber teknolojisindeki en popüler araştırma konusuydu. İkinci teknoloji ise, çok zorlu telekomünikasyon uygulamalarında sahada kullanım için sağlam ve kompakt cihazlar sağlama amacıyla EDFA'larda kullanılabilen pompa diyotlarının var olmasıydı. Elektriksel tekrarlayıcıların yerini alan ve sonuç olarak optikten elektrige ve elektrikten optige dönüşüm ihtiyacını ortadan kaldıran fiber optik yükselticilerin yararlarını görmek kolaydı. Bu, özellikle fiber optik amplifikatörlerin dalga boyu şeffaf doğası göz önüne alındığında oldukça geçerliydi (Dong ve Samson, 2017).

1980'lerin sonundaki diğer önemli gelişmeler tek modlu pompa diyotlarından elde edilebilen düşük güç seviyelerinin çok üzerinde ortalama güçlere sahip tek modlu optik fiber lazerlerin geliştirilmesine yol açtı. Kaplama-pompalama başlangıçta düşük parlaklıkta çok modlu tek emitör diyotlardan elde edilen çok daha yüksek güçlerin kullanımını sağlamak için çalışıldı (Snitzer ve diğerleri, 1988). Bu tür diyotlar, katı hal lazerlerini pompalamak için geliştiriliyordu. Daha verimli ve güvenilir yüksek güçlü katı hal lazerlerinin geliştirilmesi için önemliydi. Kaplama pompalamasında kullanılan çift kaplamalı bir fiber, çok daha büyük birçok modlu pompa kılavuzuna gömülü küçük bir aktif tek modlu çekirdeğe sahiptir. Bu konfigürasyon, düşük parlaklığa sahip çok modlu pompa ışığının, nadir toprak katkılı tek modlu çekirdekte yönlendirilen tek modlu yüksek parlaklıkta bir lazer ışımına dönüştürülmesine olanak tanıyan çok verimli bir dönüştürücü gibi çalışır.

Fermann'ın 1988 yılında, Koplow ve diğerlerinin 2000 yılında yaptığı araştırmalar fiber lazerlerin güç ölçeklendirmesini daha da geliştirdi. Tek modlu bir optik fiberin küçük çekirdeği, yüksek optik yoğunluklara ve dolayısıyla düşük doğrusal olmayan eşiklere yol açmaktaydı. Bunun çözümü, doğrusal olmayan eşikleri önemli ölçüde artıran çok daha büyük çekirdekli çok modlu fiberlerde tek modlu çalışması şeklinde gösterildi. Jeong ve diğerleri, 2004 yılında ilk defa yakın tek modlu, (~1 kW CW) fiber lazer için yüksek parlaklıkta 972 nm diyot yığını ile lazer boşluğunun her iki ucundan Yb katkılı fiber lazerin serbest alan pompalamasını kullandı.

Günümüzde fiber lazer teknolojisinde hala önemli aşamalar kaydedilmekte ve uygulama alanları yaşamın her alanında varlığını artırmış durumdadır.

2.2 Lazer Çeşitleri

Geçmişten günümüze bilimsel araştırmaların yanı sıra tıp, ticaret ve endüstriyel kullanımlar gibi uygulamalar için geliştirilmiş çok sayıda lazer türü vardır. Çok çeşitli lazerler olmasına rağmen, temel çalışma prensibi tüm lazer sistemleri için aynıdır fakat kazanç ortamlarına göre lazerler beş ana guruba ayrılırlar. Yaygın kazanç ortam türleri gaz, katı hal, sıvı, yarı iletken ve fiberdir. Ayrıca bu lazer türleri çalışma modlarına göre sürekli dalga (CW) lazerleri ve darbeli lazerler olarak ayrılırlar. Darbeli lazerlerinde kendi içinde çeşitleri bulunmaktadır. Sürekli dalga lazerleri sabit bir ortalama ışın gücü ile çalışırken, darbeli modda lazerler birkaç yüz mikro saniye ile birkaç milisaniye arasında bir darbeye sahiptir. Tek darbe Q-Anahtarlı lazerler ise ortamın maksimum potansiyel enerji depolamasını sağlayan boşluk içi gecikmenin (Q-anahtar hücresi) sonucudur. Optimum kazanç koşullarında tek darbelerde emisyon meydana gelir. Tekrarlamalı darbe veya bir başka deyişle tarama lazerleri genellikle, saniyede birkaç darbeden 20 000 darbeye kadar değişebilen sabit (veya değişken) bir hızla çalışan darbeli lazer performansının çalışmasını içerir. Mod kilitlemeli lazerler, optik boşluğun çıkış ışınının özelliklerini etkileyebilecek rezonans modlarının bir sonucu olarak çalışır. Farklı frekans modlarının fazları senkronize olduğunda (birlikte kilitlendiğinde) farklı modlar bir vuruş efekti oluşturmak için birbiriyle etkileşime girer ve düzenli vuruşlar oluştururlar. Mod kilitlemeli lazerler 10^{-15} ile 10^{-12} saniyelik sürelerle sahip darbeler üretmesinin yanında, Q-anahtarlı modda çalışan aynı lazerden son derece yüksek tepe güçleri sağlayabilir. Ek 1'de dünyada en çok kullanılan lazerlerin dalga boyları gösterilmiştir. Farklı lazer çizgilerine sahip lazer türleri, dalga boyu çubuğunun üzerinde gösterilirken, bir dalga boyu aralığında yayabilen lazerler alt tarafta gösterilmektedir. Çizgilerin ve çubukların yüksekliği, maksimum güç/darbe enerjisinin bir göstergesini verirken, renk ise lazer malzemesinin türünü belirtmektedir.

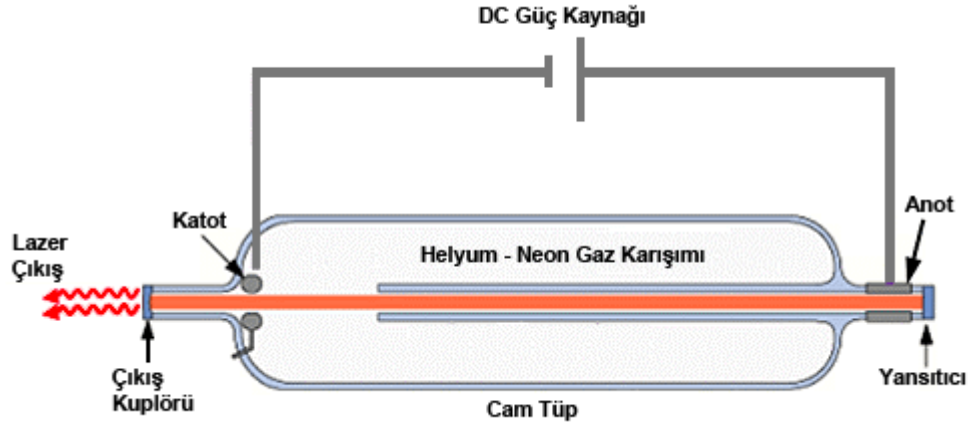
Çizelge 2.1’de yaygın kullanılan bazı lazerlerin özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Yaygın kullanımı olan lazerlerin karakteristikleri

Lazer Çeşitleri	Çalışma Modu	Ayarlanabilir	Emisyon Dalga boyları
HeNe	CW	Hayır	632.8 nm (1.15 µm)
Ar ion	CW	Hayır	351, 455, 458, 466, 477, 488, 497, 502, 515, 529 nm
N ₂	Darbeli	Hayır	337 nm
Eksimer	Darbeli	Hayır	190 – 350 nm
CO ₂	Her ikisi	Evet	10.6, 9.6 µm**
Boya lazerleri	Her ikisi	Evet	365 – 930 nm
Nd:YAG	Her ikisi	Hayır	1064 nm (532, 355, & 266 nm)
Alexandrite	Darbeli	Hayır	720 – 800 nm
Ti:safir	CW	Hayır	670 – 1100 nm
Diyot lazerler	Her ikisi	Evet	UV orta-IR arası

2.2.1 Gaz lazerler

Gaz lazeri, popülasyon inversiyonu olarak bilinen bir işleme ışık üretmek için bir gazdan elektrik akımının gönderildiği bir lazardır. Kazanç ortamı olarak düşük yoğunluklu gazlı malzemeler kullanılmaktadır ve temel çalışma prensipleri rezonans boşluğuna dayanmaktadır. Kazanç ortamı olarak oluşturulduktan sonra, gaz ortamına bağlı elektrotlar boşaltılarak sistemin pompalanması yapılır. Boşluğun içinde, elektrik enerjisi lazer ışığına dönüştürülür. Karbondioksit (CO₂) lazerler, helyum-neon lazerleri (Şekil 2.1), argon lazerleri, kripton lazerleri ve eksimer lazerler bu kategoride bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Helyum – Neon lazer yapısı (Helium–neon laser. 2023'ten değiştirilerek alınmıştır)

Eksimer yalnızca uyarılmış bir durumda var olan özdeş iki türün bir bileşiminden "uyarılmış dimer" den türetilmiştir. Eksimer kompleksleri, ultraviyole ile ultraviyole yakın spektrumunda 0,193 ila 0,351 μm arasında değişen çıktı dalga boyuna sahip argon florür (ArF), kripton florür (KrF), ksenon klorür (XeCl) ve ksenon florür (XeF) içerir. (Atakan, 2021).

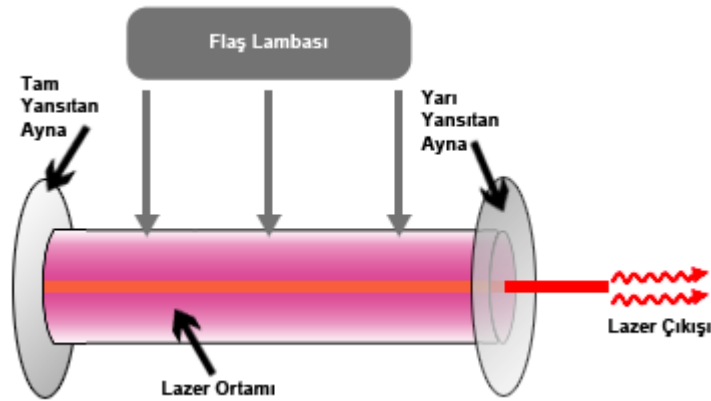
Gaz lazerleri, çok yüksek ışın kalitesi ve uzun koherens uzunlukları ile lazer ışığı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Malzeme işlemenin dışında holografi, barkod tarama, spektroskopi ve lazer cerrahi gibi çeşitli alanlarda değerlendirilmektedir. Gaz lazeri, elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştürme prensibiyle çalışan ilk lazerdir. Lazer veya kazanç ortamı gaz karışımından oluşur, bu karışım cam tüpe doldurulur. Gaz karışımıyla doldurulmuş cam tüp, aktif bir ortam veya lazer ortamı olarak işlev görür. Spektrumun kızılötesi bölgesinde 1.15 μm 'de bir lazer ışığı ışını üretir.

CO₂ lazerleri en yaygın olarak bilinen gaz lazerleridir ve esas olarak lazer markalama, lazer kesim ve lazer kaynağı için kullanılır, verimlilikleri sınırlıdır. Atık ısıyı verimli bir şekilde uzaklaştırmak ve sıcaklığını 600 K'nin altında tutmak lazer performansının en önemli etmenidir. İki tip CO₂ lazer tasarımı, aktif ortamdan ısıyı verimli bir şekilde uzaklaştırır bunlar hızlı akışlı ve difüzyon soğutmalı lazerlerdir. Hızlı akışlı tasarımlarda gaz, deşarj alanı boyunca ses hızının yarısına kadar olan hızlarda dolaştırılır. Gaz tahliye alanına dönmeden önce ısı eşanjörlerinde soğutulur. Difüzyon soğutmalı tasarımlarda ise

lazer gazı soğutulmuş yüzeylerle temas halindedir ve sıcak gaz moleküllerinin su soğutmalı elektrotlara difüzyonu ile ısı uzaklaştırılır (Hagop ve Gregory, 2011).

2.2.2 Katı hal lazerler

Katı hal lazerlerinde optik kazanç kaynağı olarak bir nadir toprak elementi ile karıştırılmış bir katı (kristaller veya camlar) kullanılır. En iyi bilinen katı hal lazeri, şimdiye kadar yapılmış ilk lazer olduğu için yakut lazerdir (Şekil 2.2). Lazer ortamı için ana malzeme olarak safir (Al_2O_3), neodimyum katkılı itriyum alüminyum granat (Nd:YAG), Neodimyum katkılı cam (Nd:cam) ve iterbiyum katkılı cam gibi malzemeler kullanılır. Bunlardan en yaygın olarak neodimyum katkılı itriyum alüminyum granat (Nd:YAG) kullanılır. Nd:YAG lazer malzeme işleme uygulamalarında yaygındır. Metal yüzeylerden soğurulmaları CO_2 lazerlerden daha iyidir.



Şekil 2.2. Yakut lazer yapısı (Types of lasers, 2023'ten değiştirilerek alınmıştır)

Katı hal lazerlerinde pompalama kaynağı olarak ışık enerjisi kullanılmaktadır. Pompalamayı sağlamak için flaş tüpü, flaş lambaları, ark lambaları veya lazer diyotları gibi ışık kaynakları kullanılır. Optik olarak pompalanan yapıları nedeniyle, yüksek ortalama güce sahip katı hal lazerleri parlaklık artırıcılar olarak işlev görür. Bir başka ifade ile düşük parlaklıktaki pompa fotonlarını, iyileştirilmiş ışın kalitesine (BQ) sahip bir çıkış ışımına dönüştürürler, ancak kusurlu verimlilik nedeniyle daha düşük toplam güce sahiptirler. Katı hal lazerleri, ışık tespiti ve uzaklık tayini (LIDAR) teknolojisinin

yanı sıra cilt uygulamaları, doku ablasyonu ve böbrek taşı çıkarma gibi çeşitli tıbbi uygulamalar için kullanılmaktadır.

2.2.3 Sıvı lazerler

Sıvıyı lazer ortamı olarak kullanan bu sistemlerde lazer ortamına enerjiyi ışık sağlamaktadır. Lazer ortamında çözücü ile karıştırılmış organik bir boya kullanılmaktadır. Boya lazerleri, sıvı çözücülerde (su, alkol veya etilen glikol) çözülmüş organik boyaların uyarılmış enerji durumlarından lazer ışığı üretir. Spektrumun yakın kızılötesi bölgesine yakın ultraviyole içinde lazer ışığı ışını üretilmektedir. Boya lazerleri lazer tıbbında, spektroskopide ve izotop ayırmada kullanılmaktadır.

Sıvı lazerlerin verimlilikleri %25'ten fazladır. Üretilen dalga boyları çeşitli aralıklarda olabilir ve ışın sapması, diğer lazerlerden nispeten daha az olan 0.8 miliradyan ile 2 miliradyan arasında değişmektedir. Fakat lazeri bir frekansa ayarlamak için özel filtreler kullanmak gerekir bu nedenle diğer lazer türlerinden daha pahalıdır.

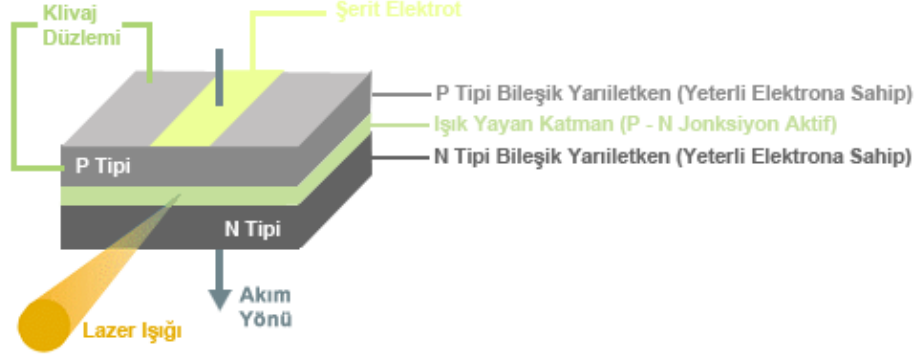
2.2.4 Yarı iletken lazerler

Lazer diyotları olarak da adlandırılan yarı iletken lazerler çok ucuz, kompakt ve düşük güç tüketimine sahiptir. Pozitif-negatif (PN) yüklü bir bağlantıya sahip oldukları için normal diyotlara benzemektedirler. Yarı iletken lazerler, katı hal lazerlerinden farklıdır. Katı hal lazerlerde pompa kaynağı olarak ışık enerjisi kullanılırken yarı iletken lazerlerde pompa kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılır.

Yarı iletken lazerlerde, yarı iletken diyotun bir p-n bağlantısı aktif ortamı veya lazer ortamını oluşturur ve optik kazanç yarı iletken malzeme içinde üretilir. Diyot lazer olmayan yarı iletken lazerlerde bulunmaktadır. Bunun nedeni, kuantum kademeli lazerler ve optik olarak pompalanan yarı iletken lazerler gibi diyot yapısını kullanmayan yarı iletken lazerlerin olmasıdır.

Yüksek güçlü lazer diyotlarının ilk kullanımı bir pompa kaynağı veya başka bir tür lazer ya da optik amplifikatörü enerjilendirme amacıyla olmuştur. Küçük görünüşleri ve enerji

tüketimleri dışında aynada kullanılmaması bir avantajdır. Fakat ışın sapması diğer lazer türlerinden çok yüksektir (125 – 400 miliradyan). Ayrıca mevcut ortam kısa ve dikdörtgen olduğundan çıkan ışın alışılmadık bir şekle sahiptir.



Şekil 2.3. Lazer diyot yapısı

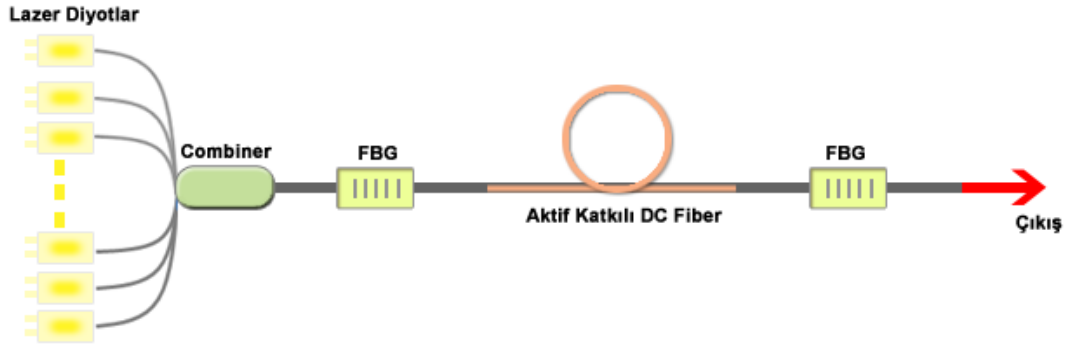
Fiber lazerlere benzer şekilde lazer diyotları (Şekil 2.3) kazanç ortamı katı olduğu için katı hal lazerleri olarak sınıflandırılabilir. Fakat PN eklemleri nedeniyle kendilerine ait bir kategoridedirler. Lazer diyotları günlük hayatta son derece yaygın şekilde kullanılır. Barkod okuyucular, lazer işaretçiler, lazer yazıcı ve tarayıcılar örneklerden bazılarını oluşturmaktadır.

2.2.5 Fiber lazerler

Özel bir katı hal lazer türü olan fiber lazerlerde kazanç ortamı, nadir bir toprak elementi ile karıştırılmış bir optik fiberdir (silika cam). Optik fiberin ışık yönlendirme özellikleri, bu lazer tipini diğerlerinden farklı kılmaktadır. Lazer ışını, diğer lazer tiplerine göre daha düz ve küçüktür, bu da onu daha hassas hale getirir.

Fiber lazer sistemlerinin, yüksek güçlerdeki CW modunda temel çalışma prensibi lazerin kaynağını oluşturan pompa diyotlara ve lazer ışınının olduğu kavite bölgesine dayanır. Fiber lazer sistemlerinde lazer ışınının invers durumu, lantanit olarak bilinen ve nadir toprak elementi olarak adlandırılan İterbiyum (Yb), Erbiyum (Er), Tulyum (Tm) ve Neodimyum (Nd) gibi iyonlarla belirli oranlarda katkılanmış aktif fiber optik kablo öz bölgesi içerisinde oluşturulur. Farklı özellikteki lazer diyotlar ile pompalanan aktif fiber,

fiber optik kablo giriş ve çıkışına kuple edilmiş fiber Bragg ızgaralar sayesinde ayna görevini üstlenerek, oluşan lazer ışınının fiber optik kablo içerisinde gidip gelmesi ve katkı elementi iyonları tarafından soğurulup istenilen dalga boyunun elde edilmesini sağlar. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere lazer diyotlar 1064 nm dalga boyu elde edilmesi ve özel seçilen iterbiyum iyonu ile etkileşmesi için 915 nm veya 976 nm dalga boyunda seçilirler. İterbiyum iyonu bu özel dalga boylarında uyarıldığında zaman 1010 nm ile 1150 nm dalga boyu aralığında foton salınmasını sağlar. İstenilen dalga boyuna göre katkı elementi ve pompa diyotun dalga boyu seçilmektedir (Süle, 2013).



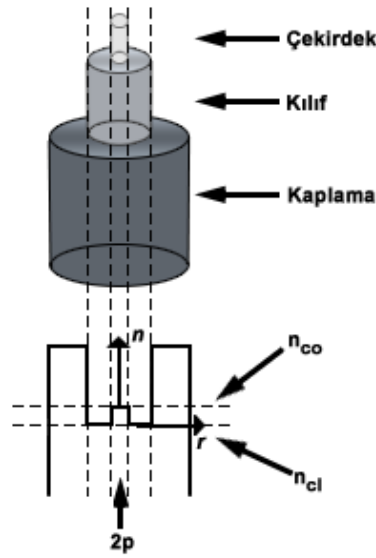
Şekil 2.4. Fiber lazer yapısı

En verimli şekilde kullanılmak istenen fiber lazerde; 915 nm veya 976 nm etkin dalga boyu ile pompalanan iterbiyum katkılu aktif fiber optik kablo 1060 ± 4 nm çıkış dalga boyunun elde edilmesini sağlar (Kurkov ve diğerleri, 1999).

Fiber lazerler ayrıca 100 000 saat diyot ömrü, az yer kaplaması, iyi elektriksel verimlilikleri, düşük bakım ve işletme maliyetleri ile öne çıkmaktadır. Fakat tüm lazer türlerinde, fiber lazerler mükemmel ışın kalitesiyle büyük ilgi görmesine rağmen, fiber lazerlerin çıkış gücü, uyarılmış Raman saçılması (SRS), uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) ve kendi kendine faz modülasyonu gibi çeşitli doğrusal olmayan işlemlerle sınırlandırılmıştır (Zhen Li ve diğerleri, 2013).

2.3 Optik Fiberlerin Temelleri

Teknolojik gelişmelerle birlikte optik fiberler araştırma laboratuvarlarında ve hatta endüstriyel ortamlarda kullanım için çok daha erişilebilir hale gelmiştir. Şekil 2.5, tipik bir optik fiberi göstermektedir. Fiberin merkezinde bir 2ρ çapında ve kırılma indisi n_{co} olan çekirdek, kırılma indisi n_{cl} olan bir kaplama tabakası ile çevrilidir. Hem çekirdek hem de kaplama çoğunlukla silika camdan yapılmıştır. Çekirdekteki Germanyum katkısı tipik olarak çekirdeğin kırılma indisini yükseltmek için kullanılmaktadır. Kırılma indisini yükseltmek için fosfor ve alüminyum katkıları da kullanılabilir. Silika camın kırılma indisini düşürmek için flor ve bazen bor kullanılır. Çekirdek cam ve kaplama camının en azından iç kısmı tipik olarak, çok düşük iletim kaybı elde etmek için özellikle geçiş metal iyonları olmak üzere safsızlıkları en aza indiren buhar fazı biriktirme işlemleri yoluyla çok yüksek saflıkta camdan yapılmaktadır (Hagop ve Gregory, 2011).



Şekil 2.5. Bir optik fiber ve enine kırılma indisi dağılımı (Hagop ve Gregory 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Bir adım indisli optik fiberin bağıl kırılma indisi farkı şu şekilde tanımlanır;

$$\Delta = \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{co}} \quad (2.1)$$

Burada Δ tipik olarak %2'nin altındadır. Lineer polarize modlar optik fiberdeki modları tanımlamak için kullanılabilir. Alanların vektör yapısı göz ardı edilerek, zayıf yönlendirici yaklaşım, bir optik fiberin teorik analizini büyük ölçüde basitleştirir. Bir optik fiberin nümerik açıklığı (NA) ve normalize frekansı sırasıyla 2.2 ve 2.3'te verilmiştir.

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.2)$$

$$V = \frac{2\pi\rho NA}{\lambda} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemde λ dalga boyudur. Bir dalga kılavuzunun kılavuzlu modları, Maxwell denklemlerinden türetilen ve tüm sınırlarda ilgili tüm alan sürekliliklerini sağlayan Helmholtz özdeğer denkleminde elde edilebilir. Kılavuzlu bir mod, yayılma sabiti β 'da yayılan ve sabit bir dalga cephesini koruyan sağlam bir temel uzaysal dağılım olarak görülebilir.

$$E(r, \theta, z) = E_0(r, \theta)e^{-i\beta z} \quad (2.4)$$

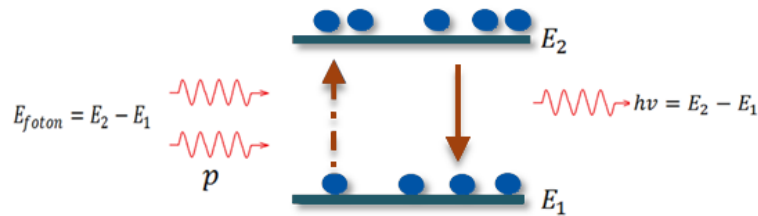
Denklem 2.4'te β yayılma sabiti, E_0 enine mod dağılımı ve z yayılma mesafesi anlamına gelmektedir. Helmholtz denkleminin benzersiz ölçekleme özellikleri nedeniyle, bir dalga kılavuzunun mod özellikleri, normleştirilmiş frekans V bilindiğinde tamamen belirlenir. Hem ρ hem de λ 'nın orantılı olarak ölçeklenmesinin, aynı görelî alan dağılımına ve yayılma sabitine sahip modlara yol açtığını belirtmekte fayda var. Efektif mod indisi n_{eff} , 2.5'ten elde edilebilir.

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad (2.5)$$

2.4 Amplifikatör Sistemleri

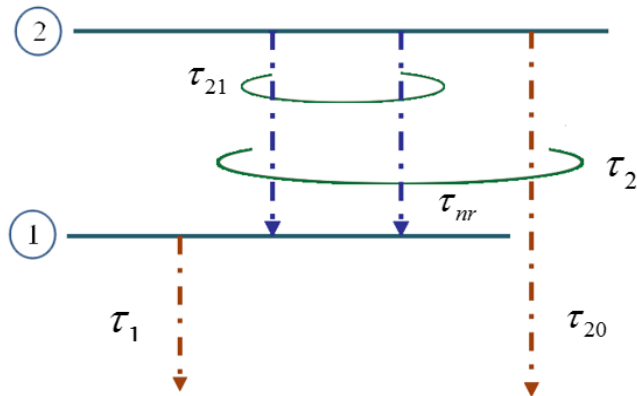
Optik yükselticiler, giriş sinyalini herhangi bir elektrik sinyaline veya başka bir şeye dönüştürmeden doğrudan yükseltenlerdir. Optik yükselticiler, geri beslemesiz bir lazer gibidir dolayısıyla sistemlerinde boşluklar gerekli değildir. Belirli koşullar altında, uyarılmış emisyon, optik amplifikasyon için bir mekanizma sağlayabilir. Lazer amplifikasyonu elde etmek için gerekli bir bileşen, dengesizlik durumu olan alt durum enerji seviyesinden daha üst durum enerji seviyesinde çok sayıda atomun varlığıdır. Harici bir enerji kaynağı, temel durumdaki atomları, bir popülasyon inversiyonu oluşturmak için uyarılmış duruma geçmeye teşvik eder. Bu, optik kazanç adı verilen sabit bir faktörle giriş sinyalinin genliğini artıran doğrusal bir sistemdir. Popülasyon inversiyonu elde etmek için yükseltici pompalandığında bu sistemler için optik kazanç önemli bir parametredir. İdeal yükseltici sistemlerinin kazancı, yükseltici spektral bant genişliği içindeki tüm frekanslar için sabittir. Gerçek yükseltici sistemlerde, tipik olarak frekansın fonksiyonu olan bir kazançla sahiptir. Büyük girişler için çıkış sinyali doygun hale gelir ve yükseltici doğrusal olmama sergiler (Sinem, 2013).

Amplifikasyon işlemi, foton-atom etkileşiminin üç farklı tipine dayanmaktadır. Atom daha düşük enerji seviyesindeyse, foton emilebilir. Eğer üst enerji seviyesindeyse, uyarılmış emisyon işlemi ile bir klon foton yayınlanabilir. Üçüncü etkileşim biçimi, üst enerji seviyesindeki bir atomun başka bir fotonun varlığından bağımsız olarak bir foton yaydığı kendiliğinden emisyondur. Şekil 2.6 temel iki seviyeli sistem için bu etkileşimin şemasını göstermektedir.



Şekil 2.6. Enerji seviye diyagramı

Lazer amplifikatörlerde pompa giriş sinyalinin artırmak için gerekli olan enerjiyi atomlardaki elektronları uyaran ve daha düşük atom enerji seviyelerine doğru hareket etmelerine neden olan bir mekanizma aracılığıyla sağlar. Amplifikasyon elde etmek için, pompa ilgili geçişte bir popülasyon inversiyonu sağlamalıdır ($N=N_2-N_1>0$). Pompalamanın mekaniği genellikle yardımcı enerji seviyelerinin kullanımını içerir. Örnek olarak, 2-1 geçişinde amplifikasyon elde etmek için atomların seviye 1'den seviye 2'ye pompalanması, atomları seviye 1'den seviye 3'e pompalayarak ve daha sonra yaşam süresine dayalı geçişe dayanarak kolay şekilde başarılabilir. Pompalamanın yanı sıra ışınımsal ve ışınımsal olmayan geçişlerin bir sonucu olarak N_1 ve N_2 popülasyon yoğunluklarının değişim oranlarını tanımlayan denklemlere oran denklemleri denir. Şekil 2.7'de τ_1 ve τ_2 toplam ömürlerine sahip olan ve daha düşük enerji seviyelerine geçişleri sağlayan seviye 1 ve 2 gösterilmiştir. Seviye 2'nin yaşam süresinin iki katkısı vardır τ_{21} , 2'den 1'e düşüşle ilişkilidir, τ_{20} ise 2'den diğer tüm alt seviyelere düşüşle ilişkilidir. Birkaç bozulma modu mümkün olduğunda, genel geçiş oranı, bileşen geçiş oranlarının bir toplamıdır. Oranlar, geçiş süreleriyle ters orantılı olduğundan, geçiş sürelerinin karşılıkları toplanmalıdır (Saleh ve Teich, 2019).



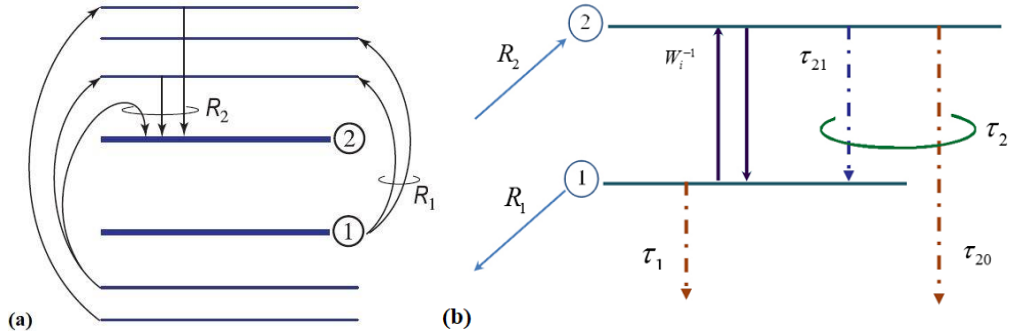
Şekil 2.7. Enerji seviyeleri ve geçiş süreleri (Saleh ve Teich, 2019'dan değiştirilerek alınmıştır)

Birden çok mod, genel kullanım ömrünü kısaltarak geçişleri daha hızlı hale getirir. τ_{21} 'deki ışınımsal kendiliğinden emisyon bileşeni t_{sp} 'nin yanı sıra, ışınımsal olmayan bir katkı τ_{nr} de mevcut olabilir.

$$\tau_2^{-1} = \tau_{21}^{-1} + \tau_{20}^{-1} \quad (2.6)$$

$$\tau_{21}^{-1} = \tau_{sp}^{-1} + \tau_{nr}^{-1} \quad (2.7)$$

Şekil 2.7'de gösterilen gibi pompalanmamış bir sistemin kararlı duruma ulaşmasına izin verilirse, N_1 ve N_2 popülasyon yoğunlukları, sonuçta daha düşük enerji seviyelerine geçiş yapan tüm elektronlar nedeniyle ortadan kalkacaktır. Seviye 1 ve 2'nin sabit durum popülasyonları, ancak, ikinci seviyenin üzerindeki enerji seviyeleri pompalama ile sürekli olarak uyarılırsa ve Şekil 2.8(a)'da daha gerçekçi enerji seviyesi diyagramında gösterildiği gibi nihayetinde seviye 2'yi doldurursa korunabilir. Pompalama, Şekil 2.8(b)'de basitleştirilmiş biçimde gösterildiği gibi, atomları sırasıyla R_1 ve R_2 (birim zaman başına birim hacim başına) oranlarında 1. seviyeden 2. seviyeye getirmeye hizmet eder. Bu şekilde seviye 1 ve 2, sıfır olmayan sabit durum popülasyonlarına ulaşabilir (Saleh ve Teich, 2019).



Şekil 2.8. a) Pompalamanın mevcudiyetinde, çevredeki daha yüksek ve daha düşük enerji seviyeleri ile enerji seviyeleri 1 ve 2. **b)** Enerji seviyeleri 1 ve 2 ve bunların geçiş süreleri (Saleh ve Teich, 2019'dan değiştirilerek alınmıştır)

Pompalama, Şekil 2.8(b)'de basitleştirilmiş biçimde gösterildiği gibi, atomları sırasıyla R_1 ve R_2 oranlarında 1. seviyeden 2. seviyeye getirmeye hizmet eder. Bu şekilde seviye 1 ve 2, sıfır olmayan sabit durum popülasyonlarına ulaşabilir. Ek olarak, rezonans frekansının yakınında radyasyonun varlığı, absorpsiyonun yanı sıra uyarılmış emisyon aracılığıyla ikinci ve birinci seviyeler arasında geçiş fırsatı sağlar. Bu süreçler olasılık yoğunluğu $W_i = \phi\sigma(\nu)$, ile karakterize edilebilir. Uyarılmış emisyon için olasılık yoğunluğu, absorpsiyon için olasılık yoğunluğu ile aynıdır. $\sigma(\nu)$, ν frekansındaki geçiş

kesitidir; burada t_{sp} , öz yaşam süresidir ve $g(\nu)$, 2.8’de hesaplanan normalize edilmiş çizgi şekli fonksiyonudur.

$$\sigma(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi t_{sp}} g(\nu) \quad (2.8)$$

Bu bilgilere dayanarak oran denklemleri şu şekilde formüle edilebilir;

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 - \frac{N_2}{\tau_2} - N_2 W_i + N_1 W_i \quad (2.9)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_1 - \frac{N_1}{\tau_1} + N_2 W_i - N_1 W_i + \frac{N_2}{\tau_{21}} \quad (2.10)$$

İkinci seviyenin nüfus yoğunluğu seviyeler arası uyarılmış emisyon ile azaltılır iken absorpsiyon ile artırılır. Nüfus yoğunlukları genellikle $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ biriminde belirtilir. Kararlı durum koşullarında ($dN_1/dt = dN_2/dt = 0$) denklem 2.9 ve 2.10, N_1 ve N_2 için kolaylıkla çözülür, böylece nüfus farkı 2.11’deki gibi olmaktadır.

$$N = N_2 - N_1 = \frac{N_0}{1 + \tau_s W_i} \quad (2.11)$$

N_0 amplifikatör ışınımın yokluğundaki kararlı durum popülasyon farkıdır. Doyma zaman sabiti olarak adlandırılacak karakteristik zaman τ_s , $\tau_{21} \geq \tau_2$ olduğu için 2.12’deki denkleme göre sürekli pozitiftir.

$$\tau_s = \tau_2 + \tau_1 \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_{21}}\right) \quad (2.12)$$

Bir lazer ortamının $\gamma(\nu)$ kazanç katsayısı, popülasyon farkına (N) ve foton-akısı yoğunluğuna (ϕ) bağlıdır. Bu durum kazanç doygunluğunun temelini oluşturur ve kazanç katsayısı, ortamın birim uzunluğu başına foton akışı yoğunluğundaki net kazancı temsil eder. Aşağıdaki denkleme z yönünde birim hacim başına optik yoğunluğun artışı gösterilmiştir.

$$I(z) = I(0)e^{\gamma(\nu)z} \quad (2.13)$$

Nüfus farkı 2.14'te gösterildiği gibi *foton-akı yoğunluğunun* ($\phi_s(\nu)$) doyması ile oluşur.

$$N = \frac{N_0}{1 + \phi / \phi_s(\nu)} \quad (2.14)$$

Burada $\phi_s = \tau_s \sigma(\nu)$ ve $\gamma(\nu) = N \sigma(\nu)$ dönüşümleri ile kazanç katsayısı doymuş kazanç katsayısı olur.

$$\gamma(\nu) = \frac{\gamma_0(\nu)}{1 + \phi / \phi_s(\nu)} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15'te görülebileceği üzere, amplifikatör sistemlerinde giriş foton-akısı yoğunluğu arttığında kazanç katsayısının azaldığı anlaşılmaktadır.

Nadir toprak katkılı fiber amplifikatörler birçok bağlamda uygulama bulsa da en önemli kullanımları fiber optik iletişim sistemlerindedir. Erbiyum iyonu, silika optik fiberler için minimum kayıp dalga boyu bölgesine tesadüfen düşen 1550 nm'ye yakın geniş bir lazer geçişi sergiler. Yüksek güçlü uygulamalar için kazanç ortamı olarak iterbiyum iyonları tercih edilmektedir. Geniş kazanç bant genişliği, yüksek güç dönüştürme verimlilikleri ve 1060 nm'deki operasyonel dalga boyları önemli avantajları arasında yer almaktadır.

İterbiyum katkılı kazanç ortamı, yarı (Quasi) üç seviyeli sistemler gibi davranır. Yarı üç seviyeli sistemler, üç ve dördüncü seviyeler arasındaki ara duruma benzemektedir. Üç seviyeli sistemlerde, alt lazer seviyesi taban durumuna o kadar yakındır ki, termal dengede bu seviyede kayda değer bir nüfus oluşur. Yarı üç seviyeli sistemler için kazancın spektral şekli uyarım seviyesine bağlıdır. Elde edilen lazer dalga boyu, yüksek kayıpların daha yüksek kazanç gerektirdiği rezonatör kayıplarına bağlı olabilir. Lazer dalga boyunun artmasıyla üç seviyeli ve dört seviyeli özellikler arasında bir geçiş vardır. İterbiyum, 1040 nm dalga boyunun altında üç seviyeli bir davranış gösterir ve 1030 nm civarında güçlü üç seviyeli bir davranış gösterir. Küçük kuantum kusuru nedeniyle üç seviyeli davranış kaçınılmazdır çünkü bu durum alt lazer seviyesi ile temel durum arasında küçük bir enerji boşluğu yaratır ve alt lazer seviyesinin termal nüfusu önemli hale gelir (Sinem, 2013).

İterbiyum katkılı amplifikatörlerin küçük kuantum kusuru, çok yüksek güç verimlerine izin verir ve ayrıca küçük bir kuantum kusuru nedeniyle, yüksek güç uygulamaları için termal etkiler azalır. Ancak iterbiyum katkılı amplifikatörlerin yarı üç seviyeli davranışı, küçük çalışma dalga boyları için bazı komplikasyonlar oluşturabilir (Özgören ve diğerleri, 2011).

2.4 Yüksek Güçlü Fiber Lazerler

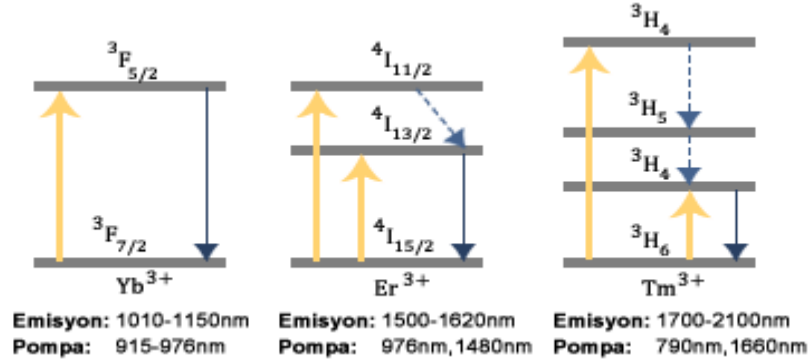
Aktif çekirdeğe çok yakın bulunan nispeten geniş bir yüzey üzerinde ısının dağıtılmasına izin veren benzersiz geometrileri sayesinde, ortalama güçleri kilovatların ötesine çıkması nedeniyle son 15 yılda fiber lazerlere olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. Katı hal muadillerinin aksine, ısı yükü, kazanç ve doğrusal olmamanın daha fazla kontrolüne izin vermek için fiber uzunluğu bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Son on yılda tam entegre monolitik yüksek güçlü fiber lazerlerin geliştirilmesi, ticari başarılarının temelini oluşturmuştur. Bu tür sistemler, zorlu üretim ortamlarında çalışması için gereken maliyeti ve beceriyi önemli ölçüde düşürmektedir. Lazer çıkışında sağlam bir tek uzamsal mod sağlamak için bir lazer boşluğunda nadir toprak katkılı tek modlu optik fiber kullanmanın yararı, ilk olarak 1961'de Snitzer, ardından America Optical Company'de gerçekleştirilmiştir (Dong ve Samson, 2017).

Fiber lazerler sistemlerindeki katkı iyonları neodimyum, iterbiyum, erbiyum sırasıyla 1060, 1070, 1550 ve 2000 nm civarında, yakın kızılötesi dalga boylarında faydalı lazer geçişleri sunmaktadır. Özellikle ${}^2F_{5/2} - {}^2F_{7/2}$ geçişi üzerinde yarı üç seviyeli sistemler olarak çalışan, InGaAs diyotlar ile 940 nm'de pompalanan iterbiyum katkılı silika fiber lazerler 1020-1200 nm dalga boyu aralığında ışık üreterek yüksek bir optik güç sağlamaktadır. Ayrıca bu sistemler sıcaklık değişimlerine ve titreşimlere karşı kararlı, kompakt, sağlam ve düşük kazanç geçişlerinde çalışabilme özelliklerine sahiptir.

Silika cam fiberleri, diğer cam elyafların çoğundan daha üstün optik ve mekanik özelliklere sahip oldukları için genellikle konakçı olarak tercih edilir. Konfigürasyon bakımından çift kaplamalı fiber konfigürasyonu, çok modlu pompa ışığı iç kaplama/dış çekirdekte dolaşırken lazer modunun iç çekirdekte yayılmasını sağlar. İlgili konfigürasyon, küçük iç çekirdekte yoğunlaşan yüksek güçlü bir pompadan doğabilecek

zararlı doğrusal olmayan etkilerden kaçınmak için yaygın olarak kullanılır. Fiber lazer işlemi birçok konfigürasyonda elde edilmiştir ve çeşitli uçtan pompalama ve yandan pompalama biçimlerinden yararlanır. Şerit fiber lazerler, dikdörtgen bir kesite sahiptir ve geleneksel fiberlerin sunduğundan daha fazla çıktı gücü sağlayabilir. Fotonik bant aralıklı fiber lazerler, ışığın aksenal olarak değil, fiberin tüm çevresel yüzeyinden radyal olarak çıkacağı şekilde yapılandırılabilir (Saleh ve Teich, 2019).

Güç ölçeklendirme için önemli bir kısıtlama, yüksek güçlü pompa diyotlarının varlığıdır. Genellikle Yb^{3+} ve Er^{3+} sistemlerini pompalamak için en uygun olan diyotlar (~ 976 nm, ~ 915 nm ve ~ 800 nm) Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Fiber lazerlerde yaygın olarak kullanılan Yb^{3+} , Er^{3+} ve Tm^{3+} ile ilgili enerji seviyelerinin gösterimi (Dong ve Samson, 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Sürekli dalga lazerleri endüstriyel uygulamaların çoğuna hakimdir ve çıkış güçleri günden güne artış göstermektedir. Genellikle sürekli dalga fiber lazer sistemlerinde fiberler kazanç ortamında ve pompalama işlemi için kullanılırken, fibere pompa ışığını göndermek için bulk optikler kullanılır. Sürekli lazerler dışında darbeli fiber lazerler de sürekli dalga lazerlerine oranla daha düşük çıkış gücü ile kullanılmaktadır. Nanosaniye mertebesindeki darbeli lazerler, sürekli dalga lazerleri gibi malzeme işleme proseslerinde tercih edilebilmektedir. İlgili işlem için her iki fiber lazer sistemi de malzeme üzerinde aynı etkilere sahiptir. Ultra kısa darbelerle sahip yüksek güçlü lazerler ise yüksek hassasiyette malzeme işleme sağlar, son yıllarda pikosaniye ve femtosaniye darbeleri üreten ultra kısa lazerlerin kullanımına ilgi çok fazladır (Sinem, 2013).

2.5 Fiber Lazerlerin Güç Ölçeklendirmesi

Yüksek güçlü lazer sistemlerinin birçok avantajı olmasına rağmen, fiber tasarım için istenilen güç seviyelerine ulaşmak için bazı sınırlamalar vardır. Tasarımlarda lazer sisteminin yüksek güçlü parçaları için özel bileşenlere ihtiyaç duyulmakta ve pompanın sinyal ışığına dönüşmesi nedeniyle termal problemlerle karşılaşmaktadır. Fiberlerde ortam kırılma indisinin yoğunluk bağımlılığı ya da esnek olmayan saçılma fenomeninden dolayı doğrusal olmayan etkiler meydana gelir. Kırılma indisinin güce bağımlılığı nedeniyle Kerr etkisi oluşur. Bu etki kendini faz modülasyonu (SPM), çapraz faz modülasyonu (XPM) ve dört dalga karışımı (FWM) gibi giriş sinyaline bağlı olarak üç farklı etkide gösterir. Lazer sistemlerinde daha yüksek yoğunluk seviyelerinde, bu sefer uyarılmış Brillouin saçılması (SBS) ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) gibi esnek olmayan saçılma fenomeni gözlemlenmeye başlar. Elastik olmayan saçılma fenomeni için, eğer gelen ışığın yoğunluğu bir eşiği aşarsa, saçılan ışığın yoğunluğu katlanarak büyümeye başlar.

Fiber lazerleri diyot pompalı katı hal (DPSS) lazerler ile karşılaştırdığımızda fiber lazerin tüm avantajlarına rağmen DPSS'nin fiber lazere göre aşağıda belirtilen özellikleri ön plana çıkmaktadır;

- Azaltılmış sapmalar (Nonlinearities)
- Azaltılmış uyarılmış Raman ve Brillouin saçılması
- Kötü ışın kalitesine sahip pompa kaynakları kullanma imkânı
- Vibronik lazer ile ilişkili geniş dalga boyu ayarlama imkânı

Fiber lazer sistemleri, özel geometrileri sayesinde ısı oluşumunun etkisine karşı dirençlidir. Ancak son yıllarda birim uzunluk başına ısı yayılımının 100 W/m mertebesinde değerlere ulaşması (Limpert ve diğerleri, 2006) hava soğutmalı sistemlerde önemli ölçüde ısınmaya sebebiyet vererek termal ışın bozulmalarına ve fiber lazer sisteminde ciddi hasarlara neden olmaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan etkiler, özellikle darbeli işlemlerde yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde, doğrusal olmayan ortamda küçük mod boyutundan ve büyük yayılma uzunluğundan kaynaklanan termal sorunlardan önce gelen ana endişelerdir (Sinem, 2013). İlgili bölümde fiber lazerler için güç ölçeklendirme kısıtlarına dair detaylar verilecektir.

2.5.1 Optik fiberde lineer olmayan etkiler

Geleneksel optikte, odaklanmış yoğun ışık, yalnızca odaklanmış ışının ışın belinin boyutuyla sınırlı ve en fazla santimetre uzunluk ölçeklerinde katı ortamlarla etkileşime girer. Bir optik fiber lazerin küçük çekirdeğindeki yüksek yoğunluklu ışık, camla 3-6 büyüklük mertebesi daha uzun ölçeklerde etkileşebilir. Ortaya çıkan lineer olmayan etkiler, fiber lazerlerin güç ölçeklemesi için sınırlamalar belirler. Yüksek optik yoğunlukta, dielektrik ortamın tepkisi, güçlü elektromanyetik alanlar altında artık doğrusal değildir. Temel olarak, doğrusal olmayan tepki, ortamdaki bağlı elektronların harmonik hareketinden kaynaklanır. (Dong ve Samson, 2017) *Toplam polarizasyon P* şu şekilde yazılabilir;

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} \cdot \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} \cdot \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots) \quad (2.16)$$

Burada ε_0 vakum geçirgenliği ve $\chi(j)$ j dereceden duyarlılıktır. Birinci dereceden duyarlılık $\chi(1)$, bir ortamın kırılma indisi n_0 'da yer alan baskın lineer terimi temsil eder. İkinci dereceden duyarlılık $\chi(2)$, ikinci harmonik oluşumundan ve toplam frekans oluşumundan sorumludur ve silika gibi bir merkez-simetrik ortam için ortadan kalkar. Optik fiberlerdeki en düşük derecedeki lineer olmayan etki üçüncü harmonik, dört dalga karıştırıcı ve lineer olmayan kırılmadan sorumlu olan üçüncü dereceden duyarlılık $\chi(3)$ 'ten gelir. Üçüncü dereceden duyarlılık, Kerr doğrusalsızlığı olarak adlandırılan kırılma indisinin yoğunluk bağımlılığından da sorumludur.

Kırılma indisinin yoğunluk bağımlılığından kaynaklanan iki belirgin etkisi bulunmaktadır. Bunlar kendi kendine faz modülasyonu (SPM) ve çapraz faz modülasyonudur (XPM). SPM, kendi kendine indüklenen doğrusal olmayan faz değişimini ve XPM, optik fiberde farklı bir frekansta başka bir optik alan tarafından indüklenen doğrusal olmayan faz değişimini tanımlar.

Fiberlerde doğrusal olmama durumlarının çoğu $\chi(3)$ tabanlıdır, yoğunluk ve fiber uzunluğuna bağlıdır. Bu nedenle darbeli, yüksek tepe gücü ve sürekli dalgada kW düzeyinde çalışmada daha şiddetli hale gelirler. Silikadaki çok küçük doğrusal olmayan katsayıya ($n_2 = 3,2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$) rağmen, içerdiği yüksek yoğunluklar ve uzunluklar

nedeniyle, doğrusal olmama iyileştirme faktörü (NEF) oldukça büyük değerler alabilir. Doğrusal olmayan etkiler, fiber lazerlerde gücün artırılmasında en sınırlayıcı faktörlerden biridir. Genel olarak, istenmeyen spektral bölgelere enerji aktarılır ve lazer çalışmasını potansiyel olarak istikrarsız duruma getirebilirler. Özel fiber tasarımları veya uygun spektral filtreleme ile bu etkiler önemli ölçüde azaltılabilirler (Zervas ve Codemard, 2014).

2.5.2 Uyarılmış Brillouin Saçılması

Uyarılmış Brillouin saçılmasında (SBS), bir Stokes fotonu ve bir akustik fonon üretmek için bir pompa fotonu yok edilir. Bu süreç, fiberde üretilen Stokes fotonlarının ve akustik fononların mevcudiyeti ile daha da uyarılır. Bir optik fiberde momentum korunumu, saçılan Stokes fotonlarının yalnızca pompa fotonlarının tersi yönde yayılabilmesini gerektirir. Enerji korunumu ve momentum korunumu 2.17'yi gerektirir (Hagop ve Gregory, 2011).

$$v_a = v_p - v_s, \quad k_a = k_p - k_s \quad (2.17)$$

Burada v_p , v_s ve v_a sırasıyla pompa, Stokes ve akustik dalgalar için frekansları ifade ederken k_p , k_s ve k_a sırasıyla pompa, Stokes ve akustik dalgalar için dalga vektörleridir.

2.5.3 Uyarılmış Raman Saçılması

Uyarılmış Raman saçılmasında (SRS), bir pompa fotonu yok edilir ve bir Stokes fotonu ve bir optik fonon üretilir. Bu etki, 1928 yılında lazerlerin ortaya çıkmasından çok önce odaklanmış güneş ışığı ve ileri yönde havada saçılan ışığı ölçmek için optik bir ızgara kullanılarak keşfedildi. Uyarılmış Raman saçılmasında SBS'de olduğu gibi enerji korunursa da momentum korunmaz. Raman saçılması, fotonlar ve ortam arasındaki doğrudan etkileşim ile optik fononların uyarılmasını içeren esnek olmayan bir ışık saçılması işlemidir. Işık elastik olarak da dağılabilir ve bu fenomen Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. Esnek olmayan Raman saçılması, elastik Rayleigh saçılmasının aksine saçılan ışıkta bir frekans kaymasına neden olur. Saçılan ışık, ortamdaki optik fononların popülasyonlarına bağlı olarak daha düşük frekanslı Stokes veya daha yüksek frekanslı

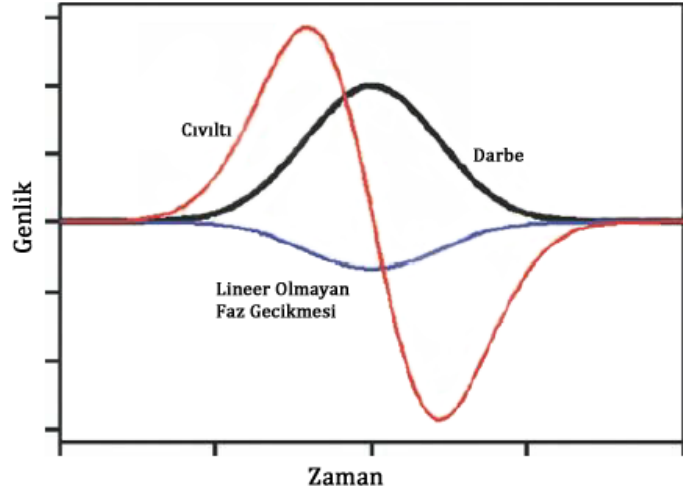
anti-Stokes dalgasına sahip olabilir. Saçılan Stokes dalgası, SBS'nin aksine hem ileri hem de geri yönde olabilir ve optik fononlar, SBS işleminde yer alan akustik fononlardan çok daha yüksek bir frekansa sahiptir. Raman kazancı büyük ölçüde pompanın polarizasyonuna ve Stokes ışığına bağlıdır. (Dong ve Samson, 2017).

SRS genel olarak yıkıcı olmayan bir etkidir ve yalnızca daha uzun dalga boylarına güç aktarımıyla sonuçlanır. Bu tür spektral genişleme, odaklama optiğinin tasarımını karmaşıklaştırabilir ve işleme yeteneklerini tehlikeye atabilecek etkili odak kaymaları ile sonuçlanabilir (Zervas ve Codemard, 2014). Bazı durumlarda, güçlü ileri ve geri SRS'nin varlığı, fiber lazer boşluklarını dengesizleştirebilir. Kontrollü koşullar ve özel fiber tasarımları altında, SBS ve SRS etkisi en aza indirilebilir veya mevcut fiber lazer çıkış spektrumunun dalga boyu kapsamını geliştirmek için etkin bir şekilde kullanılabilir. Yüksek tepe güçlü darbeleri lazerlerde, kısa fosfosilikat fiber uzunlukları kullanılarak SRS en aza indirilebilir (Morasse ve diğerleri, 2013).

2.5.4 Öz Faz Modülasyonu

Doğrusal olmayan optik ortamlarda kırılma indisinin yoğunluk bağımlılığının ilginç bir dışavurumu optik darbelerin spektral genişlemesine yol açan bir fenomen olan öz-faz modülasyonu (SPM) yoluyla gerçekleşir. SPM, doğrusal olmayan bir ortamda $n_2 > 0$ olan CW ışınlarının spot boyutunun daralması olarak ortaya çıkan kendi kendine odaklanmanın zamansal analogudur (Agrawal, 2007).

Kerr etkisinin doğrudan bir sonucu, SPM ve eşdeğer frekans kaymaları ile sonuçlanan doğrusal olmayan darbe içi faz kaymasıdır. SPM kaynaklı spektral genişleme, darbe şekline bağlıdır ve dik ön ve arka kenarları olan darbeler için daha belirgindir. SPM, faz kilitleme veya çoklu lazerlerin uyumlu kombinasyonu kullanılırken kısa darbeleri enerji ölçeklendirmesinde sınırlayıcı bir faktördür (Zervas ve Codemard, 2014).



Şekil 2.10. Optik bir darbe tarafından üretilen SPM ve ilgili cıvıltı (Hagop ve Gregory, 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Zamana bağlı faz değişimi, optik darbenin ön ve arka kenarında yeni spektral bileşenlerin üretilmesine yol açar. Kırmızıya kaydırılan bileşenlerin sürekli üretimi, bir darbenin ön kenarında ve maviye kaydırılan bileşenler bir darbenin arka kenarında meydana gelir ve pozitif bir cıvıltı ile sonuçlanır (Şekil 2.10).

2.5.5 Dört Dalga Karışımı

Dört dalga karışımı (FWM), eşit ve dar kanal aralıklarına sahip WDM tabanlı uzun mesafeli iletişim sistemlerinde karışmaya neden olan ana doğrusal olmayan faktörlerden biridir (Hiçdurmaz ve diğerleri, 2012). Temelde ise FWM, enerji tasarrufu ilkesi tarafından tanımlanan frekanslarla bir Stokes ve bir anti-Stokes fotonu oluşturmak için yok olan iki pompa fotonunu içeren elastik $\chi(3)$ doğrusal olmayan bir süreçtir. Verimliliği kritik olarak ilgili dalgalar arasındaki tam faz eşleşmesine bağlıdır. Yüksek güçlü fiber lazerlerde ve amplifikatörlerde, sinyal ışını FWM pompası görevi görür ve uzunluk boyunca katlanarak artar. Bu, faz uyumsuzluğuna rağmen önemli miktarda FWM üretimi ile sonuçlanır (Feve ve diğerleri, 2007).

2.6 Lazer Kesim Proses İzleme ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Lazer ve optik teknolojileri uygulama açısından kayda değer büyüme potansiyeli mevcuttur. Küresel lazer marketinin çıktı değeri, yirmi birinci yüzyılın başlarında sürekli bir büyüme yaşamaktadır. 2015 yılından bu yana pazarın bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) %20,3 gibi yüksek bir değere ulaşmış; 2006'dan 2016'ya kadar CAGR de %9,6 seviyesine ulaşmıştır (Laser Focus World, 2020).

Teknik olarak düşünüldüğünde lazer ve optik teknolojileri uzun bir gelişim geçmişine sahiptir, kilit rol oynayan bileşenler nispeten gelişmiş teknoloji kategorisine aittir. Ancak ana lazer ve optik ekipmanlar birim fiyatı yüksek ürünlerdir. Bunlar genel sarf malzeme değildir ve optik ekipman değiştirilmesi kolay bir proses değildir. Bu sebeple lazer ve optik teknolojileri uygulama pazarı muazzam bir gelişim gösterse de lazer ve optik ekipman pazarının hacmi beklenen kadar büyük değildir. (Chang, 2021)

Yüksek hassasiyetli lazer kesim, birçok üretim alanına hizmet edebilmesi nedeniyle önem arz eden bir teknolojidir. Genel olarak lazer kesim prosesi birkaç aşamada gerçekleşir. İşlemenin ilk adımı olarak, lazer ışını iş parçasına küçük bir delik açmak için kullanılır. Erimiş ve buharlaşmış malzemeyi delikten üfleyen yardımcı gaz destekli bir yapı, odağı ve yüksekliği değişebilen kesim kafasıyla malzeme kalınlığına göre bir veya birkaç adımda delme işlemini gerçekleştirir. İş parçası tamamen delindikten sonra nozul iş parçasının tanımlanmış yüzeyleri boyunca kesim işlemini yapar (Mesko, 2018).

Literatürde kesme işlemi dinamiklerinin anlaşılması ve kesim kalitesinin değerlendirilmesi uzun yıllardır çalışılan zorlu bir konu olmuştur (Courtier ve diğerleri, 2021). Özellikle 2021 yılıyla birlikte enerji sorunu akut hale geldi, bu nedenle lazer kesimde yer alan yüksek enerji tüketimlerinin optimizasyonunu içeren yeni bir araştırma yönü şekillendi. Bu araştırmaların amacı, erime verimliliğini tahmin etmek için hesaplamalı ve deneysel bir model geliştirmektir (Girdu ve Gheorghe, 2022).

Konu ile ilgili olarak Arai, 2014 yılında termal modeller kullanarak lazerle kesme kusurlarının kökenlerini karakterize eden bir çalışma gerçekleştirdi. Miraoui ve diğerleri, 2014 senesinde çeliğin lazer kesimini karakterize etmek için ısıdan etkilenen bölgelerin

analitik modellerini kullanmışlardır. Bocksrocker ve diğerleri, 2017 yılında lazer parametreleri ile lazer erime yönü arasındaki ilişkiyi inceledi. Poprawe ve König, konu ile ilgili 2001 yılında yaptıkları çalışmalarında lazer kesme prosesi ile ilgili ana fiziksel fenomeni ve izleme temelini tanımladılar. Bison ve diğerleri, 2019 senesinde lazerle kesim sürecini izlemek için IR kamera kullanarak faz değişimini, dönüşüm enerjisini ve iletim ve radyasyonla ısı transferini dikkate alan analitik bir model önerdiler.

Adelmann ve diğerleri, (2016) InGaAs fotodiyotları ile optik sensör sistemi ve penetrasyon kayıplarını göstermişlerdir. Schleier ve diğerleri, (2017) fotodiyotlar ile kesme kusurlarının görünümünü tespit etme yeteneği üzerine çalışmışlardır. Garmendia ve diğerleri, (2017) lazer kesim prosesini gözlemek ve kalitesini değerlendirmek için Si fotodiyotlar ile çalışma gerçekleştirmişlerdir. Her durumda, bu sensörler yüksek bir algılama oranı ve minimum hata sağladığı yayınlanan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Bahsedilen referans ve bilgiler ışığında, fotodiyotlar gerçek endüstriyel uygulamalarda kesim kalitesinin göstergesi olarak kullanılabilir. (Garcia ve diğerleri, 2020).

Sürekli dalga (CW) lazerleri ile yapılan kesme işlemi sonucunda, iş parçasının kenar yüzeyinde oluşan çizgiler ve şeritler kesim kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir (Arai, 2014). Bunların fiziksel kökenleri iyi anlaşılmamıştır, ancak yapılan çalışmalar lazerle kesme işleminin kararsız yapısını, gaz basıncındaki değişiklikleri, lazer gücü dalgalanmalarını ve ayrıca erimiş malzeme içinde neden olunan olası etkileri içerir (Shepeleva ve diğerleri, 2000). Genna ve diğerleri, 2020 yılında lazer kesme işlemi sırasında oluşan kerf ile ilgili çalışma yapmış ve işlem parametrelerinin birleşik etkisini incelemek için bir varyans analizi kullanmışlardır. Russo, 2017 senesinde aynı prosedürü sıcak damgalanmış borlu çelik boşlukların lazer kesimi için kullandı.

Pocorni ve diğerleri, 2017 yılında kesim bölgesinde oluşan fenomenleri görselleştirmek için yüksek hızlı görüntüleme teknikleri kullandı ve geliştirilen akış koşullarını karşılık kullanılan proses parametreleri ve işlem sonundaki kalite ile ilişkilendirdi. Schleier ve diğerleri, 2022 yılında yüksek hızlı bir kameradan alınan görüntülerin değerlendirilmesine dayanan uzaktan fiber lazer kesim için yerinde bir süreç izleme yaklaşımı sundu. Görüntü işleme algoritması, yüksek hızlı kameranın yakalanan

görüntülerinden eriyik havuzunun spektral ve geometrik bilgilerini analiz ederek tam ve eksik kesimler arasındaki ayrımı sağlamaya çalıştılar.

Kesme işlemini izleme metoduyla, proses anında anlık olarak kaliteye ilişkin ilgili bilgileri çıkarmak mümkündür. İlgili konuda literatürde farklı alternatifler önerilmiştir. Ö Jorgensen ve Olsen, 1991 yılında ilgili konuda ilk çalışmaları yapan kişiler arasındadır. Yaptıkları çalışmada lazer ışını ile aksenal olarak kerften yayılan ışığa bağlı olarak kesim kalitesini analiz ettiler. Sforza ve Santacesaria, 1994 senesinde işlem alanından yayılan kızılötesi radyasyona bağlı olarak benzer bir araştırma gerçekleştirdi. İlerleyen yıllarda Yılbas, 2004 senesinde kesim kalitesini değerlendirmek için testler gerçekleştirdi, proses anında oluşan kerfi inceleyerek lazer kesim ile alakalı olarak birinci ve ikinci kanun verimliliklerini öne sürdü. Chen ve diğerleri, 2016 yılında optik stereoskopik mikroskop kullanarak lazer işleme prosesinde iş parçasının yüzeyinde oluşan şerit oluşumlarını analiz etti ve kabul edilebilir bir seviyede kalite sağlayabilen uygun bir lazer enerji aralığı olduğunu ortaya koydu.

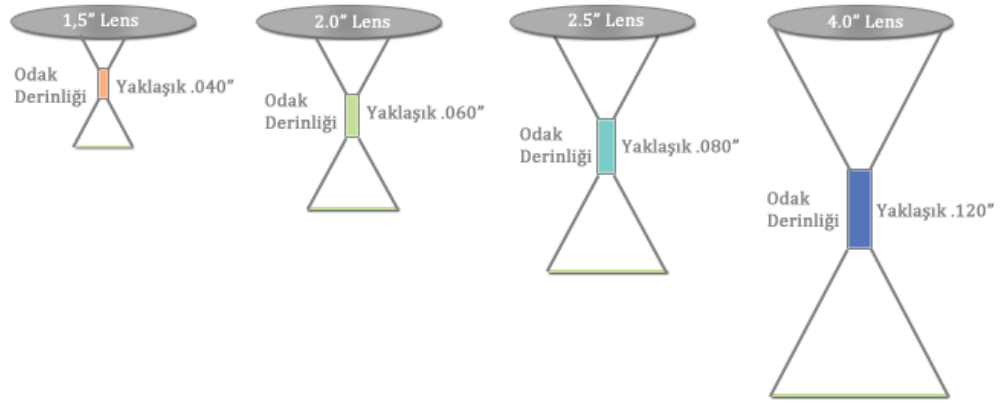
Yukarıda bahsedilen ölçüm ve analiz metotlarının dışında lazer kesim izleme için akustik sinyaller de araştırmalarda tercih edilen yöntemler arasındadır. De Keuster ve diğerleri, 2007 yılında lazer ışınının malzeme yüzeyine nüfuz etmesini sağlayabilmek için akustik ve optik sinyallerden yararlandı. Kek ve Grum, 2009 senesinde proste kullanılan yardımcı gaz akışının olumsuz etkisini önlemek için uygun filtreleme ile lazer kesimi izlemek için akustik sinyallerden yararlandılar.

2.7 Lazer Kesim Prosesine Etki Eden Parametreler

Lazer kesim işleminde iş parçasının kalınlığının veya malzeme tipinin değiştirilmesi birçok optik parametrenin değişmesine neden olmaktadır. Malzemenin termal ve fiziksel özellikleri, kullanılan lazer gücü, dalga boyu, kesme hızı, nozul çapı ve mesafesi, yardımcı gazın türü ve basınç ve odak mesafesi gibi parametreler iş parçasının yüzey kalitesini belirler. Ayrıca lazer işleminin ürün kalitesi çentik özellikleri ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ile de tanımlanmaktadır.

İnce metalik sacları kesmede en önemli kerf özelliklerinden biri kerfin genişliğidir (Kusuma ve Huang, 2022). Lazer kesiminin kalitesi, malzemeye nüfuz eden lazer enerjisinin miktarına bağlıdır. Bu nedenle malzemenin termal özellikleri lazer kesim yeteneğinde ve kesim işleminin kalitesinde büyük rol oynamaktadır. Optimum kesim kalitesini sağlamak için odak konumu ayarlanmalıdır. Farklı malzeme türleri ve kalınlıkları, odak varyasyonunda ve lazer ışını yoğunluğunda değişikliklere neden olur (Ürgüplü ve Köksal, 2015).

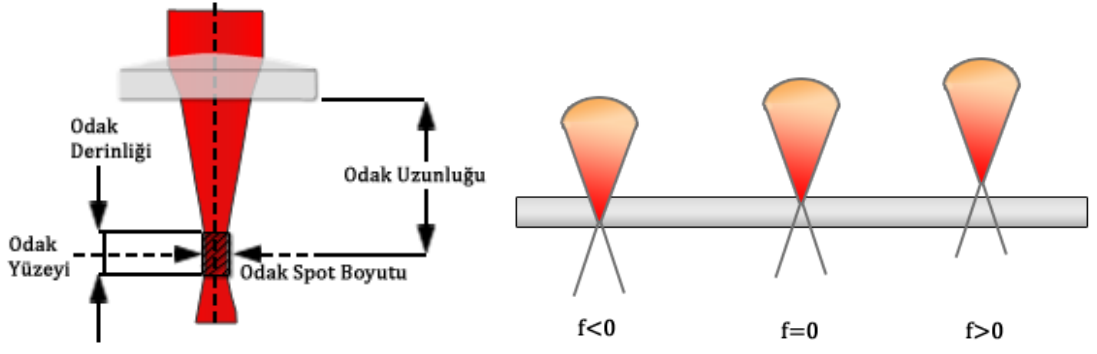
Odak konumu, odak ile kesilecek materyalin üst yüzeyi arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Genellikle, malzeme yüzeyindeki odak sıfır, üstündeki odak pozitif ve altındaki odak negatif odak olarak adlandırılır. Odak plaka yüzeyinde olduğunda, yarı genişliği en küçük seviyededir. Odak konumunun değiştirilmesi hem pozitif hem de negatif yönde yarı genişliğini artırmaktadır. Şekil 2.11'de gösterildiği üzere kullanılan kesme kafalarının farklı odak uzunlukları olmasıyla yarığın genişleme derecesi de farklılaşmaktadır. Genel olarak, kesen ana merceğin odak uzaklığı ne kadar kısaysa ve odak derinliği ne kadar küçükse, yarığın odak konumu ile değişimi o kadar büyük olmaktadır.



Şekil 2.11 Farklı odak uzunlukları (Laser Focus – Pulse Laser Systems, 2023'ten değiştirilerek alınmıştır)

Pozitif odak ile kesme işlemi uygularken odak malzemenin üzerinde konumlanmaktadır. Işık demeti malzeme yüzeyine ulaştıktan sonra, ışınlama aralığı genişler ve kesme dikişinde yayılır, kesme dikişinin alt kısmını üst kısımdan daha büyük hale getirir. Oksijenin iş parçasının dibine ulaşmasına ve yeterli oksidasyon reaksiyonuna katılmasına yardımcı olan karbon çeliğinin oksijenle kesilmesi gibi oksidatif kesim için oldukça uygundur ve ayrıca alt kısımdaki daha büyük yarık da cürufun çıkarılmasına yardımcı olur. Karbon çeliğinin oksijenle kesilmesi belirli bir aralıkta, pozitif odak ne kadar büyük olursa, malzeme yüzeyindeki nokta boyutu o kadar büyük ve kesme yüzeyi o kadar parlak ve pürüzsüz olur. Fakat belirli bir aralığın ötesinde, alt parçanın enerjisi yeterli olmayabilir, bu da geçirimsiz kesime veya altta asılı halde kalan cürufa neden olur.

Negatif odaklı kesim prosesi sırasında, odak plakanın içindedir (Şekil 2.12) ve lazer yarığın alt kısmının yeterli enerji yoğunluğuna sahip olmasını sağlayan malzemenin içine odaklanır. Yarık üstte geniş ve altta dardır ve üst kısmın kesme genliği büyüktür, bu da eriyiğin akışkanlığını artırır. Fakat alt kısım küçük bir kesme genişliğine sahiptir ve daha fazla hava akışına ihtiyaç duyar. Uygulamalarda çoğunlukla hava veya nitrojen ile kesim yaparken negatif odak kullanılır. Sıfır odaklı kesim sırasında ise malzeme yüzeyinde minimum nokta boyutu elde edilebilir, bu nedenle erime aralığı nispeten dardır ve kesme dikişi nispeten küçüktür. Sıfır odak, ince malzemelerin yüksek hassasiyetli kesimi için uygundur.



Şekil 2.12 Odak yapısı ve malzeme yüzeyindeki konumları (Fiber Laser Machine Terminology, 2021'den değiştirilerek alınmıştır)

Kesme hızı ilgili süreçteki en önemli parametrelerden biridir ve lazer gücüne ve gaz akış hızına bağlı olarak iyi dengelenmelidir (Karanfil ve Yalçın, 2019). Artan kesme hızı ile kesici kenarda oluşan şeritler belirginleşir, kesici kenar altında cüruf birikimi artar ve penetrasyon miktarı azalır. Yumuşak çelik sac kesilirken oksijen kullanıldığında, kesme kenarlarında erime düşük kesme hızlarında meydana gelir. Ortaya çıkan eriyikler, kesici kenarın kalitesini düşürür ve ısıdan etkilenen bölgeyi genişletir. Genel olarak, malzemeler için kesme hızları, malzemenin kalınlığı ile ters orantılıdır. Köşe dönüşlerinde yanıkları önlemek için hızın düşürülmesi gerekir (Ivarson, 1993). Nozul ise kesme gazının lazer ışını ile eş eksenli olarak kesim alanına taşınmasını sağlar ve gaz basıncını ayarlar. Nozul ve özellikle ağırlık tasarımı, kesme gazı jetinin şeklini ve dolayısıyla kesme kalitesini belirler. Nozul çapı 0,8 mm ile 4 mm arasında değişmekte olup, malzeme tipine ve sac kalınlığına göre seçilmektedir (Ürgüplü ve Köksal, 2015). Proses sırasında azot gazı, kesilen malzemeyi yeniden katılaşmadan kesme bölgesinin altından uzaklaştırır ve oksijen malzeme ile ekzotermik bir reaksiyona girer (Sundar ve diğerleri, 2009). Titanyum kesitlerde oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrür oluşumunu engellediği için argon ve helyum kullanılır. Gaz ayrıca, kalın malzemelerin yüksek ışın gücüyle kesilmesinde plazma oluşumunu teşvik etmede rol oynar ve gaz akışı lensi kirden korur. Kesme kenarı, ısıdan etkilenen bölgenin genişlemesi önlenecek şekilde gaz akışı ile soğutulur (Ürgüplü ve Köksal, 2015).

Işın kalitesi, ışın düzlemindeki enerji dağılımını temsil eden bir lazer ışın modu ile karakterize edilir. Lazer kesim prosesi için tekdüze enerji dağılımına sahip iyi bir ışın modu son derece önemlidir. Kesim hassasiyetini ve hızını arttıran yüksek güç yoğunluğu

ancak ışığın küçük bir noktaya odaklanması ile sağlanabilmektedir. Düzensizlik içeren modlar malzemenin kerf dışında ısınmasından dolayı kötü kesme kalitesine neden olmaktadır. Lazer ışın kalite faktörü ışın parametre ürünü (BPP) olarak ifade edilir ve ışının en dar noktadaki yarıçapı ve ışının uzak mesafedeki ayrışma açısının çarpımıyla bulunur. BPP, lazer ışınının ne kadar küçük noktaya odaklanabileceğini belirtir. Işın kalitesi BPP değeri ile ters orantılıdır. Optik olarak tek modlu lazer uygulamalarında, ışın kalite faktörü (M^2) 1 değerine ne kadar yakın ise lazer ışını o oranda kalitelidir. Çok modlu uygulamalarda ışın kalitesi 1 değerinden büyük değerler alır (Süle, 2013). Işın kalite faktörü M^2 , modern lazer araştırmalarında genel ışını değerlendirmek için standart bir parametredir. Yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ISO Standardına (11146) göre, λ/π ile bölünen ışın parametresi çarpımı olarak tanımlanmaktadır. Yarı çaplı ışın sapması 2.18’de gösterilmiştir.

$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (2.18)$$

Işın sapması, ışının bel kısmından uzağa ne kadar hızlı genişlediğinin bir ölçüsüdür. Işın sapmasının düşük olduğu durumlarda ışın kalitesinden ve yayılım kabiliyetinden söz edilebilir. Buradaki amaç düşük sapma değerine sahip ışınları iraksama metodu yardımıyla yüksek uzaklıklara iletebilme esasına dayanmaktadır (Atakan, 2021).

Kırınım sınırlı bir ışının M^2 faktörü 1’dir ve bir *Gauss ışını* ifade eder. M^2 ’nin daha küçük değerleri fiziksel olarak mümkün değildir. Bir TEM_{nm} rezonatör modu ile ilgili bir *Hermite–Gauss ışını*, x yönünde $(2n + 1)$ ve y yönünde $(2m + 1)$ M^2 faktörüne sahiptir. Lazer ışınının M^2 faktörü, odaklama merceğinin nümerik açıklığı ile sınırlanan belirli bir ışın sapma açısında ışının odaklanabilme derecesini sınırlamaktadır. Optik güçle birlikte ışın kalitesi faktörü, bir lazer sisteminde ışınımlığı belirlemektedir (Siegman, 1990). M^2 faktörü, ışın kalitesinin tek bir sayı ile ölçülmesini sağlamanın yanı sıra, *Gauss ışın* analizinin teknik olarak çok basit bir uzantısı ile ışın yarıçapının gelişimini tahmin etmeye de izin verir.

Lazer kesim prosesinde eritme verimliliği, enerji tüketimi ile yakından ilişkilidir. Bu, fiber veya CO₂ lazer kesiminde belirleyici bir rol oynar. Bu kriter ile lazer kesimde lineer enerji ve kesim verimliliği gibi diğer önemli boyutlar belirlenebilir. Literatürde, 1 Joule enerji tüketimi ile eritilen malzemenin hacmi anlamına gelen erime verimliliği adı verilen kavramı önerilmektedir (Girdu ve Gheorghe, 2022). Hesaplama ilişkisi aşağıdaki gibidir:

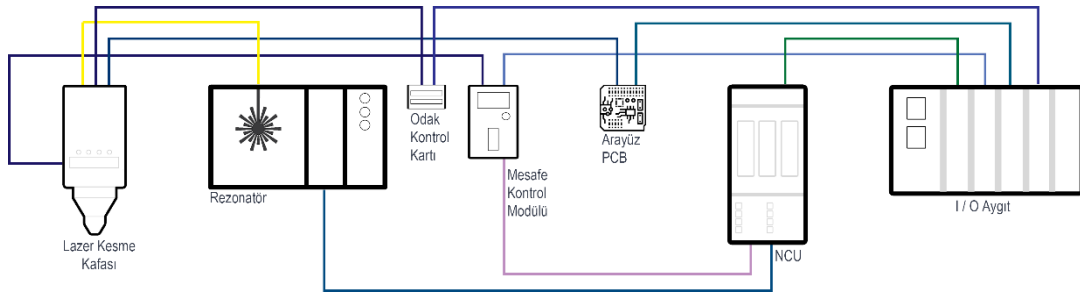
$$E_m = \frac{V}{E} \left[\frac{mm^3}{J} \right] \quad (2.19)$$

Burada V erimiş malzemenin hacmidir (mm³) ve E çeliği eritmek için kullanılan lazer enerjisidir (J). Hız ve sıcaklık, malzeme boyunca eriyiğin davranışını tanımlayan iki önemli fiziksel niceliktir. Birincisi dinamik boyut, ikincisi durum boyutudur. Onların yardımıyla, lazerle eritme ve kesme işlemine katkıda bulunan eriyiğin kinetik ve iç enerjisi hesaplanabilir.

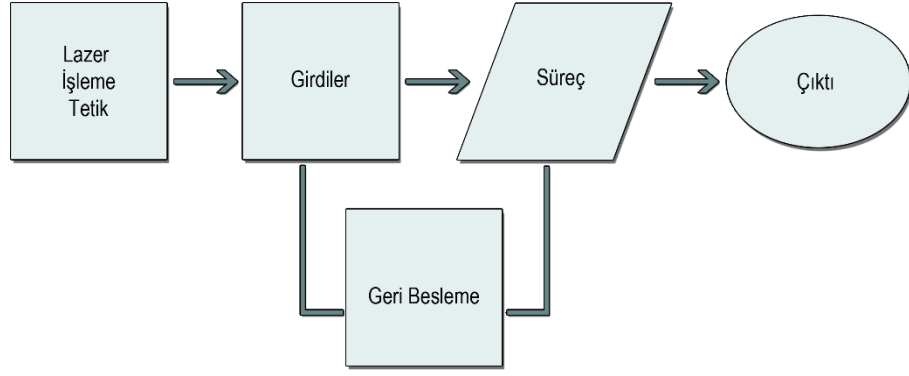
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Lazer kesim işlemi birkaç farklı aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşama olarak her kesimin başlangıç noktası olan delme prosesi malzeme üzerinde dikeye yakın biçimde ön kesimi oluşturur. Materyal tipine, kalınlığına ve kullanılan gaz tipine bağlı olarak kısa delme süreleri elde etmek ve iş parçası yüzeyinde cüruf sıçramalarını azaltmak için karmaşık bir darbe prosesine ve güç rampasına ihtiyaç duyulabilmektedir. Bunun yanı sıra malzemenin yüzey sıcaklığına, pürüzlülüğüne ve malzeme kalitesine göre aynı delme programı için delme süreleri büyük ölçüde değişebilir. Konvansiyonel metotlarda delme prosesi için kullanılan ortalama bekleme süresine işlemin tamamlandığından emin olmak için ilave süreler eklenir (duruma göre standardın 2 katına kadar) aslında bu çoğu delme için gerekli değildir, ancak her delmede istikrarlı bir sonuç elde etmek için kritik bir öneme sahiptir.

Tez çalışmasında yüksek algılama oranı ve minimum hata sağladığı yayınlanan diğer bağımsız çalışmalarla ortaya konulmuş olan kesim kafasındaki fotodiyot tabanlı sensörler ile anlık proses gözlemi yapılmıştır. Testler endüstride en çok kullanılan malzeme tipleriyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1, sarı çizginin fiber kabloyu temsil ettiği çalışmanın şematik diyagramını göstermektedir. Diğer kablolama, dijital ve analog sinyallerden oluşur. Mesafe kontrol modülü, odak kontrol kartı ve PCB Arayüzü, kesme kafasının bileşenleridir. Kesim kafasının modeline ya da farklı markaların kullanımına göre sensör verilerini toplamak ve işlemek için cRIO modülü de kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Testler için kullanılan ekipmanların şematik diyagramı



Şekil 3.2. Lazer kesim sürecinin blok diyagramı

Şekil 3.2’de lazer kesiminin blok diyagramı verilmiştir. Prosesin tetiklenmesinin ardından CNC makinede kesime dair tüm parametre ve değişkenlerin ataması yapılmaktadır. *Girdi* olarak kullanılan bu değişkenler arasında kesim hızı, lazer gücü, yardımcı gaz basıncı ve kesim kafasının odak pozisyonu gibi birçok veri seti (Datalar dördüncü bölümde paylaşılmıştır) bulunmaktadır. İlk lazer ışınının açılmasıyla *Süreç* başlamakta ve makinede delme veya kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Önerilen sistem bu aşamada devreye girmekte ve lazer kesim kafasının içinde yer alan sensörler ile işlem alanı izlenmektedir. Bölüm 3.3’te detaylı bahsedilen algoritmalar lazer ışınlarının geri yansımaları ve buna bağlı olarak fotodiyot tabanlı sensörlerden alınan sinyaller ile çalışmaktadır. *Geri Besleme* anında önceden ilgili malzemenin kaliteli delme ve kesme anında kaydedilen ve referans eşik değerleri olarak kullanılan sensör sinyalleri ile anlık olarak alınan sinyal değerlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu aşamada sistem dijital ve analog beslemelerde bulunarak karar mekanizmalarını (yazılımlarını) çalıştırmaktadır. Sistem değerlendirmelerine göre girdi parametrelerinde değişiklik yapılabilen, sabit bırakılabilmekte veya *Süreç* durdurulabilmektedir. *Çıktı* nihai ürünün kalitesinin görülebileceği geri dönüşü olmayan iş parçasının son halini temsil etmektedir.

Önerilen sistem genel olarak üç ayrı sınıfta değerlendirme yapabilmektedir.

- 1- Delme Bitim Anı: Lazer ışınının malzemenin altına tam olarak geçtiğini ifade eder.
- 2- Kaliteli Kesim: Genel olarak iyi üretim kalitesini belirtir.
- 3- Plazma (Kötü Kesim): Kesimin yapıldığı ancak kalitenin standarttan düşük olduğu bir durum.

Testler sırasında basınç, kesim kafası yüksekliği, odak konumu, duty ve rampa süresi, delme işlemi üzerindeki etkilerini analiz etmek için değiştirilmiştir. Duty, lazer darbesinin açılıp/kapanma yüzdesi ile ilgili olduğundan, enerjiyi azaltmak için kullanılmıştır. Delme işlemi için ideal parametreleri bulduktan sonra, işlevselliğini değerlendirmek amacıyla köşeleri yuvarlatılmış parçadan oluşan bir test deseni seçilmiştir. Her malzeme için izlemede kızılötesi veya görünür sinyal seçimi, her deneyin her iki sinyalle de izlendiği önceki lazer kesim çalışmalarına dayanmaktadır. Oksijen gazı ve nitrojen gazı ile yapılan kesimlerin sırasıyla görünür ve kızılötesi spektrumlarla daha iyi sinyaller gösterdiği bulunmuştur.

Yapılan gözlem ile proses sırasında anlık olarak delme ve kesme süreçlerine müdahale etmeye yarayan algoritmalar çalışmaların başlangıcında Labview platformunda ve Siemens 840DSL içindeki nümerik kontrolcü (NC) ve programlanabilir lojik kontrolcü (PLC)'de geliştirilmiştir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte kesim kafasındaki sensör verileri ilgili ticari firmanın sağladığı elektronik kart (PCB Arayüz) tarafından işlenebildiği için NC ve PLC yazılımları önerilen çözüm için yeterli olmuştur. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak 4 kW dışında 6, 8 ve 10 kW yüksek güçlü lazerler ile endüstride en çok kullanılan yumuşak çelik, paslanmaz çelik, alüminyum gibi malzemeler farklı kalınlıklarda kesilmiş ve karşılaştırılmıştır. Önerilen metot ve yazılımın kararlı bir şekilde çalıştığını doğrulamak için tekrarlı testler yapılmış ve örnek çeşitleri artırılmıştır. Kesim parametrelerinin malzeme üzerindeki etkileri tartışılmış örnek parçalar görselleri paylaşılmış ve bazıları için taramalı elektron mikroskop (SEM) ölçümleri alınarak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçların bağımsız yapılan diğer çalışmalar ile paralel sonuç verdiği görülmüştür.

3.1 Kullanılan Komponent ve Test Materyalleri

4kW lazer gücüyle yapılan testler Durma marka HD-FL 3015 lazer makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan lineer motorlar sayesinde çok yüksek ivmelenme (30 m/s^2), yüksek hareket hızı (200 m/s) ve hassas pozisyonlama toleransı ($0,03 \text{ mm}$) değerlerine ulaşılmaktadır.

Fiber lazer olarak IPG YLS 4000 modeli kullanılmış, 100 µm fiber çekirdek çapı ile otomatik odak kontrolü yapılabilen ve sensör içeren Precitec Procutter V1.0 (F 150) kesim kafası kullanılarak delme ve kesme işlemleri yapılmıştır. Lazer kafası, düz yataklı makinelerde fiber bağlantılı lazerler kullanılarak metallerin mesafe kontrollü lazer kesimi için kullanılır. Hassas bir şekilde tasarlanmıştır, tüm bağlantılar lazer kafasının üstünde bulunur. Cihazların optik karakteristikleri ve teknik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de gösterilmiştir

Çizelge 3.1. Model YLS 4000 CUT teknik özellikleri

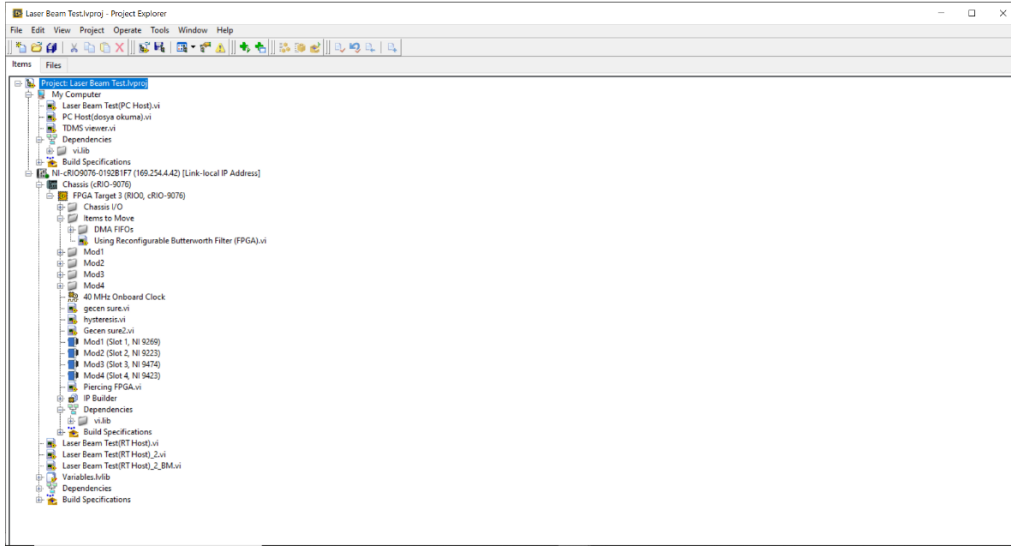
Optik Karakteristik	Minimum	Tipik	Maksimum	Birim
Maksimum çıkış gücü, Besleme Fibri	4			kW
Çıkış gücü ayar aralığı	10		105	%
Emisyon dalga boyu (merkez)	1 068		1 080	nm
Emisyon hat genişliği (FWHM)		3	6	nm
Işın parametresi ürünü (BPP)		3,5	4	mm x mrad
Işın açma zamanı		50	100	µs
Işın kapanma zamanı		50	100	µs
Çıkış gücü kararsızlığı		±1	±2	%
Rezonatör güç tüketimi		10	11,5	kW

Çizelge 3.2. Kesim kafasının teknik özellikleri

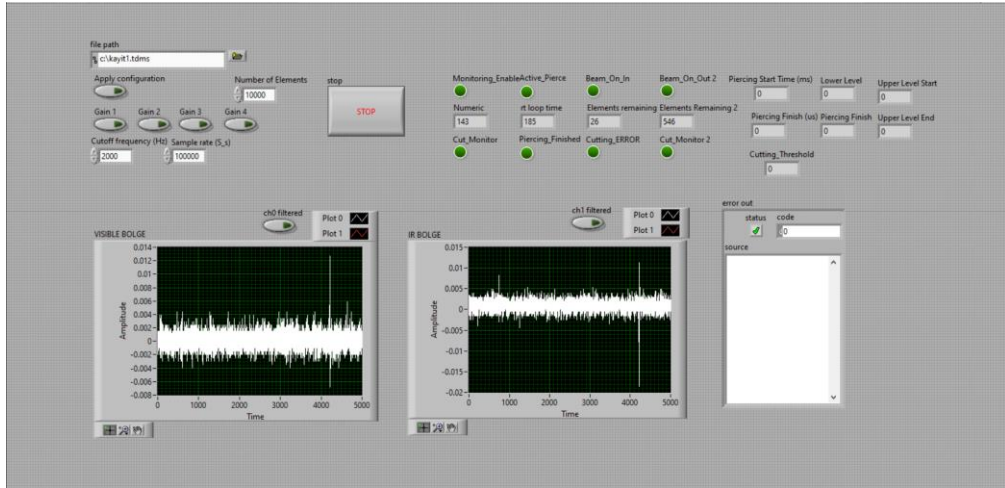
Lazer Dalga boyu	1030 - 1090 nm
Lazer Gücü	6 kW (maksimum)
Odak Uzunluğu	125 mm, 150 mm, 175 mm, 200 mm
İzin Verilen İvmelenme	45 m/s ² (maksimum)
Kesim Gaz Basıncı	25 bar (maksimum)
Yardımcı Gaz Basıncı	5 bar (maksimum)
Soğutma Gaz Basıncı	5 bar (maksimum)
Çalışma Gerilimi	24 V ± %10, 4 A (maksimum)
Çalışma Sıcaklığı	5 – 55 °C

Proses değişkeni olduğundan ötürü tüm testler boyunca %99,9 saflıkta olan nitrojen ve oksijen olmak üzere lazer ışınına eş eksenli akan iki farklı yardımcı gaz kullanıldı. Lazer işleme sürecini takip eden sensörlerden Si, sinyali görünür spektrumda (VIS) 400-1100 nm dalga boyunda kaydederken, InGaAs kızılötesi spektrumda (IR), 1000 -1800 nm dalga boyunda ölçüm almıştır. Üretilen analog sinyaller, National Instruments bir ürünü olan CRIO cihazıyla toplandı ve veriler, Labview’da geliştirilen bir program aracılığıyla işlenerek makineye gönderildi (Karanfil ve Yalçın, 2016).

Kullanılan veri toplama komponentlerini cRIO-9076 şase üzerinde yer alan analog (NI 9223, NI 9269) ve yüksek hızlı dijital (NI 9423, NI 9474) giriş çıkışlar sağlamaktadır. Sensörlerden gelen analog veriler, yazılan programda işlenerek lazer kesim makinesine delmenin bittiğine ve kesimin bozulduğuna dair sinyalleri aktarmıştır. Lazer kesim makinesi aldığı bu bilgileri yazılan NC ve PLC programlarında işleyerek delme ve kesme süreçlerine anlık olarak müdahalede bulunmuştur.



Şekil 3.3. Geliştirilen veri toplama ve işleme yazılımının ana sayfası



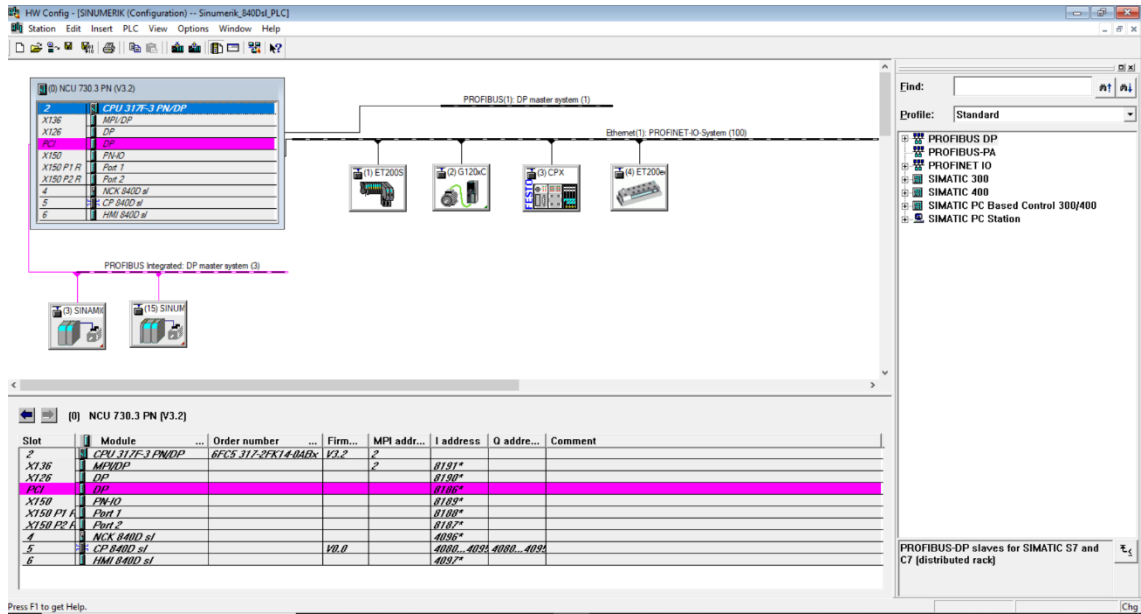
Şekil 3.4. Geliştirilen veri toplama ve işleme yazılımının insan makine arayüzü

Labview projesinin ana sayfası Şekil 3.3'te gösterilmiştir. İnsan makine arayüz (HMI) görüntüleri Şekil 3.4'te verilmiş, program kesitlerinden görüntüler ise Ek 2 ve Ek 3'te detaylı olarak paylaşılmıştır. Çizelge 3.3'te veri toplama sisteminde kullanılan komponentlerin özellikleri verilmiştir. Bu ürünler FPGA (Field Programmable Gate Array) ve gerçek zamanlı uygulamalar için özel olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.3. Veri toplama komponentlerinin teknik özellikleri

	NI 9223	NI 9269	NI 9423	NI 9474
Kategori	Analog Giriş	Analog Çıkış	Dijital Giriş	Dijital Çıkış
Kanal Sayısı	4	4	8	8
Çalışma Gerilimi	±10 V	±10 V	24 V	5 – 30 V
Çözünürlük	16 Bit	16 Bit	-	-
Led Gösterge	Yok	Yok	Var	Var
Koruma Sınıfı	IP 40	IP 40	IP 40	IP 40

4 kW testlerinde sensörden alınan sinyallerin çıkış değerini uyarlamak için dört kazanç seviyesi mevcuttu. VIS spektrumu için, süreci gözlemlemek için izleme sinyallerinin yeterli bir ortalama seviyesi sağlanana kadar 1'den 4'e kadar kazanç değerleri uygulandı. IR spektrumunda testler sırasında sinyalleri izlemek için 1 ve 2'lik kazançlar yeterli görüldü.



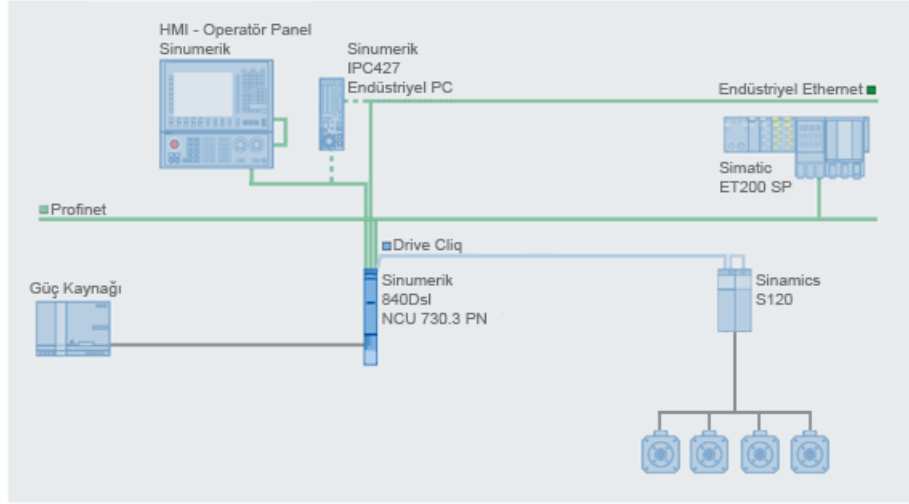
Şekil 3.5. PLC topoloji konfigürasyon sayfası

Yapılan testler boyunca proses yönetim kısmında aktif rol alan komponent olarak Siemens Sinumerik 840D SL, NCU 730.3 aracılığı ile kullanılmıştır. Şekil 3.5'te proje topoloji konfigürasyon sayfası gösterilmektedir. İçerisinde makineye dair tüm yazılım bloklarını bulunduran PLC'nin (S7-300) çevrim zamanı maksimum 7 ms olmaktadır. S7-300'den kontrol edilen bloklarda 10 ms altında bir zamanlayıcı kullanılmamıştır. PLC'nin rezonatör, kesim kafası gibi birimleri yönetmek için kullandığı giriş çıkış modülü olarak Siemens ET200SP komponentleri tercih edilmiştir. Profinet IRT özelliğini destekleyebilen ürün için haberleşme süresi 250 μ s'dir. Çıkışların maksimum anahtarlama frekansı yüke göre 2 – 100 Hz arasında değişiyor. ET200SP'nin barındırdığı komponentlerin verileri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. ET200SP modüllerinin teknik özellikleri

	Analog Giriş	Analog Çıkış	Dijital Giriş	Dijital Çıkış
Gecikme Süresi	125 - 250 μ s	125 - 250 μ s	0,05 - 20 ms	50 - 100 μ s
Kanal Sayısı	2	2	8	8
Akım Tüketimi	39 mA	90 mA	50 mA	25 mA
Çalışma Gerilimi	\pm 10 V	\pm 10 V	24 V	5 – 30 V
Çözünürlük	16 Bit	16 Bit	-	-
Led Gösterge	Var	Var	Var	Var
Kısa Devre Koruma	Var	Var	Var	Var

Kullanılan sistemde ışık açma, delme algılama gibi ultra hızlı sinyalleri algılamak ve yönetmek için NCU 730.3 PN üzerindeki hızlı giriş çıkışlar kullanılmıştır. Nümerik kontrolcünün IPO çevrim ve blok işleme süreleri sırasıyla 1 ms ve 0.3 ms seviyesindedir. Makinenin çalışmasına dair bütün kompleks ve özel yazılımlar, iş parçasının işleme kodları bu birimde koşturmaktadır. Çalışılan sistemin topoloji yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. NCU 730.3 ile oluşturulmuş sistem topolojisi (Siemens AG 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

İlerleyen aşamalarda, yüksek güçlü fiber lazerlerin hızlı gelişimiyle beraber 6, 8 ve 10 kW lazerler ile yapılan testler Durma marka HD-F 3015 lazer makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan servo motorlar sayesinde 2,5 G ivmelenme, yüksek hareket hızı (120 m/s) ve hassas pozisyonlama toleransına (0,03 mm) ulaşılmaktadır.

Çizelge 3.5. YLS 6000 U modelinin teknik özellikleri

Optik Karakteristik	Minimum	Tipik	Maksimum	Birim
Maksimum çıkış gücü, Besleme Fiberi	6			kW
Çıkış gücü ayar aralığı	10		105	%
Emisyon dalga boyu (merkez)	1 068		1 080	nm
Emisyon hat genişliği (FWHM)		3	6	nm
Işın parametresi ürünü (BPP)		3,30	4,00	mm x mrad
Işın açma zamanı		50	100	µs
Işın kapanma zamanı		50	100	µs
Çıkış gücü kararsızlığı		±1	±2	%
Rezonatör güç tüketimi		15	17,1	kW

Çizelge 3.6. YLS 8000 U modelinin teknik özellikleri

Optik Karakteristik	Minimum	Tipik	Maksimum	Birim
Maksimum çıkış gücü, Besleme Fiberi	8			kW
Çıkış gücü ayar aralığı	10		105	%
Emisyon dalga boyu (merkez)	1 068		1 080	nm
Emisyon hat genişliği (FWHM)		3	6	nm
Işın parametresi ürünü (BPP)		3,30	4,0	mm x mrad
Işın açma zamanı		50	100	µs
Işın kapanma zamanı		50	100	µs
Çıkış gücü kararsızlığı		±1	±2	%
Rezonatör güç tüketimi		20	22,9	kW

Çizelge 3.7. YLS 10000 CUT modelinin teknik özellikleri

Optik Karakteristik	Minimum	Tipik	Maksimum	Birim
Maksimum çıkış gücü, Besleme Fiberi	10			kW
Çıkış gücü ayar aralığı	10		105	%
Emisyon dalga boyu (merkez)	1 068		1 080	nm
Emisyon hat genişliği (FWHM)		3	6	nm
Işın parametresi ürünü (BPP)		3,50	4,0	mm x mrad
Işın açma zamanı		50	100	µs
Işın kapanma zamanı		50	100	µs
Çıkış gücü kararsızlığı		±1	±2	%
Rezonatör güç tüketimi		25	28	kW

Fiber lazer olarak IPG YLS 6000, 8000 ve 10000 modelleri ile içerisinde sensörler barındıran Precitec Procutter V2.0 (F 150) ve Procutter Zoom kesim kafaları kullanılarak delme ve kesme işlemleri yapılmıştır. Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de lazer güç üreteçlerinin teknik verileri gösterilmiştir. Yukarıda verilen bilgiler ve çizelgeler, lazer güç üretici firması tarafından kontrollü ortamlarda gerçekleştirilen testlerin sonucudur. Bunlar, ürünün işlevleri ve performansı hakkında yararlı ancak garanti edilmeyen bilgiler sağlamıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle kesim kafasını üreten firmanın geliştirdiği elektronik kart ve yazılımlar sayesinde sensör verisini toplama ve işleme sistemine (cRIO-9076) olan ihtiyaç ortadan kalkmış CNC makinesinde koşan NC ve PLC yazılımları ilgili birimden delme bitimi ve kötü kesim dijital sinyallerini alarak prosese anlık müdahale etmek ve yönetmek için yeterli duruma gelmiştir. Kullanılan komponentlerin verileri Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9 ile verilmiştir.

Çizelge 3.8. İkinci jenerasyon kesim kafasının teknik özellikleri

Lazer Dalga boyu	1030 - 1090 nm
Lazer Gücü	8 kW (maksimum)
Kolimatör Odak Uzunluğu	100 mm
Odak Uzunluğu	125 mm, 150 mm, 175 mm, 200 mm
Ayarlanabilir Odak Mesafesi (F150)	-13 & +9 mm
İzin Verilen İvmelenme	45 m/s ² (maksimum)
Kesim Gaz Basıncı	25 bar (maksimum)
Yardımcı Gaz Basıncı	5 bar (maksimum)
Soğutma Gaz Basıncı	5 bar (maksimum)
Çalışma Gerilimi	24 V ± %10, 6 A (maksimum)
Çalışma Sıcaklığı	5 – 55 °C

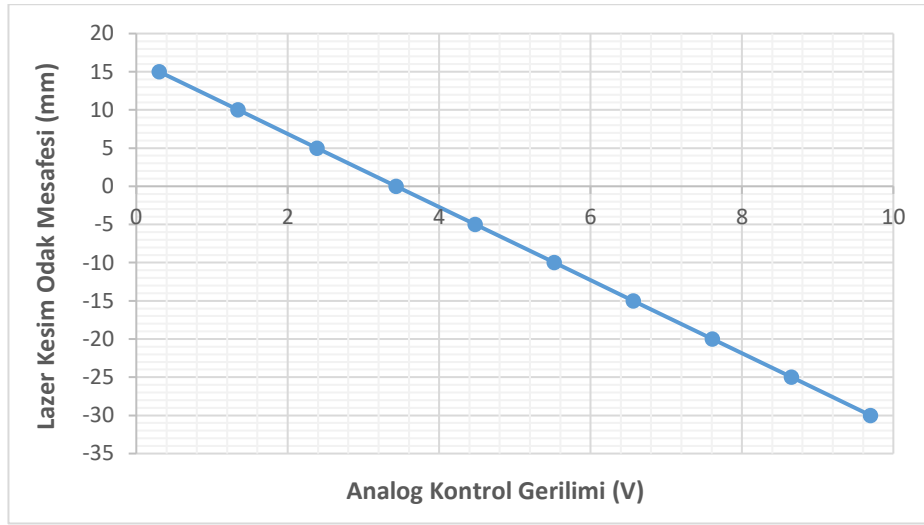
Çizelge 3.9. İkinci jenerasyon zoom model kesim kafasının teknik özellikleri

Lazer Dalga boyu	1030 - 1090 nm
Lazer Gücü	12 kW (maksimum)
Görüntü (Image) Oranı	1:1,2 / 1:1,5 / 1:2,0 / 1:2,5 / 1:3,0 / 1:3,5 / 1:4,0
Ayarlanabilir Odak Mesafesi	-30 & +15 mm
İzin Verilen İvmelenme	45 m/s ² (maksimum)
Kesim Gaz Basıncı	25 bar (maksimum)
Yardımcı Gaz Basıncı	5 bar (maksimum)
Soğutma Gaz Basıncı	5 bar (maksimum)
Çalışma Gerilimi	24 V ± %10, 6 A (maksimum)
Çalışma Sıcaklığı	5 – 55 °C

Kesim kafasında var olan koruyucu cam, ışın şekillendirme optiklerinin altında bulunarak lensleri kesim alanından gelen etkilere karşı korur. Kesim kafasının alt kısmında kapasitif sensör bulunmakta ve sac yüzeyinde 0-20 mm karşılık gelen 0-10 V analog çıkış gerilimi oluşturmaktadır. Nümerik kontrolcü proses için istenen delme ve kesme yüksekliklerine göre kesim kafası yüksekliğini kafanın bağlı olduğu servo motor ile kontrol etmektedir. Kesim sırasında meydana gelebilen olası temaslarda, mesafe kontrol modülündeki çıkışlar nümerik kontrolcünün hızlı girişleriyle alınmakta ve süreç içinde öncelik oluşturarak kaçma veya durdurma işlemleri gerçekleştirilmektedir.

3.2 Odak ve Lazer Kontrol Sinyal Akış Diyagramları

Lazer kesim kafası, odak konumu ve görüntü oranının motor kontrollü olarak ayarlanması için kullanılan iki sürücüye sahiptir. Bu, manuel ayar yapmak zorunda kalmadan çeşitli kalınlıklardaki sacları kesmek için kullanılmaktadır. Gerekli odak konumunu ve görüntü oranını belirlemek için CNC makineden 0,3 ila 9,7 V arasında bir harici analog sinyal gönderilir.



Şekil 3.7. Gerilime karşılık gelen odak mesafesi

Şekil 3.7’de uygulanan gerilime karşın odak değişiminin grafiği verilmiştir. Proseste kullanılmak istenen odak için aşağıdaki denklemden yararlanır.

$$\text{Analog Çıkış (V)} = \text{Odak Pozisyonu} (-0,2088) + 3,4343 \quad (3.1)$$

Özellikle delme adımlarında anlık değişimler kaçınılmaz olsa da kesim aşamasında genellikle sabit odak kullanılmaktadır. CNC makine odak konumunu sürekli olarak izler, gerekli durumlarda odak değişim talebinde bulunur. Ayar noktası konumuna hedef değer tolerans aralığı içinde ulaştığında kesim kafasından “pozisyona ulaşıldı” sinyali alınır. Odak pozisyonun aktif olarak izlenmesi için makinede eş zamanlı eylemler komutları yazılmıştır. Hareket-eşzamanlı eylemler (veya kısaca "eşzamanlı eylemler"), kullanıcı tarafından programlanan ve parça programının yürütülmesiyle eş zamanlı olarak NCK'nın enterpolasyon döngüsünde değerlendirilen talimatlardır. Eşzamanlı eylemde

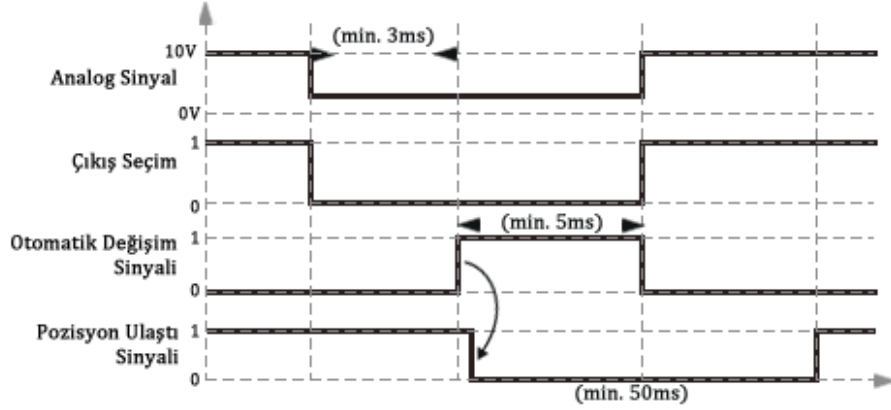
programlanan koşul yerine getirilirse veya hiçbiri belirtilmezse, talimata atanan eylemler, parça program çalışmasının geri kalanıyla eşzamanlı olarak etkinleştirilir. Odak kontrolü için gerekli olan eş zamanlı eylemler ve kodlar sırasıyla aşağıda tanımlanmış ve Ek 4'te gösterilmiştir.

```
N9999104      ID=104      WHENEVER      AKTIF_ODAK_MESAFESI<=MIN_ODAK      DO
$A_OUTA[1]=F_MIN_VOLT
N9999105      ID=105      WHENEVER      AKTIF_ODAK_MESAFESI>=MAX_ODAK      DO
$A_OUTA[1]=F_MAX_VOLT
N9999106      ID=106      WHENEVER      ($A_IN[19]==1)      DO $A_OUT[25]=0
N9999107      ID=107      WHENEVER      (ABS((F_ZERO_VOLT+(AKTIF_ODAK_MESAFESI
*(F_MAX_VOLT-F_MIN_VOLT)/45))-(SON_ODAK_POS))>(0.2*ABS(F_MAX_VOLT-
F_MIN_VOLT)/45))      AND      ($A_IN[19]==0)      DO      $A_OUTA[1]=F_ZERO_VOLT+
AKTIF_ODAK_MESAFESI *(F_MAX_VOLT-F_MIN_VOLT)/45 $A_OUT[25]=1
```

ID 104 tanımlamasında proses için istenen odak değerinin lazer kesim kafasının sağladığı minimum odak değerine eşit veya düşük olduğu durumlarda analog çıkış (bkz. Çizelge 3.4) geriliminin F_MIN_VOLT değerine (9,7 V) eşit olmasını sağlar. ID 105 ise benzer biçimde istenen odak değerinin kesim kafasının sağladığı maksimum odak değerine eşit veya büyük olduğu durumlar için analog çıkış gerilimini F_MAX_VOLT değerine (0,3 V) set etmektedir. ID 106 nümerik kontrolcü ve PLC arasında haberleşmeyi sağlayan değişkenleri göstermektedir. PLC'den odak değişim onayı alındığında odak değişim talebi NC tarafından resetlenmektedir. Ek 4'te görüleceği üzere odak talebinin düşen kenarında ise bu kez değişim onay biti resetlenmekte ve ID 107 şartı için hazır duruma gelmektedir. ID 107 lazer kesim kafasının sağladığı tüm odak pozisyonlarında doğru gerilim değerinin hesaplanmasını ve değişim talebinin PLC'ye bir değişken aracılığı ile aktarılmasını sağlar. CNC makinesinde lazer kesim sürecince tüm odak hesaplama ve tetikleme görevleri nümerik kontrolcüde yapılırsa da değişimler PLC aracılığı ile kesim kafasının kontrol kartına aktarılmaktadır.

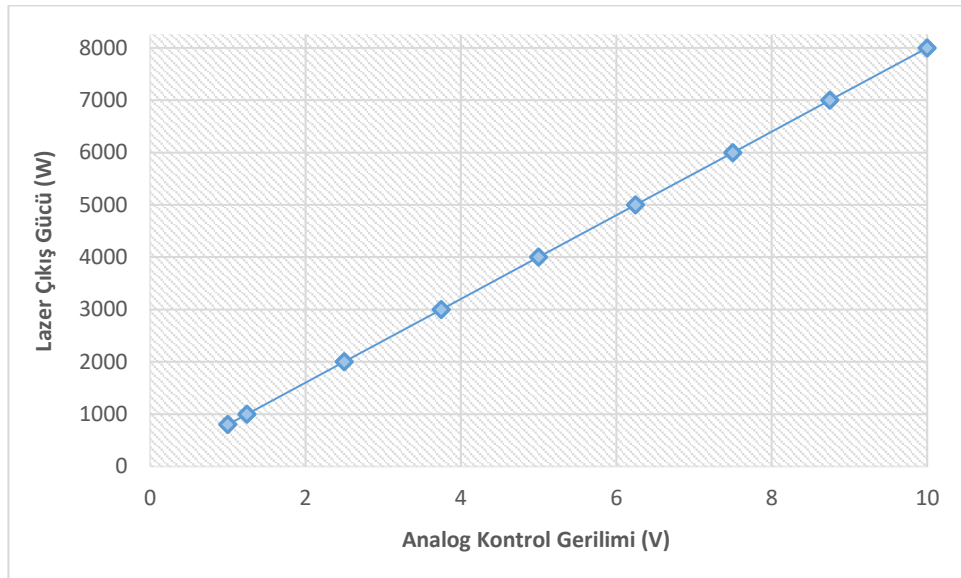
İstenen odak konumu, lazer kesim kafasının analog girişine analog voltaj ve “otomatik değişim sinyali” adı verilen dijital girişe yükselen kenar uygulanarak ayarlanır. Bu konumu onaylamak için “pozisyona ulaşıldı” sinyali en az 50 ms süreyle düşük konumda olmaktadır. Odak konumu değişiklikleri daha büyük mesafe aralıklarını içeriyorsa

konumlandırma daha uzun sürebilir. Herhangi bir hatanın yaşanmaması için analog gerilim değeri seçim öncesi ve sonrası en az 5 ms stabil durumda, “çıkış seçimi” ise düşük konumda tutulmalıdır. Şekil 3.8’de odak değişimi için gerekli olan sinyal akış diyagramı paylaşılmıştır.



Şekil 3.8. Odak değişimi sinyal diyagramı (Precitec 2019’den değiştirilerek alınmıştır)

Lazer güç üretici ile makine arasında dijital ve analog sinyallerle haberleşme sağlanmıştır. Lazer gücüne karşılık gelen analog gerilim değerleri örnek olması açısından 8kW lazer güç üretici için Şekil 3.9’da paylaşılmıştır.



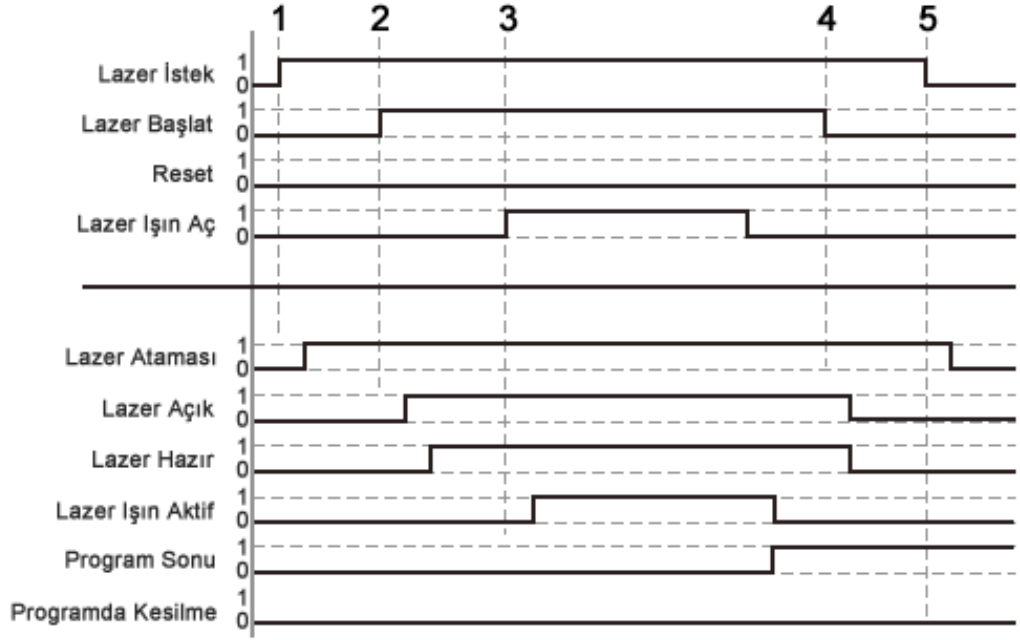
Şekil 3.9. Lazer çıkış gücüne karşılık gelen analog kontrol gerilimi

İstenen güç değeri kontrolü için gerekli olan eş zamanlı eylemler aşağıda verilmiştir. PLC blokları Ek 5’te paylaşılmıştır.

```
N9999108      ID=108 WHENEVER (AKTIF_GUC<=LAZER_MIN_GUC) AND ($R162==0)
DO $A_OUTA[2]=0
N9999109      ID=109 WHENEVER AKTIF_GUC>=LAZER_MAKS_GUC
DO $A_OUTA[2]= LAZER_MAKS_GUC_GRLM
N9999110      ID=110      WHENEVER      (AKTIF_GUC>LAZER_MIN_GUC)      AND
(AKTIF_GUC<LAZER_MAKS_GUC)
DO $A_OUTA[2]=AKTIF_GUC/ LAZER_MAKS_GUC*LAZER_MAKS_GUC_GRLM
```

Geçerlilik tanımlayıcısı (ID) ile senkronize edilmiş eylemler yalnızca otomatik modda ve programlanmış modal bloklara göre çalışır. Yukarıda “whenever” ile ilişkili eylem/teknoloji döngüsü, koşulun karşılanması koşuluyla her enterpolasyon çevrimde döngüsel olarak yürütülür. ID 108 lazer kesim süreci anında istenen optik güç değerinin rezonatörün sağlayabileceği minimum güç değerine eşit veya düşük olduğu durumlarda topolojide gösterilmiş (bkz. Şekil 3.6) ikinci analog çıkışın (bkz. Çizelge 3.4) değerini ayarlamaktadır. Düşük güç modu sağlamayan geleneksel lazer güç üreteçlerinde bu değer maksimum optik gücün %10’una eşit iken, bu özelliğe sahip modellerde anlık olarak tekil modül kullanımına erişim sağlanması ile çok daha düşük güçlere erişilmektedir. Bu sayede sac üzerinde yapılan markalama işlemlerinde yanık gözlemlenmemektedir. ID 109 istenen gücün rezonatörün sağlayabileceği maksimum optik güce eşit veya büyük olması durumunda analog çıkışın LAZER_MAKS_GUC_GRLM değerine (10 V) set edilmesini sağlamaktadır. ID 110 kalan diğer koşullarda istenen optik güç değerine karşılık gelen analog kontrol gerilimine (bkz. Şekil 3.9) uygun olarak çıkışı ayarlamaktadır.

CNC makinelerde istenen optik güç ve lazer ışını sürekli olarak nümerik kontrolcü ile kontrol edilmektedir. Fakat güvenlik durumları ve rezonatörün diğer haberleşme sinyalleri PLC’de yazılmış olan kodlar (Ek 5) aracılığı ile yönetilmektedir. Hatasız bir program dizisi Şekil 3.10’da açıklanmıştır. Prosedür kullanıma özel arayüz uyarlamalarına veya fieldbus protokolüne bağlı olarak değişebilir. Sinyal akış diyagramı CNC ve rezonatör arasındaki dijital sinyallerin sıralı şekilde birbirine gönderilmesi ile çalışır.



Şekil 3.10. Lazer kontrol sinyal akış diyagramı (IPG Laser 2022’den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 3.10’da gösterilen kontrol sinyal diyagramında dijital giriş ve çıkışların aşamalara göre sıralı akışı verilmiştir.

Aşama 1: Gerekli koşullar sağlandığında makineden “Lazer İstek” sinyali güç üreticine gönderilmektedir. Bu sinyal olmadan, diğer giriş sinyalleri yok sayılır. Harici Lazer İzni seçeneğine sahip lazerler için iki kanallı güvenlik girişi uygulanmaktadır. “Lazer İstek” sinyaline karşılık “Lazer Atandı” bilgisi alındığında birinci aşama tamamlanmaktadır.

Aşama 2: “Lazer Başlat” sinyali, rezonatör içinde yer alan lazer güç kaynağını açmak için kullanılmaktadır. Güç üreticiden çıkış sinyali olarak, lazer güç kaynağı başarıyla açıldığında ve nominal çıkış voltajına ulaştığında “Lazer Açık” ve hata yoksa lazer, “Lazer Hazır” sinyalleri CNC makineye gönderilmektedir.

Aşama 3: Makineden gelen “Lazer Işın Aç” sinyali ile lazer emisyonunu etkinleştirir ve lazer ışını çıkmaya başlar. ET200SP giriş çıkış modülleriyle yönetilen diğer sinyallerin aksine bu komut NCU üzerinden gönderilmektedir.

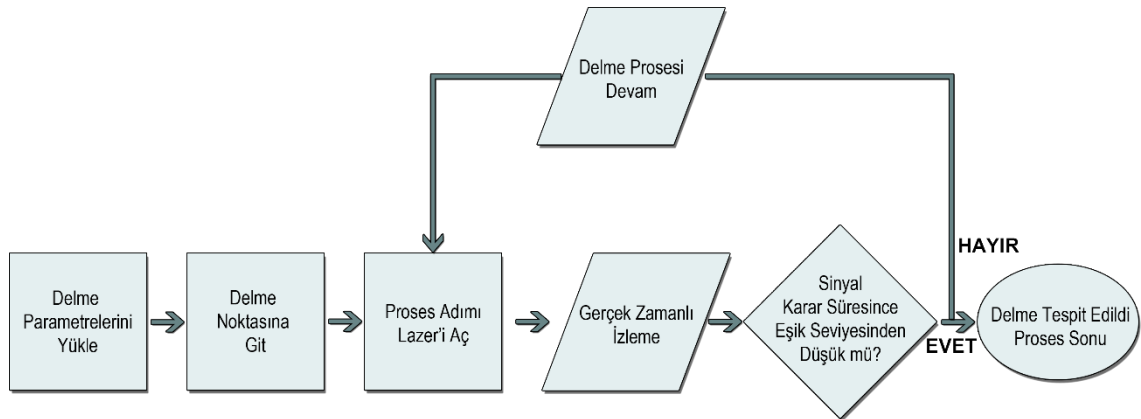
Lazer emisyonu, ilgili sinyal ayarlandığı sürece veya program durdurma sinyali gönderilene kadar etkinleştirilir. Bu sinyal aktif olduğu sürece lazer, “Lazer Işını Aktif” çıkış sinyalini göndermeye devam eder. Süreç bir arıza nedeniyle beklenmedik bir şekilde kesintiye uğrarsa, güç üretici “Program Kesildi” sinyali üreterek makineye bilgi verir.

Aşama 4: Lazer başlat sinyalinin kesilmesi durumunda lazer güç üretici güç kaynaklarını kapalı duruma geçirerek bir sonraki komuta kadar beklemeye geçer. “Lazer Açık” ve “Lazer Hazır” sinyalleri bu aşamada sıfır konumunda olur.

Aşama 5: “Lazer İstek” talebi herhangi bir nedenle kesintiye uğrağında buna karşılık gelen “Lazer Ataması” sinyali de sıfır konumuna geçmektedir.

3.3 Anlık Gözlem Sistemi ve Algoritma Yapısı

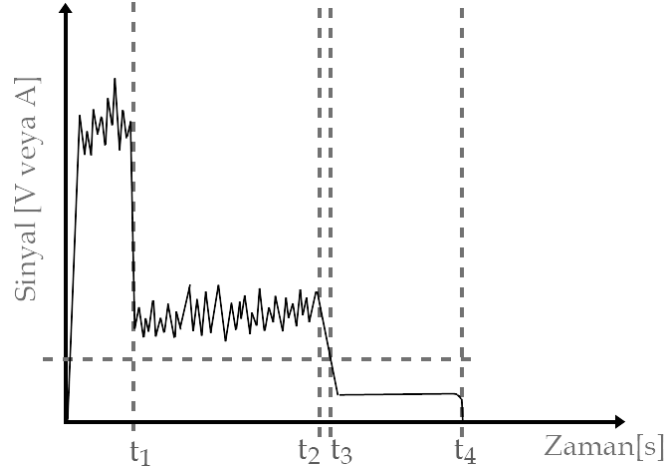
Sistemin çalışma prensibi esas olarak kesim kafasındaki sıcaklık veya ışık yoğunluğunun sensörler aracılığıyla izlenmesine dayanmaktadır. Delme izleme sisteminin çalışması Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde delme izleme algoritması (Yalçın ve Karanfil, 2022)

Öncelikle işlenecek malzemede kullanılacak olan lazer parametreler nümerik kontrolcü aracılığı ile makineye yüklenir veya otomatik çağrılır. Bu veriler odak uzaklığı, kesme gazı ve basıncı, nozul mesafesi ve delme alanı gibi birçok parametreyi içerir. Makine bu değerleri nümerik kontrolcü ve PLC aracılığıyla (Ek 6) işlem süresince arka planda yönetir ve bu girdiler delme işlemi boyunca kullanılarak kaliteli delik elde edilmesi amaçlanır. Bu aşamada ayrıca başarılı bir delmeye ilişkin önceden ölçüm yapılarak belirlenen eşik değerleri de takip sistemine yüklenir. Lazer teknolojisindeki delme ve kesme işlemleri oldukça farklıdır. Delme prosesi adım adım işlemektedir; kafa yüksekliği, gaz basıncı, odak ve lazer gücü delme işleminde farklı zamanlarda değişir. Her parametre adıma karşılık olarak Ek 6'da gösterilen eş zamanlı eylem yazılımları ile yönetilmektedir. CNC makinesinde delme başlangıç değerleri ayarlandıktan sonra ilk parça işleme koordinatında lazer ışığı açılır. Lazerin açılma anında PLC, sensörleri uyku modundan çıkarır ve delme izleme sistemini çalışma moduna alır, anlık izleme bu aşamada aktif konuma geçer. Uygulanan lazer gücü ve parametreleri için her malzeme tipi ve kalınlık davranışı farklıdır. İşlemin başında işlenecek malzemeye özel olarak yüklenen eşik değerleri, sensörlerden alınan anlık geri besleme değerleri karşılaştırılır. Anlık ölçülen değer belirli bir süre eşik değerinin altında kalırsa, gömülü işlemci delmenin tamamlandığını algılar ve makineye bir sinyal gönderir. CNC makinesi lazer ışınını nümerik kontrolcü ve PLC aracılığı ile kapatarak delme işlemini tamamlayıp kesime hazır hale gelir. Aksi takdirde, takip sistemi ile sürekli karşılaştırılan anlık analog voltaj değeri belirli bir süre eşik değerinin altına düşmediği için sistem delmeye devam eder. Bu algoritma ve sisteme sahip olmayan geleneksel endüstriyel uygulamalarda herhangi bir karar mekanizması olmadığı için delme süreci kullanıcının ön gördüğü sabit süre boyunca devam etmek zorundadır.

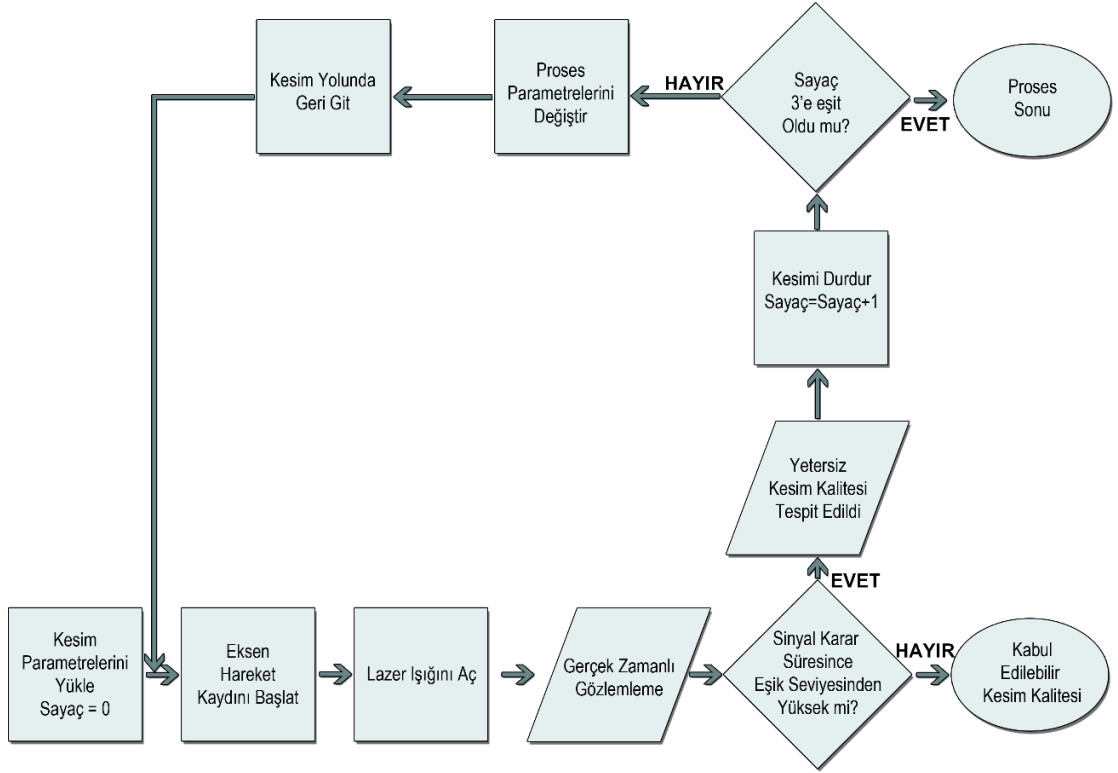
Yukarıda anlatılanlar dışında sensörlerden alınan sinyaller için üst eşik değeri de belirlemek mümkündür. İlgili seviye ile delme işlemi sırasında malzeme aşırı ısındıkça lazer ışını kapatılabilir ve limit düşüşlerinde tekrar açılabilir. Kaliteli delik elde etmek için avantaj sağlayan bu yapı yazılımının içinde opsiyon olarak eklenmiş fakat delme sürelerini artıracığı için kullanılmamıştır.



Şekil 3.12. Delme işlemi sırasında sensörler tarafından kaydedilen tipik sinyal

Şekil 3.12 delme işleminde kaydedilen bir sinyalin tipik bir örneğini göstermektedir. İlk ışığın çıkmasıyla birlikte t_1 anına kadar yüksek genlikli bir sinyal ölçülür. Bunun nedeni, lazerin yüzeye ilk kez çarpmasıdır. t_1 ve t_2 zamanları arasında malzeme oyulmaya başlamıştır ve kesme kafasının konumuna bağlı olarak dengesiz geri yansıma sinyalleri ölçülür. t_3 anı, lazer ışınının malzemenin arka yüzeyine ilk kez geçmeye başladığını gösterir. Lazerin kapatıldığı t_3 anından t_4 anına kadar sıfır olmasa bile düşük seviyeli geri yansıma sinyalleri gözlenir. Delme tespit yöntemi, belirlenen eşik sinyal seviyesi (t_3 anı) ve programlanabilir karar süresine bağlı olarak çalışır. Karar zamanı eşik seviyesi kadar önemlidir. Eşik seviyesinin doğru seçilmediği durumlarda okunan değer bu seviyenin altına düştükten sonra anlık olarak bu seviyenin üzerine çıkabilir. Bu seviyeyi belirlemek için çalışmada önerilen sistem ile standart delme işlemine ait sinyaller kayıt altına alınmaktadır. Kaydedilen grafiklerde t_3 anının sinyal seviyesi belirlenir ve t_3 ile t_4 arasındaki kararlı karar durumu aranır. Bu aralık aslında delme tamamlandığında boşa harcanan zamanı temsil eder. Karar süresi ise t_3 anındaki seviye düşüşünün eğiminin bittiği ile kararlı sinyal hareketinin görülmeye başladığı zaman arasındaki farka göre belirlenir (Yalçın ve Karanfil, 2022).

Yüksek güçlü fiber lazer sistemlerindeki kesme izleme algoritması temelde delme izleme sistemine benzerdir. Fakat ikisi arasındaki en önemli fark, tanımlanan eşik değerinin konumudur. Sistemin çalışması için, delme işleminin tamamlanması ve kesime hazır hale getirilmesi gerekir. Algoritma Şekil 3.13'te gösterilmektedir ve aşağıdaki adımlar ile çalışmaktadır.



Şekil 3.13. Yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde kesme izleme algoritması (Yalçın ve Karanfil, 2022)

Adım I: Delme işlemi tamamlandıktan sonra lazer ışını kapatılır. Delme işlemi parametreleri yerine nümerik kontrolcü kesme parametrelerini çağırır. İşlenecek malzemenin veri tabanındaki tüm değerleri makineye yüklenir. Bu veriler, delme işlemindekine benzer odak mesafesi, kesme hızı, kesme gazı ve basıncı ve nozul mesafesi gibi birçok parametreyi içerir. Ayrıca daha önceden ilgili malzemede kaliteli bir kesime ilişkin ölçülmüş olan kaydedilmiş referans değerleri de bu adımda takip sistemine yüklenir. Kesim işlemi parametrelerinin diğer bir farkı, kesim başlangıcı (giriş), başlangıç (kontur) sonrası ve köşe dönüşleri için parametrelerin ayrı olmasıdır.

Adım II: Kesme işleminde lazer kafasının konumu genellikle delme işleminden daha yakındır. Atış ve kademeli metodoloji ile delme işlemi yönlendiren sistem, gazın levhaya daha iyi nüfuz etmesi için kesme işlemindeki deliğin yapıldığı noktaya özellikle yakındır. Bu adımda servo motorlar lazer kesim kafasını kapasitif sensörden aldığı analog sinyallerin nümerik kontrolcüde işlenmesiyle istenen seviyeye getirir.

Adım III: Bu aşamada CNC makinesinde kesme başlangıç değerleri (Odak, gaz vb.) ayarlandıktan sonra lazer ışığı ilk kez açılır.

Adım IV: Lazer ışını açıldığında, algoritma uyku modundan çıkarılır ve kesim gözlem sistemini çalışma moduna geçirir. İzleme bu aşamada başlar.

Adım V: Bu adımda anlık ölçüm değerleriyle referans değerlerinin sürekli bir karşılaştırması yapılır. Anlık ölçülen değer belirli bir süre eşik değerinin üzerinde kalırsa, sistem Adım VII'ye geçer; aksi takdirde, Adım VI ile devam eder.

Adım VI: Bu adımda sistem herhangi bir olumsuz durum algılamaz ve dolayısıyla kesme işleminin istenen kalitede devam ettiğini varsayarak kesime müdahale etmez. İş parçası kesimi tamamlandıktan sonra CNC makinesi lazer ışınını NC ve PLC üzerinden kapatır. Ayrıca sensörleri ve sistemi uyku moduna geçirir.

Adım VII: Anlık sensör değerleri belirli bir süre eşik değerinin üzerinde kaldığından, sistem prosesin anormal olarak işlediğini algılar ve makineye kalitesiz kesim yapıldığını belirten dijital bir sinyal gönderir.

Adım VIII: CNC makinesi düşük kesme kalitesi sinyali aldığı anda, lazer ışınını hemen kapatır ve eksenlerini hareket ettirmeyi durdurur. Nümerik kontrolör lazer kafasını kesme konumundan yukarı kaldırır ve kesme yolunda önceden ayarlanan (arzu edilen) mesafe kadar geri getirir. Sonrasında kesme hızı ve parametrelerinde malzeme tipine göre bazı değişiklikler yapar (Kesme hızını %15 düşür, odağı değiştir vb.) ve ardından Adım II'ye döner. Bu işlem, karşılık gelen kontur veya segment için üç kez tekrarlanır.

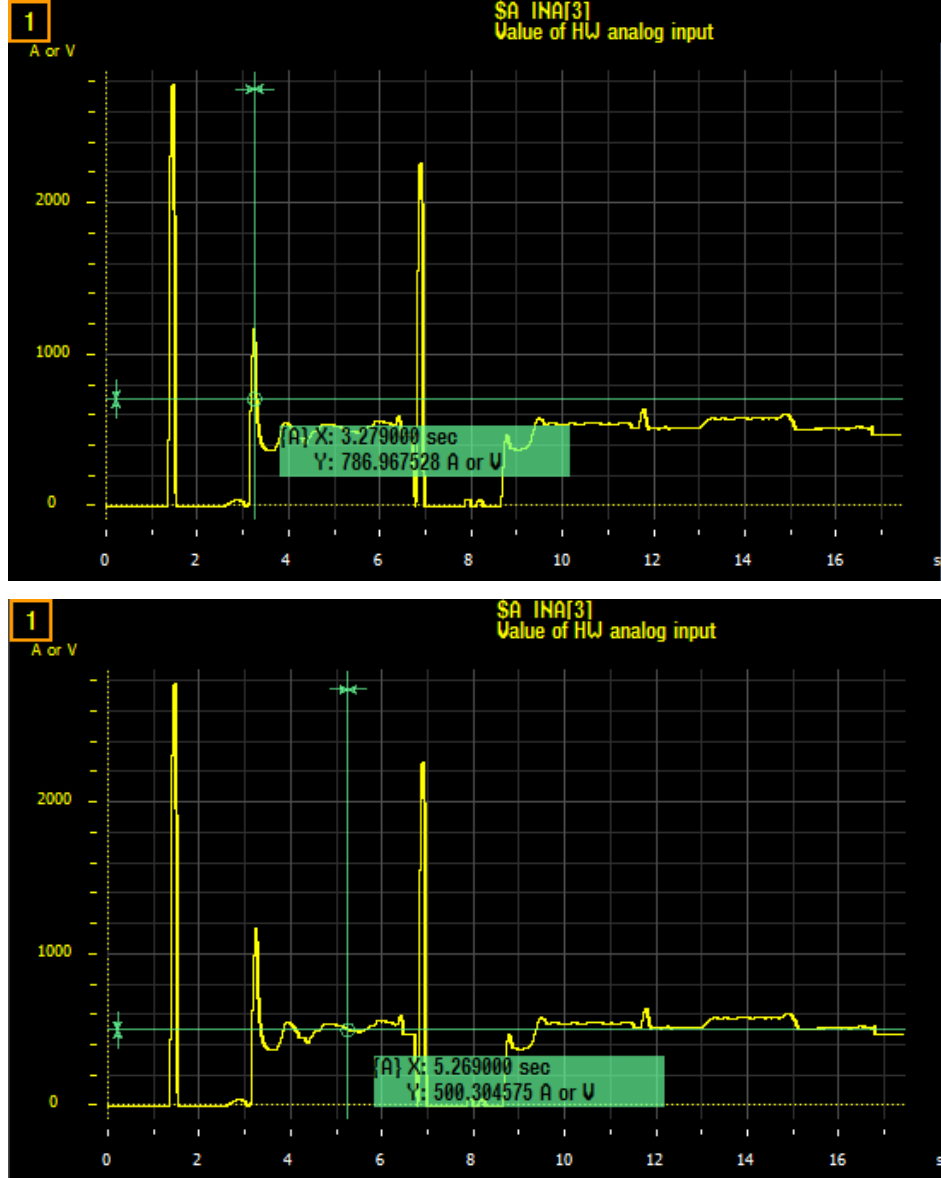
Kesme işleminde yeniden bir anormal durum algılanırsa makine ilgili konturu HMI'da göstermek için hafızasında tutar ve kullanıcı isteğine bağlı olarak kesimi durdurur veya diğer kontur ya da parçaya atlar. Atlama sırasında nümerik kontrolcüde yazılan alt programlar sayesinde parçalar ve konturlar arasında geçiş yaparken orijinal kesme parametresi değerleri yeniden yüklenir. Geçtiği diğer parçada da aynı sorunla karşılaşırsa sistem makineyi tamamen durdurur ve operatörü alarm mesajı ile uyarır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Önerilen yazılımın kararlılığından emin olmak için birçok malzeme farklı kalınlıklarda ve güçlerde kesilerek ölçümler alınmış ve sisteme kaydedilerek veri tabanı oluşturulmuştur. Yapılan testlerde adımlardan oluşan uygulama nedeniyle gaz basıncına ek olarak, odak ve nozul mesafeleri değiştirilmiştir. Kademeli delmeye ek olarak, alınan kayıtlar düz, kavisli ve köşeli kesimlerden oluşturulmuştur. Lazer ışını standart bir fiber optik kablo ile taşınmıştır ve maksimum kesme hızı kesilecek iş parçasının plakanın tamamından tamamen ayrılabilmesi koşuluna göre ayarlanmıştır. Kenar kesimi ve delme kalitesi görsel inceleme ile belirlenmiş ve uygulanan parametreler ile ilgili detaylar ilerleyen bölümlerde paylaşılmıştır. Fotodiyot tabanlı sensörler, delme tarafından üretilen erimiş eriyik ve buhar bulutunu tespit etmiş ve bunu delme prosedürünü analiz etmek için kullanılan bir analog sinyale dönüştürülmesine yardımcı olmuştur. Yapılan tüm kesimler aşağıdaki verilere göre değerlendirilmiş ve kapalı çevrim kontrol yazılımı içerisinde kullanılmıştır. Elde edilen iş parça örneklerinin yüzey topografyası TÜBİTAK Butal Laboratuvarlarındaki elektron mikroskobu (SEM) aracılığı ile görselleştirilmiştir, ilgili görsellerin yakınlaştırılmış detayları Ek 7, Ek 8 ve Ek 9'da paylaşılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamalarındaki ölçümler sırasında elde edilen grafiklerde, sensörden (0–10 V) elde edilen gerilim değerlerini, zamana karşılık gelen saniye cinsinden gösterilmiştir. Sensörler, delme ve kesme işlemlerini izler ve görünür ve kızılötesi spektral aralıklarda lazer kesim sırasında üretilen emisyonları analiz eder. Kesme ve delme işlemleri sırasında sensörler, CNC makinesi ile analiz edilebilen çıkış sinyallerini gönderir. Grafiklerin daha ayrıntılı bir görünümü ve takibi için, ordinat ekseninde bir çarpan kullanılabilir. Delme işleminin son adımlarında malzemeye fazla lazer gücü uygulamamak için en düşük karar süresi seçilmeye çalışılmıştır (Karanfil ve Yalçın, 2019).

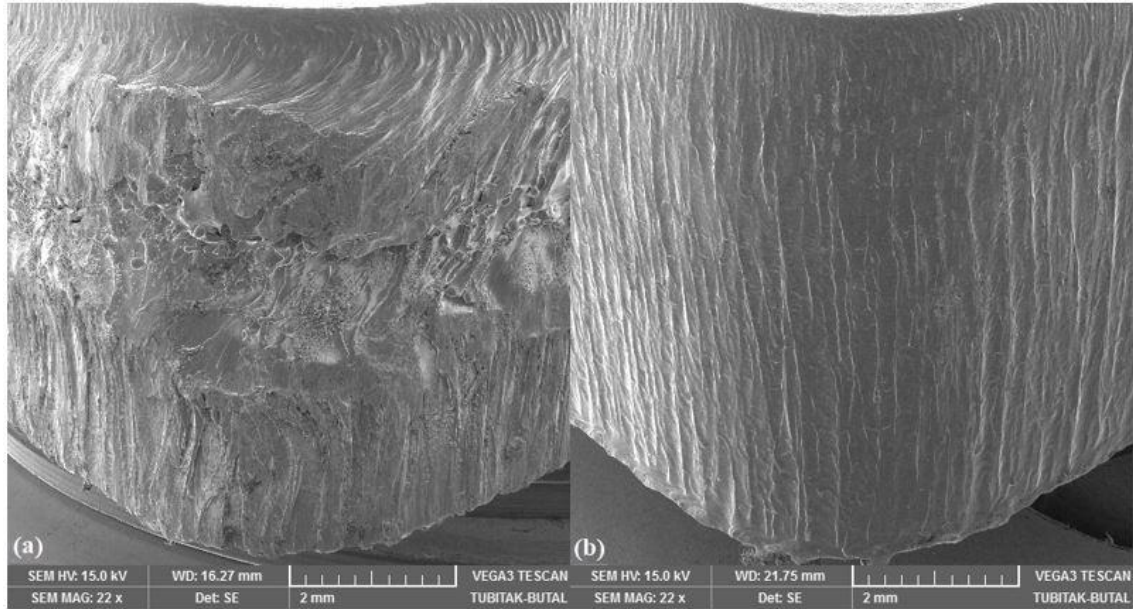
Lazer gücünün etkisini gözlemlemek için ilk aşamada 4 kW lazer güç üretici kullanıldı. Şekil 4.1'de 8 mm kalınlığında paslanmaz çelik malzeme için sırasıyla delme ve kesme grafiğini gösterilmektedir. İlgili süreçte delme için 3,5 kW kullanılırken kesim işlemi sırasında 4 kW güç uygulanmıştır.



Şekil 4.1. 8 mm paslanmaz çelik malzemesinde sensörden alınan azotlu kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).

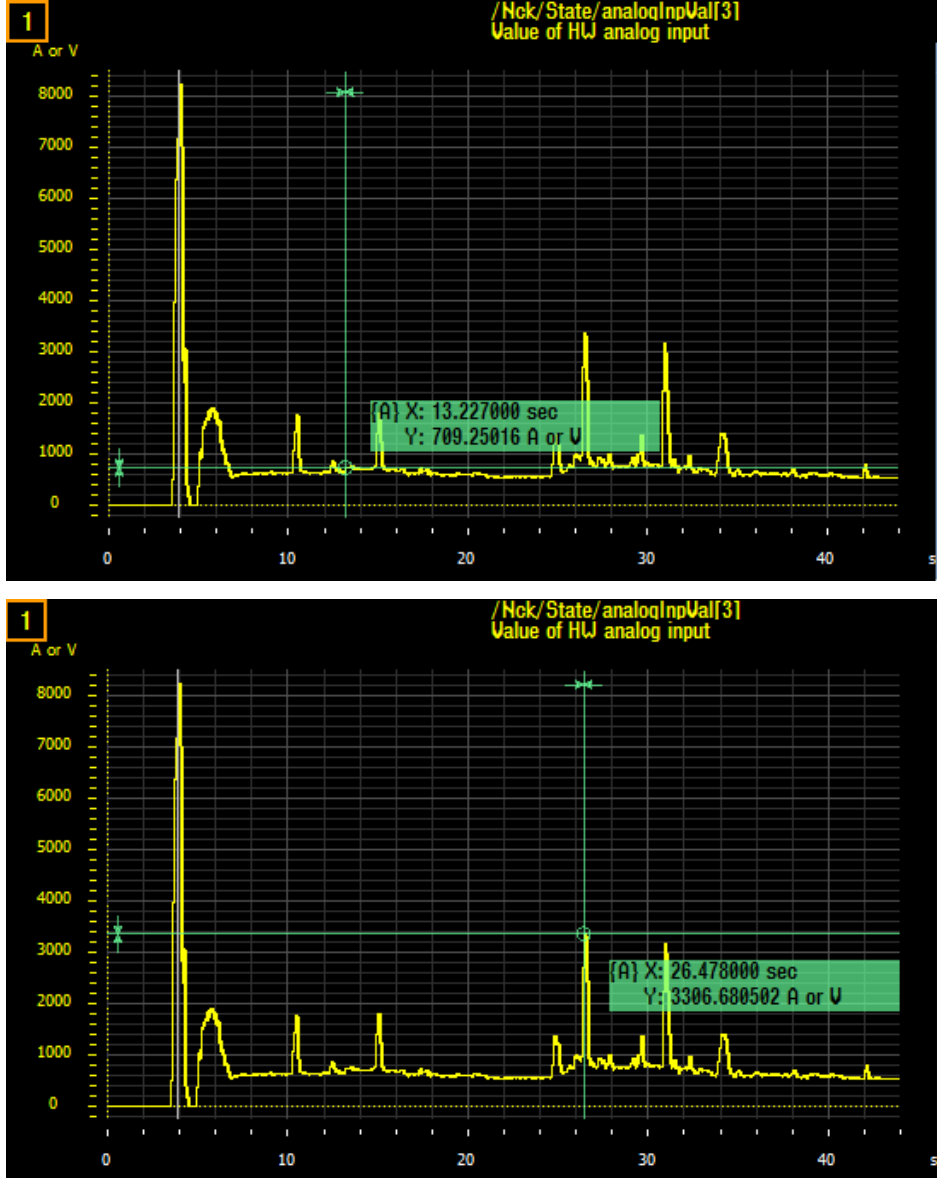
8 mm paslanmaz çelik için delme işlemi iki adımda gerçekleştirildi ve 2,5 mm'lik tekil nozul kullanıldı. Elde edilen ölçümlere göre, 0.8 V paslanmaz çelikteki delme kritik eşik değeri için ideal olduğu görüldü. Ayrıca grafikler 10 ms karar süresinin sistemin kararlılığı için uygun olduğunu göstermektedir. Kesme işleminde, sinyal yaklaşık 0.5 V olmakta ve ölçümlerde, zayıf kesim anında paslanmaz çeliğin genlik tepkisinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Lazer kesimin kaliteli olduğuna dair işaretler arasında dar kesim genişliği, kesim yüzeyinde minimum pürüz ve termal hasarla birlikte yapışmayan cüruf bulunmaktadır. İkinci bölümde de bahsedildiği gibi kesim hızı lazerle malzeme işleme prosesindeki en önemli etmenlerden biridir. Şekil 4.2(a)'da 8 mm paslanmaz çelik malzemesinin kesme kalitesinin zayıfladığı bir durum gösterilmektedir. Gerçek zamanlı izleme sistemi etkinleştirildiğinde, anlık oluşan bu durum tespit edilerek kesim hızına müdahale edilmekte ve mevcut hız otomatik olarak %15 (malzeme tipine bağlı olarak değiştirilebilir) düşürülmektedir. Devam eden kesimdeki bir sonraki köşe dönüşü yeterince iyi kalitede olmuş ve Şekil 4.2(b)'de görselleştirilmiştir.



Şekil 4.2. 8 mm paslanmaz çelik malzemesinin köşe dönüş kısmının SEM görüntüleri. **a)** Zayıf kaliteli kesim **b)** Önerilen sistemin müdahalesi sonrası yapılan kesim (Karanfil ve Yalçın, 2019).

Şekil 4.3'te 12 mm kalınlığında Alüminyum malzemenin ölçüm grafiği gösterilmektedir. Paslanmaz çeliğe benzer şekilde, alüminyum için 2,5 mm'lik tekil nozul tercih edildi. Delme için 8 ve 5 mm yüksekliklerden iki adımda proses gerçekleştirildi. 1,4 V kritik (eşik) değeri ve 30 ms karar süresi ile 2-4 kW lazer gücü kademeli olarak kullanıldı. Grafiğe bakıldığında kesme işlemi sırasında alınan ölçümlerde kaliteli kesim sırasındaki sinyal seviyesi 0.7 V mertebelerinde olduğu kalitenin bozulmaya başladığı noktalarda elde edilen değerlerin ise 3.3V seviyelerine çıktığı görülmektedir.

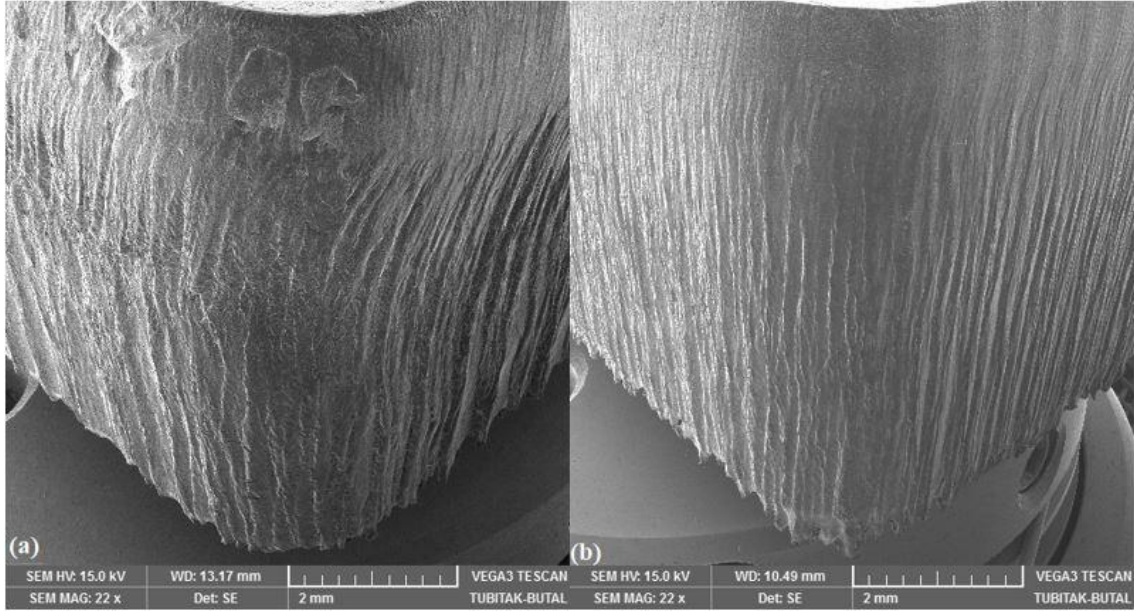


Şekil 4.3. 12 mm alüminyum malzemesinde sensörden alınan azotlu kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).

Alüminyum yansıtıcı bir malzeme olduğundan fiber lazerle kesilmesi potansiyel bir risk oluşturabilir. Bu tür geri yansımalar, sac yüzeyindeki düzensizliklerle, normal yüzeyle hassas hizalama eksikliği ve optiklerin sınırlı toplama açısı ile ilişkilidir. Düz plakadan yansıtılabilen lazer ışını, ışın iletiminin optikleri üzerinden geri iletilebileceğinden lazerin kendisine ciddi zarar verme potansiyeli barındırmaktadır. Bu sebeple, sensörler aracılığıyla yansımayı sürekli olarak ölçen bir yazılımsal koruma sistemi vardır. İlgili koruma sistemi kesim kafasında, lazer güç üreticinde ve önerilen sistemde ayrı ayrı çalışmaktadır. İlgili testlerde kullanılan optik çıkışlı lazer güç üreticinde, kritik eşik

seviyesi aşıldığında lazer ışını kesilmekte ve lazerin geri yansıma ile oluşturabileceği olası optik hasarların önüne geçilmektedir (Karanfil ve Yalçın, 2019).

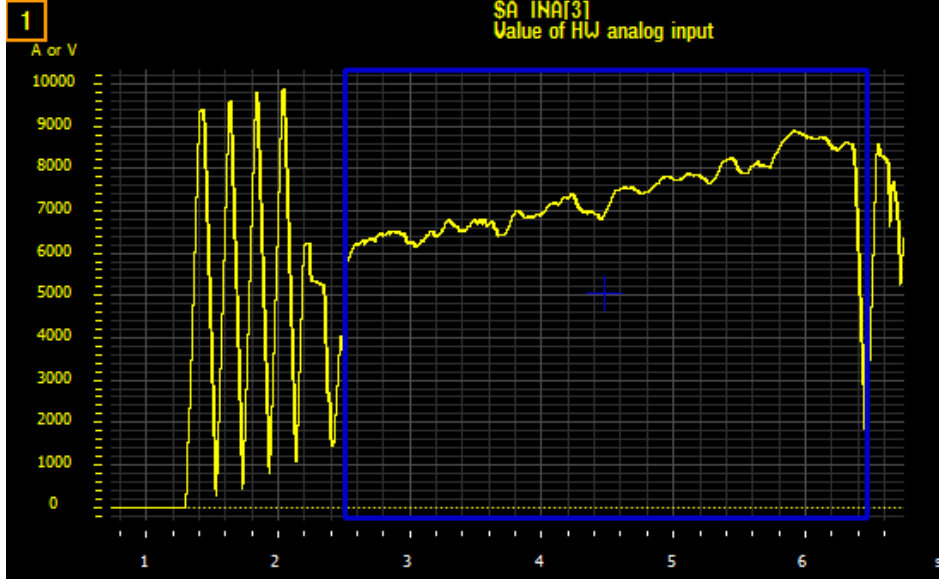
12 mm alüminyum 4kW bir lazer güç üretici için sınır bir malzemedir. Şekil 4.4(a)'da yüksek kesim hızına sahip parametre seti 12 mm alüminyum malzemesine uygulandığında oluşan zayıf kalitedeki kesimin SEM görüntüsü verilmiştir. Tez çalışmasında önerilen metot aktif edildiğinde ilgili kalitesizlik yüksek sinyal yoğunlukları ile tespit edilmiş ve kesim durdurularak otomatik hız azaltma prosedürü ile parça kesim yolunda beraber belirli bir miktar geriye gidilerek malzeme istenilen kalitede kesilebilmiştir. Şekil 4.4(b)'de aynı malzemenin bir sonraki kesimine dair SEM görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 4.4. 12 mm alüminyum malzemesinin köşe dönüş kısmının SEM görüntüleri. **a)** Zayıf kaliteli kesim **b)** Önerilen sistemin müdahalesi sonrası yapılan kesim (Karanfil ve Yalçın, 2019).

Birinci aşama test ölçümlerinin devamında delinmesi diğerlerinden daha zor olan 20 mm kalınlığında yumuşak çelik üzerinde denemeler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te işaretli alanda görüldüğü gibi, malzeme yüzeyindeki sıcaklık delme süresi boyunca kademeli olarak artma eğilimi göstermiştir. Malzeme yüzeyinin aşırı ısıtılması, delme bölgesinin

bozulmasına ve delik çapının genişlemesine yol açar. Bu nedenle, özellikle kalın malzemeler için delme parametresini ayarlamak hassas ve kritik önemi olan bir süreçtir.

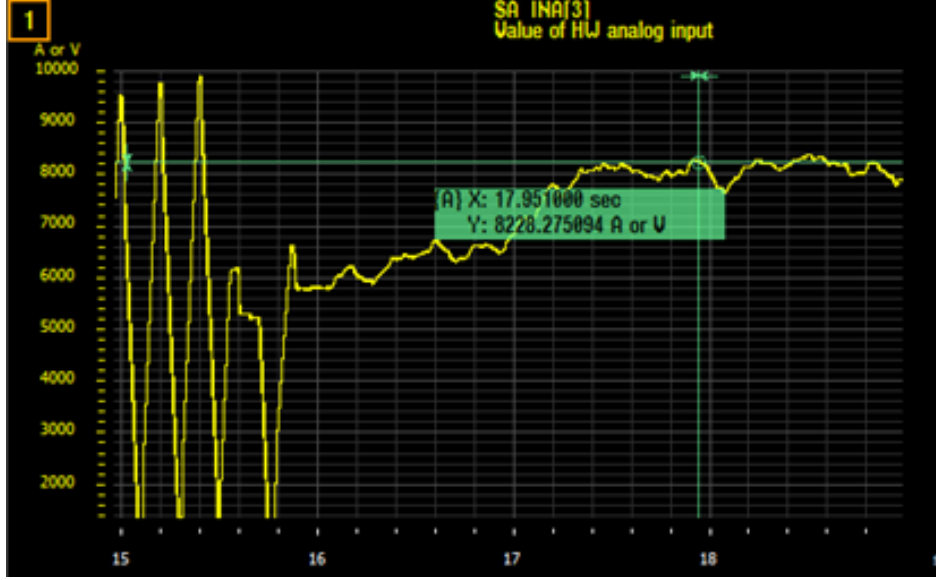


Şekil 4.5. 20 mm yumuşak çelik malzemesinde sensörden alınan oksijenli kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).

İlgili denemede yumuşak çelik için, kızılötesi sensör kullanımı, görünür ışık sensörü kullanımından daha güvenilirdir, çünkü yumuşak çelik üzerindeki oksijenli kesimde sıcaklık artışı daha önemlidir. 20 mm yumuşak çelik testlerinde delme işlemleri dört adımda gerçekleştirilmiş 6 ve 15 mm yükseklikleri arasında 4 kW lazer gücü ve yardımcı gaz olarak 0.6 bar oksijen kullanıldı. Malzeme delme test ölçümleri için 3.7 V kritik (eşik) değeri ve 90 ms karar süresi uygun görülmüştür (Karanfil ve Yalçın, 2019).

Şekil 4.6’da iş parçasının ikinci konturundan kesme grafiğini göstermektedir. Birinci konturda elde edilen delme parametreleri ikinci kontur için uygulandığında, delme süresi azaldı ve kesme işlemi daha erken başladı. Bu işlem, kesim kafası sacın 2,8 mm yüksekliğinde iken, 3 mm çift delikli (double) nozul ve 3,3 kW lazer gücünde 0,65 bar basınç uygulanarak gerçekleştirildi. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere kaliteli kesim sırasında sinyalin 6 ile 8,2 V arasında değiştiği görülmüştür. Zayıf kesim sırasında ise sacın çok ısındığı ve erimenin çok fazla olduğu gözlemlenmiştir. Deneme sonunda kesim için

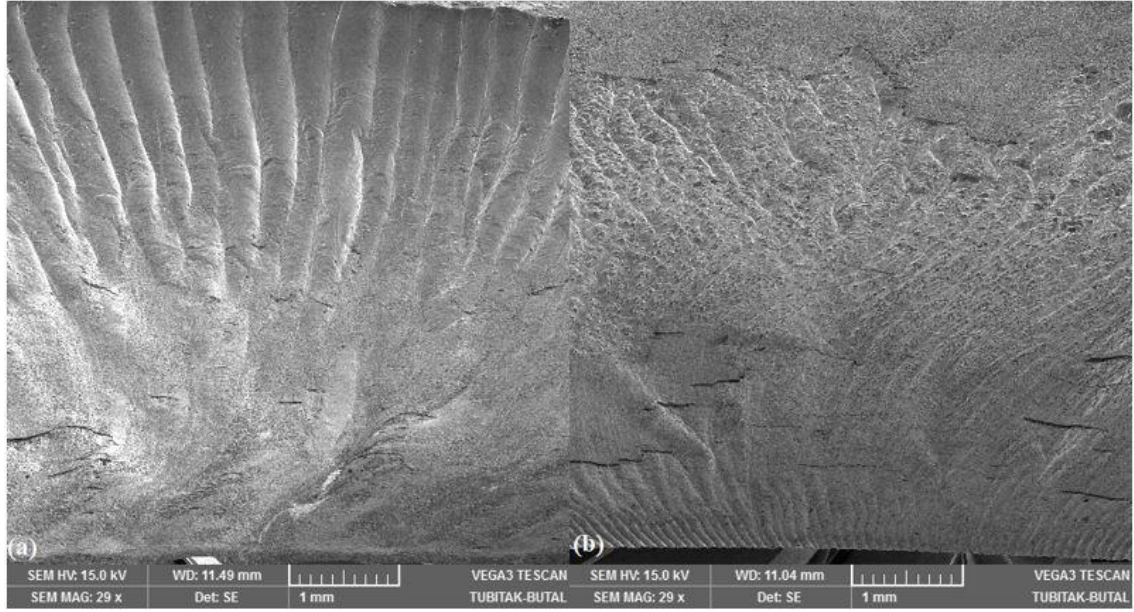
yapılan ölçümlerde, 25 ms karar süresi ile 9,5 V kritik (eşik) değeri uygun görülmüştür (Karanfil ve Yalçın, 2019).



Şekil 4.6. 20 mm yumuşak çelik malzemesinde sensörden alınan oksijenli kesim ölçüm değerleri (Karanfil ve Yalçın, 2019).

20 mm yumuşak çelik ilgili malzeme türü için 4 kW lazer gücünde sınır bir kalınlıktır. Şekil 4.7(a)'da zayıf kesim kalitesindeki malzeme yüzeyi gösterilmiştir. Oksijenle kesilen yumuşak çelik malzemesinde kalite zayıfladığında malzemenin üst tarafında çizgiler belirginleşmekte ve kalitenin daha da kötüleşmesi durumunda alt tarafta cüruf miktarlarında artış oluşmaktadır. Bu oluşum numunenin kalınlığı, kesim hızı ve eriyiğin özellikleri ile ilişkilidir. Şekil 4.7(b)'de sistem müdahalesi sonrasında değişen yüzey gösterilmiştir.

Önerilen kontrol sisteminin hedeflerinden biri, kesim kalitesinin bozulmadığı maksimum hızda kesim yapabilmektir. Yumuşak çelik levhalarda, nominal ilerleme hızından daha yüksek bir hızda kesim yapmak mümkündür. Bu durumda sensör sinyali risk seviyesine ulaşmadan önce kademeli olarak artan hız, kontrol sistemi için bir yol gösterici olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.7. 20 mm yumuşak çelik malzemesinin köşe dönüş kısmının SEM görüntüleri. **a)** Zayıf kaliteli kesim **b)** Önerilen sistemin müdahalesi sonrası yapılan kesim (Karanfil ve Yalçın, 2019).

İkinci aşama ve sonraki testlerde teknolojinin gelişmesiyle beraber yeni jenerasyon kesim kafaları kullanılmıştır. Bu sayede cRIO-9076 ara birimi ortadan kalmış, sensör çıktıları bilgisayar tabanlı uygulamadan (AE Tools) görülür hale gelmiştir. Bu aşamadan sonraki ölçüm grafiklerinde sensörler üzerine düşen ışın yoğunluğunun zamana bağlı değişimleri gösterilmiştir. 4 kW testlerinden sonra 6 kW lazer güç ünitesinde testlere devam edilmiştir. Kullanılan parametrelerden örnek setler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

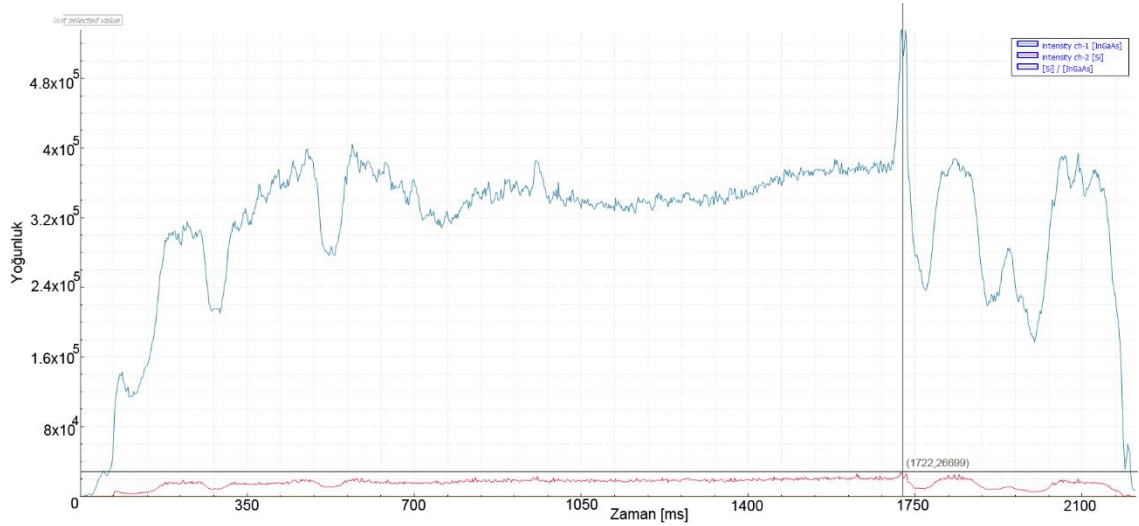
Çizelge 4.1. 6kW testlerinde kullanılan delme prosesinin ilk adım parametreleri

Delme Parametresi	4 mm SS	8 mm SS	8 mm AL	20 mm MS
Nozul Mesafesi	7 mm	7 mm	8 mm	15 mm
Gaz Tipi /Basıncı	Azot / 12 Bar	Azot / 15 Bar	Azot / 10 Bar	Azot / 15 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 150 / -2 mm	F 150 / -4,8 mm	F 150 / -3,2 mm	F150/ 4 mm
Lazer Gücü	6 kW	6 kW	6 kW	6 kW
Duty (%)	60	60	80	40
Frekans	5 kHz	5 kHz	5 kHz	50 Hz

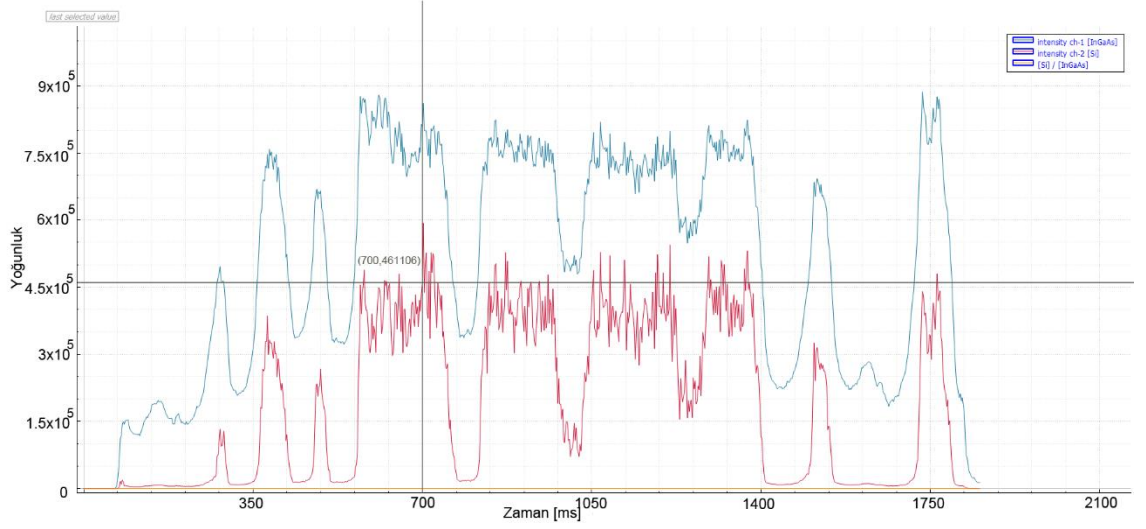
Çizelge 4.2. 6kW testlerinde kullanılan kesme prosesinin örnek parametreleri

Kesme Parametresi	4 mm SS	8 mm SS	8 mm AL	20 mm MS
Nozul Mesafesi	1 mm	2 mm	1,2 mm	2,6 mm
Kesim Hızı	9500 mm/dk	2800 mm/dk	3300 mm/dk	750 mm/dk
Gaz Tipi / Basıncı	Azot / 14 Bar	Azot / 15 Bar	Azot / 15 Bar	Oksijen / 0.8 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 150 / -2 mm	F 150 / -4,8 mm	F 150 / -3,2 mm	F150/ 4 mm
Lazer Gücü	6 kW	6 kW	6 kW	6 kW
Duty (%)	100	100	100	100
Frekans	5 kHz	5 kHz	5 kHz	5 kHz

Kesim hızının yüksek olduğu ince malzemelerde zayıf kesimin sensörlerdeki etkisini gözlemlemek için 4 mm kalınlığında paslanmaz çelik malzemesi test edilmiştir. Şekil 4.8’de kaliteli kesime ilişkin referans olması amacıyla yapılan ölçüm kaydedilmiştir. Kararlı sinyal seviyeleri VIS spektrumunda maksimum $2,6 \times 10^4$ seviyesine ulaşırken zayıf kesimde Şekil 4.9’da görüldüğü gibi $4,6 \times 10^5$ seviyelerine çıkarak yüksek tepki verdiği tespit edilmiştir. Özellikle yüksek ivmeli sinyal yükselişleri yazılım algoritmasında bozulan kesimi algılamayı kolaylaştırmakta ve bunu düşük karar süreleri (20 ms) ile gerçekleştirebilmektedir. Aşağıdaki grafiklerden de görülebileceği gibi ilgili kesim için yazılımda hem VIS hem de IR spektrum bölgesinden alınan sinyallerden faydalanmak mümkündür.

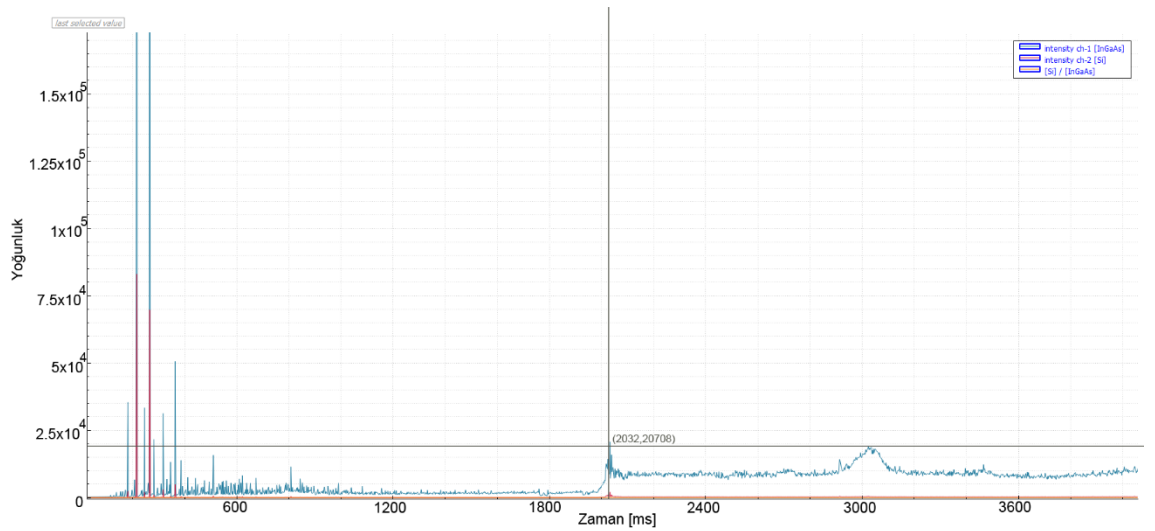


Şekil 4.8. 4 mm paslanmaz çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

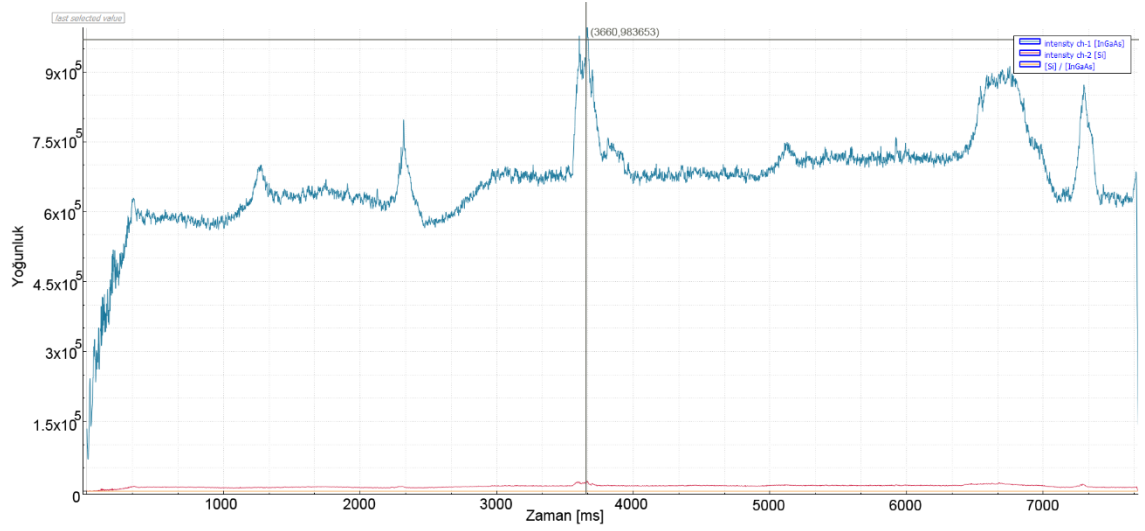


Şekil 4.9. 4 mm paslanmaz çelik malzemesinin zayıf kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

Malzeme tipinin, anlık gözlem yapılan fotodiyotlarda oluşturduğu etkiyi gözlemek için paslanmaz çelik ve alüminyum üzerinde testler yapılmıştır. Yardımcı gaz basıncının tipi, materyal kalınlığı, lazer gücü gibi etmenler değiştirilmediğinde paslanmaz çeliğin (Şekil 4.11) iki spektrum içinde alüminyumdan (Şekil 4.10) daha yüksek bir izleme sinyali değeri sergilediği görülmüştür.



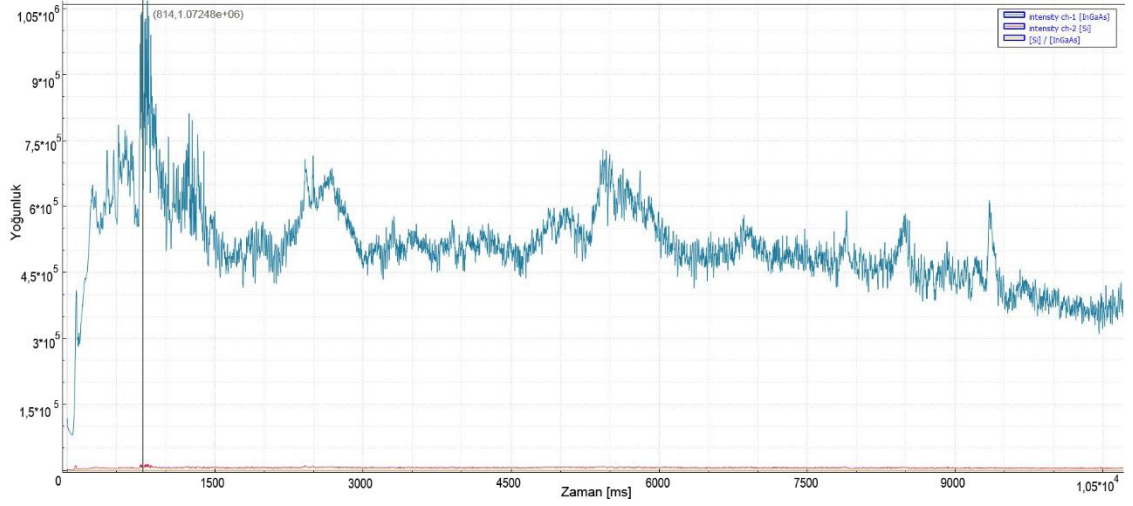
Şekil 4.10. 8 mm alüminyum malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



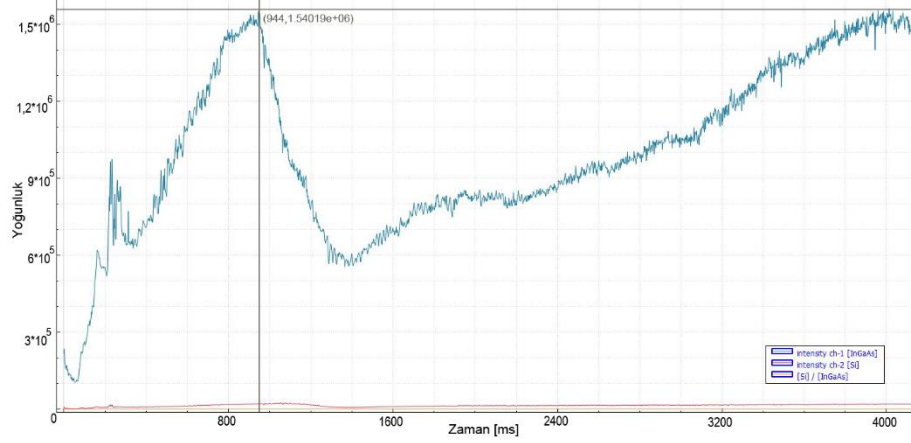
Şekil 4.11. 8 mm paslanmaz çelik malzemesinin azotlu kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

Sensörlerin elde ettiği bu veriler kesim süresinde üretilen emisyonlardır ve ilgili malzemenin ϵ emisyon katsayısı ile ilişkilidir. Testlerde aynı koşullar için paslanmaz çelik malzemesinin daha yüksek sinyal üretmesi emisyon katsayısının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ve literatür ile uyumludur (Chhabra, 2017).

Artan lazer gücünün aynı malzemeye uygulandığında oluşan etkilerini incelemek için ise daha önce 4 kW ile kesilmiş olan 20 mm yumuşak çelik malzemesi 6 kW lazer gücüyle kesilmiştir. Şekil 4.12’de görüldüğü üzere delme prosesinden sonra kaliteli kesim sırasında IR spektrumunda kararlı ve yatay bir yoğunluk gözlenmiştir. Düşük kaliteli bir süreçte ise malzeme sıcaklığının artmasıyla beraber sinyal seviyesinde kademeli bir artış kaydedilmiştir. Şekil 4.13’te gösterilen bu kayıt 4 kW ile gerçekleştirilen 20 mm ST37 testleri ile aynı karakteristiği sergilemiştir.



Şekil 4.12. 20 mm ST37 malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



Şekil 4.13. 20 mm ST37 malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

6 kW lazer güç ünitesi ile yapılan kesimlere dair kaydedilen diğer ölçümler Ek 10'da paylaşılmıştır. Çalışmaların ilerleyen aşamalarında 8 kW lazer güç kaynağı ile testler gerçekleştirilmiştir. İlgili denemelerde delme ve kesme prosesindeki hız ve yüzey kalite en optimum seviyede korunmaya çalışıldı. Kullanılan parametrelerden örnek setler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. 8kW testlerinde kullanılan delme prosesinin ilk adım parametreleri

Delme Parametresi	5 mm AL	10 mm AL	12 mm AL	12 mm SS
Nozul Mesafesi	4 mm	7 mm	7 mm	9 mm
Gaz Tipi /Basıncı	Azot / 15 Bar	Azot / 9 Bar	Azot / 9 Bar	Azot / 8 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 150 / -2 mm	F 300 / -6 mm	F 300 / -6 mm	F 150 / -7 mm
Lazer Gücü	8 kW	8 kW	8 kW	8 kW
Duty (%)	80	80	70	75
Frekans	5 kHz	5 kHz	5 kHz	5 kHz

Delme Parametresi	15 mm MS	20 mm MS	25 mm MS
Nozul Mesafesi	12 mm	13 mm	14 mm
Gaz Tipi /Basıncı	Oksijen / 0,5 Bar	Oksijen / 0,5 Bar	Oksijen / 0,5 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 200 / 9 mm	F 200 / 9,5 mm	F 150 / 3 mm
Lazer Gücü	8 kW	8 kW	8 kW
Duty (%)	30	40	40
Frekans	50 Hz	50 Hz	50 Hz

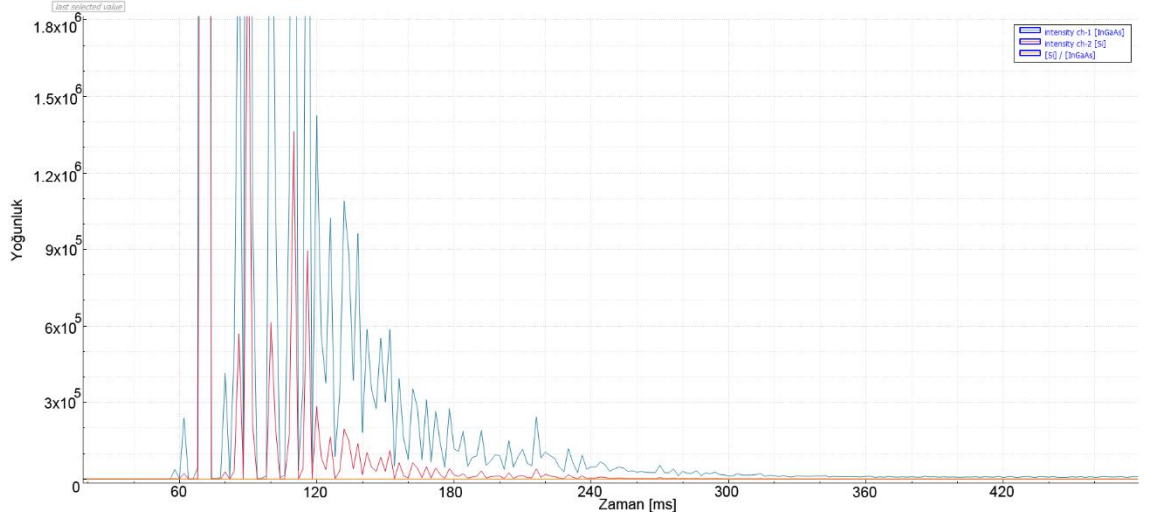
Çizelge 4.4. 8kW testlerinde kullanılan kesme prosesinin örnek parametreleri

Kesme Parametresi	5 mm AL	10 mm AL	12 mm AL	12 mm SS
Nozul Mesafesi	0,7 mm	1 mm	0,9 mm	0,7 mm
Kesim Hızı	9000 mm/dk	2900 mm/dk	1800 mm/dk	2200 mm/dk
Gaz Tipi / Basıncı	Azot / 15 Bar	Azot / 15 Bar	Azot / 15 Bar	Azot / 15 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 150 / -2 mm	F300 / -6 mm	F300 / -5,8 mm	F 150 / -7 mm
Lazer Gücü	8 kW	8 kW	8 kW	8 kW
Duty (%)	100	100	100	100
Frekans	5 kHz	5 kHz	5 kHz	5 kHz

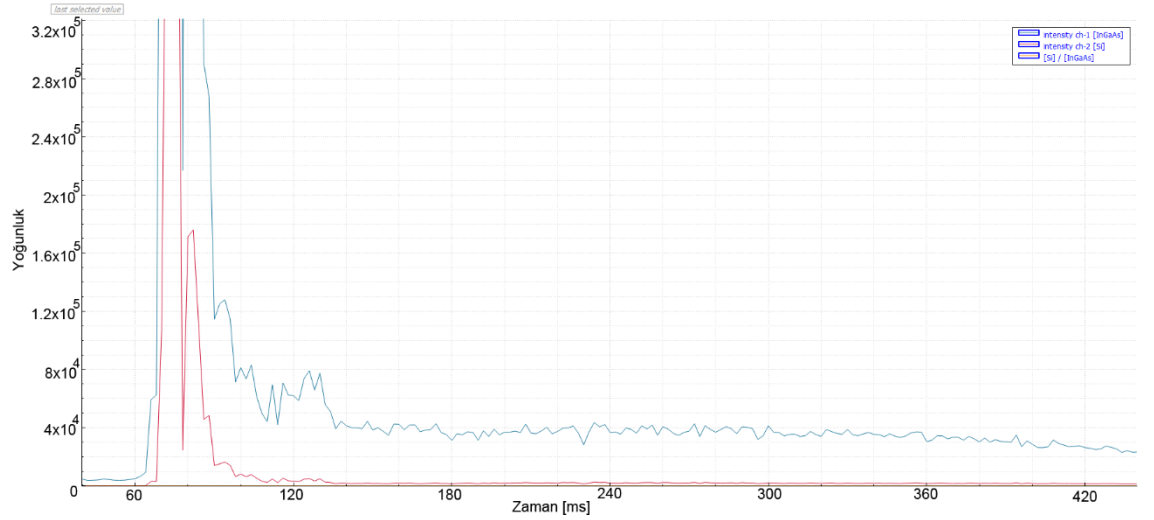
Kesme Parametresi	15 mm MS	20 mm MS	25 mm MS
Nozul Mesafesi	2 mm	2 mm	2,5 mm
Kesim Hızı	1700 mm/dk	1200 mm/dk	650 mm/dk
Gaz Tipi / Basıncı	Oksijen / 0.5 Bar	Oksijen / 0.5 Bar	Oksijen / 0.8 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 200 / 9 mm	F 200 / 9,5 mm	F 150 / 3 mm
Lazer Gücü	8 kW	8 kW	8 kW
Duty (%)	100	100	100
Frekans	5 kHz	5 kHz	5 kHz

Gerçek zamanlı analizler yaparken veri ve bulguların doğru olduğundan emin olmak oldukça önem arz etmektedir. Pratikte lazer kesimine etki eden birçok parametre ve faktör bulunmaktadır. İlgili parametreler ışığında elde edilen sensör verileri malzemelere bağlı olarak değişim göstermektedir. Elde edilen verilerin doğruluğu algoritmaların kullanımı için kritik bir etmendir. Bu sebeple birçok test gerçekleştirilmiş ve literatürde benzer konfigürasyonla ölçüm ve analiz yapmış kişilerin çalışmalarını karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlara göre görünür ışık spektrumunda 10 mm alüminyum malzemenin (Şekil 4.14) 5 mm kalınlığındaki alüminyum malzemeye (Şekil 4.15) oranla

daha yüksek yoğunluk oluşturduğu Garcia ve diğerlerinin 2020 yılında yaptığı bağımsız çalışmalarda da görülmüştür. İlgili prosesteki etkileşim ve fotodiyot çıktıları literatürde buhar bulutu (vapor plume) ile ilişkilendirilmektedir.



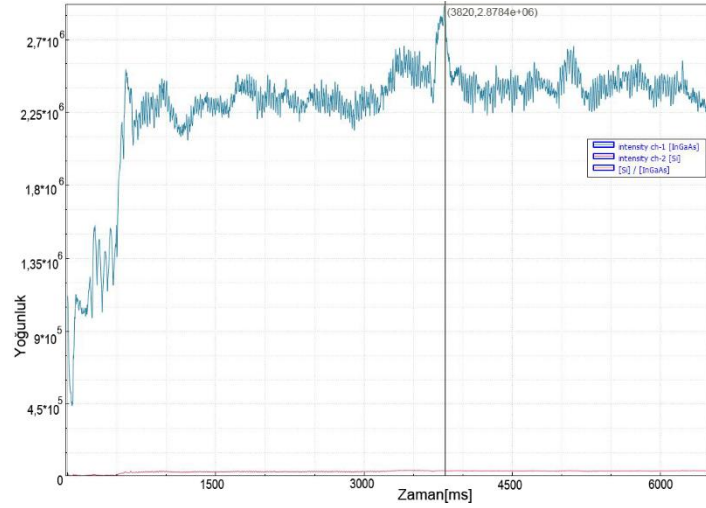
Şekil 4.14. 10 mm AL malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



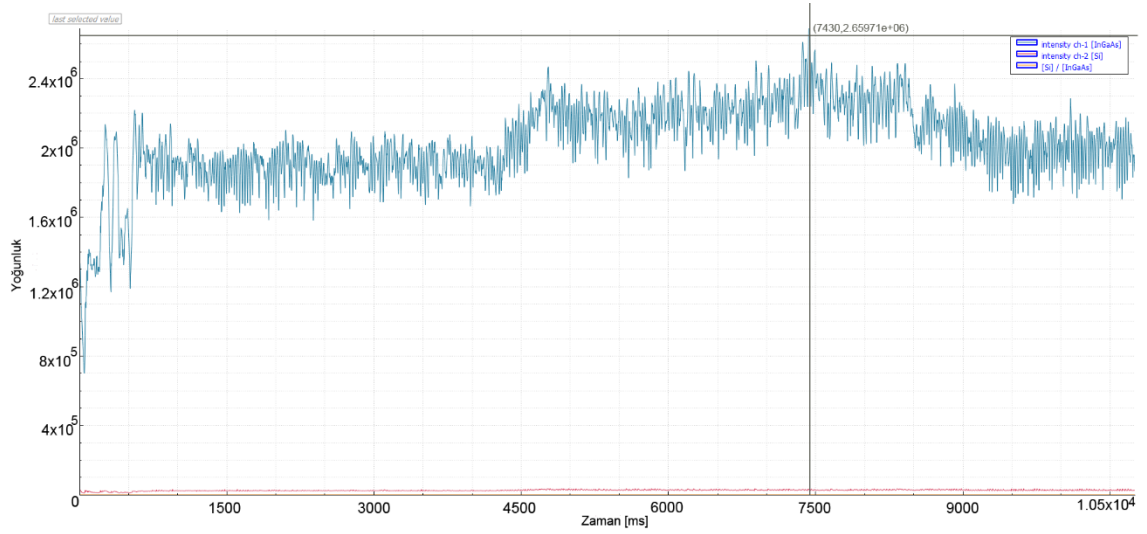
Şekil 4.15. 5 mm AL malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

Çalışmanın devamında 8 kW lazer gücünün sağladığı kesim hız avantajının yarattığı etkilerin belirginleşmesi için 15 - 20 ve 25 mm yumuşak çelik malzemeler üzerinde denemeler yapılmıştır. Bir önceki çalışmada özellikle 4 kW lazer gücü 25 mm malzemeyi kesememekte 20 mm malzemede ise yavaş kesim ile performans göstermişti. 15 mm yumuşak çelik malzemenin oksijen ile kaliteli kesimi sırasında (Şekil 4.16) 20 mm (Şekil

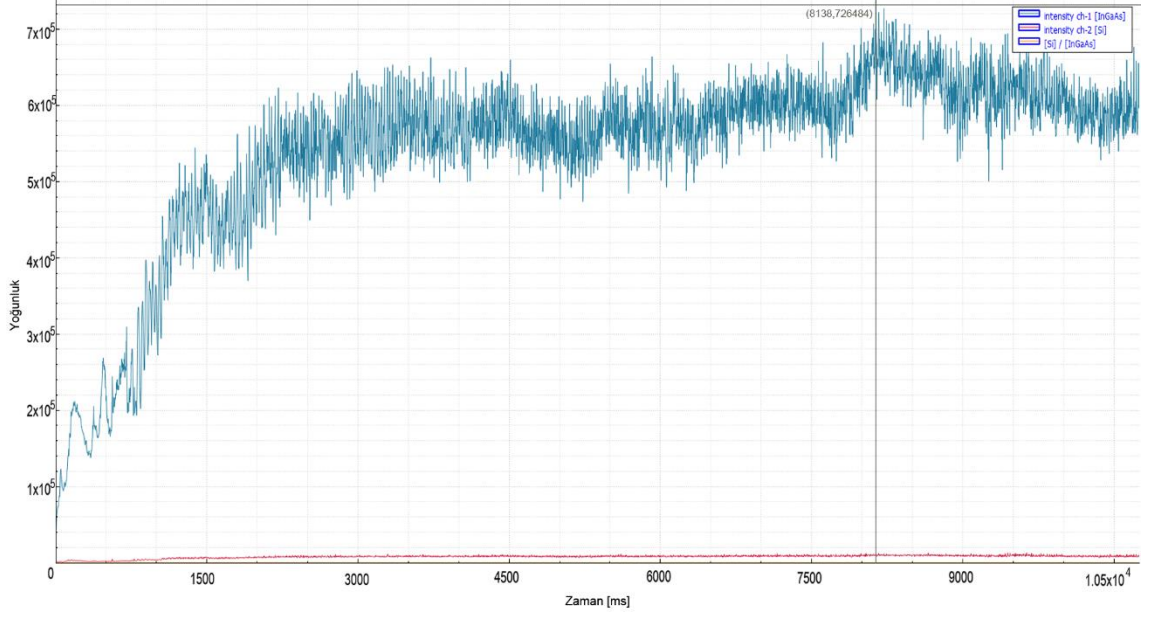
4.17) ve 25 mm (Şekil 4.18) malzemeye oranla daha yüksek bir gerilim ortaya çıkarması da diğer bağımsız çalışmalarla paralel sonuç vermektedir. Özellikle IR spektrumundaki bu olay literatürde ısı iletimi olayıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.16. 15 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri (Yalçın ve Karanfil, 2022)



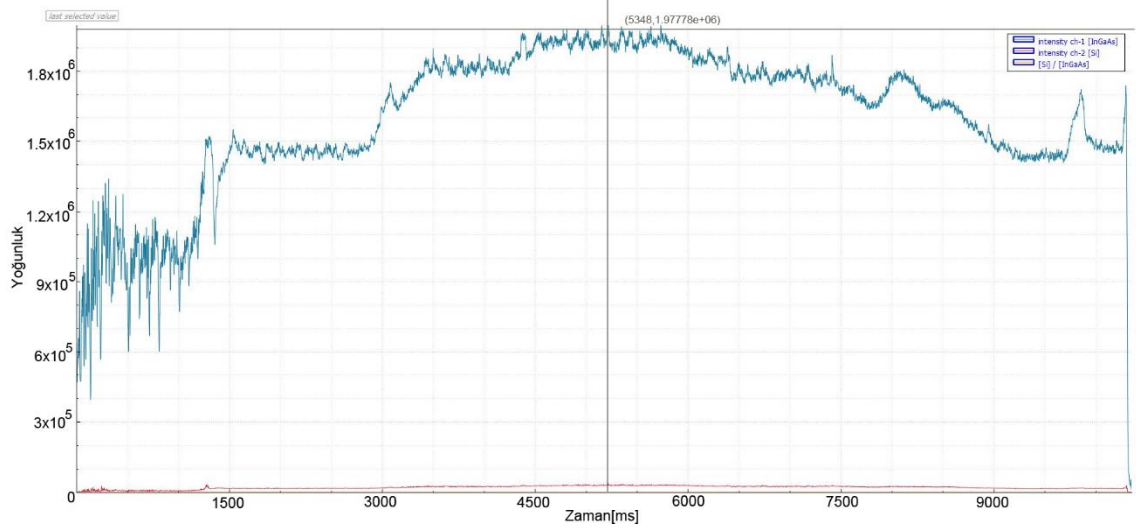
Şekil 4.17. 20 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



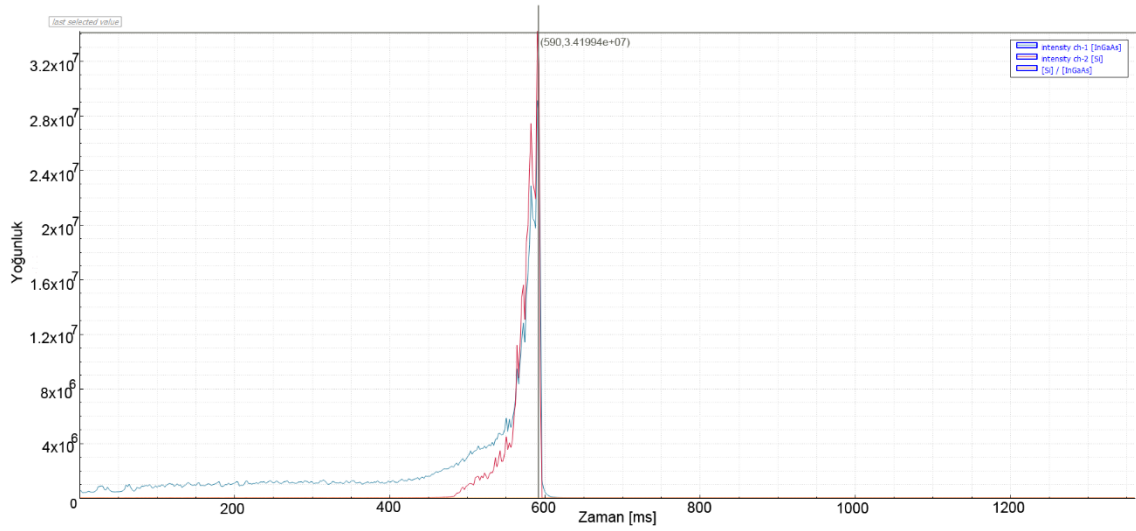
Şekil 4.18. 25 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri (Yalçın ve Karanfil, 2022)

Özellikle kalın malzemeler için delme parametresini ayarlamak önemlidir. Sonuçları analiz ederken delme işleminde geleneksel parametrelerden yararlanılmış ve tüm delme testleri başarıyla tamamlanmıştır. Yapılan denemelerde ince malzemelerde hızlı delme metotları kullanılırken kalınlık arttıkça delme süresi kademeli bir yapıya geçiş yapılmıştır. Ayrıca kesim denemeleri yapılırken sonuçların kalitesini uygulanan parametre ve iş parçasının geometrisiyle ilişkilendirmek ve kolay değerlendirme sağlamak için makine dinamikleri ile alakalı birçok parametre (eksen konum koordinatları, aktif hız, aktif ivme, akım vb.) süreç anında CNC makine içerisinde kaydedilmiştir. Bu sayede kesim yapılan tüm iş parçalarında sensörler tarafından tespit edilen kusurların tam konumunu belirlemek mümkün olmuştur.

Devam eden denemelerde malzeme değişikliğine gidilerek sistem 12 mm paslanmaz çelik için test edilmiştir. Azot yardımıyla 8kW lazer gücüyle kaliteli seviyede kesildiğinde (Şekil 4.19) sinyal yoğunluğu 1.9×10^6 mertebesinde seyrederken zayıf kesim anında sensörlerin tespit ettiği değer Şekil 4.20'de görüldüğü gibi 50 ms içerisinde pik yaparak IR spektrumunda $3,41 \times 10^7$ seviyesine anlık olarak ulaşmıştır.

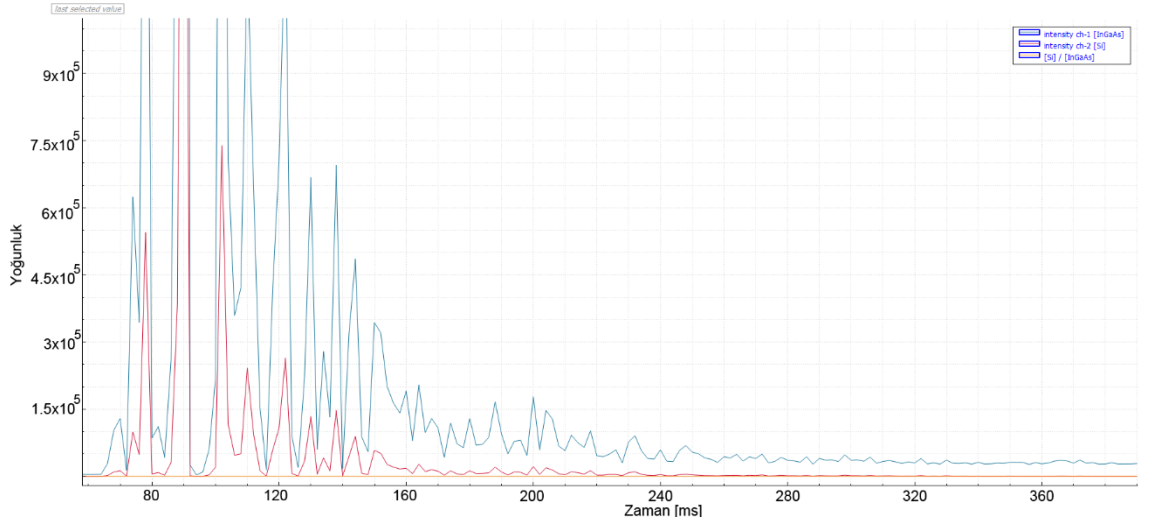


Şekil 4.19. 12 mm paslanmaz çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

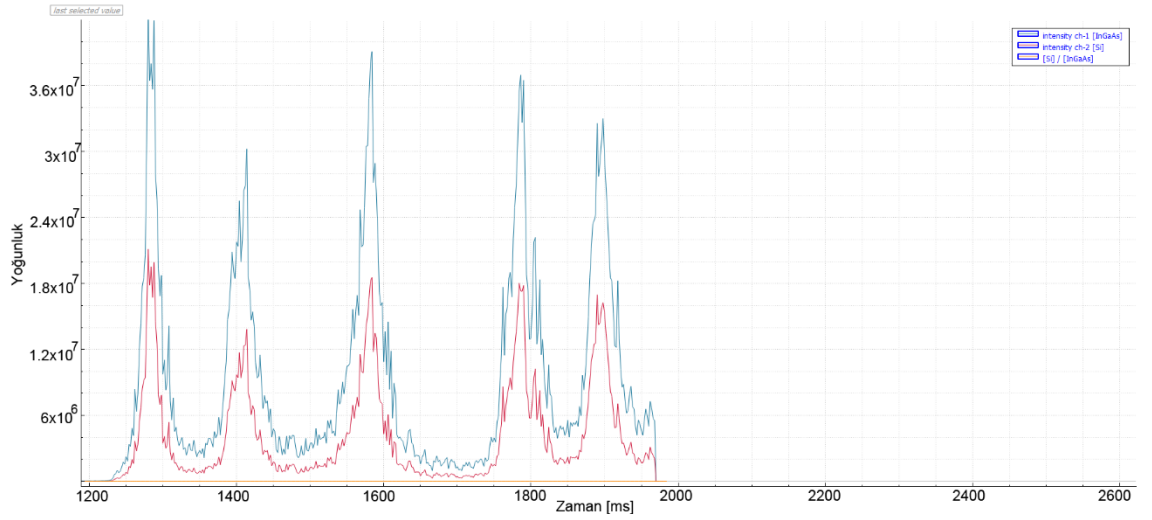


Şekil 4.20. 12 mm paslanmaz çelik malzemesinin zayıf kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

Aynı kalınlıktaki azotlu kesimde alüminyum için yapılan test çalışmalarında da durumun farklı olmadığı gözlemlenmiştir. Kaliteli kesimin giriş anında yaşanan pik dalgalanmaları hariç alınan ölçümlerde sinyallerde kararlılık tespit edilmiştir. Zayıf kesim anında ise yazılımın prosese müdahale etmemesi sağlanarak zayıf kesim anındaki sinyal dalgalanmasının minimum değeri izlenmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilen grafiklerde de görüleceği üzere sinyal yoğunluk artışı 10 katına inmemiştir. 8 kW ile yapılan diğer test ölçümleri Ek 11 ve Ek 12’de paylaşılmış ve örnek test numuneleri Ek 13’te sunulmuştur.



Şekil 4.21. 12 mm alüminyum malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



Şekil 4.22. 12 mm alüminyum malzemesinin zayıf kalitedeki kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

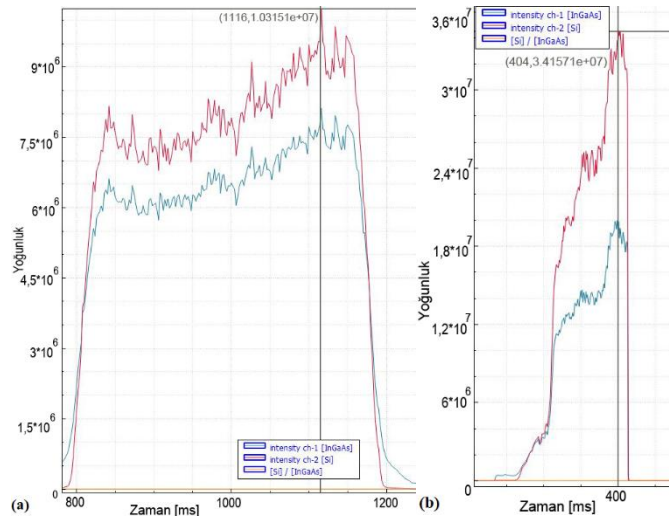
Yumuşak çelik malzemesini alışılmışın dışında azotla keserek 10 kW lazer gücünün kesim hızında oluşturacağı etkiyle birlikte gözlemlenmek için 3, 4 ve 6 mm kalınlığındaki yumuşak çelik malzemeler üzerinde testler yapılmıştır. Delme ve kesme prosesindeki hız ve kalite en optimum seviyede korunmaya çalışılarak yapılan testlerde 10 kW için kullanılan değerler Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'daki gibidir.

Çizelge 4.5. 10 kW testlerinde kullanılan delme prosesinin ilk adım parametreleri

Delme Parametresi	3 mm MS	4 mm MS	6 mm MS	20 mm AL
Nozul Mesafesi	8 mm	9 mm	9 mm	12 mm
Gaz Tipi / Basıncı	Azot / 13 Bar	Azot / 13 Bar	Azot / 13 Bar	Azot / 6 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 150 / 0,5 mm	F 150 / 0,2 mm	F150 / 0 mm	F400 / -3,5 mm
Lazer Gücü	10 kW	10 kW	10 kW	10 kW
Duty (%)	70	100	80	70
Frekans	5 kHz	5 kHz	100 Hz	5 kHz

Çizelge 4.6. 10 kW testlerinde kullanılan kesme prosesinin parametreleri

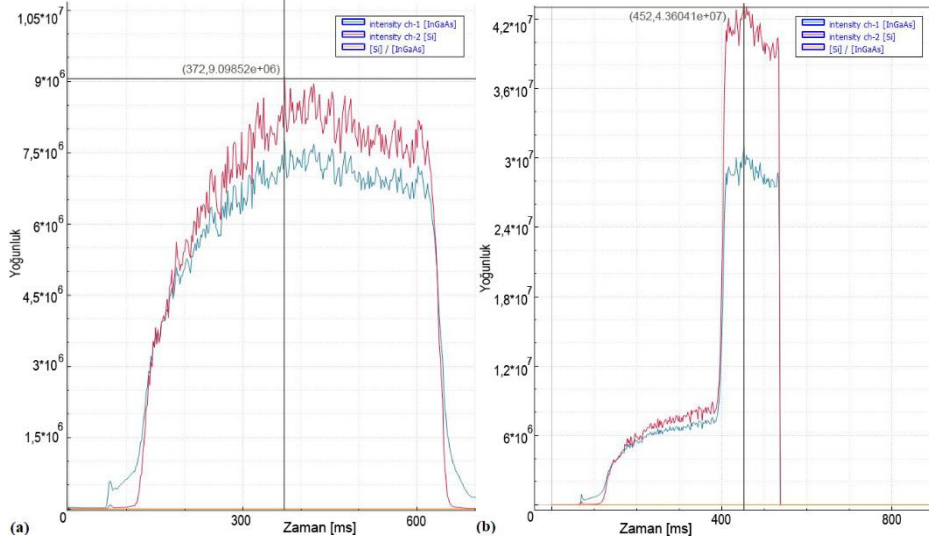
Kesme Parametresi	3 mm MS	4 mm MS	6 mm MS	20 mm AL
Nozul Mesafesi	1 mm	1,2 mm	1,2 mm	1,2 mm
Kesim Hızı	29 000 mm/dk	21 300 mm/dk	12 600 mm/dk	1 000 mm/dk
Gaz Tipi / Basıncı	Azot / 14 Bar	Azot / 13 Bar	Azot / 14 Bar	Azot / 12 Bar
Odak Tip/ Mesafe	F 150 / 0,5 mm	F 150 / 0,2 mm	F 150 / 0 mm	F 400 / -3,5 mm
Lazer Gücü	10 kW	10 kW	10 kW	10 kW
Duty (%)	100	100	100	100
Frekans	5 kHz	5 kHz	5 kHz	5 kHz



Şekil 4.23. 3 mm yumuşak çelik malzemesinin azotlu kesimleri **a)** Kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri **b)** Zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

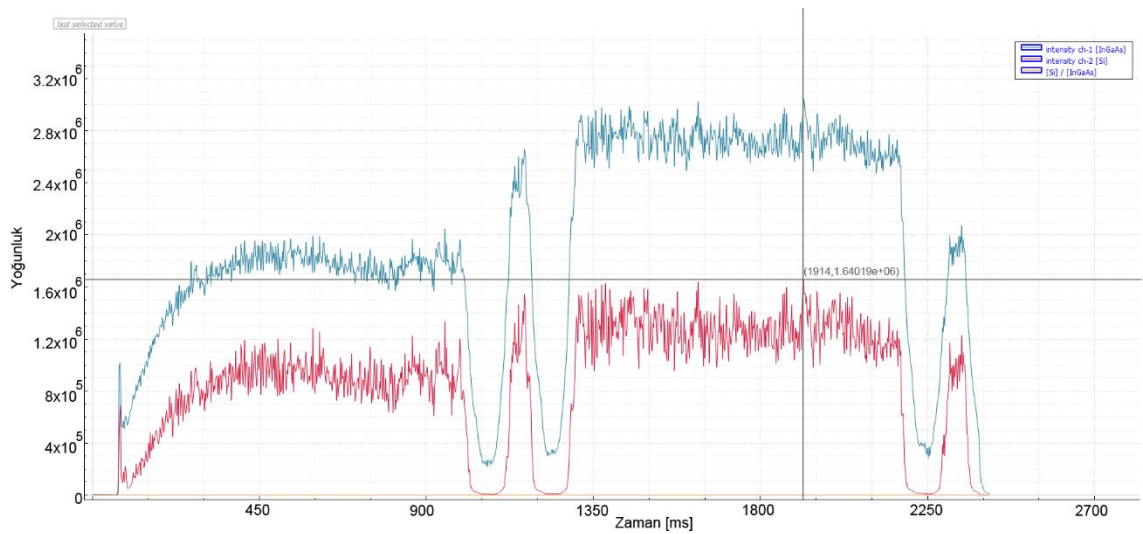
Şekil 4.23(a)'da görüldüğü üzere kesime başlama anında sinyal seviyeleri $7,5 \times 10^6$ mertebelerinde iken hızlanmanın da etkisiyle artış ($1,03 \times 10^7$) görülmektedir. Şekil 4.23(b) kesim kalitesi bozulduğunda sensörlerden elde edilen sinyal karakteristiğini göstermekte ve sinyalin tepe seviyelerinde 3,3 kat artış göze çarpmaktadır. Sinyaldeki artışın eğimi dikkate alınarak eşik seviyesi olarak $1,6 \times 10^7$ seçilmiş ve 15 ms karar süresi yeterli görülmüştür (Yalçın ve Karanfil, 2022). Bu seviye kaliteli kesim sırasında oluşan pik sinyal seviyesine yakındır ve kesim bozulmalarına karşı süreç ilerlemeden hızlı bir

algılama sağlayacaktır. Önerilen sistemin verimliliğini artırmak için seviye değerini belirlemek oldukça kritiktir.

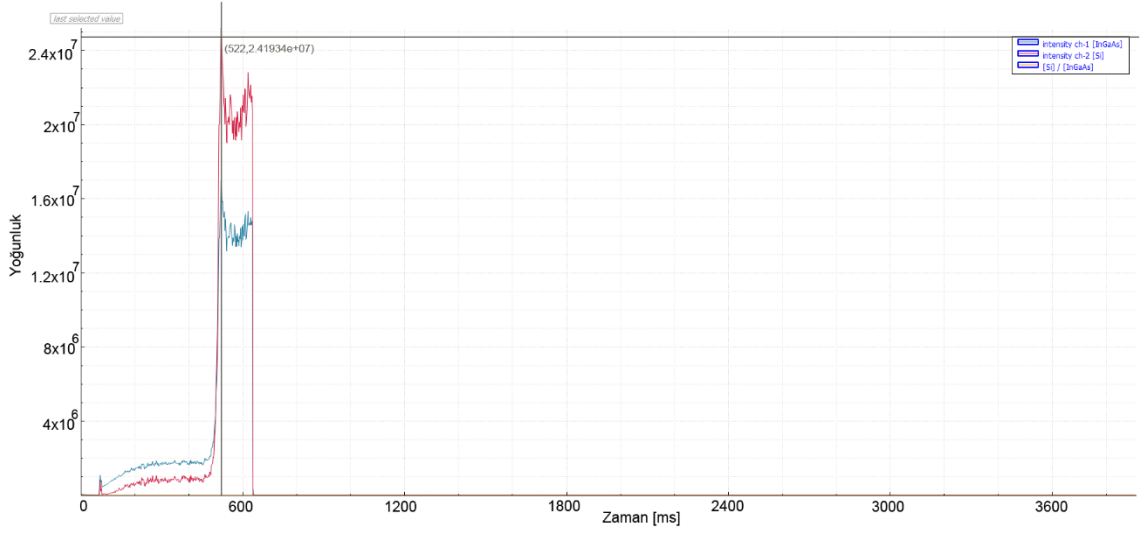


Şekil 4.24. 4 mm yumuşak çelik malzemesinin azotlu kesimleri **a)** Kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri **b)** Zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

4 mm yumuşak çelik malzemenin 10 kW nitrojen kesimlerinde proses hızının en yüksek olduğu durum için 9×10^6 pik değeri kaydedilmiştir. Kesim kalitesinin bozulduğu ikinci deneyde ise VIS bölgesinde Si fotodiyot çıkışında 4.3×10^7 düzeyinde sinyal gözlemlendi. Alınan verilere göre 1.3×10^7 eşik değeri ve 15 ms karar süresi seçilmesi uygun görülmüştür (Yalçın ve Karanfil, 2022).

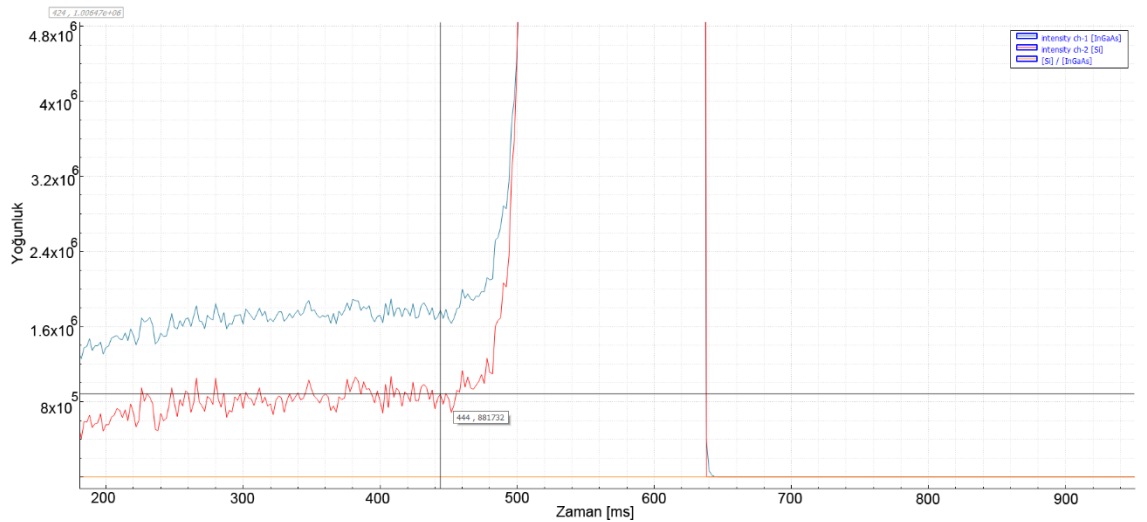


Şekil 4.25. 6 mm yumuşak çelik malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



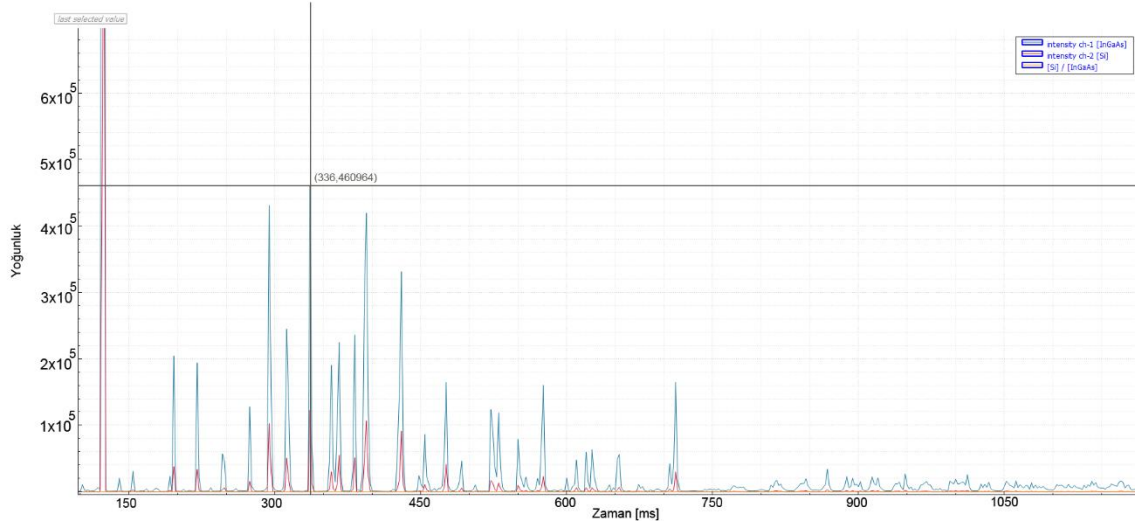
Şekil 4.26. 6 mm yumuşak çelik malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

6 mm zayıf kesime yakından bakıldığında $8,8 \times 10^5$ seviyesindeki sinyal yoğunluğunun kalitenin düşmesiyle $2,4 \times 10^7$ seviyesine geldiği ve o bölgede seyrettiği görülmektedir. 150 ms sinyal genişliği (Şekil 4.27) karar mekanizması için 20 ms süresinin yeterli olabileceğini kanıtlamıştır. Yumuşak çeliğin azotlu kesimindeki en önemli etki zayıf kesimde VIS spektrumundaki sinyal artışının IR spektrumundakinden çok daha belirgin olmasıdır. Diğer malzeme tiplerinde bu davranış biçimi tespit edilmemiştir.

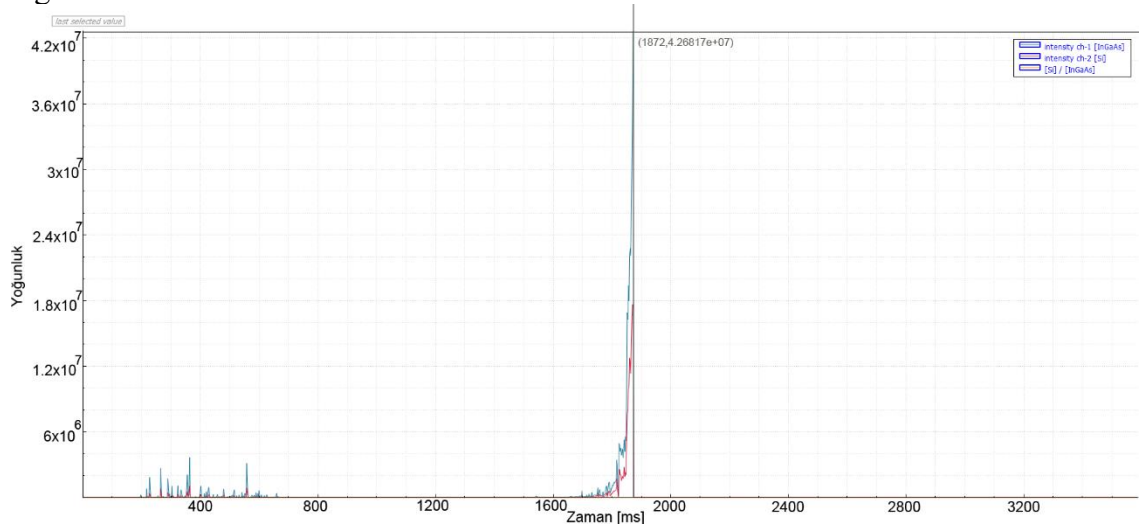


Şekil 4.27. 6 mm yumuşak çelik malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerlerinin yakın görüntüsü

20 mm Al malzemesi üzerinde yapılan testlerde delme sonrası malzeme üzerine sıçrayan cürüflar sebebiyle kesime giriş yapılan bölgede (lead in) sinyal yoğunluğu IR spektrumunda $2,6 \times 10^6$ seviyesine çıkmasına rağmen kaliteli kesim boyunca (Şekil 4.28) maksimum $4,6 \times 10^5$ değeri görülmüştür. Aynı malzemede kalitenin bozulmasının etkisiyle IR spektrumunda okunan değerler $4,2 \times 10^7$ seviyesinde pik yapmıştır (Şekil 4.29).



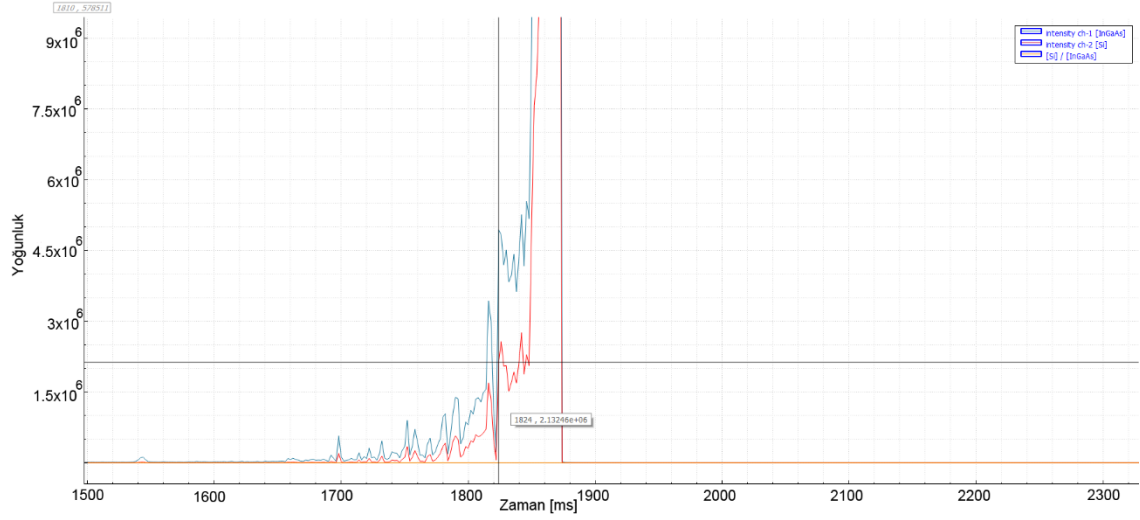
Şekil 4.28. 20 mm alüminyum malzemesinin kaliteli kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri



Şekil 4.29. 20 mm alüminyum malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerleri

Bozulan kısım yakınlştırılarak incelendiğinde (Şekil 4.30) kesim eşik değeri olarak kabul edebileceğimiz $2,13 \times 10^6$ seviyesinin zirve değerine ulaşma süresi yaklaşık 48 ms

sürmüştür. Sinyal seviyesinde eşik değerinden sonra azalış gözlemlenmediği için 20 ms karar verme süresi algoritma için yeterlidir.



Şekil 4.30. 20 mm alüminyum malzemesinin zayıf kesim anında kaydedilen ölçüm değerlerinin yakın görüntüsü

Çizelge 4.7. Önerilen Sistemin Delme Algılama Performans Tablosu

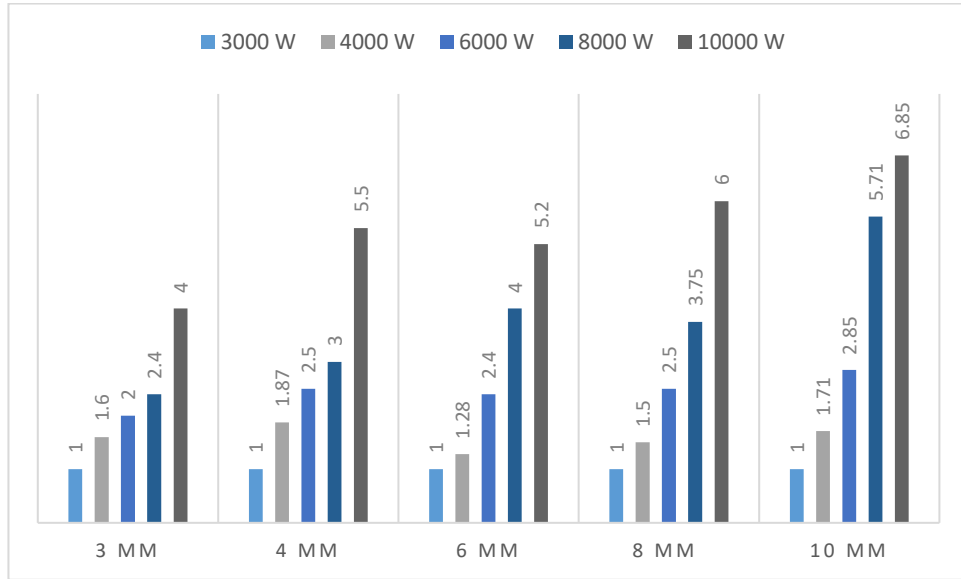
Lazer Gücü	Malzeme Türü & Kalınlık	Kullanılan Gaz Tipi	Kazanılan Ortalama Süre	Verimlilik Oranı
4 kW	8 mm SS	Azot	0.35 s	%41
	12 mm AL	Azot	0.40 s	%16
	20 mm MS	Oksijen	0.35 s	%6
6 kW	4 mm SS	Azot	0.21 s	%50
	8 mm SS	Azot	0.30 s	%33
	8 mm AL	Azot	0.22 s	%66
	20 mm MS	Oksijen	0.45 s	%8
8 kW	5 mm AL	Azot	0.22 s	%57
	10 mm AL	Azot	0.25 s	%33
	12 mm AL	Azot	0.31 s	%20
	12 mm SS	Azot	0.40 s	%25
	15 mm MS	Oksijen	0.30 s	%16
	20 mm MS	Oksijen	0.41 s	%11
10 kW	25 mm MS	Oksijen	0.50 s	%6
	3 mm MS	Azot	0.15 s	%50
	4 mm MS	Azot	0.28 s	%66
	6 mm MS	Azot	0.35 s	%53
	20 mm AL	Azot	0.30 s	%30

Çizelge 4.7’de test edilen tüm güç ve malzeme tiplerinde her bir delmeye ilişkin performans tablosu ve verimlilik yüzdesi gösterilmektedir. Süreler her bir delme prosesi için saniye cinsinden verilmiştir. Verimlilik oranı delme parametrelerinin kalitesine ve adımlarda tanımlanmış olan süre uzunluklarına göre farklılık gösterebilir. Çizelgeye göre

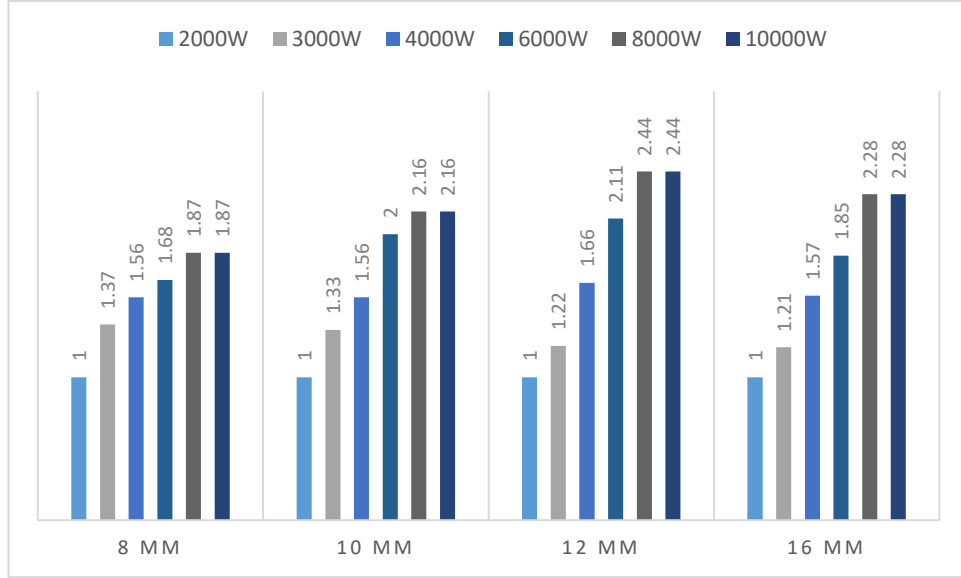
8 kW gücüyle geleneksel olarak dört adımda delinen 25 mm yumuşak çelik malzemede, önerilen yöntem sayesinde delme işlemi dördüncü adım sürecinde tespit edilerek delme başına ortalama 0,5 saniye hız elde edilmektedir. 15 mm siyah sacda ise üç adımda delik başına ortalama 0,3 saniye kazanılmıştır (Yalçın ve Karanfil, 2022). Örnek bir iş parçası kesiminin 3x1,5 m sac ve yaklaşık 2500 delik içereceği senaryoda, proses 12,5 dakika önce tamamlanacak ve buna bağlı olarak ışık açma süreleri azalacağı için lazer kesim kafası ve güç kaynağının optik bileşenlerinin ömürleri artarak enerji ve gaz tüketimleri düşecektir. Delme sayısı iş parçasına göre değiştiği için delme adedi ile toplam sağlanan verimlilik doğru orantılı olarak artacaktır.

Yapılan testlerde lazer güç artışının hız ile olan ilişkisi incelendiğinde yumuşak çelik malzemesinin azotlu kesiminde gücün hıza olan etkisi Çizelge 4.8’de verilmiştir. Kalınlık arttıkça gücün etkisiyle hızdaki artış ivmesinin arttığı göze çarpmaktadır.

Çizelge 4.8. Azotlu yumuşak çelik kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi



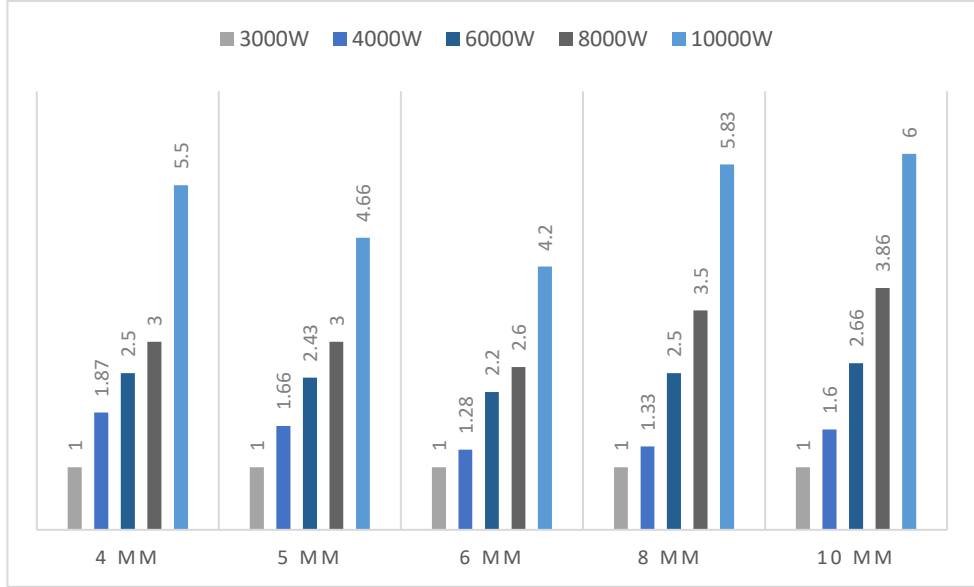
Çizelge 4.9. Oksijenli yumuşak çelik kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi



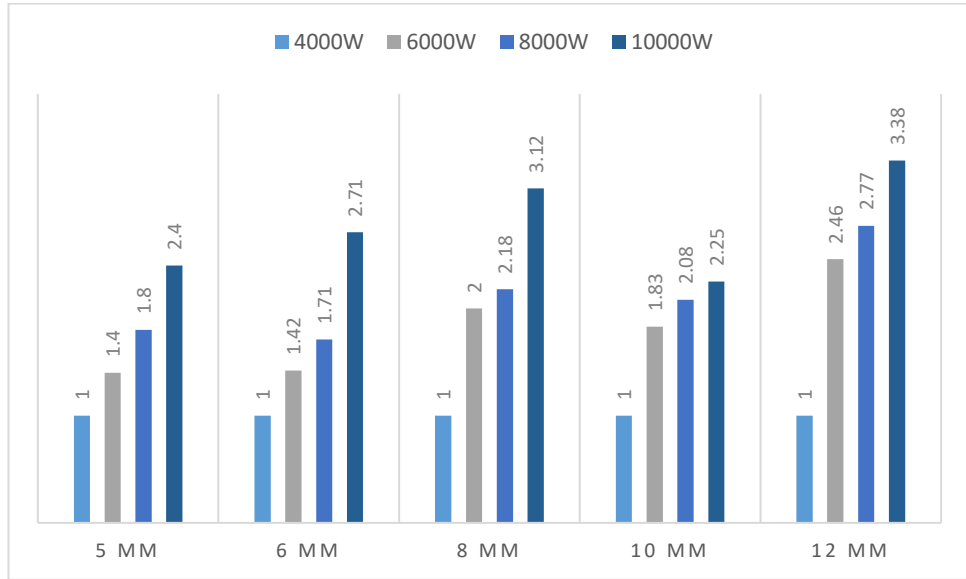
Aynı malzemenin oksijenli kesimlerinde ise uygulanan lazer gücü 5 kat artmasına rağmen hızdaki değişim 2,4 kat artmaktadır (Çizelge 4.9). Paslanmaz çelik malzemesinin kesiminde gücün hıza olan etkisi Çizelge 4.10’da verilmiştir. Aynı malzeme ve kalınlıklarda hızın artış oranı gücün artış oranından fazla olmaktadır. Alüminyum malzemesinde ise malzeme kalınlığı arttıkça gücün etkisi belirgin oranda artmaktadır (bkz. Çizelge 4.11). Oldukça yansıtıcı bir malzeme olduğundan kesim kalitesi dolayısıyla seçilen hız değeri önem arz etmektedir.

Malzemelerin işlenmesi sırasında kesme hızı önemli ölçüde düşürüldüğünde, ısı girdisi çok büyük olur ve pürüzlülüğü önemli ölçüde artıran yanma kusurları oluşmaya başlar. Bu sebeple kötü kesimlerde müdahale sırasındaki hız düşümleri malzemelere göre değişiklik göstermelidir. Ayrıca kesimlerde bozulmalara sebep olan bir başka etken ısınan optikler sebebiyle odağın kaymasıdır. Bozulma anında bu sıcaklıklar kontrol edilerek odak pozisyonunda minör değişimler uygulamak kesim kalitesini artırabilmektedir.

Çizelge 4.10. Paslanmaz çelik kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi



Çizelge 4.11. Alüminyum kesimlerinde hız katsayısının güce göre değişimi



5. SONUÇ

Fiber lazer kesim teknolojisinde çeşitli parametreler/değişkenler (malzeme, lazer gücü, gaz tipi/basınç, kesme hızı, odak vb. gibi) işlenen metal boyunca kesimi kontrol etmek ve yüksek kaliteli bir yüzey kenarı elde etmek için kullanılır. Ancak kontrol edilemeyen bazı çevresel faktörler ve malzeme değişkenleri, prosesin kalitesini beklenmedik bir şekilde etkileyebilir. Bunları, malzeme özellik değişiklikleri (Farklı malzeme grupları, ön işleme, kaynaklama, cilalama, paslanma vb.), dış sıcaklık, nem ve optik fiberdeki kusurlar oluşturur. Bu durum lazer kesim işleminde her zaman tatmin edici bir sonuç sağlanmamasına, kesilmemiş malzeme parçalarına veya doğru şekilde eritilmiş ancak etkili bir şekilde boşaltılmamış istenmeyen çapak oluşumlarına sebebiyet verir. Kötü işleme sonuçları genellikle tüm sürecin bitiminden sonra fark edilir ve bu durum çok fazla malzeme tüketimine, zaman kaybına ve yüksek maliyetlere yol açar.

Metal plakaların işlenmesini etkileyen birçok faktörün varlığında, farklı malzemeleri işlemek için aynı ana parametreler kullanılamamakta ve proses anındaki olaylar insan gözünün algılayamayacağı kadar hızlı gelişmektedir. Bu nedenle prosesi izleyebilecek bir sistemin varlığı literatürde son zamanların önemli bir araştırma konusu olmuştur (Yalçın ve Karanfil, 2022). Termal modellemeler, yüksek hızlı görüntüleme teknikleri, kerf incelemeleri, optik stereoskopik mikroskop kullanımı, akustik sinyaller, IR kameraları ve fotodiyotlar bu çalışmaların öne çıkan yöntemlerini oluşturmuştur.

Bu tez çalışmasında önerilen proses izleme sistemi, üretim kalitesini iyileştirmek için üretim sürecinin durumu hakkında eyleme geçirilebilir bilgiler üretmeyi ve kullanmayı sağlamaktadır. Veri toplama (sensörler) ve bilgi yönetimi (veri işleme) arasındaki yüksek verimli bağlantı, üretim sistemi arızalarını, düşük kaliteyi veya verimsiz üretim hatalarını önlemektedir. Çalışmada InGaAs (1000 -1800 nm) ve Si (400-1100 nm) fotodiyotlarına dayalı gerçek zamanlı izleme yapabilen ve bu sensörlerle entegre çalışan algoritmalar ile durumu analiz ederek CNC makinede işleme müdahale eden bir sistem sunulmuştur. Malzeme cinsi ve kalınlığının, kullanılan gazın ve uygulanan lazer gücünün önerilen sistemin özelliklerini nasıl etkilediğini anlamak için dört farklı yüksek güçlü lazer güç ünitesi, birçok farklı malzeme tipi ve testler ile ölçümler yapılmıştır. Malzeme seçimiyle ilgili olarak endüstriyel uygulamada kullanım alanları, mekanik, fiziksel ve kimyasal

özellikler, iyi kaynaklanabilirlik ve türlerine göre çok az sayıda bilimsel makale olan çeşitler seçilmiştir. Her materyal hem kaliteli hem de düşük kalitede kesilmiştir, delme prosesinde amaç hızlı algılamak olduğu için, yalnızca kaliteli delme parametreleri kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında girdi değişkenleri olarak lazer gücü, kesme hızı, odak ve yardımcı gaz basıncı seçilirken, eritme verimliliği bir çıktı değişkeni olarak kabul edilmiştir. Ölçümlerden elde edilen verilerden çıkan sonuçlar ve tez çalışmasının literatüre olan katkısı şunlardır:

Testler sırasında kesim kalitesinin iyi olduğu durumlar için IR ve VIS spektrumlarında izlenen sinyallerin kararlı şekilde olduğu görülmüştür. Ortalama değerler kesim kalitesi kötüleştikçe artma eğilimi sergilemiştir. Bu durum fotodiyot kullanımının lazer kesim prosesini çevrimiçi izlemek için doğru bir metot olduğunu kanıtlamaktadır. Paslanmaz çelik ve alüminyum kesme proseslerinde gözlemlenen zayıf kesme tepkisinin oksijenle kesilen yumuşak çelik için gözlemlenenden çok daha büyük olduğu grafiklerle gösterilmiştir. Fakat yumuşak çeliğin azotlu kesimindeki en önemli etki, zayıf kesimde VIS spektrumundaki sinyal artışının IR spektrumundakinden çok daha belirgin olmasıdır. Diğer malzeme tiplerinde bu davranış biçimi gözlenmemiştir.

Gaz basınç tipi, kalınlık ve lazer gücü değişmeden materyal çeşitlerinin aynı spektrumda ürettikleri geri besleme sinyali değerlendirildiğinde emisyon katsayısının spektrumda oluşan sinyal ile doğrudan ilişkili olduğu saptanmıştır. Önerilen sistemde hem IR hem de VIS bölgesinde gözlem yapılmasının sağladığı etkiyle kesimler sırasında literatürde ısı iletimi ve buhar bulutu olarak tanımlanan fenomenler ölçümlerle doğrulanmıştır.

Lazer gücünün yardımcı kesim gazına bağlı olarak kesim hızına olan etkileri çizelgelerde sunulmuştur. Özellikle oksijen kullanılan lazer kesimlerinde gücün artış oranındaki değişimi, hızın artışına aynı oranda etki etmediği tespit edilmiştir. Ayrıca kaliteli kesimi sağlayan tek bir parametre seti olmadığı, belirli aralıklarda her parametre için değişim esnekliği olduğu görülmüştür.

Sistemin çalışmasında kritik bir rol oynayan eşik seviyelerinin ve karar sürelerinin belirlenme yöntemi ilgili ölçümlerle anlatılmıştır. Farklı malzeme ve kalınlıkların delinmesi ve kesilmesi üzerine yapılan ölçümler ile delme ve kesme eşiklerinin ve karar süresinin malzeme özelliklerine bağlı olarak değiştiği ortaya konulmuştur. Bu durum süreci izlemek kadar örnekleme sayısının ve sistem kararlılığının ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır. Literatürde bu kadar çeşitli parametre ve malzeme tipinin bir arada bulunduğu başka bir lazer kesim süreç izleme çalışması sunulmamıştır.

Testlerde lazer gücü ve kesim hızının arttıkça eritme verimliliğinin kademeli olarak arttığı görülmüştür. Kesme hızı minimum iken lazer gücü orta seviyede seçildiğinde erime verimliliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek güçlü fiber sistemleri için önerilen bu algoritma yapısı ve anlık izleme metodu sayesinde her delme işlemi için ortalama %6 ile %66 arasında süreç iyileştirmesi elde edilmiştir (bkz. Çizelge 4.7). Böylece literatürde kesim teknolojisinin sürecini iyileştirmeye yönelik önemli bir sonuç ortaya çıkarılmıştır.

Önerilen metot lazer kesim işlemlerinde, üretim sürecinin kalitesini sınıflandırmanın yanı sıra optimum üretim parametrelerini tanımlamaya yardımcı olmak içinde kullanılabilir. Seçilen komponent setinde marka bağımlılığı ve yazılımların farklı platformlarda geliştirilmesinde herhangi bir engel bulunmamaktadır. Literatürde süreci izleme ile ilgili farklı çözümler önerilmesine rağmen modellerin güvenilirliği sahada nadiren değerlendirilmiş ve devreye alınmıştır. Bu bakımdan tez çalışmasının gelecekteki diğer bağımsız araştırmalara destek olması beklenmektedir.

Tez çalışmasında önerilen gerçek zamanlı izleme teknolojisi delme sonunu, kaliteli ve kötü kesimi ayırt ederek doğrudan prosese müdahale edebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu özellikler ile literatürdeki diğer çalışmalardan farklı bir yaklaşım sergilemekte ve süreç anındaki gereksiz beklemlerin önüne geçerek zamandan tasarruf sağlamakta ve sacın gereksiz yere ısınmasının önüne geçerek birbirine daha yakın delikler açılmasına olanak sağlamaktadır. Zayıf kesim durumunu algıladığında sürece otomatik olarak müdahale ederek koruma camındaki olası kirlilikleri en aza indirmekte, bozulmaların ve çapakların önüne geçerek iş gücünü kaybını ve sac maliyetlerini azaltmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla literatürde şu ana kadar bahsedilen çözümlerin

hepsini kapsayan bir çalışma sunulmamıştır. Bu tez çalışmasında ise yukarıda bahsedilen tüm çözümleri kapsayan gerçek zamanlı verimliliği artıran yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda gerçek zamanlı izleme sisteminde lazer kesim kalitesinin tahmini için destek vektör regresyonu (SVR), rassal orman (RF) ve aşırı öğrenme makinesi (ELM) dahil olmak üzere üç makine öğrenimi (ML) modelinin performansının karşılaştırması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında oluşturulan veri setleri ve deneyimler hedeflenen çözümler için temel oluşturmaktadır.

Ayrıca son zamanlarda oldukça ilgi çekici bir konu olan robotik lazer kaynak işlemlerinde süreç izleme üzerine çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu çözüm ile kaynak işlemi sırasında oluşabilecek sıçrama ve gözenekler, kirlenmiş bileşenler, kaynak parametrelerindeki değişiklikler, kaynak dikişindeki sapmalar ve bağlama kusurlarının tespit edilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede yeniden işleme yapmanın önüne geçilerek verimliliğe önemli bir katkı sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Adelmann, B., Schleier, M., Neumeier, B., & Hellmann, R. (2016). Photodiode-based cutting interruption sensor for near-infrared lasers. *Applied Optics*, 55(7), 1772-1778. <https://doi.org/10.1364/AO.55.001772>
- Agrawal, G. (2007). *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press.
- Applications of optical sensing for laser cutting and drilling. (t.y.). Geliş tarihi 13 Temmuz 2022, gönderen <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?r=1&rwjcode=ao&uri=ao-41-24-4988&html=true>
- Arai, T. (2014). Generation of the striations during laser cutting of mild steel. Proceeding of JSPE Spring Meeting, 2014, 187-188. <https://doi.org/10.15764/APHY.2014.02010>
- Atakan, A. (2021). Lazer ışığının teorik ve deneysel olarak karakterizasyonu ile otomatik odak noktası belirleme. <http://acikerisim.uludag.edu.tr/jspui/handle/11452/21676>
- Nane, B., Dönmez, R., Karanfil, U. (2020). 6G İvmelenmeli Lazer Kesme Makinesi Tasarımı ve Prototip İmalatı. 4th International Congress On Engineering And Technology Management, 3, 69-74, E-ISBN: 978-605-7594-56-3.
- Balasubramaniam, V., Rajkumar, D., Ranjithkumar, P., & Narayanan, C. S. (2020). Comparative study of mechanical technologies over laser technology for drilling carbon fiber reinforced polymer materials. *INDIAN J ENG MATER SCI*, 14
- Beam quality of multimode fiber lasers using coiling technique. (2013). *Optik*, 124(1), 82-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.11.046>
- Bison, P., Ferrarini, G., & Zanon, G. (2019). Thermographic Monitoring of Laser Cutting Machine. *Proceedings*, 27(1), 28. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019027028>
- Bocksrocker, O., Berger, P., Regaard, B., Rominger, V., & Graf, T. (2017). Characterization of the melt flow direction and cut front geometry in oxygen cutting with a solid state laser. *Journal of Laser Applications*, 29, 022202. <https://doi.org/10.2351/1.4983262>
- Booth, H. (2010). Laser Processing in Industrial Solar Module Manufacturing. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 5(3), 183-191. <https://doi.org/10.2961/jlmn.2010.03.0001>
- Chang, S.-H. (2021). The development trend and academic patent technology network of laser and optical technologies. *International Journal of Innovation Science*, 14(2), 302-315. <https://doi.org/10.1108/IJIS-02-2021-0044>

- Chen, C., Gao, M., Jiang, M., & Zeng, X. (2016). Surface morphological features of fiber laser cutting of AA2219 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5), 1219-1226. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8271-z>
- Chen, S. L. (1997). In-process monitoring of the cutting front of CO2 laser cutting with off-axis optical fibre. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(10), 685-691. <https://doi.org/10.1007/BF01179067>
- Chen, Y., Chen, B., Yao, Y., Tan, C., & Feng, J. (2019). A spectroscopic method based on support vector machine and artificial neural network for fiber laser welding defects detection and classification. *NDT & E International*, 108, 102176. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102176>
- Chhabra, R. P. (2017). *CRC Handbook of Thermal Engineering Second Edition* (2. bs). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781315119717>
- Courtier, A. F., McDonnell, M., Praeger, M., Grant-Jacob, J. A., Codemard, C., Codemard, C., Harrison, P., Mills, B., & Zervas, M. (2021). Modelling of fibre laser cutting via deep learning. *Optics Express*, 29(22), 36487-36502. <https://doi.org/10.1364/OE.432741>
- Danh. (2009). English: Overview of the wavelengths of commercially available lasers. Own work. The data and its references can be found in the spreadsheet Commercial laser lines.xls (unfortunately Wikipedia does not allow uploading spreadsheets). Currently most of the data is taken from Weber's book Handbook of laser wavelengths [1], with newer data in particular for semiconductor lasers. For quasi-cw lasers (e.g. metal vapor lasers) the length of the full line gives the mean power. Uses File:Linear visible spectrum.svg ↑ Weber, Marvin J. Handbook of laser wavelengths, CRC Press, 1999. ISBN 0849335086. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Commercial_laser_lines.svg
- De Keuster, J., Duflou, J. R., & Kruth, J. P. (2007). Acoustic and Optical Monitoring of High-Power CO2 Laser Cutting. *Key Engineering Materials*, 344, 161-168. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.161>
- Decker, I., Heyn, H., Martinen, D., & Wohlfahrt, H. (1997). Process monitoring in laser beam cutting on its way to industrial application. *Lasers in Material Processing*, 3097, 29-37. <https://doi.org/10.1117/12.281094>
- Duflou, J. R., Sichani, E. F., Keuster, J. D., & Kruth, J.-P. (2009). Development of a real time monitoring and adaptive control system for laser flame cutting. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2009(1), 527-536. <https://doi.org/10.2351/1.5061606>
- Eichhorn, M. (2010). Pulsed 2 μm fiber lasers for direct and pumping applications in defence and security. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7836. <https://doi.org/10.1117/12.864430>

- Fallahi Sichani, E., De Keuster, J., Kruth, J. P., & Duflou, J. R. (2009). Monitoring of CO2 Laser Cutting of Thick Steel Plates by Means of a NIR Camera Based System. *Key Engineering Materials*, 410-411, 207-216. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.410-411.207>
- Fermann, M. E. (1998). Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses. *Optics Letters*, 23(1), 52-54. <https://doi.org/10.1364/OL.23.000052>
- Fiber Laser Machine Terminology or Key Terms You Should Know | Senfeng USA. (2021, Şubat 19). <https://www.senfenglaserusa.com/fiber-lasers/terms-vocabulary-thats-good-to-know-for-laser-machines/>
- Fieret, J., Terry, M. J., & Ward, B. A. (1986). Aerodynamic Interactions During Laser Cutting. *Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering*, 0668, 53-62. <https://doi.org/10.1117/12.938884>
- Four-wave mixing in nanosecond pulsed fiber amplifiers. (t.y.). Geliş tarihi 15 Temmuz 2022, gönderen <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-15-8-4647&id=131862>
- Francis, J., & Bian, L. (2019). Deep Learning for Distortion Prediction in Laser-Based Additive Manufacturing using Big Data. *Manufacturing Letters*, 20, 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.02.001>
- Fundamental studies on high power fiber laser cutting performance of 30 mm thick carbon steel plate | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. (t.y.). Geliş tarihi 13 Temmuz 2022, gönderen <https://ieeexplore.ieee.org/document/6020952>
- Garmendia, I., Ocaña, R., Soriano, C., & Lambarri, J. (2017). Optical monitoring of fiber laser based cutting processes for in-situ quality assurance.
- Garcia, S. M., Ramos, J., Arrizubieta, J. I., & Figueras, J. (2020). Analysis of Photodiode Monitoring in Laser Cutting. *Applied Sciences*, 10(18), 6556. <https://doi.org/10.3390/app10186556>
- Genna, S., Menna, E., Rubino, G., & Tagliaferri, V. (2020). Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. *Applied Sciences*, 10(14), 4956. <https://doi.org/10.3390/app10144956>
- Girdu, C. C., & Gheorghe, C. (2022). Simulation of Melting Efficiency in Laser Cutting of Hardox 400 Steel. *Materials*, 15(20), Art. 20. <https://doi.org/10.3390/ma15207192>
- Hao, H. J., Cheng, G. H., & Xu, J. Y. (2012). The Study of Quality Monitoring and Control for Laser Cutting Based on Pulse-Induced Acoustic Sound. *Applied Mechanics and Materials*, 182-183, 422-426. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.182-183.422>

- Hashemzadeh, M., Powell, J., & Voisey, K. T. (2014). Fibre laser piercing of mild steel – The effects of power intensity, gas type and pressure. *Optics and Lasers in Engineering*, 55, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.10.001>
- Helium–neon laser. (2023). İçinde Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Helium%E2%80%93neon_laser&oldid=1131597999#References
- Hicdurmaz, B., Temurtaş, H., Karlik, S., & Yilmaz, G. (2013). A novel method degrading the combined effect of FWM and ASE noise in WDM systems containing in-line optical amplifiers. *OPTIK*, 124(19). <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.12.071>
- High Peak Power Single-mode Amplification Using Highly Doped Double Cladding Ytterbium Phosphosilicate Fiber. (t.y.). Geliş tarihi 15 Temmuz 2022, gönderen <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=WSOF-2013-F2.19>
- IPG Laser (2022). Product name: High power fiber laser YLS-U Series. Installation, Operation and Maintenance Document. Publisher location: Germany
- Ivarson, A. (1993). On the physics and chemical thermodynamics of laser cutting. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-17662>
- Jeong, Y., Sahu, J. K., Payne, D. N., & Nilsson, J. (2004). Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Optics Express*, 12(25), 6088-6092. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.006088>
- Jorgensen, H., & Olsen, F. O. (1991). Process monitoring during CO2 laser cutting. *Gas and Metal Vapor Lasers and Applications*, 1412, 198-208. <https://doi.org/10.1117/12.43651>
- Kaebnick, H., Jeromin, A., & Mathew, P. (1998). Adaptive Control for Laser Cutting Using Striation Frequency Analysis. *CIRP Annals*, 47(1), 137-140. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62802-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62802-9)
- Karanfil, U., & Yalcin, U. (2019). Real-time monitoring of high-power fibre-laser cutting for different types of materials. *Ukrainian Journal of Physical Optics*, 20(2), 60-72. <https://doi.org/10.3116/16091833/20/2/72/2019>
- Karanfil, U., & Yalçın, U. (2016). Characteristic of laser cutting observation technology and applications. 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), 257-261.
- Kek, T., & Grum, J. (2009). Monitoring laser cut quality using acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(1), 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2008.08.006>

- Koplow, J. P., Kliner, D. A. V., & Goldberg, L. (2000). Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier. *Optics Letters*, 25(7), 442-444. <https://doi.org/10.1364/OL.25.000442>
- Kruth, J.-P., Duflou, J., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Craeghs, T., & De Keuster, J. (20070901). On-line monitoring and process control in selective laser melting and laser cutting. *Proceedings of the 5th Lane Conference, Laser Assisted Net Shape Engineering*, 1, 23-37. <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/118273>
- Kurkov, A. S., Medvedkov, O. I., Karpov, V. I., Vasiliev, S. A., Lexin, O. A., Dianov, E. M., Gur'yanov, A. N., Laptev, A. A., Umnikov, A., & Vechkanov, N. I. (1999). Photosensitive Yb-doped double-clad fiber for fiber lasers. *Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (1999)*, Paper WM4, WM4. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-1999-WM4>
- Kusuma, A. I., & Huang, Y.-M. (2022). Performance comparison of machine learning models for kerf width prediction in pulsed laser cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7), 2703-2718. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10348-3>
- Laser Focus – Pulse Laser Systems. (t.y.). Geliş tarihi 12 Şubat 2023, gönderen <https://pulselasersystems.com.au/laser-focus/>
- Lasers & Photonics Marketplace Seminar 2020 Summary Report. (t.y.). Laser Focus World. Geliş tarihi 02 Temmuz 2022, gönderen <https://www.laserfocusworld.com>
- Lasers & Photonics Marketplace Seminar 2022 Summary Report. (t.y.). Laser Focus World. Geliş tarihi 02 Temmuz 2022, gönderen <https://www.laserfocusworld.com>
- Limpert, J., Roeser, F., Schreiber, T., & Tunnermann, A. (2006). High-power ultrafast fiber laser systems. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 12, 233-244. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2006.872729>
- M. Garcia, S., Ramos, J., Lamikiz, A., & Figueras, J. (2019). Influence of Process Parameters in Laser Piercing. *Applied Sciences*, 9(16), 3231. <https://doi.org/10.3390/app9163231>
- Majumdar, J., & Manna, I. (2003). Laser processing of materials. *Sadhana*, 28, 495-562. <https://doi.org/10.1007/BF02706446>
- Mesko, J., Zrak, A., Nigrovič, R., & Nikolić, R. (2018). The Effect of Selected Technological Parameters of Laser Cutting on the Cut Surface Roughness. *Tehnicki Vjesnik*, 25, 997-1003. <https://doi.org/10.17559/TV-20160609171348>
- Miraoui, I., Boujelbene, M., & Bayraktar, E. (2014). Analysis of Roughness and Heat Affected Zone of Steel Plates Obtained by Laser Cutting. *Advanced Materials Research*, 974, 169-173. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.974.169>

- Özgören, K., Öktem, B., Yilmaz, S., Ilday, F. Ö., & Eken, K. (2011). 83 W, 3.1 MHz, square-shaped, 1 ns-pulsed all-fiber-integrated laser for micromachining. *Optics Express*, 19(18), 17647-17652. <https://doi.org/10.1364/OE.19.017647>
- Peghini, N., Zignoli, A., Gandolfi, D., Rota, P., & Bosetti, P. (2021). Real-Time Cross-Dataset Quality Production Assessment in Industrial Laser Cutting Machines. *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges*, 490-505. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68799-1_36
- Pocorni, J., Powell, J., Deichsel, E., Frostevarg, J., & Kaplan, A. F. H. (2017). Fibre laser cutting stainless steel: Fluid dynamics and cut front morphology. *Optics & Laser Technology*, 87, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.08.002>
- Pocorni, J., Powell, J., Frostevarg, J., & Kaplan, A. (2017). Investigation of the piercing process in laser cutting of stainless steel. *Journal of Laser Applications*, 29, 022201. <https://doi.org/10.2351/1.4983260>
- Poprawe, R., & König, W. (2001). Modeling, Monitoring and Control in High Quality Laser Cutting. *CIRP Annals*, 50(1), 137-140. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62089-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62089-7)
- Precitec GmbH & Co. KG (2019). Product Name: Procutter Zoom V2.0 Operating Instructions Document. Publisher location: Germany
- Rao, B., Ittoop, M. O., & Kukreja, L. M. (2009). A power ramped pulsed mode laser piercing technique for improved CO₂ laser profile cutting. *Optics and Lasers in Engineering - OPT LASER ENG*, 47, 1108-1116. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.07.003>
- Russo Spena, P. (2017). CO₂ Laser Cutting of Hot Stamping Boron Steel Sheets. *Metals*, 7(11), 456. <https://doi.org/10.3390/met7110456>
- Schleier, M., Adelman, B., Esen, C., & Hellmann, R. (2018). Cross-Correlation-Based Algorithm for Monitoring Laser Cutting With High-Power Fiber Lasers. *IEEE Sensors Journal*, 18(4), 1585-1590. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2783761>
- Schleier, M., Adelman, B., Neumeier, B., & Hellmann, R. (2017). Burr formation detector for fiber laser cutting based on a photodiode sensor system. *Optics & Laser Technology*, 96, 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.027>
- Schleier, M., Adelman, B., Esen, C., & Hellmann, R. (2022). Image Processing Algorithm for In Situ Monitoring Fiber Laser Remote Cutting by a High-Speed Camera. *Sensors*, 22(8), Art. 8. <https://doi.org/10.3390/s22082863>
- Schuöcker, D., & Schuöcker, G. (2012). Dynamic phenomena and quality defects in laser cutting. 1464, 317-324. <https://doi.org/10.1063/1.4739885>

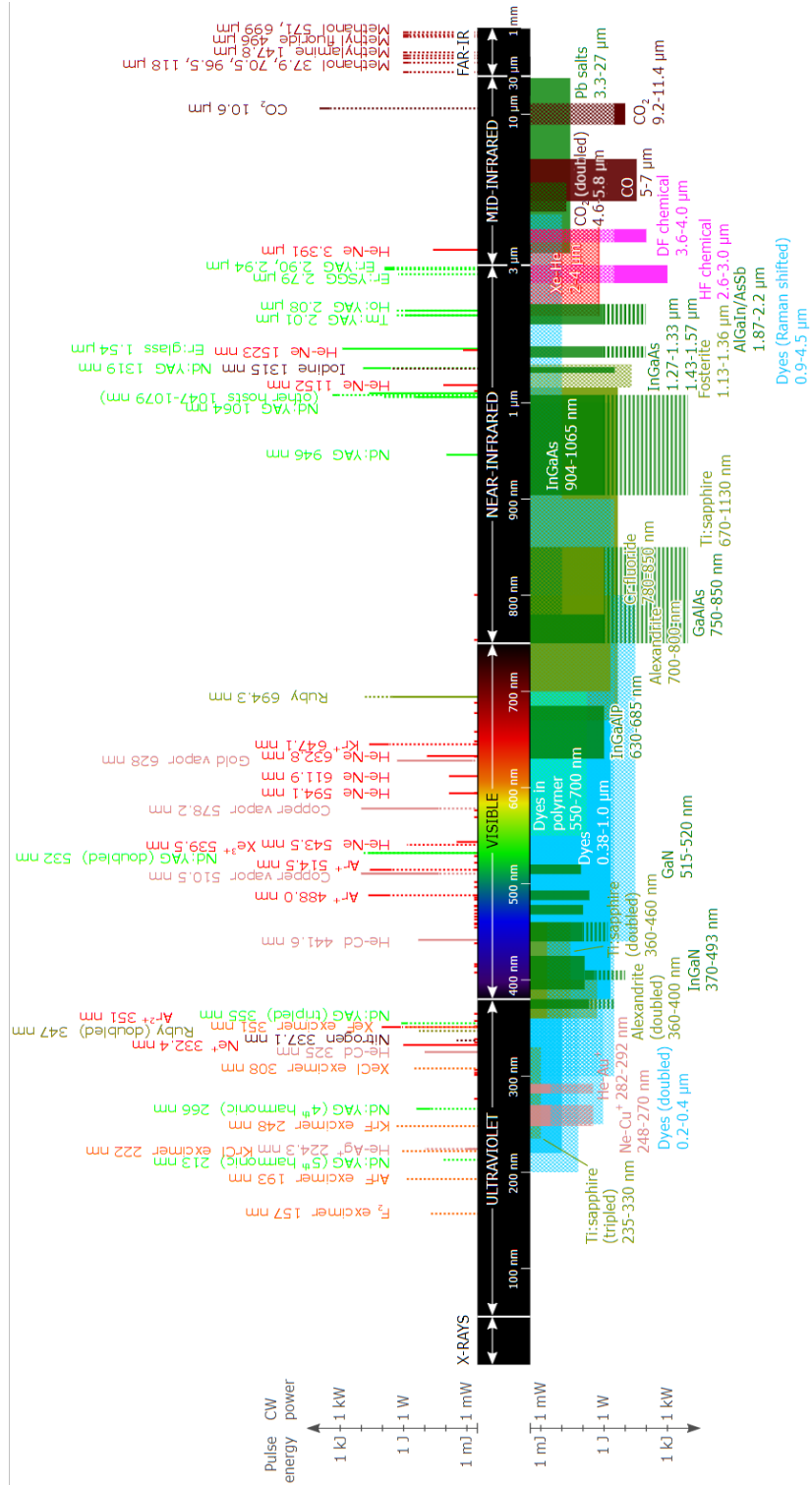
- Sforza, P., & Santacesaria, V. (1994). CO2 laser cutting: Analytical dependence of the roughness of the cut edge on the experimental parameters and process monitoring. *Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications*, 2207, 836-847. <https://doi.org/10.1117/12.184712>
- Shepeleva, L., Medres, B., Kaplan, W. D., Bamberger, M., & Weisheit, A. (2000). Laser cladding of turbine blades. *Surface and Coatings Technology*, 125(1-3), 45.
- Siegman, A. E. (1990). New developments in laser resonators. *Optical Resonators*, 1224, 2-14. <https://doi.org/10.1117/12.18425>
- Siemens AG (2016). Product name: Sinumerik 840. Equipment for Machine Tools, Catalog NC 62. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b112c5dd-ac08-4cea-9376-f3a07bdacfe9/e86060-k4462-a101-a2-7600.pdf>
- Snitzer, E., Po, H., Hakimi, F., Tumminelli, R., & McCollum, B. C. (1988). DOUBLE CLAD, OFFSET CORE Nd FIBER LASER. *Optical Fiber Sensors (1988)*, Paper PD5, PD5. <https://doi.org/10.1364/OFS.1988.PD5>
- Sobih, M., Crouse, P. L., & Li, L. (2007). Elimination of striation in laser cutting of mild steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(22), 6908-6916. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/22/009>
- Sparkes, M., & Steen, W. M. (2018). Chapter 1 - "Light" Industry: An Overview of the Impact of Lasers on Manufacturing. İçinde J. Lawrence (Ed.), *Advances in Laser Materials Processing (Second Edition)* (ss. 1-22). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00001-7>
- Sukhov, Y. T., & Matiushin, I. V. (2001). Development of information-measuring channels of the monitoring system of quality cut for technological process laser cutting of materials. *Laser-Assisted Microtechnology 2000*, 4157, 88-92. <https://doi.org/10.1117/12.413740>
- Sundar, M., Nath, A. K., Bandyopadhyay, D. K., Chaudhuri, S. P., Dey, P. K., & Misra, D. (2009). Effect of process parameters on the cutting quality in lasox cutting of mild steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(9), 865-874. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1413-9>
- Süle, P. (2013). Düşük güçlü fiber lazer diyotlu kesme sistemlerinde ışın kalite faktörünün iyileştirilmesi. <http://acikerisim.uludag.edu.tr/jspui/handle/11452/6128>
- Thermal Characteristics in the Cutting of Inconel 718 Superalloy Using CW Nd: YAG Laser—ScienceDirect. (t.y.). Geliş tarihi 13 Temmuz 2022, gönderen <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100503021060059X>
- Thieme, J. (2007). Fiber Laser – New Challenges for the Materials Processing. *Laser Technik Journal*, 4(3), 58-60. <https://doi.org/10.1002/latj.200790168>

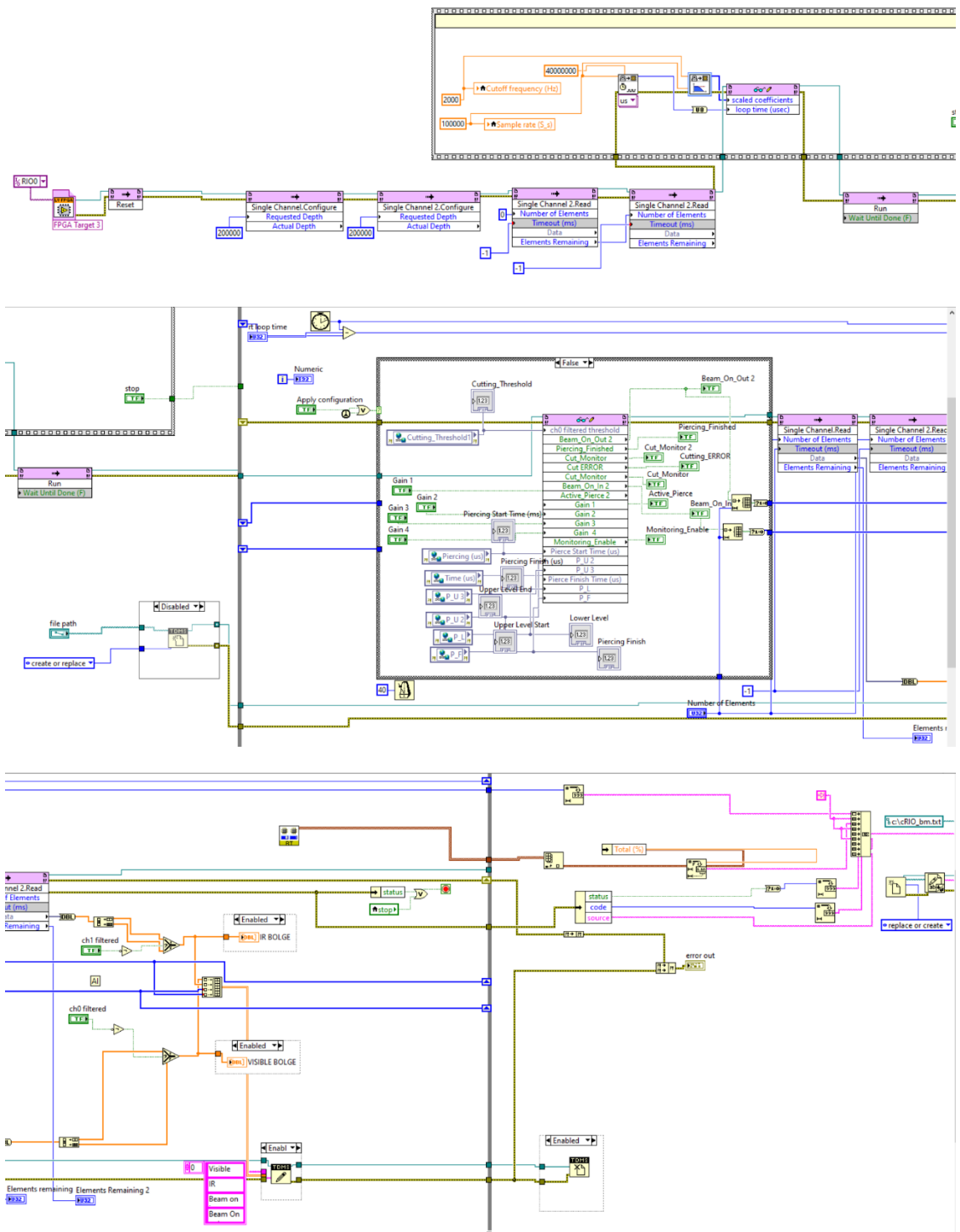
- Tirumala Rao, B., Ittoop, M. O., & Kukreja, L. M. (2009). A power ramped pulsed mode laser piercing technique for improved CO₂ laser profile cutting. *Optics and Lasers in Engineering*, 47, 1108-1116. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.07.003>
- Types of lasers—Solid state laser, Gas laser, Liquid laser & Semiconductor laser. (t.y.). Geliş tarihi 12 Şubat 2023, gönderen <https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/differenttypesoflasers.html>
- Ürgüplü, M. (t.y.). Lazer ile Kesme İşlemlerinde Kesim Kalitesine Etki Eden Parametreler. 10.
- Ward, B. G., & Spring, J. B. (2009). Brillouin gain in optical fibers with inhomogeneous acoustic velocity. *Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications*, 7195, 347-357. <https://doi.org/10.1117/12.812882>
- Wee, L. M., & Li, L. (2005). An analytical model for striation formation in laser cutting. *Applied Surface Science*, 247(1), 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.01.143>
- Wen, P., Zhang, Y., & Chen, W. (2012). Quality detection and control during laser cutting progress with coaxial visual monitoring. *Journal of Laser Applications*, 24(3), 032006. <https://doi.org/10.2351/1.4719933>
- Yalçın, U., & Karanfil, U. (2022). Developing a Real-Time Working Method That Improves Process Efficiency in High-Power Fiber Laser Systems. *Micromachines*, 13(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/mi13091552>
- Yilbas, B. S. (2004). Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 2106-2115. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.194>
- Zang, X., Jian, C., Zhu, T., Fan, Z., Wang, W., Wei, M., Li, B., Follmar Diaz, M., Ashby, P., Lu, Z., Chu, Y., Wang, Z., Ding, X., Xie, Y., Chen, J., Hohman, J. N., Sanghadasa, M., Grossman, J. C., & Lin, L. (2019). Laser-sculptured ultrathin transition metal carbide layers for energy storage and energy harvesting applications. *Nature Communications*, 10(1), 3112. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10999-z>
- Zervas, M. (2014). High power ytterbium-doped fiber lasers—Fundamentals and applications. *International Journal of Modern Physics B*, 28. <https://doi.org/10.1142/S0217979214420090>
- Zervas, M. N., & Codemard, C. A. (2014). High Power Fiber Lasers: A Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20(5), 219-241. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2321279>

EKLER

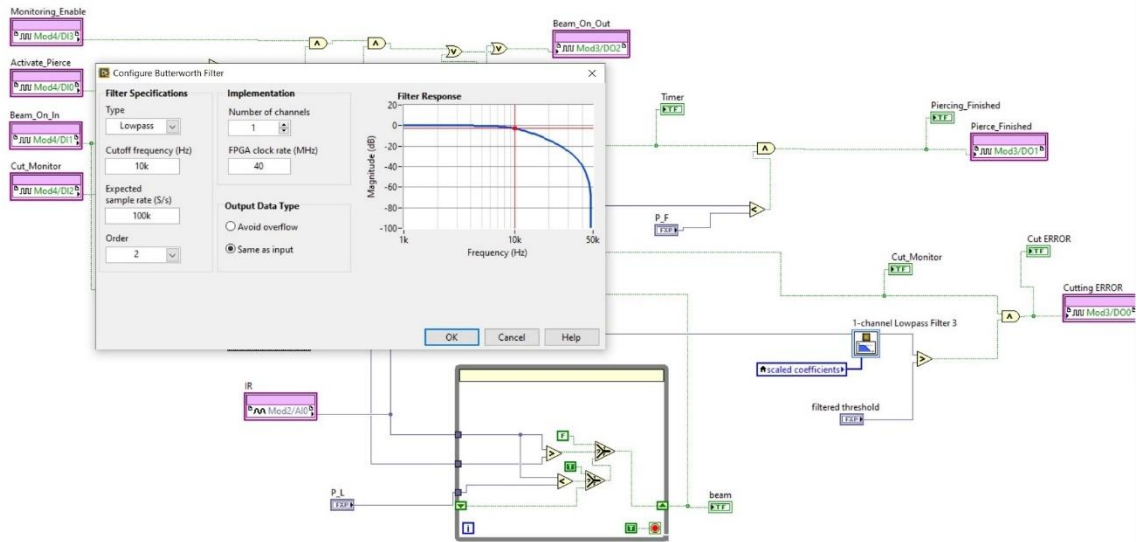
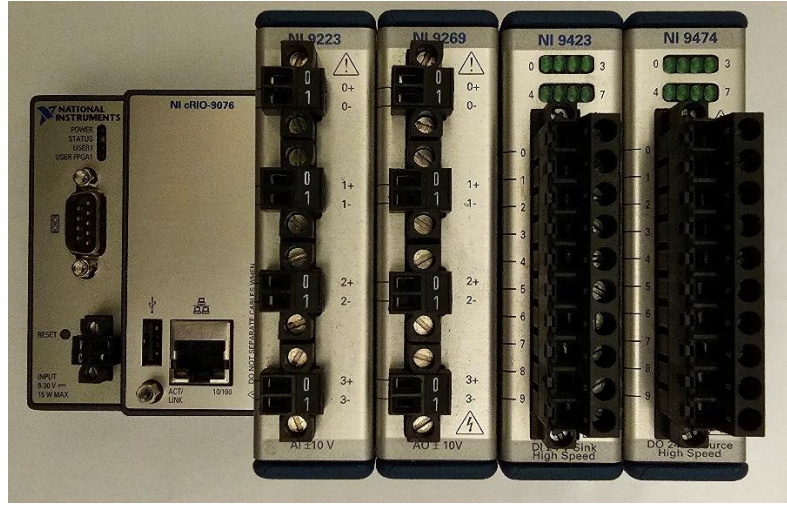
EK 1

Dünyada en çok kullanılan lazerlerin dalga boyları (Danh, 2009).





EK 3 Kullanılan CompactRIO cihazı ve Labview platformunda geliştirilen veri işleme yazılımı



EK 4

Odak Kontrolü ile İlgili PLC Blokları

```

Network 1: LENS REFERANS
A      "m_Lense_buton"
A      "m_ref"
A      "m_art1"
O(
A      "M_drives_on"
AN     "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference
FP     M 245.0
A      "I_Kafa_Hatada"
)
S      "Q_REF_GIT"
FP     M 245.1
R      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference

A      "m_reset"
R      "Q_REF_GIT"
A      "I_Pos_Ulasti"
L      S5T#50MS
SD     T 245

A      "Q_REF_GIT"
A      T 245
AN     "m_art1"
R      "Q_REF_GIT"
S      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference

Network 2: OUT. SELECT.
AN     "Q_OTO_DEGISIM"
A      "I_Kafa_Hatada"
A      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference
AN     "M_LENS_GIT"
A(
A      "M_Lens_Konf"
O      M 245.2
)
L      S5T#50MS
SE     T 246
A      T 246
=      "Q_CIKIS_SECIM"

A      "T_POS_REACH"
A      "M_LENS_GIT"
A      "Q_OTO_DEGISIM"
R      "M_LENS_GIT"
R      "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp19
S      M 200.4
JNB   _245

L      I 2096
T      "DB_SIEM_NC".A_Setval_anaOut1
=      "DB_SIEM_NC".A_OvMask_anaOut1
=      "DB_SIEM_NC".A_InMask_anaOut1
_245: NOP 0

Network 3: Odak Degisim
A      "M_LENS_GIT"
AN     "Q_CIKIS_SECIM"
AN     "Q_REF_GIT"
=      "Q_OTO_DEGISIM"

Network 4: Set Act Lens Pos
A      "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out25
FN     M 245.3
R      "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp19
A      "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out25
AN     "m_reset"
FP     M 245.4
=      L 245.0

A      L 245.0
S      "M_LENS_GIT"
S      "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp19
A      L 245.0
JNB   _246
L      0
T      MW 202

L      "DB_SIEM_NC".E_SetVal_anaOut1
ITD
DTR
L      2.764800e+000
/R
RND+
CAW
T      DB160.DBW 20
_246: NOP 0

Network 5: Title:
A(
O      "M_Koru_Cam_Temp"
O      "M_Odak_Lens_Temp"
O      "M_Kesim_Gas_Press"
)
A      "I_Kafa_Hatada"
A      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference
AN     "M_LENS_GIT"
L      S5T#200MS
SD     T 247

Network 6: Title:
A(
O      "M_Colli_Lens_Temp"
O      "M_Current_Lens_Pos"
O      M 202.5
)
A      "I_Kafa_Hatada"
A      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference
AN     "M_Lens_Konf"
AN     "M_LENS_GIT"
L      S5T#200MS
SD     T 248

Network 7: Title:
A(
O      "M_Colli_Lens_Temp"
O      "M_Current_Lens_Pos"
O      M 202.5
)
AN     T 248
O(
A      "M_Koru_Cam_Temp"
O      "M_Odak_Lens_Temp"
O      "M_Kesim_Gas_Press"
)
AN     T 247
=      M 200.3

Network 8: Title:
A      "M_Koru_Cam_Temp"
A      "I_Kafa_Hatada"
A      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference
A      T 247
=      L 245.1
A      L 245.1
S      "M_Colli_Lens_Temp"
A      L 245.1
R      "M_Koru_Cam_Temp"
A      L 245.1
R      T 247
A      L 245.1
JNB   _247
L      I 1728
T      "DB_SIEM_NC".A_Setval_anaOut1
=      "DB_SIEM_NC".A_OvMask_anaOut1
=      "DB_SIEM_NC".A_InMask_anaOut1
_247: A      "M_Colli_Lens_Temp"
A      T 248
JNB   _248
L      "DB_SIEM_NC".E_ActVal_anaIn2 //10V*27648
T      MW 210
=      M 203.1
_248: NOP 0

Network 9: Title:
A      "M_Colli_Lens_Temp"
A      "I_Kafa_Hatada"
A      "DB_INTER_EASY-MASK".Lense.reference
A      T 248
A      M 203.1
=      L 25.0
A      L 25.0
S      "M_Odak_Lens_Temp"
A      L 25.0
R      "M_Colli_Lens_Temp"
A      L 25.0
R      T 248
A      L 25.0
JNB   _249
L      I 6912
T      "DB_SIEM_NC".A_Setval_anaOut1
=      "DB_SIEM_NC".A_OvMask_anaOut1
=      "DB_SIEM_NC".A_InMask_anaOut1
_249: A      "M_Odak_Lens_Temp"
A      T 247
JNB   _250
L      "DB_SIEM_NC".E_ActVal_anaIn2 //10V*27648
T      MW 211
=      M 203.2
_250: NOP 0

```


EK 5 Güç Kontrolü ile İlgili PLC ve NC Kodları

```
Network 1: Lazer İstek
A   "I_Safety_Ok"
A   "M_CNC_OK"
=   "Q_Lazer_Istek"

A   "I_Lazer_Hatada"
A   "Q_Lazer_Acık"
L   S5T#800MS
SD  T   182
A   T   182
=   "ALARMS".A7006xx[10]    /*Lazer Hatada

Network 2: Lazer Ac
A   "m_buton_on"
FP  M   82.0
X   M   82.1
A   "I_Safety_Ok"
A   "M_CNC_OK"
=   M   82.1

A   M   82.1
A   "I_Lazer_Atandi"
A   "M_Safety_D"
=   "Q_Lazer_Acık"

Network 3: Guide Lazer
A   "m_guide"
A   "I_Lazer_Atandi"
=   "Q_Lazer_Guide"
A   "I_Lazer_Guide"
=   "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp11

Network 4: Program No
L   MB   83
T   QB   68
A   "m_reset"
JCN pgno
L   0
T   QB   68
pgno: NOP 0

Network 5: Analog Kont
L   MB   83
L   0
<>I
JC   NW51
A   "I_Lazer_Hazir"
=   "Q_Lazer_Ana"
JU   NW52
NW51: CLR
=   "Q_Lazer_Ana"
NW52: NOP 0
```

;DUTY KONTROL

N9999114 ID=114 WHENEVER \$R229<=0 DO \$A_OUTA[4]=0

N9999115 ID=115 WHENEVER \$R229>=100 DO \$A_OUTA[4]=9999

N9999116 ID=116 WHENEVER (\$R229>0) AND (\$R229<100) DO \$A_OUTA[4]=\$R229/100*10000

;FREKANS KONTROL

N9999117 ID=117 WHENEVER \$R230<=0 DO \$A_OUTA[3]=0

N9999118 ID=118 WHENEVER \$R230>= LAZER_MAKS_FREK DO \$A_OUTA[3]=9999

N9999119 ID=119 WHENEVER (\$R230>0) AND (\$R230< LAZER_MAKS_FREK) DO

\$A_OUTA[3]=\$R230/LAZER_MAKS_FREK*10000

;PWM KONTROL

N9999120 ID=120 WHENEVER (\$R229<>100) AND (\$A_OUT[3]==1) DO \$A_OUT[1]=1

N9999121 ID=121 WHENEVER (\$R229==100) OR (\$A_OUT[3]==0) DO \$A_OUT[1]=0

EK 6

Önerilen Sistem kontrolü ile ilgili PLC ve NC kodları

```

Network 1 : Prog_Bit_Secim_NW1
A(
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
A DB502.DBX 100.0
O
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
A DB502.DBX 101.0
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out3
)
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
= "Q_Prog_Bit_1"

A(
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
A DB502.DBX 100.1
O
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
A DB502.DBX 101.1
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out3
)
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
= "Q_Prog_Bit_2"

A(
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
A DB502.DBX 100.2
O
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
A DB502.DBX 101.2
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out3
)
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
= "Q_Prog_Bit_3"

Network 2 : Prog_Bit_Secim_NW2
A(
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
A DB502.DBX 100.3
O
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
A DB502.DBX 101.3
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out3
)
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
= "Q_Prog_Bit_4"

A(
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
A DB502.DBX 100.4
O
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
A DB502.DBX 101.4
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out3
)
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
= "Q_Prog_Bit_5"

A(
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
A DB502.DBX 100.5
O
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
AN "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out39
A DB502.DBX 101.5
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out3
)
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
= "Q_Prog_Bit_6"

Network 3 : Title:
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out40
L S5T#20MS
SD T 161

Network 4 : Case 0: Cutting Error
A(
L "DB_KOPPELARM".DATEN.A_DBS80
L 0
==I
)
A "I_Bad_Out_Detect"
A "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp4
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
T 161
= "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp13

Network 5 : Alarm 700800-700863 (user area 6)
A "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp4
AN "I_Bad_Out_Detect"
S "ALARMS".A7008xx[37] // Delme Algılandı
A "I_motor_overspeedtemperature"
AN "DB_SIEM_NC".A_Set_Inp4
S "ALARMS".A7008xx[39] // Gezersiz Program Seçildi
A "DB_EI".M119
O DB160.DBX 54.0
S "ALARMS".A7008xx[41] // Kesim basarırsız oldu
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out34
AN "I_Lazer_367"
S "ALARMS".A7008xx[47] // Modüller Hazır Değil
A "M_cancel_alarms"
R "ALARMS".A7008xx[37]
R "ALARMS".A7008xx[39]
R "ALARMS".A7008xx[41]
R "ALARMS".A7008xx[47]
A "DB_SIEM_NC".E_Setpoint_Out32
= "ALARMS".A7008xx[24] // Rotu kesim algılandı

```

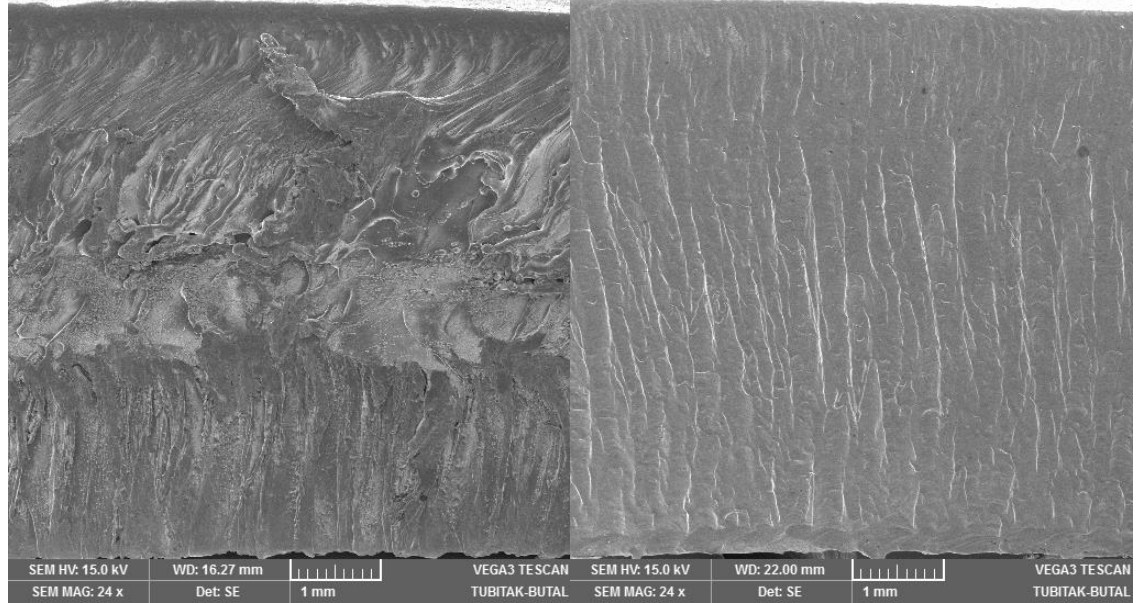
```

N9999011 ID=11 EVERY (SUREC_IZLEME==1) AND ($A_IN[4]==0) AND ($R204==1) DO $R161=1
N9999012 ID=12 EVERY (SUREC_IZLEME==1) AND ($R161==1) AND ($R204==0) DO $R161=0
N9999013 ID=13 EVERY ($R204==0) AND (ABS($A_OUTA[7]-$A_INA[1])<=100) DO $R204=1 $AC_TIMER[21]=0
$R229=0 $A_OUT[1]=1 $A_OUT[3]=1
N9999014 ID=14 WHENEVER ($AC_TIMER[21]<$R[TOI($R205)+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]) AND ($R204==1) DO
$R260=$AC_TIMER[21]/$R[TOI($R205)+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)] $R225=$R[1003+RTOI($R201-
1)*RTOI($R206)]
N9999015 ID=15 WHENEVER ($AC_TIMER[21]<$R[TOI($R205)+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]) AND ($R204==1) DO
$R255=$R[1004+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]+$R260*($R[1005+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]-
$R[1004+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)])-$R427+$R1250
N9999016 ID=16 WHENEVER ($AC_TIMER[21]<$R[TOI($R205)+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]) AND ($R204==1) DO
$R228=$R[1006+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]+$R260*($R[1007+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]-
$R[1006+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]) $R229=$R[1008+RTOI($R201-
1)*RTOI($R206)]+$R260*($R[1009+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]-$R[1008+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)])
$R230=$R[1010+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]+$R260*($R[1011+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]-
$R[1010+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)])
N9999017 ID=17 WHENEVER (($AC_TIMER[21]>=$R[TOI($R205)+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]) AND ($R204==1))
OR ((SUREC_IZLEME==1) AND ($A_IN[4]==1) AND ($R161==1) AND ($R204==1) AND ($R162==1)) DO $A_OUT[3]=0
$R204=0 $R201=$R201+1 $R427=$R[1002+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]
N9999018 ID=18 WHENEVER ($R201>=5) OR ($R[TOI($R205)+RTOI($R201-1)*RTOI($R206)]<0.01) OR ($R160==1)
DO $R160=0
N9999019 ID=19 WHENEVER ($R[TOI(1000+($R201-1)*20)]<0.01) OR ($R160==1) DO $R160=0
N9999020 ID=20 WHENEVER (SUREC_IZLEME==1) AND (R200==5) AND ($A_IN[6]==1) OR ($R160==1) DO $R160=0

```

EK 7

8mm paslanmaz çelik numunesinin SEM görüntüleri



VegaTC

File Edit SEM Tools Diagnostics Options Windows Help

SEM Scanning window [512x512] 100%

SEM HV: 15.0 kV WD: 16.27 mm SEM MAG: 22 x Det: SE 2 mm VEGA3 TESCAN TUBITAK-BUTAL

Chamber View

Nano Stage Control

System status: OK Adjustment: OK

Main Toolbar

Pad

Scan Speed

8 1.61 min

Scan Mode: WIDE FIELD

HV: 15.00 kV

Magnification: 22 x

View field: 6782 µm

Speed: 8 (320.00 µs/pix)

WD: 16.269 mm

Depth of Focus: 131.871 mm

Stigmator: 0.0 % / 0.0 %

Image Shift: 0.0 µm / -0.0 µm

Rotation: 0.00 deg

Beam Intensity: 5.00

Absorb. Curr: 2 pA

Spot Size: 860.0 nm

SEM Detectors & Mixer

Channel A: SE (52.8 % / 93.1 %)

Channel B: BSE (67.3 % / 92.5 %)

Electron Beam

HV: 15.00 kV Emission: 76 µA

Live Time: 84 h Heating: 45.0 %

Low Vacuum Mode

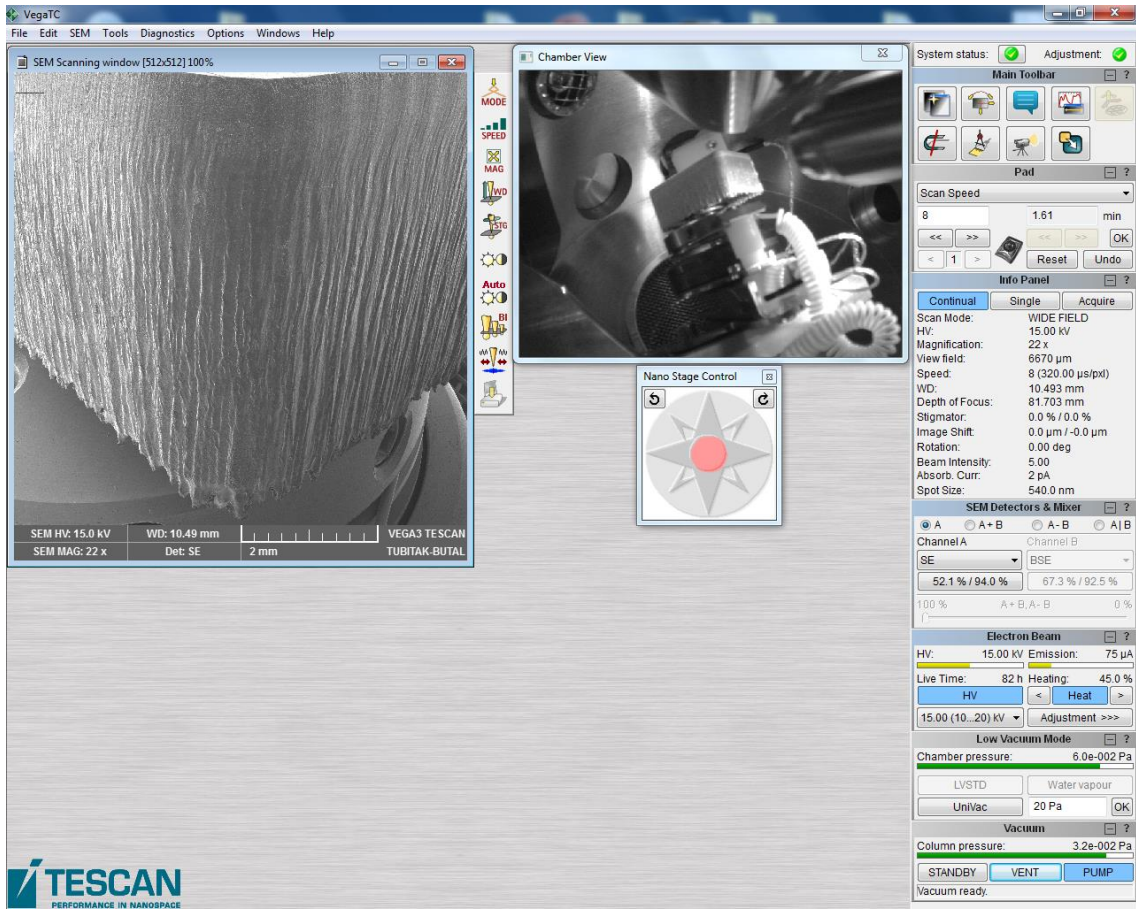
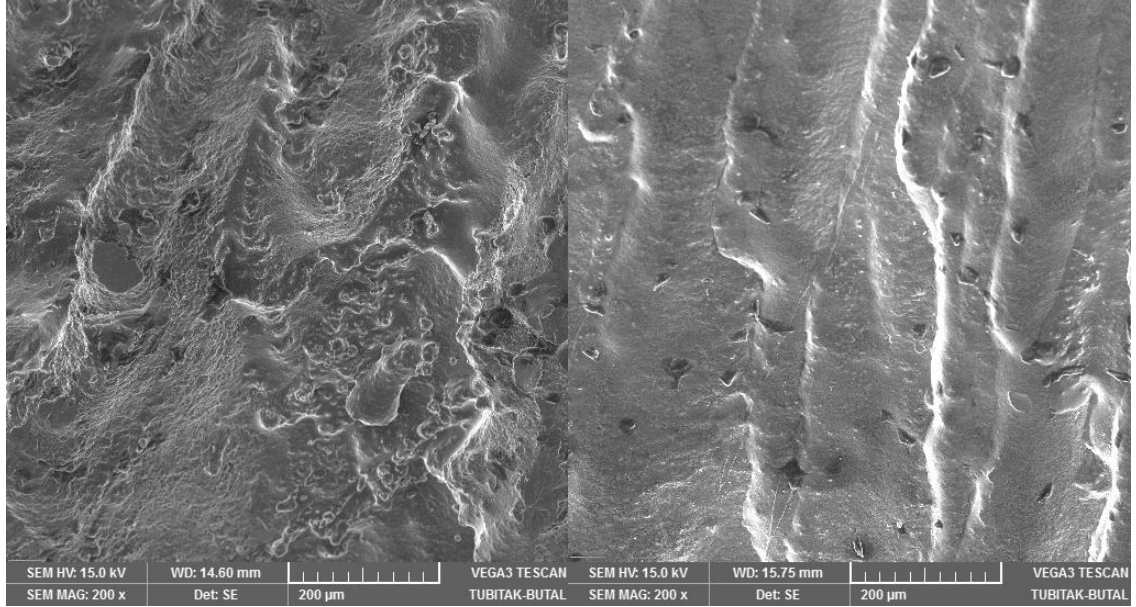
Chamber pressure: 5.7e-002 Pa

Column pressure: 3.1e-002 Pa

TESCAN PERFORMANCE IN NANOSPACE

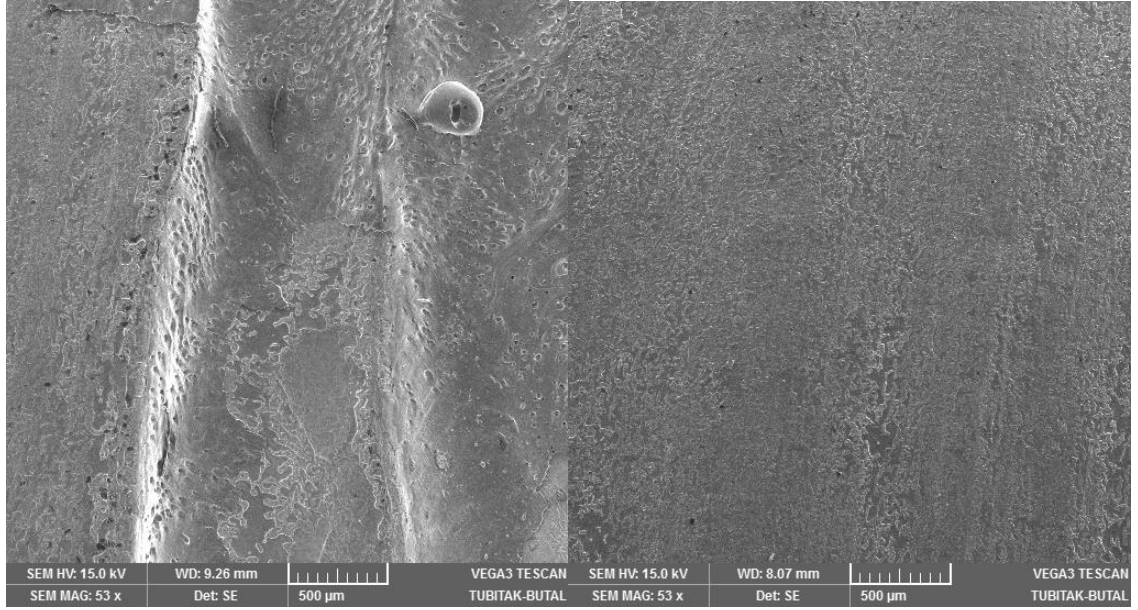
EK 8

12 mm alüminyum numunesinin SEM görüntüleri



EK 9

20 mm yumuşak çelik numunesinin SEM görüntüleri



VegaTC
File Edit SEM Tools Diagnostics Options Windows Help

SEM Scanning window [512x512] 100%

Chamber View

Nano Stage Control

System status: Adjustment:

Main Toolbar

Pad

Scan Speed: 8 1.61 min

Info Panel

Continual Single Acquire

Scan Mode: WIDE FIELD
HV: 15.00 kV
Magnification: 53 x
View field: 2835 µm
Speed: 8 (320.00 µs/pxl)
WD: 9.262 mm
Depth of Focus: 30.738 mm
Stigmator: 0.0 % / 0.0 %
Image Shift: 0.0 µm / -0.0 µm
Rotation: 0.00 deg
Beam Intensity: 5.00
Absorb. Curr: 4 pA
Spot Size: 480.0 nm

SEM Detectors & Mixer

Channel A Channel B

SE BSE

59.6 % / 91.4 % 67.3 % / 92.5 %

100 % A + B A - B 0 %

Electron Beam

HV: 15.00 kV Emission: 74 µA

Live Time: 85 h Heating: 45.0 %

HV Heat

15.00 (10...20) kV Adjustment >>>

Low Vacuum Mode

Chamber pressure: 6.2e-002 Pa

LVSTD Water vapour

UniVac 20 Pa OK

Vacuum

Column pressure: 3.1e-002 Pa

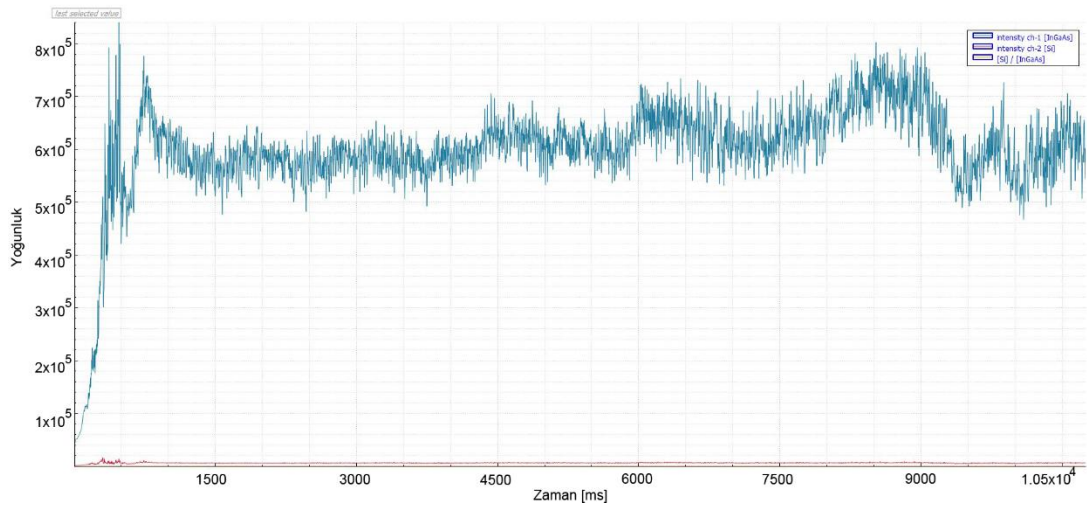
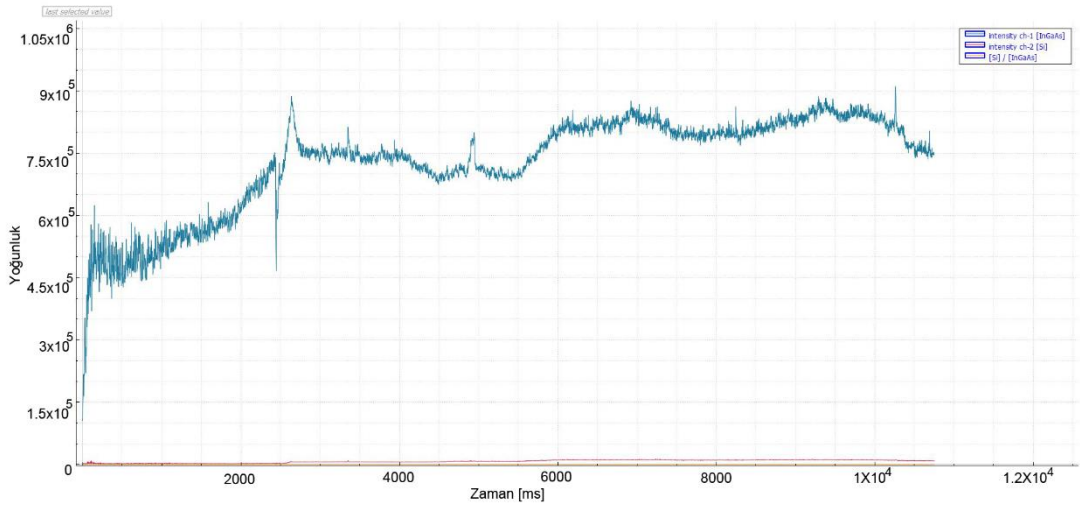
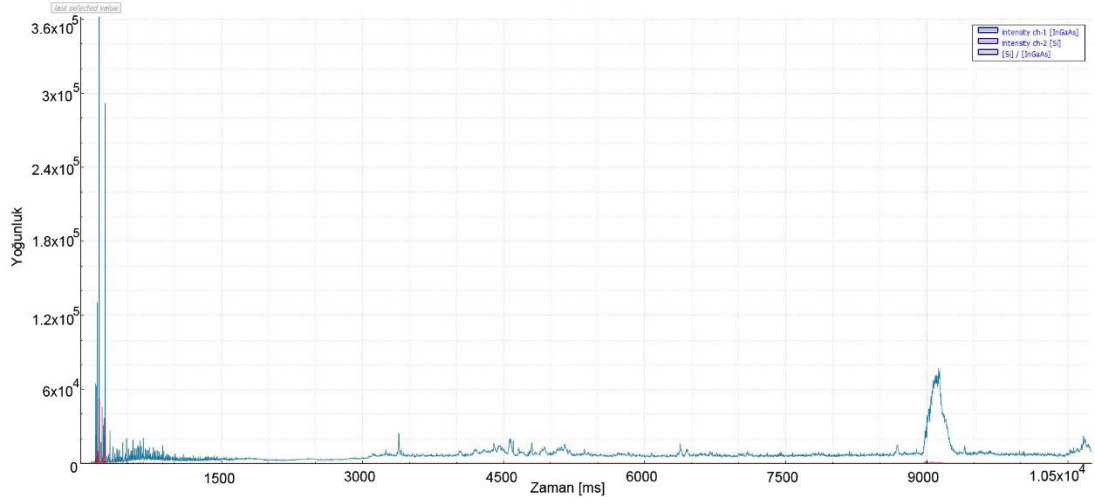
STANDBY VENT PUMP

Vacuum ready

TESCAN
PERFORMANCE IN NANOSPACE

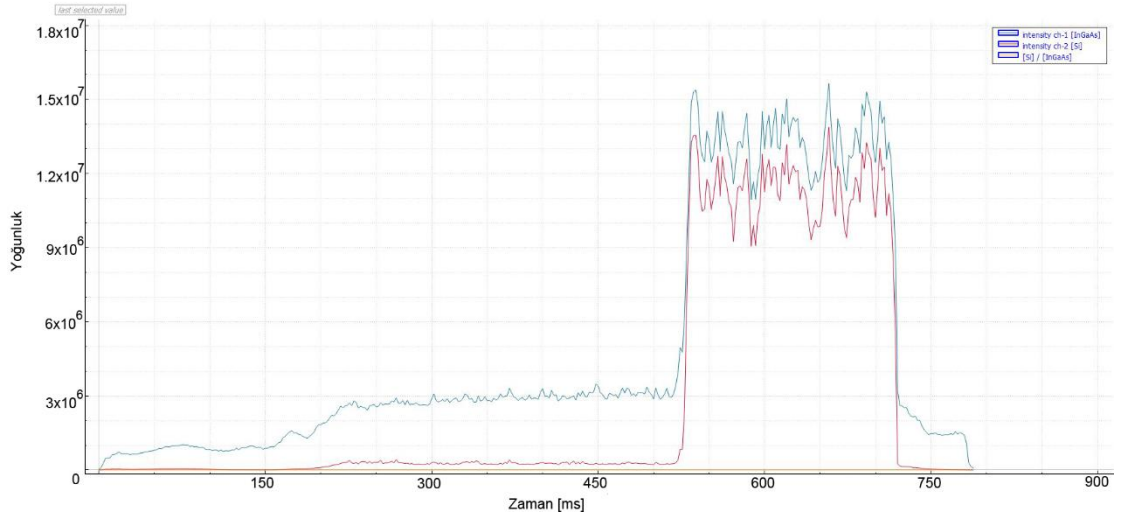
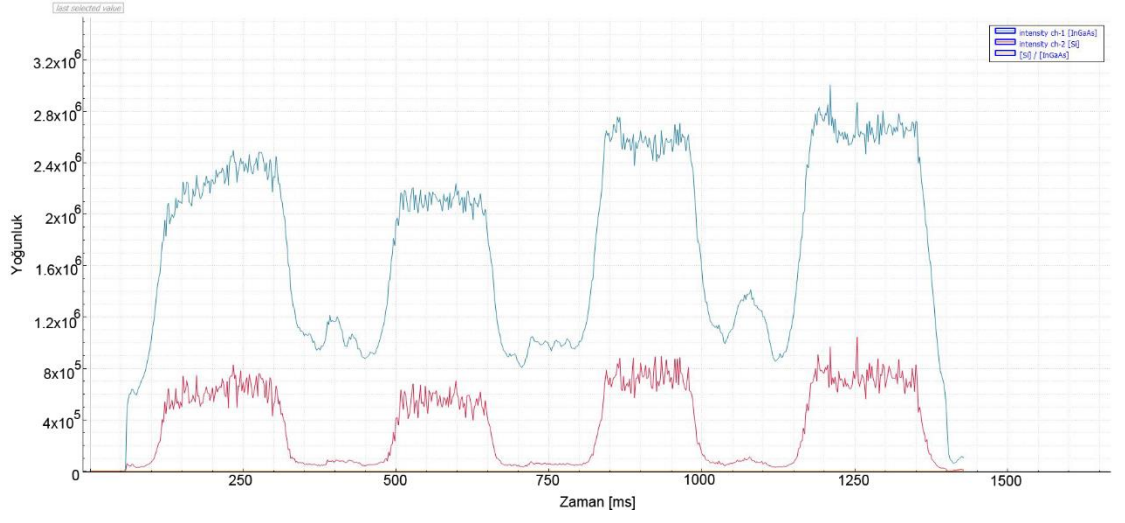
EK 10

6 kW ile kesimleri gerçekleştirilen 12mm AL, 10mm SS ve 25mm ST37 ölçüm grafikleri



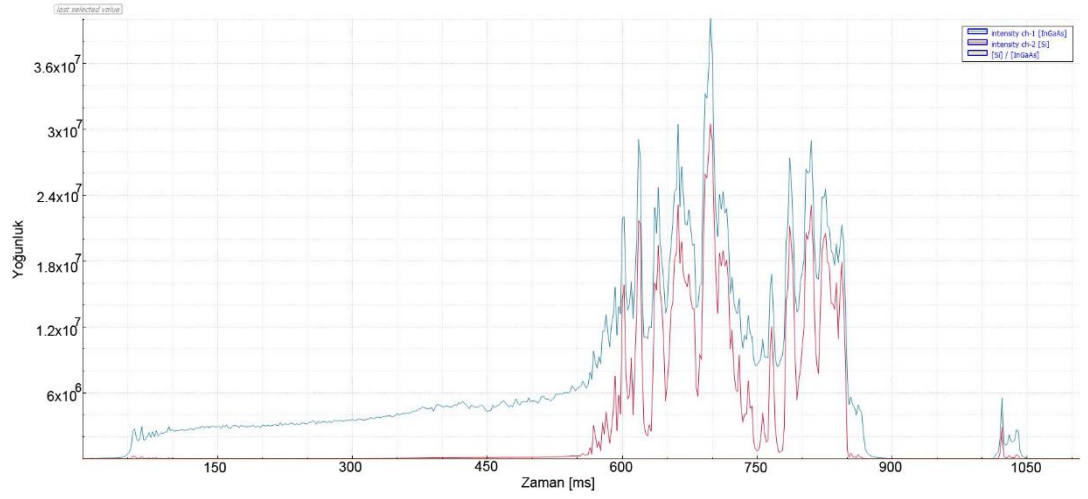
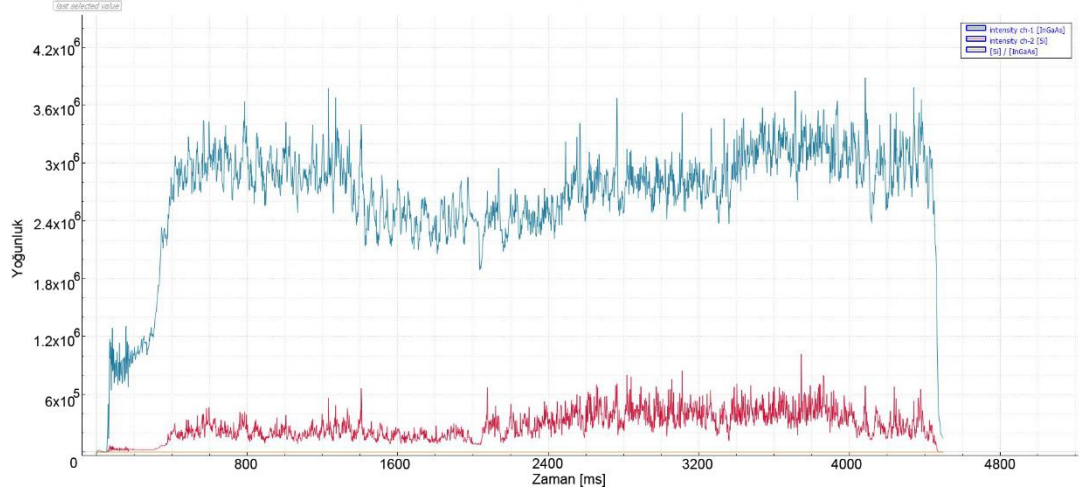
EK 11

8 kW azot kullanılarak kesilen 3 mm yumuşak çelik malzemesinin iyi ve kötü kalitedeki ölçüm grafikleri



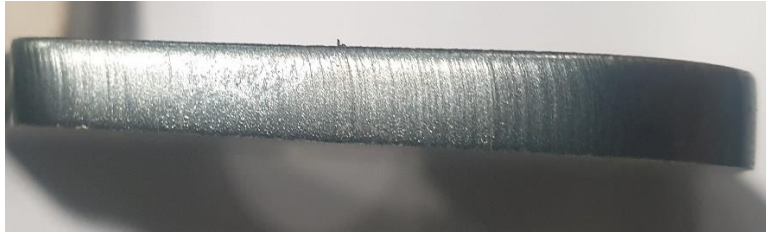
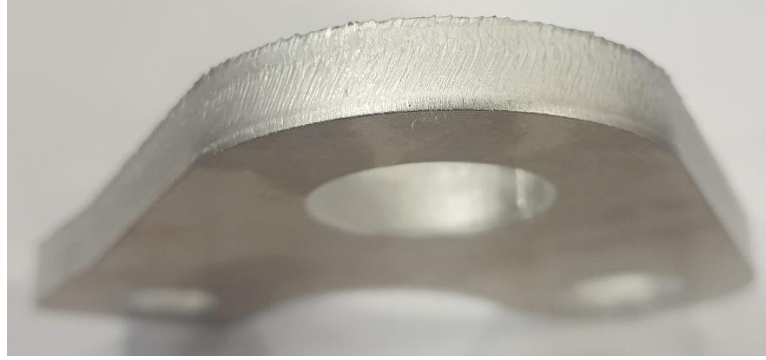
EK 12

8 kW azot kullanılarak kesilen 8 mm yumuşak çelik malzemesinin iyi ve kötü kalitedeki ölçüm grafikleri



EK 13

Kesim numunelerinin yüzey kaliteleri (Yalçın ve Karanfil, 2022)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Uğur KARANFİL
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa – 21/08/1988
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Nilüfer Fatih Lisesi
Lisans : Gaziantep Üniversitesi
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum : Durmazlar Makine A.Ş. (2013 – ...)

İletişim (e-posta) : ugurkaranfil@yahoo.com

Tez Çalışması ile İlgili Yayın ve Patentler:

Yalçın, U., & **Karanfil, U.** (2022). Developing a Real-Time Working Method That Improves Process Efficiency in High-Power Fiber Laser Systems. *Micromachines*, 13(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/mi13091552>

Karanfil, U., & Yalçın, U. (2019). Real-time monitoring of high-power fibre-laser cutting for different types of materials. *Ukrainian Journal of Physical Optics*, 20(2), 60-72. <https://doi.org/10.3116/16091833/20/2/72/2019>

Karanfil, U., & Yalçın, U. (2016). Characteristic of laser cutting observation technology and applications. 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), 257-261.

Karanfil, U., & Yılmaz, V. (2016). Işın Sıcaklık Ölçümü ile Kesim Takip Metodu (Başvuru No:2016/10473), Tescil Tarihi: 23.09.2019.

Karanfil, U., & Yılmaz, V. (2016). Işın Şiddet Ölçümü ile Kesim Takip Metodu (Başvuru No:2016/10470), Tescil Tarihi: 22.04.2019.

Tescillenmiş Diğer Patentler :

Genç, E. & **Karanfil, U.**, (2018). Lazer Kesme Makinesi İçin Bir Tespit Ünitesi (Başvuru No: 2018/20206), Tescil Tarihi: 23.11.2020.

Karanfil, U., Aydın, Ş., Yılmaz, V. (2016). Otomatik Nozul Değişirme Sistemi ve İlişkili Bir Yöntem (Başvuru No:2016/18400), Tescil Tarihi: 21.12.2022.

Kongre ve Sempozyumlar :

Karanfil, S., & **Karanfil, U.** (2020). Lazer merkezleme ve kaynak dikişi algılama çözümleri. 6th International Congress on Engineering, Architecture and Design, 8, 775-779, E-ISBN: 978-605-7594-64-8.

Nane, B., Dönmez, R., **Karanfil, U.** (2020). 6G İvmelenmeli Lazer Kesme Makinesi Tasarımı ve Prototip İmalatı. 4th International Congress On Engineering And Technology Management, 3, 69-74, E-ISBN: 978-605-7594-56-3.

Çelenk, O., **Karanfil, U.**, Lamrini, S., Neumann, J., Demir, İ., Demir, A. (2018). Fiber Laser Cutting Process Of E-Glass Composites. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18), 408, ISBN 978-605-9554-16-9.

Çelenk, O., **Karanfil, U.**, Demir, İ., Lamrini, S., Neumann, J., Demir, A. (2018). Comparison of Yb and Tm-Fiber Laser Cutting Processes of Fiber Reinforced Plastics. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering Vol:12, No:6, ISNI:0000000091950263.