

**LAZER KAYNAK YORULMA DAVRANIŞININ
MODELLEME VE TESTLER İLE İNCELENMESİ**

Furkan Sinan ERÇEL



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LAZER KAYNAK YORULMA DAVRANIŞININ MODELLEME VE TESTLER
İLE İNCELENMESİ**

Furkan Sinan ERÇEL
0000-0002-5778-7954

Prof. Dr. Necmettin KAYA
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LAZER KAYNAĞIN YORULMA DAVRANIŞININ MODELLEME VE TESTLER İLE İNCELENMESİ

Furkan Sinan ERÇEL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin KAYA

Otomotiv sektörü başta olmak üzere özellikle çelik sacların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri de kaynak yöntemidir. Birleştirilecek malzeme ya da parçanın şekline göre farklı kaynak yöntemleri uygulanmaktadır. Lazer kaynağı günümüzde geleneksel direnç kaynağı veya gazaltı kaynak yöntemleri yerine kullanılan veya kullanılmaya başlanılan, üstün özellikli bir birleştirme yöntemidir. Lazer kaynak parçaların birleşme kalitesi, mukavemeti ve proses hızı gibi özellikleriyle diğer kaynak yöntemlerine göre tercih edilme sebebi olabilmektedir. Aynı tip malzemelerin birleştirilmesinin yanında, farklı tipteki malzemelerin birleştirilmesinde de pek çok endüstride lazer kaynak kullanılmaktadır. Bu çalışmada üst üste bindirme lazer kaynak yönteminin sonlu elemanlar modellemesi ve fiziksel testler yapılarak, birleşme mukavemeti ve yorulma davranışı incelenmiştir. Otomotiv sektöründe daha çok süspansiyon sistemi ve araç şasesinde bulunan parçalarda kullanılan kompleks fazlı çelik sac malzemenin lazer kaynak yöntemi ile birleştirme mukavemeti ve yorulma performansı belirlenmiştir. Lazer kaynak yönteminin sonlu elemanlar paket programları sayesinde modellemesi yapılarak yorulma performansının fiziksel test sonuçları ile korelasyonu sağlanmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, lazer kaynak yönteminin kompleks fazlı çelik sac malzemelerde birleşme yorulma performansı hesaplanmıştır. Uygun parametrelerde yapılan lazer kaynak çalışması sonucunda kaynak yorulma grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik, ürün geliştirme çalışmalarında lazer kaynakla birleştirilmesi düşünülen parçaların yorulma hesabı çalışmalarına ışık tutacaktır.

Anahtar Kelimeler: Lazer kaynak, kaynak yorulma performansı, kompleks fazlı çelik, lazer kaynak mukavemeti

2022, ix + 58 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF LASER WELDING FATIGUE BEHAVIOR BY MODELING AND TESTS

Furkan Sinan ERÇEL

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

Supervisor: Prof. Dr. Necmettin KAYA

One of the joining methods that is widely used in the joining of steel sheets, especially in the automotive sector, is the welding method. Different welding methods are applied according to the shape of the material or part to be joined. Laser welding is a superior joining method that is used or started to be used instead of traditional resistance welding or gas welding methods. Laser welding can be the reason why parts are preferred over other welding methods with their properties such as joining quality, strength and process speed. In addition to joining the same type of materials, laser welding is used in many industries for joining different types of materials. In this study, finite element modeling and physical tests of the lap laser welding method were carried out to examine the joint strength and fatigue behavior. The joining strength and fatigue performance of the complex phase steel sheet material, which is mostly used in the parts of the suspension system and vehicle chassis in the automotive sector, were determined by laser welding method. The laser welding method was modeled with the help of finite element package programs and the fatigue performance was correlated with the physical test results. As a result of this study, the joint fatigue performance of the laser welding method in complex phase steel sheet materials was calculated. Welding fatigue graph was obtained as a result of laser welding work performed with appropriate parameters. This graphic will shed light on the fatigue calculation studies of the parts that are considered to be combined with laser welding in product development studies.

Key words: Laser welding, welding fatigue performance , complex phase steel, laser welding strength

2022, ix + 58 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana destek veren değerli hocam Prof.Dr. Necmettin KAYA'ya; çalışmalarım süresince birçok konuda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ahmet ONAYLI ve Mehtap HİDİROĞLU'na; çalışmanın gerçekleşmesi için imkan sağlayan Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş. firmasına ve çalışmalarda emeği geçen ismini sayamadığım herkese teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni her daim destekleyen, yanımda olan eşime ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme sonsuz teşekkürlerimi ederim.

Furkan Sinan ERÇEL
27/07/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	ivi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Lazer ve Lazer Işını Oluşumu	3
2.1.1. Lazer sisteminin temel elemanları	5
2.1.2. Lazer türleri.....	6
2.2. Lazer Kaynağı	9
2.2.1. Fiber lazer kaynak yöntemi	11
2.2.2. Lazer kaynağının avantaj ve dezavantajları	12
2.2.3. Lazer kaynak parametreleri.....	13
2.3. Lazer Kaynak Mekanik Özellikleri.....	16
2.4. Yorulma Dayanımı.....	18
2.4.1. Yorulma gerilmesini etkileyen faktörler	20
2.4.2. Yorulma analizi yaklaşımları	21
2.4.2.1. Gerilme-ömür (S-N) metodu.....	21
2.4.2.2. Gerilme-ömür (ϵ -N) metodu	24
2.4.2.3. Kırılma mekaniği yaklaşımı	25
2.4.3. Kaynaklı yapılarda yorulma hesaplama yaklaşımları	26
2.5. Lazer Kaynak Yorulma Dayanımı	26
2.6. Kompleks Fazlı Çelikler	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal	31
3.2. Lazer Kaynak Ünitesi ve Özellikleri.....	31
3.3. Deney Numuneleri Oluşturulması	32
3.4. Simufact Welding Modeli	34
3.5. Metalografik İnceleme ve Mikro Sertlik Ölçümü.....	35
3.5. Sonlu Elemanlar Modellemesi	37
3.5.1. Lazer kaynak modellenmesi.....	37
3.5.2. Çekme analiz modeli.....	38
3.5.3. Yorulma analiz modeli	39
3.6. Yorulma Test Düzenneği	41
4. BULGULAR	43
4.1. Kaynak Bölgesinin Mikro ve Makro Yapılarının İncelenmesi	43
4.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	46
4.3. Simufact Welding Analiz Sonucu.....	47
4.4. Çekme Analizi Sonucu.....	48
4.5. Yorulma Analizi Sonuçları	49
4.6. Yorulma Test Sonuçları	50
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	53
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
R _p	Akma dayanımı
N ₂	Azot
R _m	Çekme dayanımı
P	Fosfor
R	Gerilme Oranı
He	Helyum
C	Karbon
CO ₂	Karbondiyoksit
A ₈₀	Kopma uzaması
Cr	Krom
S	Kükürt
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Nb	Niobyum
Ne	Neon
Si	Silisyum
Ti	Titanyum

Açıklama

Kısaltmalar

AK-ITAB	Alt Kritik ITAB
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	American Society for Testing Materials
CP	Complex Phase(Kompleks faz)
DP	Dual Phase(Çift faz)
dk	Dakika
EB	Erime Bölgesi
FE	Finite Element
FEA	Finite Element Analysis
S-N	Gerilme-Ömür Metodu
ε-N	Gerilme-Ömür Metodu
HV	Hardness Vickers (Vickers sertlik birimi)
İT-ITAB	İnce Taneli ITAB
İK-ITAB	İnter Kritik ITAB
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
kN	KiloNewton
KT-ITAB	Kaba Taneli ITAB
kW	Kilowatt
m	Metre
mm	Milimetre

Açıklama

MPa	Megapascal
MTS	Malzeme Test Sistemi
Nd:YAG	Neodymium yttrium aluminum garnet
s	Saniye
TM	Temel Malzeme
TRIP	Transformation Induced Plasticity
vb	ve benzeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Kendiliğinden emisyon	4
Şekil 2.2. Tahrik edilmiş yutma	4
Şekil 2.3. Tahrik edilmiş emisyon	4
Şekil 2.4. Lazer Cihazının Temel Elemanları (Convissar, 2016)	5
Şekil 2.5. Lazer Türleri	6
Şekil 2.6. Katı hal lazerlerin yapısı	7
Şekil 2.7. Gaz lazerlerin sistem yapısı	8
Şekil 2.8. Yarı iletken lazer şematik gösterimi (Öner, 2007)	8
Şekil 2.9. Kaynaklı birleştirmeler ile meydana gelen bölgeler (Atmaca, 2021)	9
Şekil 2.10. Anahtar deliği (key hole) sistematığı şema gösterimi (Altıntaş, 2018)	10
Şekil 2.11. İletimsel lazer kaynağı şema gösterimi (Altıntaş, 2018)	11
Şekil 2.12. Fiber lazerin çalışma prensibi (Atmaca, 2021)	12
Şekil 2.13. Odak ve toplayıcı lens	16
Şekil 2.14. Lazer gücü- eğme dayanımı arasındaki ilişki (Uzun ve Keleş, 2012)	17
Şekil 2.15. Sonlu elemanlar analizinde ve deneysel test sonucunda sol alt numunenin boyun vermesi ve burkulması	18
Şekil 2.16. Gerilme-zaman grafiği (Shigley, 2006)	19
Şekil 2.17. Wöhler eğrisi (Shigley, 2006)	22
Şekil 2.18. Farklı yorulma kriterlerini gösteren yorulma diyagramı (Shigley, 2006)	23
Şekil 2.19. Yorulma ömrü adımları ve yorulmaya etki eden faktörler (Özmen, 2007)	25
Şekil 2.20. Yorulma ömürlerine göre lazer kaynak hasarı. A) 6x10 ³ çevrimlik yorulma ömründe başarısız bir lazer kaynak B) 1,7x10 ⁴ çevrimlik yorulma ömründe başarısız bir lazer kaynak	28
Şekil 2.21. CP çeliğinin mukavemet-uzama grafiği (Kekik, 2021)	29
Şekil 2.22. CP çeliğinin araç üzerinde kullanıldığı bileşenler (Kekik, 2021)	29
Şekil 3.1. Lazer Kafası	32
Şekil 3.2. Numune boyutları	33
Şekil 3.3. Lazer kaynak fikstürü	33
Şekil 3.4. Kaynaklı numuneler	34
Şekil 3.5. Simufact Welding numune lazer kaynak modeli	35
Şekil 3.6. Metalografik incelemede kullanılan cihazlar. A) Metkon Ecopress numune kalıplama cihazı B) Metkon Forcipol zımparalama-parlatma cihazı C) Nikon Eclipse LV150NL mikroskobu	36
Şekil 3.7. QNESS Q10M sertlik ölçüm cihazı	36
Şekil 3.8. Vickers mikro sertlik ölçüm hattı	37
Şekil 3.9. Kaynak bölgesi yüzey eleman olarak modellemesi	37
Şekil 3.10. Kaynak bölgesi sonlu elemanlar modeli	38
Şekil 3.11. Çekme testi analiz modeli	39
Şekil 3.12. Yorulma analiz modeli	40
Şekil 3.13. nCode DesignLife akış şeması	40
Şekil 3.14. Sinüs grafiğinde yorulma yükleme durumu	41
Şekil 3.15. Yorulma test düzeneği	42
Şekil 4.1. Kaynak bölgeleri. a) Kaynak bölgesi makro yapısı b) Erime bölgesi	

	c) Kısmi erime bölgesi	44
Şekil 4.2.	Kesit alınan kaynaklı bağlantının ITAB bölgeleri	45
Şekil 4.3.	Delta fazından dışarı göç eden karbonun oluşturduğu beyaz bölge ...	46
Şekil 4.4.	Mikro Sertlik Sonuçları	47
Şekil 4.5.	Kaynak analizi sonucu ve makroyapı karşılaştırma. a) Simufact Welding penetrasyon sonucu b) Lazer kaynak makro yapısı	47
Şekil 4.6.	Kaynak bölgelerinin malzeme grafikleri	48
Şekil 4.7.	Çekme analizi sonuç görseli. a) Kopma olayı oluşmadan önceki adım b) Kopma olayının gerçekleştiği adım	48
Şekil 4.8.	Çekme analizi yer değiştirme-kuvvet grafiği	49
Şekil 4.9.	Kuvvet değerlerine bölgesel çevrim sayılarının kontur grafiği	50
Şekil 4.10.	Yorulma testi sonuçlarının çevrim sayısı-kuvvet grafiği	51
Şekil 4.11.	Yorulma testi sonucunda kopan numune	52
Şekil 4.12.	Yorulma testi ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. CP800 malzemesinin kimyasal kompozisyonu	31
Çizelge 3.2. CP800 malzemesinin mekanik özellikleri	31
Çizelge 4.1. Yorulma Analiz Sonuçları	49
Çizelge 4.2. Yorulma Test Sonuçları	51

1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarında Henry Ford tarafından ilk kez çalışılan otobant modelinden sonra otomotiv sektöründe oldukça köklü değişimler meydana gelmiştir. Bu değişimlerin yaşandığı alanlardan biri de kaynak teknolojileridir. Otomotiv sektörü için kaynak teknolojisi vazgeçilmez bir prosestir. Çünkü kaynak teknolojileri sayesinde otomotiv sektörü kalite ve maliyet yönünden iyi bir noktaya gelmiş hem de üretimde hız kazanmıştır. Ayrıca otomotiv seri üretiminde kullanılan robot sistemleri de kaynak teknolojileri ile kombine edildiğinde birleştirme teknolojileri olarak kaynak, sektörün en büyük ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir.

Lazer kaynak işlemi, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla önemli faydalar sunan daha düşük deformasyon (çarpılma), derin nüfuziyet, yüksek kaynak ilerleme hızı ve minimum ısı girdisi ile ince sac metal yapıları birleştirmek için mükemmel yeteneklere sahiptir. Otomotiv başta olmak üzere birçok endüstride en büyük hedef ürün hafifliği ve üretim-proses hızının artmasıdır. Lazer kaynak esnasında ek bir kaynak teli veya farklı bir malzeme kullanmadan lazer ışını ile birleştirme işlemi yapıldığından hafif bir birleştirme yöntemidir. Yüksek ilerleme hızı sayesinde seri üretim aşamasında endüstri isteklerine hızlıca cevap verebilmektedir. Lazer kaynağı, birçok hafif metallere ve bileşiklerine uygulanabilmektedir.

Lazer kaynak uygulamasında genellikle iki tip lazer sistemi kullanılır. CO₂ lazeri ve Nd:YAG(Neodymium doped yttrium aluminum garnet(Y₃Al₅O₁₂) kristali ile oluşturulan lazer) olarak adlandırılmaktadır. CO₂ lazeri daha çok 1-15 mm kalınlıklarda, Nd:YAG katı hal lazeri ise genellikle 0.2-4 mm kalınlıkları arasında tercih edilir. Nd:YAG lazeri ile yüksek kaynak kalitesine sahip yüksek sayılabilecek hızlarda kaynak işlemleri yapılabilmektedir.

Kompleks fazlı çelikler TRIP ve DP çeliklerden daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. 800 Mpa ve üzeri çekme mukavemetleri ve yüksek akma değerleri ile yüksek deformasyona uğrama, çarpışma enerjisi emilimi ve artan deformasyon kapasitesine sahiptir. Lazer kaynağı ile birleştirilen bindirme şeklindeki yapılarda kaynak mukavemeti

yapının genel mukavemetini belirleyen en etkin parametredir. Yapı üzerine gelen tekrarlı yüklere karşı lazer kaynak yorulma performansı hesabı önemli hale gelmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, kompleks fazlı çelik sac malzemelerin lazer kaynak yorulma performansının fiziksel test ve simülasyonlar ile incelenerek korelasyonun sağlanmasıdır. Yapılan çalışmalarda; uygun kaynak parametrelerinde kompleks fazlı çeliklerin birleştirilerek çekme ve yorulma numuneleri elde edilmiştir. Kaynak yapıldıktan sonra kaynak nüfuziyet oranının kontrolü optik mikroskop cihazı yardımıyla incelenmiştir. Kompleks fazlı çeliklerde lazer kaynak yorulma grafiği simülasyon ortamında ve fiziksel testler yardımıyla elde edilerek kıyaslama yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lazer ve Lazer Işını Oluşumu

Uyarılmış yayılma ile ışığın güçlendirilmesi anlamına gelen “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri ile simgelenen LASER, çeşitli yollarla elde edilen elektromanyetik ışımayı güçlendiren ve mor ötesi bölgesinden kızıl ötesi bölgeye kadar geniş bir spektrumda ışığa verebilen bir alettir. Bir lazer ışını oluşturabilmek için gerekli şartlar, ışığın kuvvetlendirilmesini sağlayan kazanç ortamı, ortamı uyaran güç kaynağı ve doyuma ulaşabilmek için geri besleme sistemleri olmak üzere üç grupta ele alınırlar (Atmaca, 2021).

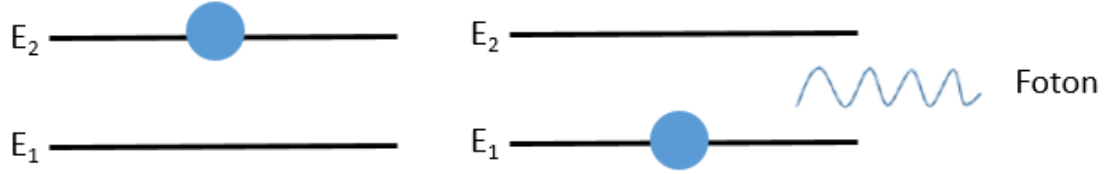
Lazer ışınının çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir: Bir maddenin veya cismin dış bir etki ile uyarılması ve sonucunda foton yayması ile üretilir. Yayılan fotonların bazıları, maddenin içinde bulunduğu yüzeylere çarparak yansır ve maddeye geri çarparak zincirleme şekilde foton yayılımına neden olurlar. Bu reaksiyonlar sonucunda eş fazlı ve monokromatik bir ışık meydana gelmektedir. Maddenin bulunduğu muhafaza yüzeyinden bu ışık çıkarılarak istenen doğrultuda yönlendirilir (Güneş, 2012).

Bir maddenin E_1 ve E_2 ($E_1 < E_2$)’den oluşan iki farklı enerji değerine sahip olduğunu kabul edersek, atomu sahip olduğu düşük E_1 enerji seviyesinden daha büyük olan E_2 enerji seviyesine ancak, uyarılmaya neden olan aşağıdaki şartlardan birinin yerine getirilmesi ile çıkabilir.

- Isıtma,
- Basınç uygulama,
- Hızlandırılmış elektronlarla bombardıman edilme,
- Hızlandırılmış parçacıklarla bombardıman edilme,
- Bir ışık demetinin etkisine maruz bırakma (Uzun, 2010).

Uyarılarak E_2 enerji seviyesine çıkarılan atom E_1 enerji seviyesine inmek isteyecektir. Bu geçiş anında sahip olduğu $E_2 - E_1$ enerji farkını ortama bırakacaktır. Şekil 2.1’de

gösterildiği gibi, atomdan açığa çıkan enerji elektromanyetik dalga (foton) olarak ortama yayılacaktır. Bu olaya kendiliğinden emisyon denir (Yariv, 1989-Loudon, 2000).



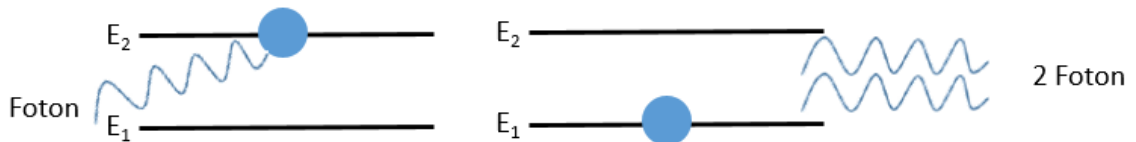
Şekil 2.1. Kendiliğinden emisyon

Lazer ışınının oluşturan diğer bir unsur yutmadır. Başlangıçta E_1 enerji seviyesindeki atoma bir elektromanyetik dalganın(fotonun) çarpması durumunda, fotonun sahip olduğu enerji atom tarafından yutulur. Yutulan enerji, atomu E_2 seviyesine yükseltir. Atoma çarpan dalganın enerjisi daha sonra E_2-E_1 enerji farkına dönüşecektir.



Şekil 2.2. Tahrik edilmiş yutma

Lazer ışınının oluşturan son unsur tahrik edilmiş emisyonudur. E_2 enerji seviyesinde bulunmakta olan atoma foton çarptığında E_1 enerji seviyesine düşecektir. Bu esnada çarpan elektromanyetik dalganın enerjisine E_2-E_1 enerji farkı ilave olunacaktır. Tahrik edilmiş emisyonda, giren her bir fotona karşılık iki foton bırakılır.(Uzun, 2010).

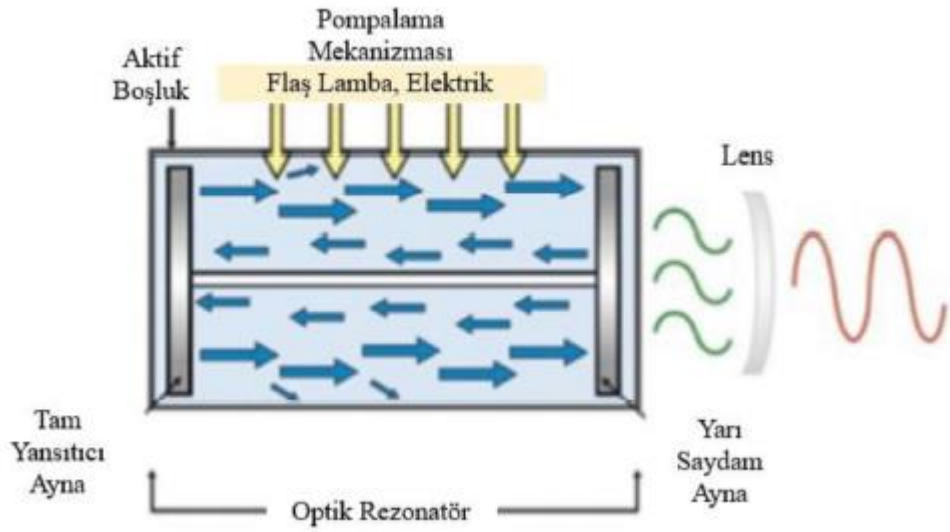


Şekil 2.3. Tahrik edilmiş emisyon

2.1.1. Lazer sisteminin temel elemanları

Lazer ışığı aşağıdaki dört temel eleman aracılığıyla elde edilmektedir. Bunlar:

- Aktif Ortam,
- Uyarma Mekanizması (Pompalama Mekanizması),
- Mükemmel Yansıtıcı Ayna ,
- Yarı Saydam Ayna (Convissar, 2016).



Şekil 2.4. Lazer cihazının temel elemanları (Convissar, 2016)

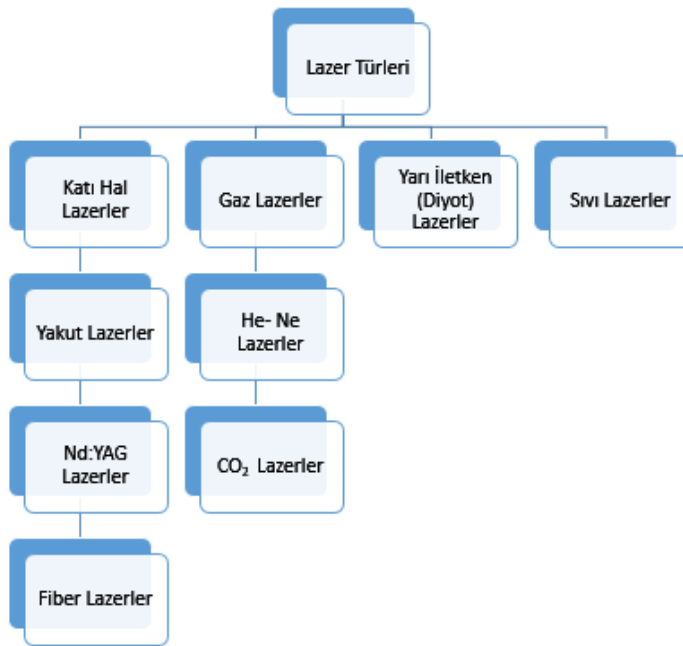
Aktif ortam; bir dış etki vasıtasıyla elektronları üst enerji düzeyine geçirebilecek olan atomlardan oluşur. Bu ortamı oluşturma amacıyla argon, CO₂ benzeri gazlar,erbiyum ve yakut gibi katı kristaller veya yarı iletkenler kullanılabilir. Aktif ortam için enerji üretmek amacıyla kullanılan kimyasal, optik veya elektriksel elemanlardan oluşan uyarma mekanizması kullanılır. Sistem içerisindeki tam yansıtıcı ve yarı saydam aynalar optik rezonatörler olarak adlandırılmaktadır. Tam yansıtıcı ayna, üzerine düşen lazer ışığının tamamını yansıtırken, yarı saydam ayna ise üzerine düşen lazer ışığının bir kısmının içinden geçmesine imkan sağlar (Convissar, 2016).

Atomların uyarılması için gerekli olan enerji, enerji kaynağı tarafından sağlanmaktadır. Bu enerji; elektrik pompalama veya optik pompolama prensibi ile lazer aktif ortamının elektrik enerjisi ya da ışımayla atomların üst enerji düzeyine çıkarılması ile oluşmaktadır.

Bir diğer ismi yansıtıcı ayna olan rezanatörler, oluşan lazer ışınlarından bazılarını lazer aktif maddesine geri yansıtırlar ve sürekli ışık demeti oluşturup bu ışınların belirli eksen boyunca paralel olarak yayılmasını sağlarlar. Rezanatörler, farklı tür iki aynadan oluşmaktadır. Lazer aktif maddenin arkasında bulunup üzerine gelen ışınları yansıtır, diğeri ise aktif maddenin ön kısmında bulunup kısmi geçirgenliğe sahiptir (Kannatey, 2009).

2.1.2. Lazer türleri

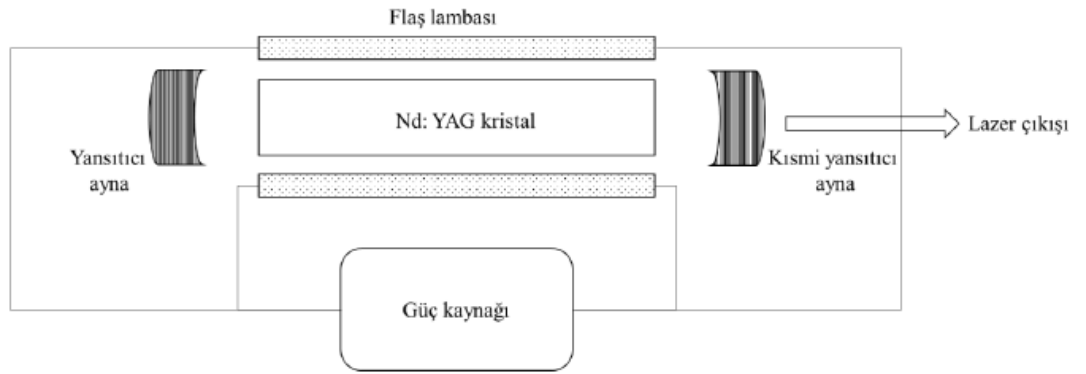
Geçmişten günümüze kadar geliştirilen ve kullanımı devam eden üretildikleri ortama bağlı olarak sınıflandırılmış lazer türleri Şekil 2.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Lazer Türleri

Katı hal lazerler

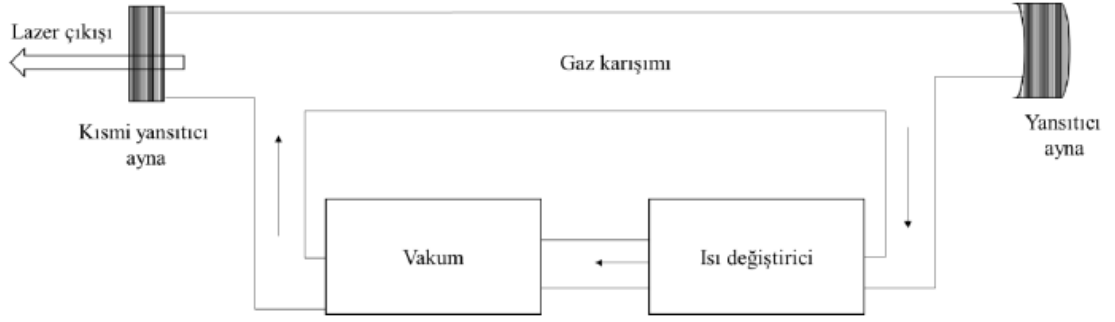
Katı hal lazerlerinde aktif ortamı uyarabilmek için aktif ortamdaki maddenin çevresine sarılmış veya paralel şekilde konumlandırılmış flaş tüpleri bulunur. Katı hal lazerlerinde aktif ortamdaki atom yoğunluğu yüksek olduğundan yüksek titreşim kapasitesi ve kısa dalga boyu gibi özelliklere sahiptir. Katı hal lazerlerinde kullanılan katı cisimlerin başında Al_2O_3 (yakut lazerler), Nd:YAG kristalleri ve fiberler gelmektedir (Atmaca,2021).



Şekil 2.6. Katı hal lazerlerin yapısı

Gaz lazerler

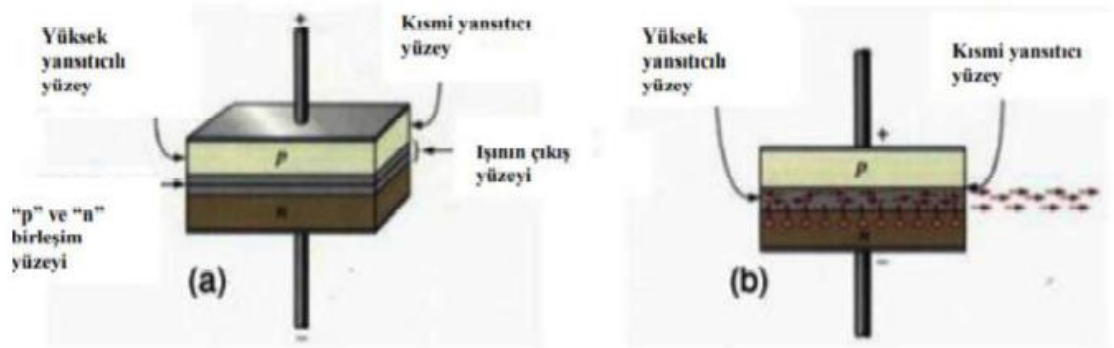
Bu yöntemde gaz veya gaz karışımlarının uyarılabilmesi için, elektrik boşalması ile gaz atom veya moleküllerinin uyarılması veya optik uyarma yöntemi ile gaz atomlarının ya da moleküllerinin uyarılması gerekmektedir. Gaz lazerlerde aktif ortam çoğunlukla He-Ne ve CO₂ kullanılmaktadır. CO₂ lazerlerde aktif ortam olarak genellikle CO₂, N₂ ve He gaz karışımı kullanılmaktadır. N₂ gazı CO₂ moleküllerinin üst enerji seviyelerine çıkmasını kuvvetlendirmek için, He gazı ise yüksek ısı iletkenlik özelliğinden dolayı soğutucu olarak kullanılmaktadır (Atmaca,2021).



Şekil 2.7. Gaz lazerlerin sistem yapısı

Yarı iletken (diyot) lazerler

Bu lazerlerde, iki farklı çeşitten yarı iletken cisim düz bir birleşim yüzeyi içerecek şekilde yan yana konumlandırılır. Oluşturulan yapıya , yüksek bir elektrik akımı verildiğinde, birleşme bölgesinde lazer ışığı meydana gelir. Bu lazerler, düşük maliyetli olması, ufak boyutta olmaları ve verimlerinin yüksek olması nedeniyle iletişim aletlerinde kullanılmaktadırlar (Öner, 2007).



Şekil 2.8. Yarı iletken lazer şematik gösterimi (Öner, 2007)

Sıvı lazerler

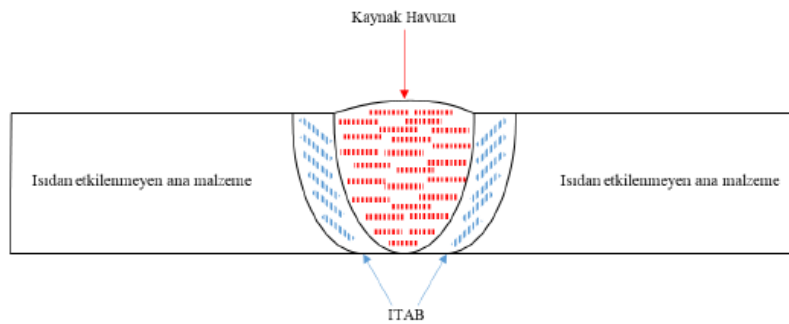
Sıvı lazerlerde, kristal ya da camsı çubuk yerine organik boyların solventler içerisinde seyreltilerek elde edilen solüsyonlardan konur. En önemli fark, tek bir dalga boyu yerine istenilen bir dalga boyuna ayarlanıp çalışabilmesidir (Karaağaçlı, 2019).

2.2. Lazer Kaynağı

Lazer kaynağının otomotiv, beyaz eşya, elektronik ve benzeri yüksek adetli üretim hacmine sahip sektörlerde yüksek kaynak hızı sayesinde kullanımı her geçen gün artmaktadır. Lazer kaynağı , diğer konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre, lazer ışınının kolaylıkla yönlendirilebilmesi ve fazla miktarda enerjinin, dar noktalara odaklanabilmesi sebebiyle oldukça ileri bir kaynak yöntemidir (Püskülcü ve ark. 2009).

Lazer kaynağı lazer ışınlarının kaynak edilecek malzeme üzerine aktarılması ile yüksek miktarda enerjinin küçük noktalara odaklanarak istenilen malzemenin ergitilip birleştirilmesini ya da kaplanması için kullanılan bir yöntemdir. Kaynak edilecek bölgeye çok hassas bir şekilde odaklanması ve bölgeye gereğinden fazla ısı uygulanmaması sebebi ile bu yöntemde çok düşük bir ITAB genişliği elde edilmektedir (Karaağaçlı, 2019).

Lazer kaynağı kullanılarak yapılan birleştirme işlemlerinde, birbirine temas eden iki yüzey lazer ışını sayesinde ergitilir ve soğuma işlemi bittikten sonra ergime işlemi tamamlanmış olur. Odaklanmış ışın demetiyle yapılan birleştirme işlemi sonrasında kaynak bölgesine mikro yapısı temel malzeme, ITAB ve kaynak havuzu bölgelerinden meydana gelir. Kaynak bölgeleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

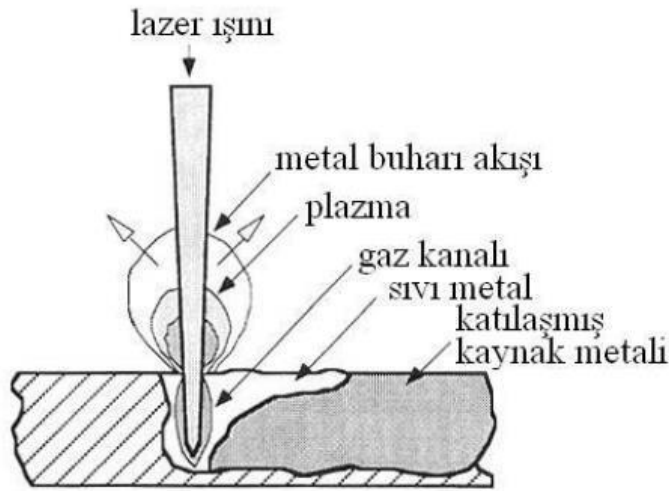


Şekil 2.9. Kaynaklı birleştirmeler ile meydana gelen bölgeler (Atmaca, 2021)

Lazer kaynağı işlemi iki farklı yöntemden biri esas alınarak kullanılabilir.

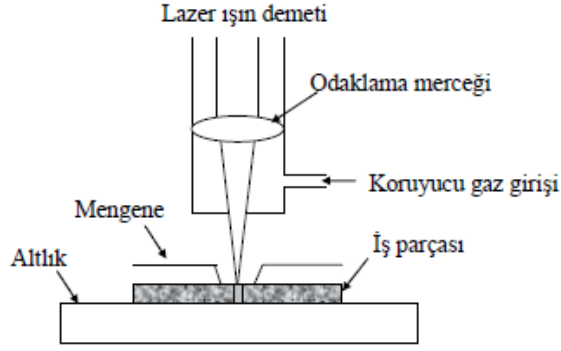
- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynak (Anahtar deliği)
- İletimsel lazer kaynak

Anahtar deliği yöntemi, derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağının literatürdeki bir başka tanımlamasıdır. Genellikle otomotiv sektöründe sac parçalar için uygulanan lazer kaynak yönteminde, iş parçasının veya lazer ışınının sabit hızla ilerletilmesi ile kaynak işlemi uygulanır. Anahtar deliği yönteminde 1:10 oranında en : boy değişikliği vardır. Yöntemin detayları Lancaster tarafından bulunmuştur (Altıntaş 2018). Aşağıdaki Şekil 2.10'da anahtar deliği yönteminin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.10. Anahtar deliği (key hole) yöntemi şema gösterimi (Altıntaş, 2018)

İletimsel lazer kaynağında ise , malzeme tarafından lazer ışınları enerjisi yutulur ve daha sonra malzemeye sabit bir kuvvet uygulayıp kaynak işleminin tamamlanması prensibi ile çalışmaktadır. İletimsel lazerler, zayıf lazer gücü ile malzemedен buharlaşma olmadan malzemenin sadece ergitildiği işlemlerde kullanılmaktadır. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi malzeme tarafından yutulan lazer ışınlarından meydana gelen ısı radyasyon ve konveksiyon ile yayılmadan önce iletim ile et kalınlığı boyunca iş parçasının merkezi yönünde yayılma gerçekleşir.



Şekil 2.11. İletimsel lazer kaynağı şema gösterimi (Altıntaş, 2018)

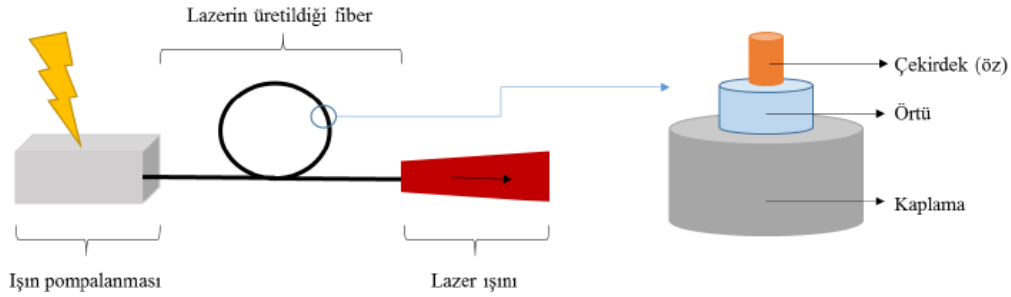
2.2.1. Fiber lazer kaynak yöntemi

Fiber lazerler, 1960'lı yılların başında ortaya çıkmış ve 1990 yılına kadar düşük güç seviyelerinde optik yükseltici olarak kullanılmışlardır. 2000 yılında ilk kez 100 W'lık fiber lazer üretilmiş ancak bu lazerlerin malzeme işleme süreçlerindeki potansiyellerine ilişkin yapılan raporlamalar günümüzde halen gelişerek devam etmektedir. Ticarileşmenin artmasıyla günümüzde 10 kW' a kadar farklı güçlerde fiber lazerler üretilmiştir (Atmaca, 2021).

Fiber optik lazer prosesi , küçük iş parçalarının birleştirilmesinde kullanılan en uygun kaynaklı birleştirme yöntemlerindendir. Bu kaynak yönteminde düşük güç girdisi ile yüksek ışın kalitesi elde edilebilmektedir. Yüksek kalitede ve devamlı odaklanmış ışık, oldukça dar bir alanda malzemenin ergitilmesini sağlayarak özellikle ince malzemelerde iyi kalitede kaynak yapılmasını sağlar (You ve ark. 2013).

Yüksek güçteki fiber lazerler, düşük dalga boyuna sahip olduklarından neredeyse tüm metaller ve alaşımlar tarafından soğurulmasını ve lazer ışını konumlandırmada gerekli esnekliği sağlaması nedeniyle, çeşitli malzeme ve yapılarda derin penetrasyon kaynağı elde etmek için kullanılabilir. Sac metal malzemelerin birleştirilmesinde yüksek ilerleme hızından dolayı yüksek kaynak hızı kullanılabilmesi nedeniyle yüksek güçteki CO₂ lazerden daha verimlidir (Quintino ve ark. 2007).

Bir fiber lazerin yapısında, 9-50 mikron çapında nadir toprak elementleri katkılı Si fiberler vardır. Bu yöntemde lazer ışını, tamamen fiberlerin içinde üretildiğinden, diğer lazer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi optik hizalamaya ve bunlar için kullanılan aynalara ihtiyaç yoktur. Fiber lazerin çalışma prensibi Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Atmaca, 2021).



Şekil 2.12. Fiber lazerin çalışma prensibi (Atmaca, 2021)

2.2.2. Lazer kaynağının avantaj ve dezavantajları

Son zamanlarda fiber lazer kaynak konusundaki yeni gelişmeler bu kaynak yönteminin diğer birleştirme yöntemlerine göre bir çok avantajı olmasını sağlamaktadır:

- Yüksek penetrasyon derinliği,
- ITAB genişliğinin dar olması,
- Yüksek malzeme işleme hızları,
- Rahat ve basit kullanım özelliği,
- Çeşitli üretim endüstrilerinde ve tamir işlerinde kullanımı,
- Yüksek güç,
- Ek bir malzemeye gerek olmadan hafif birleştirme işlemi,
- Temiz kaynak yüzeyi
- Farklı türden malzemelerin kaynatılabilmesi
- Temassız bir şekilde kaynak işlemi olduğundan ulaşılması zor olan bölgelere kaynak yapabilme imkanı,
- Yüksek verimlilik.

Fiber lazer kaynak yönteminin dezavantajı ise,

- Lazer ışın demetinin darlığı nedeniyle alın kaynaklarında birleştirme yerlerinin düz olması gerekliliği,
- Kullanılan lazer ışının canlıya teması sonrasında sağlık sorunları ve iş güvenliği problemleri oluşabilmesi,
- Yatırım maliyetlerinin yüksek olması

şeklinde sıralanabilir.

2.2.3. Lazer kaynak parametreleri

Malzemelerin lazer kaynak işlemi ile birleştirilmesinde proses parametreleri birleşme performansını etkileyen ana nedenlerdendir. Isı girdisi proses parametreleri sonucu değişiklik gösterir. Proses parametrelerinin kontrolü lazer kaynağında hızlıca değiştirilebilmektedir. Kaynak kalitesini etkileyen parametreler:

- Lazer gücü,
- Kaynak ilerleme hızı,
- Işın verme türü,
- Odak noktası ve mesafesi,
- Işın çapı,

şeklinde sıralanabilir (Alpar ve ark. 2021).

Endüstride lazer kaynak işleminde 10 kW'a kadar güç kaynakları kullanılmaktadır. Lazer gücünün, kaynatılacak malzemeye nüfuz edebilecek şekilde ayarlanması gerekir. Güç gereğinden fazla olursa, birleştirilecek malzemenin katılaşmasına veya delinmesine sebep olabilir. Optimum nüfuziyetin sağlanması için lazer gücü ile birlikte kaynak hızı parametresi de optimize edilmelidir. Seri imalat proseslerinde genellikle yüksek hız talep edildiğinden, çoğunlukla yüksek güç kullanılarak, kaynak hızı optimum nüfuziyete göre ayarlanır (Fahlström, 2015).

Kaynak hızı, gerçekleştirilen kaynak prosesinin ilerleme hızıdır. Kaynak hızı [mm/s], lazer gücü [kW] ile birlikte ısı girdisi [kJ/mm] belirlenmektedir (Denklem 2.1). Lazer gücü ile kaynak hızı optimize edilmediği durumlarda zayıf penetrasyon oluşmaktadır (Fahlström, 2015).

$$Isı Girdisi(Q) = \frac{Lazer Gücü(P)}{Kaynak Hızı (v)} \quad (2.1)$$

Literatürde farklı güç seçeneklerinde yapılan kaynak işlemlerinde nüfuziyet oranlarına bakılmıştır. Kaynaktaki nüfuziyet oranı kaynak birleşme mukavemetini direkt etkilediği için farklı güç değerlerinde yapılan kaynaklı birleştirmelerin mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmaların ortak sonucu olarak lazer gücünün kaynak kalitesini, mukavemetini ve iç yapıyı etkileyen önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir (Alpar ve ark. 2021).

Benyounis ve ark. (2005) lazer kaynak proses parametreleri ve ısı girdisi miktarının kaynak dikişine etkisini incelemişlerdir. Lazer gücü azalması veya kaynak hızı artmasıyla ısı girdisinin azaldığı, dolayısıyla nüfuziyetin azaldığı tespit edilmiştir. Lazer kaynak hızının artmasıyla kaynak dikişi azaldığı dolayısıyla ITAB genişliğinin de azaldığı tespit edilmiştir.

Öztürk ve diğ. (2019) 1.8 mm kalınlığında DP600 ve 1.5 mm kalınlığında DP800 sacların CO₂ lazer kaynağı ile farklı güç ve hızlarda birleştirmeye çalışmışlardır. Kaynak yapılarak birleştirilmiş sacların akma ve maksimum çekme mukavemetlerinin lazer gücünün 3 kW ve kaynak hızının 4 m/dk olduğu kaynak parametrelerinde daha iyi olduğu görülmüştür.

Indhu Ra ve diğ. (2020) CP800 kompleks faz çeliği ile Al6061 alüminyum malzemesini birbirine lazer kaynak ile birleştirmeye çalışmışlardır. Kaynak parametrelerini farklı güçlerde ve ilerleme hızlarında deneyerek uygun penetrasyon değerlerine bakılmıştır. En yüksek kaynak mukavemeti (254 MPa) 4 kW ve 12 mm/s parametrelerinde elde edilmiştir. Kaynak arayüzünde intermetalik kalın bir tabaka oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

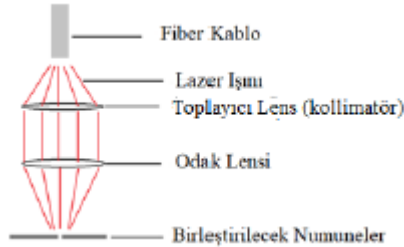
Çakmakaya ve diğ. (2020) farklı türde ST6222 ve DP600 sac malzemelerini lazer kaynak ile birleştirmiş. Farklı ilerleme hızlarının kaynak dikişi ve nüfuziyet oranlarına etkisini araştırmışlardır. 2-3-4 m/dk hızlarda iki sac malzeme lazer kaynak ile birleştirilmiş, ilerleme hızı arttıkça numuneyle temas süresi azaltıldığından nüfuziyet oranını azalttığı belirtilmiştir. İlerleme hızının düşmesi ile kaynak havuzu genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Endüstride lazer kaynak işleminde kullanılan lazerler, lazer ışınının verilme özelliğine göre de ayrılmaktadır. Lazer kaynağı sürekli (continuous wave), darbeli (Pulsed) ve Q-anahtarlamalı modda çalışabilir. Lazer ışığı üretilen ortamdan birim anahtarlama zamanında açığa çıkan enerjiye Q değeri ve u işleme Q anahtarlama denir. Darbeli operasyonlar genellikle lazerin ısını azaltmak için kullanılır. Sürekli ışın üreten kaynak için temel parametre güç iken darbeli modda çalışan lazerler için darbe frekansı, darbe süresi, ortalama güç gibi değerler ortaya çıkmaktadır. Literatürde lazer ile yapılan birleştirme işlemlerinde birçok çalışmada darbeli lazer kaynak yöntemi kullanılmıştır.

Behera (2020) 2 mm kalınlığında AISI 316L ve AISI 1552 çeliklerini lazer kaynak ile birleştirmiştir. Kaynak işleminde ışın çapı, kaynak hızı ve darbe frekansı parametrelerinin kaynak havuzu sertliği ve ITAB üzerinde ki etkilerini araştırmış. Taguchi metodu kullanarak parametre optimizasyonu yapmış ve atım frekansının diğer parametrelere göre daha az etkili olduğunu gözlemlemiştir.

Bir diğer lazer kaynak kalitesini etkileyen parametreler lazer ışınının lazer kafasından çıkması sırasında kaynaklanacak malzemeye odaklanacağı nokta, odak mesafesi ve ışın çapıdır. Lazer kafasında, kafaya kadar gelen ışını toplayan toplayıcı (kollimatör) lens ve

toplanan ışığı kaynatılacak malzeme üzerine odaklayan odak lensi kullanılmaktadır. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi odak ve toplayıcı lens görülmektedir. Malzemeye yakın olan odak lens, kaynak esnasında oluşabilecek sıçrama veya buharlardan zarar görmemesi için odak mesafesi değeri mümkün oldukça uzak tutulur (Püskülcü ve Koçlular, 2009).



Şekil 2.13. Odak ve toplayıcı lens

Salminen ve diğ. (2016) 8 mm kalınlığındaki 960QC çeliğinin lazer kaynağında optik parametrelerin kaynak kalitesine ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. 10 kW gücünde sürekli modda çalışan bir fiber lazer sisteminde 0,71 mm ve 1.46 mm ışın çapları çalışılmıştır. Odak noktası kaynatılacak malzemenin üst yüzeyinin 1 mm aşağısı olarak seçilip farklı kaynak hızlarında birleştirme yapılmıştır. Düşük ışın çapında daha iyi penetrasyon, daha dar ITAB ve EB (Ergime Bölgesi) elde edilmiştir.

2.3. Lazer Kaynak Mekanik Özellikleri

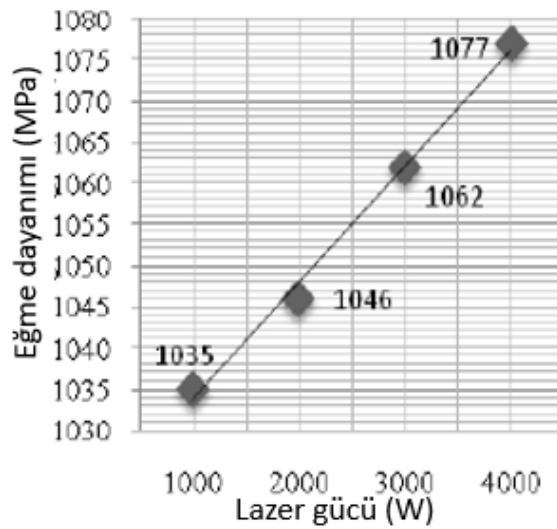
Bütün kaynaklı birleştirmelerde temelde, ergime ve katılaşma aşamaları oluşmaktadır. Lazer kaynak mukavemetini de etkileyen durumlar aslında bu aşamalarda oluşmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda genelde lazer kaynak ile diğer kaynak çeşitlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda mukavemet olarak lazer kaynak yönteminin üstünlükleri görülmektedir. Lazer kaynağı bir ısıtma işlemi olarak düşünüldüğümüzde ergime bölgesi soğuma işleminden sonra ana malzemeden daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür. Lazer kaynak yönteminde daha dar şekilde oluşan ITAB bölgesi ise genelde yapılan testlerde ilk ayrılan ve mekanik özellikleri ana malzemeden daha kötü olduğu anlatılmıştır.

Yang ve Lee (1999) otomotiv sektöründe kullanılan direnç nokta kaynağı ile lazer nokta kaynağının mekanik performanslarını karşılaştırmıştır. Kaynak mukavemetlerinin tayini

için düşük devirli yorulma testi ve artık gerilme hesabı için sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda lazer nokta kaynaklarının kaynak mukavemeti, dirençli nokta kaynaklarından daha fazla bulunmuştur. Lazer nokta kaynaklarının birleştirme mukavemetinin, kaynak birleştirme alnına ve maksimum çapa bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Farabi ve diğ. (2011) DP600-DP980 çeliklerini lazer kaynak ile birleştirme çalışması yapmışlardır. Kaynak sonrası maksimum sertlik değeri EB’de görülmüş, ITAB’da ise ana malzemeden daha az sertlik gözlemlemişler. Çekme testlerinde kopmalar DP600 çeliğinin ITAB bölgesinde gerçekleşmiştir. Minimum sertlik içeren bu bölgede kırılma yüzeyine yapılan mikro inceleme sonucu kopma, sünek olarak gerçekleşmiştir.

Uzun ve Keleş (2012) AISI 304 paslanmaz çelik malzemesi ile alın alına lazer kaynak işlemi yapmışlar. Yapılan kaynak birleştirmelerinde kaynak bölgelerinin sertlik değerlerini incelemişler. Kaynak metalindeki sertliğin, ana malzemenin sertliğinden daha yüksek olduğunu görmüşler. Lazer gücündeki artışın kaynak metalindeki sertliği arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca oluşturulan numunelere üç nokta eğme testi yapılarak eğme dayanımlarını incelemişler. Numuneye giren ısı girdisi arttıkça eğme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiş. Lazer gücü ile eğme dayanımı arasındaki ilişki şekil 2.14’te gösterilmektedir.

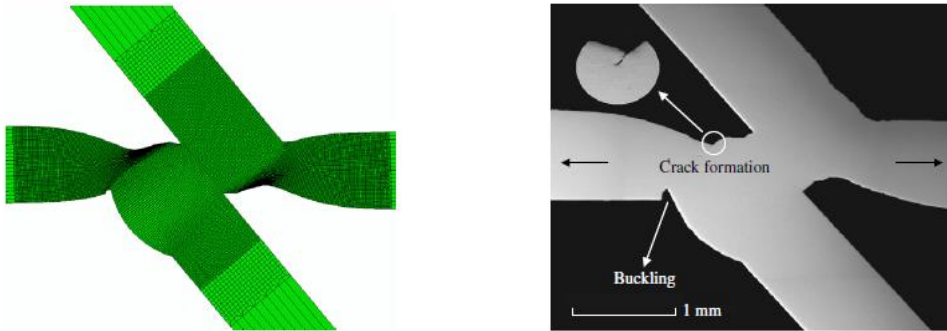


Şekil 2.14. Lazer gücü- eğme dayanımı arasındaki ilişki (Uzun ve Keleş, 2012)

Lazer kaynak mukavemetini etkileyen diğ er bir parametre kaynak dikiş geometrisidir. Endüstride genellikle lineer veya nokta şeklinde dikiş formları kullanılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı dikişi formlarının kaynak mukavemetine veya yorulma performansını etkileri araştırılmıştır.

Ergin (2021)  alışmasında DX54D+Z  eliğinin lazer kaynak parametrelerini makro seviyede optimize etmiştir. Sonrasında uygun parametrelerde I, S ve C şeklindeki kaynak dikiş formlarında kaynaklar yaptıktan sonra çekme testleri uygulamıştır. Bindirme, 30  ve 60  açılı birleştirme tiplerinde S tipi dikiş geometrisi, soyma ve 90  açılı birleştirme tiplerinde I tipi lazer kaynak dikiş geometrisi daha iyi çekme dayanımı sergilemiştir.

Lee ve ark. (2011) yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin bindirmeli lazer kaynak birleştirmelerinin hata modlarını incelemişlerdir. Yapılan deneysel ve sanal analizler sonucunda kırılmanın ITAB bölgesi ile ana malzeme arasında gerçekleştiğini saptamışlar. ITAB ve kaynak bölgesinin malzeme modelini sonlu elemanlar analizinde oluşturmak için gerinim-gerilim eğrilerini, ana malzemenin eğrisine göre sertlik değerlerini dikkate alarak ölçeklendirme yapılması sonucunda oluşturmuşlardır.



şekil 2.15. Sonlu elemanlar analizinde ve deneysel test sonucunda sol alt numunenin boyun vermesi ve burkulması

2.4. Yorulma Dayanımı

Yorulma tekrarlı şekilde uygulandığında çatlak veya kırılma şeklinde hasar meydana gelme durumudur. Yorulma olayında mühendislik yaklaşımlarından en önemlisi çatlağın

ilerleme hızını ve sonuçta malzemenin tamamen hasara uğraması için ilgili zamanı tespit etmek ve böylece hesaplanan zamandan önce ilgili parçayı değiştirmektir.

Yorulma ASTM 206-72’de aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

“ Bazı nokta veya noktalarda tekrarlı gerilme ya da uzamaya maruz kalan malzemelerde, yeterli tekrar sayısından sonra çatlak oluşması, çatlağın büyümesi ve bunun sonucunda malzemenin kırılmasına sebep olan kısmi ve sürekli gelişen kalıcı bir yapı değişikliği olayıdır.”

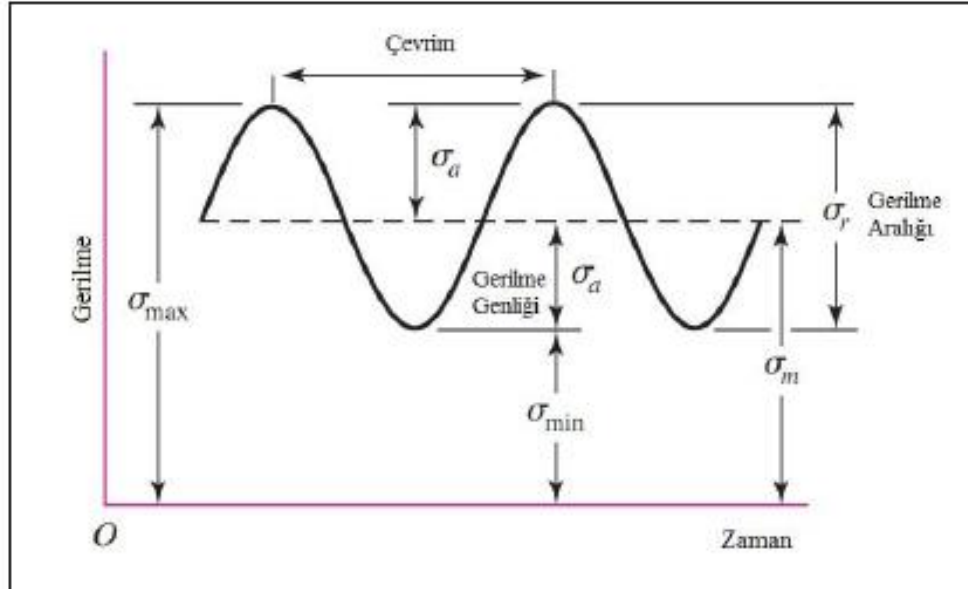
Tanımlamada da anlatıldığı gibi yorulmadaki dört önemli özellik:

- Olayın tekrarlı gelişmesi,
- Bölgesel yükleme olması,
- Çatlakların ilerlemesi,
- Çatlakların büyümesi ve kırığın oluşmasıdır.

Yorulma dayanımına ilişkin genel tanımlar:

Gerilme-zaman grafiğinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına çevrim denir.

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi grafikteki iki tepe noktanın arası olarak yorumlanabilir.



Şekil 2.16. Gerilme-zaman grafiği (Shigley, 2006)

σ_{max} : Maksimum Gerilme

σ_r : Gerilme Aralığı

σ_{min} : Minimum Gerilme

R : Gerilme Oranı

σ_m : Ortalama Gerilme

A : Genlik Oranı

σ_a : Gerilme Genliği

N : Çevrim Sayısı

Yukarıda verilen tanımlar şu formüller ile bulunmaktadır:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.5)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.6)$$

2.4.1. Yorulma gerilmesini etkileyen faktörler

Yorulma kırılmasının oluşmasında çoğunlukla birden çok parametrenin aynı anda etkin olması söz konusudur. Yapılan araştırmalara göre yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu çentik etkisi yapan şekil veya yüzey etkileri, aşırı yükleme, montaj hataları, yetersiz bakım vb. nedenlerle ortaya çıkmaktadır (Sabırlı, 2012).

Bazı malzemelerde belli bir gerilme limiti altında malzemede zamanla hiçbir çatlak oluşumu veya ilerlemesi olmamaktadır. Bu gerilme limitine yorulma sınırı (endurance limit) denir. Yorulmaya maruz kalan elemanın yorulma gerilmesi σ_e , deney numunesinin yorulma gerilmesi σ_e' şeklinde ifade edildiğinde:

$$\sigma_e = \sigma_e' \cdot K_{\text{çentik}} \cdot K_{\text{boyut}} \cdot K_{\text{yüklem}} \cdot K_{\text{yüzey}}$$

ifadesi ile belirlenebilir. Buradaki terimler;

$K_{\text{çentik}}$: Çentik etkisi,

K_{boyut} : Boyut etkisi,

$K_{\text{yükleme}}$: Yükleme tipinin etkisi,

$K_{\text{yüzey}}$: Yüzey kalitesini,

İfade eder. Bu ifadeler yorulma dayanımı düzeltme faktörü (K_f) olarak kullanılmaktadır.

$$K_f = 1 / (K_{\text{çentik}} \cdot K_{\text{boyut}} \cdot K_{\text{yükleme}} \cdot K_{\text{yüzey}})$$

eşitliği ile hesaplanabilir (Doğan, 2007).

2.4.2. Yorulma analizi yaklaşımları

Yorulma ömrü değerlendirmesi için literatürde çok sayıda model geliştirilmiştir. Temel olarak üç çeşit metod şeklinde sınıflandırırsak;

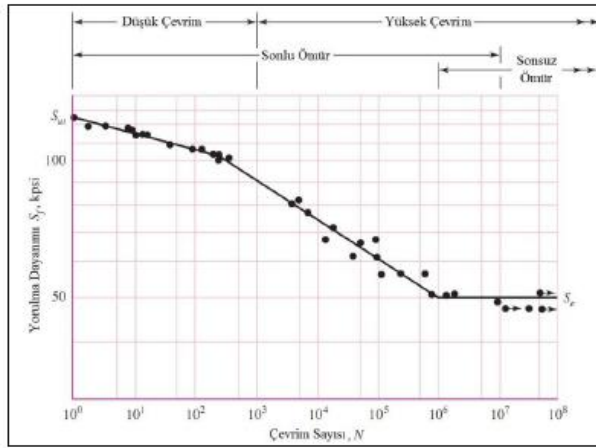
1. Gerilme-Ömür Metodu (Stress-Life Method)
2. Gerinim- Ömür Metodu (Strain-Life Method)
3. Kırılma Mekaniği Yaklaşımı (Fracture Mechanism)

2.4.2.1. Gerilme-ömür (S-N) metodu

Metal malzemelerin yorulma tahmininde kullanılan ilk ve en yaygın metottur. Yöntemin temeli, gerilme genliği-çevrim sayısını barındıran Wöhler(S-N) diyagramına dayanır. Wöhler yaklaşımı ürün tasarımı veya geliştirilmesi aşamalarında sıklıkla kullanılır. S-N metodu elastik bölge sınırındaki malzemelere gerilme uygulayıp çevrim sayısına denk gelen yorulma ömrünün tayin edildiği yüksek çevrimli yorulma analizi yöntemidir. S-N yöntemi düşük çevrimli yorulma ömür hesaplarında iyi sonuç vermez (Acar, 2002).

Wöhler yönteminde malzeme, ölçü ve yüzey kalitesi bakımından birebir aynı olan deney numunelerinin her biri farklı yüklemelerde ve aralıksız biçimde zorlanarak kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayıları bulunur. Bir yorulma dayanım deneyinde düzgün biçimde yorulma grafiği oluşturmak için 6-10 adet deney numunesi gereklidir. Yorulma deneyinde zaman zaman durdurma olursa deney numunelerinde toparlanma olayı görülebilir ve aralıksız deney yapılan numunelere göre daha yüksek yorulma dayanımı elde edilir (Sabırlı, 2012).

Wöhler yönteminde bir deney aşamasında tüm numuneler için ortalama gerilme veya alt gerilme sabit tutularak her deney için farklı gerilme genliği seçilir. Bir yorulma testinde ilk deney parçası üst gerilme genlikle akma sınırına yakın olacak şekilde yükleme yapılır. Sonraki deneylerde yüklemeler gittikçe azalan şekilde uygulanır. Test sonunda uygulanan gerilme genlikleri ile kırılma görülen çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi şekil 2.16'ta görülmektedir. Oluşan bu şekil wöhler eğrisidir (Sabırlı, 2012).



Şekil 2.17. Wöhler eğrisi (Shigley, 2006)

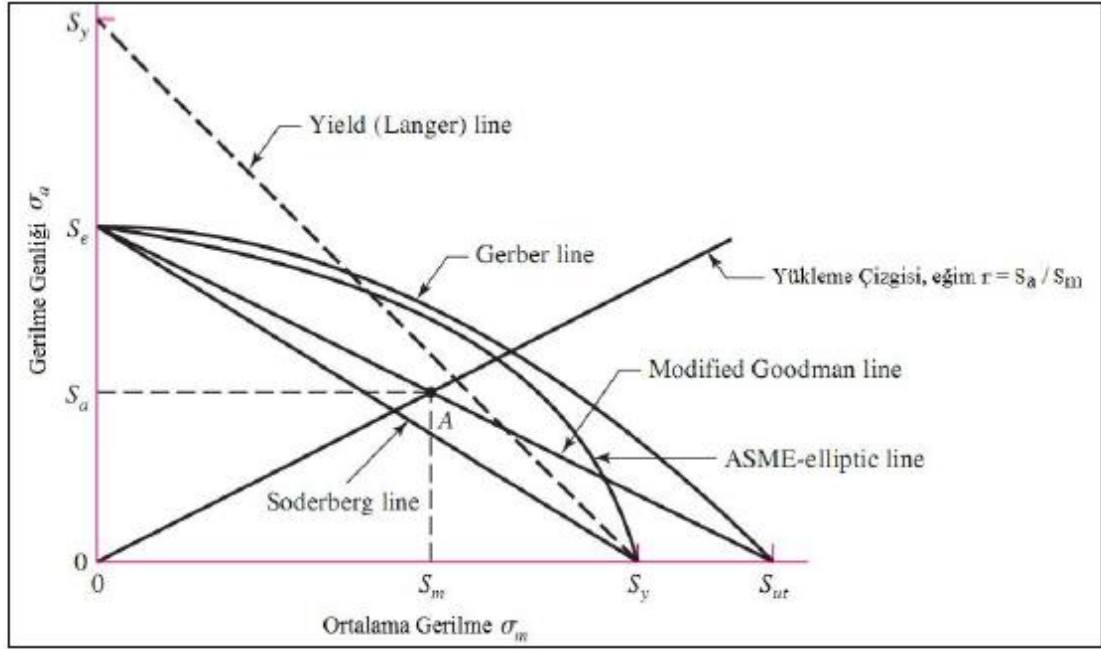
S-N eğrisi yöntemi yüksek çevrim altında Basquin eşitliği ile tanımlanır.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.7)$$

Basquin eşitliğinde yorulma bütünsel olarak veya çatlakın gerçek uzunluğunun zamana göre değişimi olarak ifade edilir. Basquin eşitliğinde gerilme dağılımı ($\Delta\sigma$), yorulma gerilme üssü (σ'_f), yorulma gerilmesi katsayısı (b) arasında bir bağlantı vardır. 1910 Basquin tarafından bulunan bu eşitliğin amacı gerilme tabanlı yorulmayı değerlendirerek temel bir denklem elde etmektir.

Gerilme tabanlı yaklaşımlar, gerilim için değer aralığının bir bileşenin yorulma davranışını kontrol ettiği varsayımına dayanmaktadır. Tek eksenli tersine çevrilmiş gerilim ve yorulma ömrü (S-N eğrileri) arasındaki ampirik ilişkileri içerirler. Bununla

birlikte, mekanik bileşenler genellikle ortalama bir gerilim seviyesi etrafında salınan gerilimlere maruz kalır. Bu durumlar için bir takım modeller önerilmiştir. Bu modellerin eğrileri Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Farklı yorulma kriterlerini gösteren yorulma diyagramı (Shigley, 2006)

Eğrilere ait formüller aşağıda verilmiştir.

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (\text{Goodman, 1899}) \quad (2.8)$$

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad (\text{Gerber, 1874}) \quad (2.9)$$

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_y} = 1 \quad (\text{Soderberg, 1930}) \quad (2.10)$$

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{\sigma_f} = 1 \quad (\text{Morrow, 1960}) \quad (2.11)$$

Bu denklemlerde S_a değişken gerilim, S_m ortalama gerilim, S_f yorulma limiti, S_u nihai çekme gerilmesi, S_y akma gerilmesi, σ_f gerç k kırılma gerilmesidir.

2.4.2.2. Gerinim- m r (ϵ -N) metodu

Gerinim- m r yaklaşımı malzemelerin sadece elastik gerinime uğradığı durumlarda değil malzemenin plastik gerinime uğradığı tekrarlı yükleme durumlarında ömür hesabı yapmak için kullanılır. Malzemeye gelen elastik gerilme veya gerinim oluşturan yüklemelerde iyi sonuçlar vermektedir. Bir malzeme plastik gerinime maruz kalıyorsa malzeme ömür hesabı için gerinimi elastik ve plastik gerinim bölgesi olarak ayırmak gereklidir.

Elastik malzemelerin gerinim değeri gerç k gerilme genliği ve çevrim sayısı arasındaki ilişki Basquin eşitliği ile tanımlanır.

Bu tanımda:

$\Delta\sigma/2$: Gerç k gerilme genliği (true stress amplitude),

$\Delta\epsilon_e/2$: Gerç k elastik gerinim genliği (true elastic strain amplitude),

$2N_f$: Tekrarlı yorulma çevrim sayısı (Number of repetitive fatigue cycles),

σ'_f : Yorulma mukavemeti katsayısı (fatigue strength coefficient),

b : Yorulma mukavemeti üssü (fatigue strength exponent),

E : Malzeme elastik modülü (material elastic modulus).

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e E}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.12)$$

Coffin ve Manson plastik gerinim ve çevrim arasındaki bağıntıyı aşağıdaki formül ile tanımlar.

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.13)$$

Bu tanımda:

$\Delta\varepsilon_p/2$: Plastik gerinim genliği (plastic strain amplitude),

ε'_f : Yorulma süneklik katsayısı (fatigue ductility coefficient),

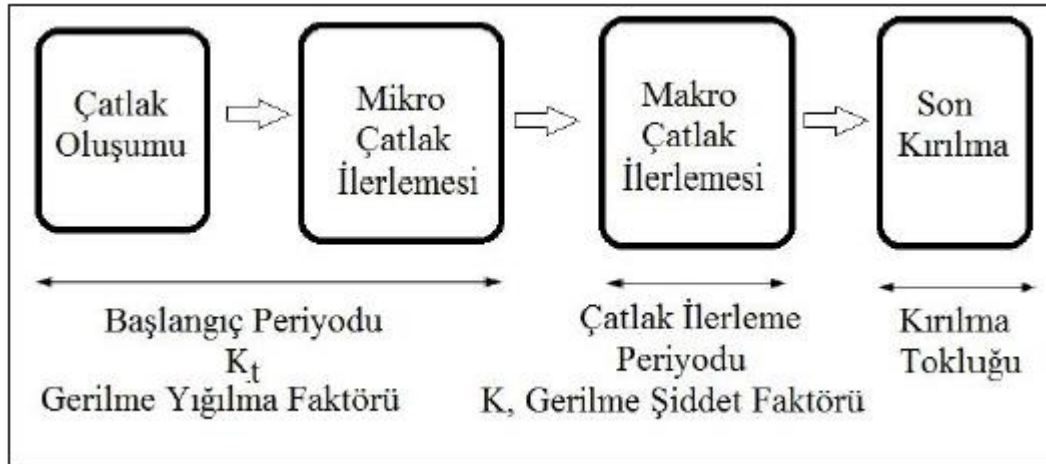
c : Yorulma süneklik üssü (fatigue strength exponent).

2.4.2.3. Kırılma mekaniği yaklaşımı

Bu yaklaşımda yorulma üç aşamada incelenmektedir:

1. Çatlak oluşumu ve başlangıcı
2. Çatlak ilerlemesi
3. Kalan malzeme kesitinin kırılması

Yorulma kırılmasının başlangıcında büyük etki gösteren gerilme yığılma faktörü (K_t), en büyük bölgesel gerilmenin nominal ortalama gerilmeye oranıdır. Şekil 2.19’da yorulma ömür tayin adımları ve yorulmayı performansını etkileyen adımlar gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Yorulma ömrü adımları ve yorulmaya etki eden faktörler (Özmen, 2007)

Yorulma çatlakları malzeme iç yapısında bulunan kusurlar veya malzeme yüzey kalitesine bağlı olarak oluşan çentik civarındaki deformasyonların çok şiddetli olduğu bölgelerde başlamaktadır. Malzemelerde bulunan yüzeysel çatlak, çentik, ani kesit değişimi veya iç yapısal olarak boşluk olan bölgelerdeki gerilmeler parçaya gelen dış gerilmelerden daha büyük değerdedir.

2.4.3. Kaynaklı yapılarda yorulma hesaplama yaklaşımları

Kaynaklı bağlantılarda mukavemetin belirlenmesi bağlantıya etki eden kuvvetin yönü, büyüklüğü, tekrar sayısı ve kaynak dikişinin şekline bağlıdır. Kaynak bölgesine gelen kuvvetlerin dinamik ve statik olması durumuna göre kaynak yorulma dayanımı değişmektedir. Kaynaklı yapılarda yorulma dayanım hesabı yaklaşımları:

- Nominal gerilme yaklaşımı
- Hot spot gerilme yaklaşımı
- Etkin gerilme yaklaşımı
- Kırılma mekaniği yaklaşımı
- Volvo yöntemi
- Gerilme integrasyon yöntemi

Mevcut yöntemlerin birçoğu kalın saclar için geliştirilmişken, otomotiv endüstrisinde genellikle ince saclar kullanılmaktadır. Volvo ile Chalmers üniversitesinin geliştirdiği Volvo yöntemi otomotivde kullanılan ince saclar birleştirilmesinde ki kaynaklı yapılarda daha az kullanıcı müdahalesi gerektiren, karmaşık yüklere maruz kalan kaynaklı yapılarda FE tabanlı yorulma yaklaşımıdır. Bu projede Volvo yöntemi yaklaşımı kullanarak yorulma dayanımı hesabı yapılmıştır. nCode DesignLife yazılımı içerisinde Volvo işbirliği ile ince saclar için geliştirilmiş bir kaynak modeli vardır (nCode DesignLife, 2013).

Büyükbayram ve ark. (2015) alüminyum bir zırh plakası üzerinde kaynaklı yorulma numeleri üzerinden farklı yorulma yaklaşımlarını test verileri ile karşılaştırdıkları bir çalışma yapmışlar. Çalışmada K-alın kaynaklı çapraz bağlantı için yorulma eğilme analizleri ve testleri gerçekleştirmişler. Çalışma sonucunda test verilerine en yakın çıkan sonuçların biri Volvo yöntemi olmuştur.

2.5. Lazer Kaynak Yorulma Dayanımı

Lazer kaynaklı birleştirme tasarımları hem statik hem de dinamik yüklemelere maruz kalmaktadır. Tekrarlı gelen yüklerde kaynak mukavemeti ürünün ömrünü belirleyen

parametredir. Lazer kaynaklı bir bağlantının yorulma ömrü, hızlı kırılma aşamasının izlediği çatlak başlatma ve ilerleme aşamalarının bir kombinasyonudur. Genellikle kaynak geometrisine, dip yarıçaplarına, kök yarıçaplarına, kaynak açısına ve kusurlara, kaynak penetrasyon eksikliğine, soğuk bindirmeler vb. bağlıdır.

Dattoma ve diğ. (2004) çalışmasının amacı, sinüzoidal bir dış yüke maruz kalan kaynaklı bir bileşenin gerçek gerilme durumunu sayısal simülasyonla değerlendirmektir. Bir kaynak işleminden kaynaklanan artık gerilim alanını ve değerini mevcut ABAQUS simülasyonlarında ön gerilim koşulu olarak alınır. Genlik seviyesinin artık gerilme gevşemesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için modele $R=0,1$ yük oranında sekiz farklı sinüzoidal yük uygulanmıştır.

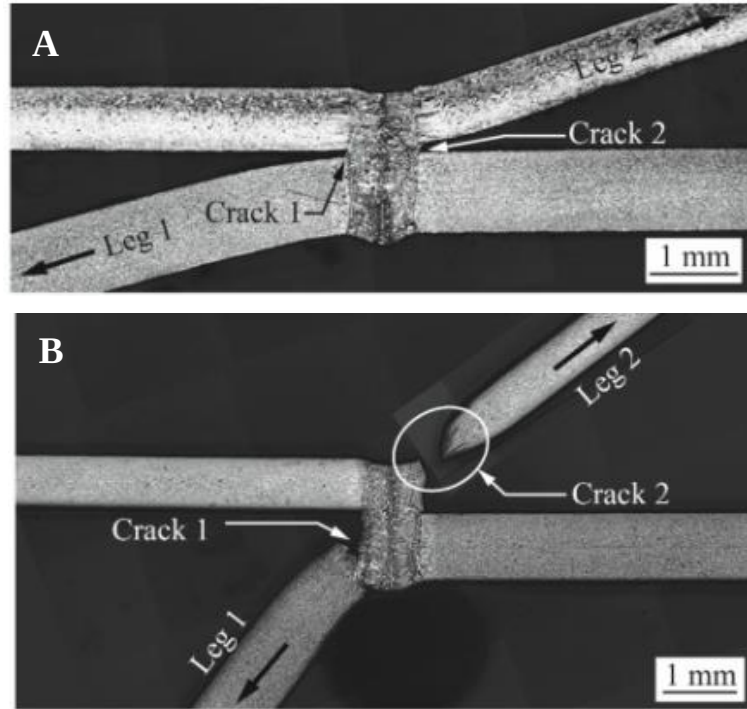
Tsuda ve ark. (2005) makalesinde, yorulma özelliklerini netleştirmek için çeşitli yetersiz dolgulu kaynak boncukları ile farklı kalınlıktaki çelik levhaların lazer kaynaklı alın bağlantıları için çekme testleri ve yorulma testleri yapılmıştır. Ayrıca alın bağlantılarında kaynak metali etrafındaki stres dağılımını, özellikle stres konsantrasyonunu incelemek için FE analizleri yapılmıştır. Yetersiz dolgulu kaynak dikişleri ve kademeli kesitli alın birleşimlerinin, çekme mukavemeti üzerindeki etkileri küçük olmasına rağmen, yorulma mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini gözlemlenmiştir.

Kuppuswamy ve ark. (2007) lazer kaynaklı bağlantılar için modelleme tekniklerini tartışmışlar. Levha kalınlığı, statik ve dinamik dayanım ve bağlantının kırılma davranışı gibi sayısız fiziksel etkiyi kapsayan ampirik bir ilişki geliştirmişlerdir. Tüm simülasyonlarda kaynak için gerinim-gerilme eğrileri ile doğrusal olmayan elastik malzeme modeli (MAT24) kullanmışlardır.

Goyal ve El-zein (2020) yüksek mukavemetli çelik malzemelerin doğrusal ve C şekilli lazer kaynak bağlantılarının mekanik ve yorulma davranışlarını deneysel olarak incelemişler. Doğrusal ve C şekilli kaynaklar kullanılarak yapılan lazer kaynaklı bağlantılar, aynı yorulma yükleme şartları altında benzer yorulma davranışını gösterdiğini bulmuşlardır. Mikron boyutundaki kaynak kök yarıçapından gelen yüksek gerilme yoğunluğu nedeniyle, lazer kaynaklı bağlantının döngüsel yüklenmesi esnasında

çatlak başlangıcının erken gerçekleşeceğini, toplam yorulma ömrünün çoğunu, çatlağı üst tabaka kalınlığı boyunca büyütme için harcadığını saptamışlar.

Su ve diğ. (2020) düşük karbonlu çelik ile yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliğinden yapılmış lazer kaynaklı numunelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Bindirmeli lazer kaynak çekme numunelerini kullanarak hasar yükleri ve yorulma verilerini elde etmişler. Yapılan deneylerde kullanılan iki çeliğin ITAB bölgesinde ilk ayrılmalar görülmüştür.

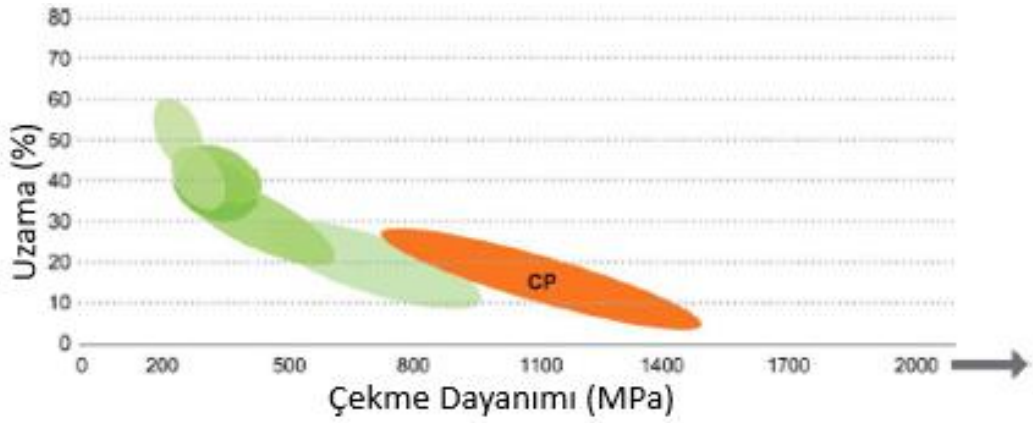


Şekil 2.20. Yorulma ömürlerine göre lazer kaynak hasarı. **A)** 6×10^3 çevrimlik yorulma ömründe başarısız bir lazer kaynak **B)** $1,7 \times 10^4$ çevrimlik yorulma ömründe başarısız bir lazer kaynak

2.6. Kompleks Fazlı Çelikler

Kompleks fazlı (CP) çelikler, çok fazlı mikro yapı içerdiği için geleneksel çeliklere göre daha yüksek mukavemetli çelikler olarak adlandırılmaktadır. Kompleks fazlı çelikler yüksek akma dayanımları, yüksek uzama değerleri ve güvenlik parçalarında çarpışma enerjisi emilimi amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek uzama değerleri sayesinde çift fazlı (DP) çeliklere göre daha iyi şekillendirilebilirliğe sahiptirler.

DP ve TRIP çelikleri, güçlendirme için çökeltme sertleşmesine dayanmaz ve sonuç olarak bu çeliklerdeki ferrit nispeten yumuşak ve sünektir. CP çeliklerinde, karbon nitrür çökeltmesi yapıdaki ferrit mukavemetini arttırır. Bundan dolayı CP çelikleri, 800 MPa ve daha yüksek eşit çekme mukavemetlerinde DP çeliklerinden önemli ölçüde daha yüksek akma mukavemetlerine sahiptir. CP çeliğinin mukavemet-uzama grafiği şekil 2.15’ te gösterilmektedir (World Auto Steel, 2022).



Şekil 2.21. CP çeliğinin mukavemet-uzama grafiği (Kekik, 2021)

Sıcak ve soğuk haddelenmiş şekilde üretilen CP çelikleri otomotiv endüstrisinde birçok parçada kullanılmaktadır. Sıcak haddelenmiş CP çelikleri yüksek yorulma dayanımı sağlar ve dinamik yüklere maruz kalan araç parçaları için uygun olmaktadır. CP çeliği araç üzerinde, şasi bileşenlerinde, süspansiyon parçalarında, B-sütunlarında, darbe anında enerji sönmüleme görevi yapacak ön veya arka tampon kirişlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.22. CP çeliğinin araç üzerinde kullanıldığı bileşenler (Kekik, 2021)

Yapılacak olan bu çalışmada sıcak haddelenmiş, 3.5 mm kalınlığında CP800 kompleks fazlı çelik kullanılmıştır. CP800 malzemenin lazer kaynak ile birleştirilmesi sonucu birleştirme mukavemeti sonlu elemanlar yöntemi ile bakılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışmasında kompleks faz çeliği olan CP800 çelik sac malzeme kullanılmıştır. İki aynı malzemenin birbirine uygun parametre de kaynatılması ile çalışmaya başlanmıştır. Parametre seçiminde proses bilgisi ve yapılan simülasyonlar sonucunda seçilmiştir. 3.5 mm kalınlığında CP800 saclar uygun parametrede birbirine kaynatıldıktan sonra numunelerden makro alınarak nüfuziyet oranına bakılmıştır.

CP800 kompleks sac malzeme sıcak haddelenmiş şekilde üretilmektedir. Endüstride 4 mm kalınlığına kadar sıcak haddelenmiş CP800 sac malzeme bulmak mümkündür. Çizelge 3.1’de CP800 çelik sac malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2’de ise mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. CP800 malzemesinin kimyasal kompozisyonu

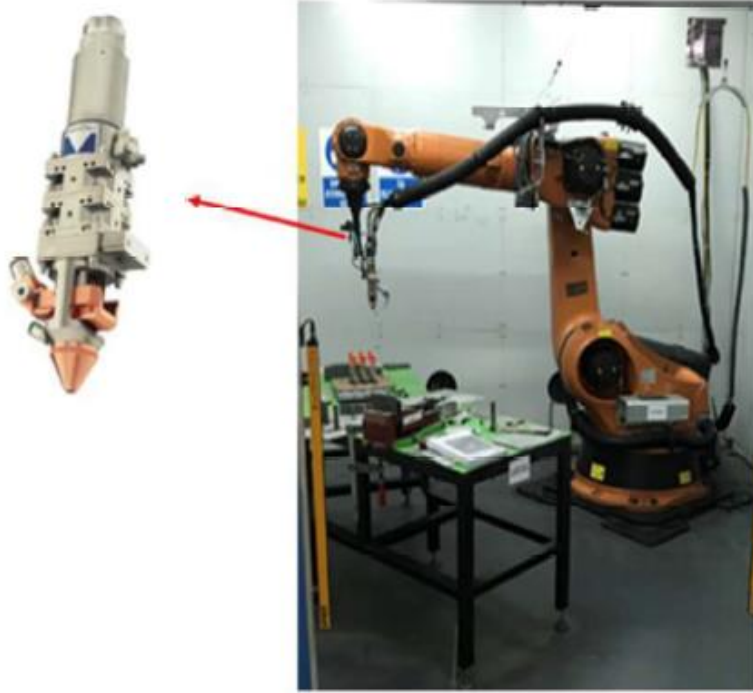
Malzeme	C (maks.)	Mn (maks.)	Si (max)	P (maks.)	S (maks.)	Al (maks)	Cr+Mo (maks.)	Ti+Nb (maks.)
CP800	0.18	2.20	1.00	0.08	0.015	1.2	1.00	0.25

Çizelge 3.2. CP800 malzemesinin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı R_p (Mpa)	Çekme Dayanımı R_m (Mpa)	Kopma Uzama A_{80} (%)
CP800	660-820	760-960	12

3.2. Lazer Kaynak Ünitesi ve Özellikleri

Çalışma kapsamında yapılan lazer kaynak işlemlerinde 3 kW gücündeki Precitec YW30 modelinde bir lazer kafası kullanılmıştır. Rezonatör ünitesi ise IPG YLS-3000-S2T modelinde su soğutmalı bir fiber lazer ünitesi kullanılmıştır.



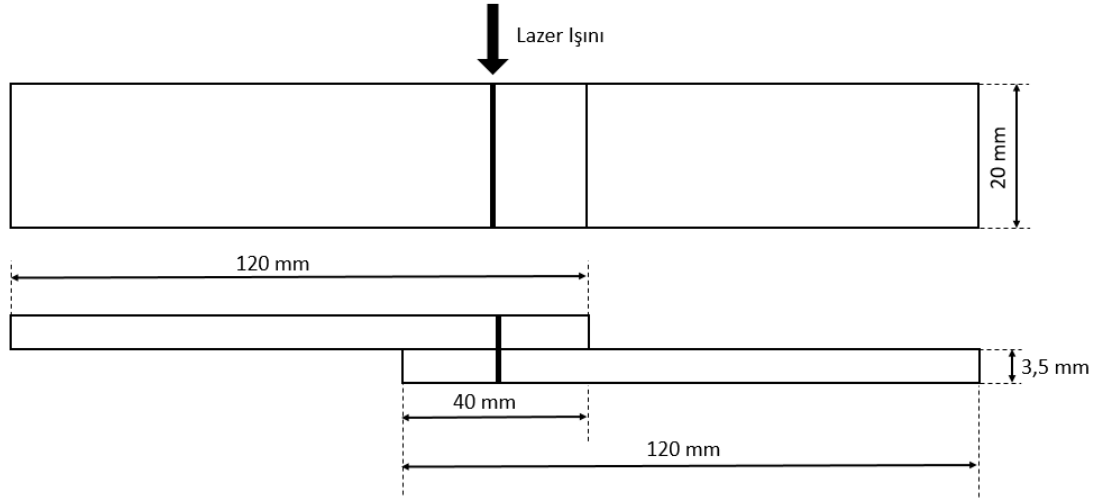
Şekil 3.1. Lazer Kafası

Lazer kaynak işleminde numune sacların doğru konumda ve hassas şekilde sabitlenmesi önemlidir. Kaynak işlemi sonrası çarpılmadan dolayı oluşacak çarpılma büyüklükleri ve şekilleri iş parçasını bağlayış şekline göre değişebilmektedir. İki adet CP800 çelik sacların fikstür üzerine sabitlenmiş hali Şekil 3.2’de verilmiştir.

3.3. Deney Numuneleri Oluşturulması

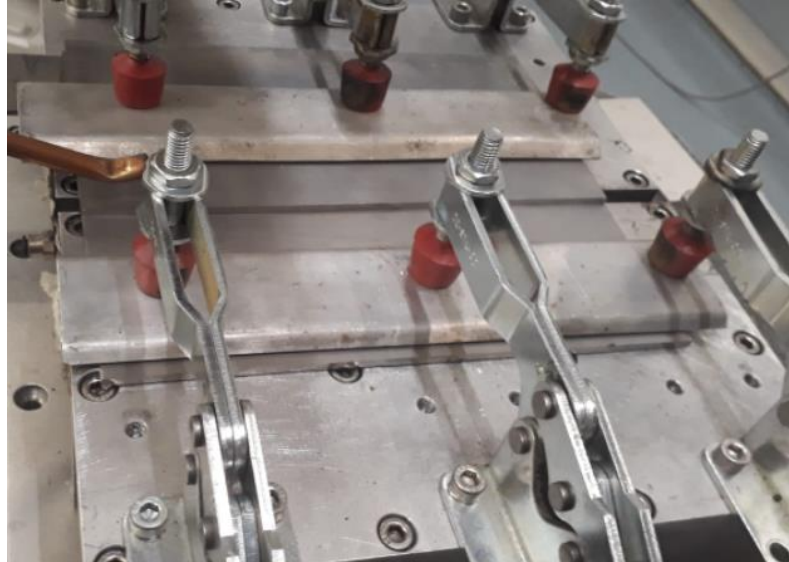
Tez çalışmasında kaynak işlemi için parametre çalışması yapılmamıştır. Seri üretimde kullanılan parametreler dikkate alınarak kaynak işlemi yapılmıştır. Kaynak numuneleri oluşturmada önce sac malzemeler üzerinde deneme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan ön çalışmalar sonucunda 3 kw güç, 12 mm/s hız ve odak uzaklığı 0 mm olarak belirlenmiştir.

Lazer kaynak numune boyutları ve bindirme konumları şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Bindirme uzunluğunun tam ortasına lazer ışını gelecek şekilde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Numune boyutları

Deney numuneleri hazırlanırken mevcut sac malzeme ölçülerine göre numune seçilmiştir. Lazer kaynak işlemi için 130x270 mm lik iki adet sac malzeme oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sac malzemeler 40 mm ölçüsünde üst üste bindirecek şekilde kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Kaynak işlemi büyük bir plaka üzerinde yapıp bu plakadan gerekli sayıda numuneler çıkartılmıştır. Şekil 3.3' te lazer kaynak işleminde kullanılan fikstür görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3. Lazer kaynak fikstürü

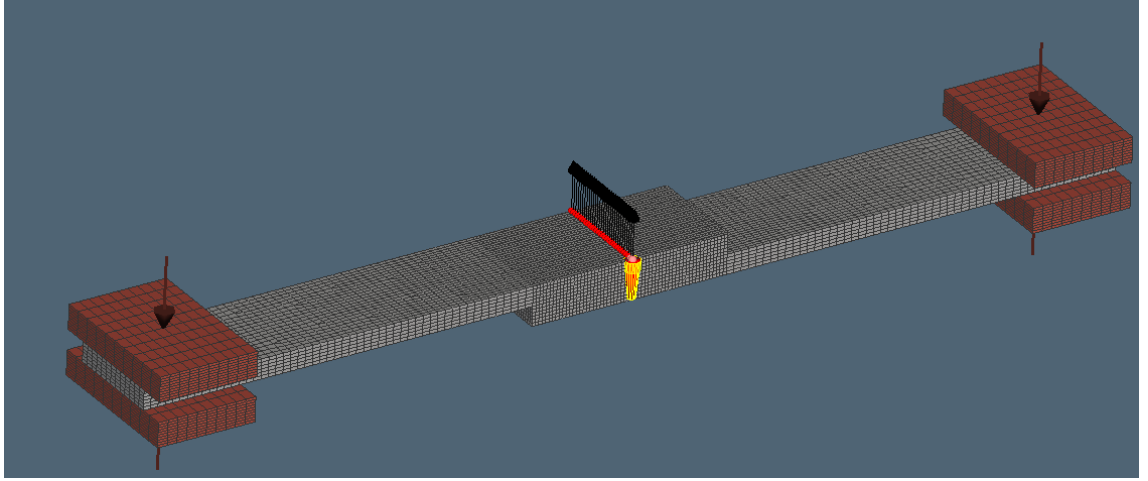
Numune sayısı 9 adet yorulma, 1 adet mikro ve makro analiz olmak üzere toplamda 10 adet numune oluşturulmuştur. Kaynak işlemi sonrasında tel erozyon ile büyük plakadan 10 adet numune çıkarılmıştır. Kaynak işlemi sonrası oluşturulan numuneler Şekil 3.4' te verilmiştir.



Şekil 3.4. Kaynaklı numuneler

3.4. Simufact Welding Modeli

Lazer kaynak prosesi Simufact Welding yazılımı sayesinde simüle edilmiştir. Proses esnasında girilen parametreler simülasyon aşamasında dikkate alınarak gerçeğe en yakın şekilde analiz koşturulmuştur. Numune boyutlarına uygun CAD modelleri oluşturulup elemanlara ayırma işlemi yapılarak simülasyona başlanmıştır. CP800 malzemesi JmatPro yazılımı yardımıyla malzeme kartı oluşturulup Simufact Welding yazılımına import edilmiştir. Kaynak simülasyonu sonucunda faz dönüşümleri ve sertlik değerlerini görmek için oluşturulan malzeme kartı faz dönüşüm özelliklerini de barındırmaktadır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi sac malzemeler üst üste bindirildikten sonra uç kısımlarından klamp yardımı ile sabitlenmiştir.



Şekil 3.5. Simufact Welding numune lazer kaynak modeli

Simufact Welding modeli termomekanik olarak kurulmuştur. İlerleme hızına bağlı olarak toplam kaynak süresi yaklaşık 2 s sürede bitmekte ve sonrasında model oda koşulu sıcaklığına(20 °C) kadar soğutulmaktadır.

3.5. Metalografik İnceleme ve Mikro Sertlik Ölçümü

Lazer kaynak ile birleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra makro ve mikro yapının incelenmesi için oluşturulan numunelerden bir tanesi enine kesilerek incelenmiştir. Metalografik inceleme öncesi numune Metkon ECOPRESS 52 marka numune kalıplama cihazı ile bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler yapının daha düzgün incelenmesi için zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur.

Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra numuneye dağlama işlemi yapılmıştır. Numunenin iç yapısının ortaya çıkması için dağlama işleminde son olarak nital ve nitrik asit 5-10 s uygulanarak yüzey su ile yıkanmıştır. Metalografik inceleme için hazır numune NIKON ECLIPSE LV150NL mikroskobu ve CLEMEX analiz yazılımı yardımıyla farklı yakınlıklarda görüntüler alınmıştır. Kaynak penetrasyon derinliğine makro seviyede bakılıp, TM, ITAB ve EB için mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Metalografik incelemede kullanılan cihazların fotoğrafları Şekil 3.6'ta gösterilmektedir.

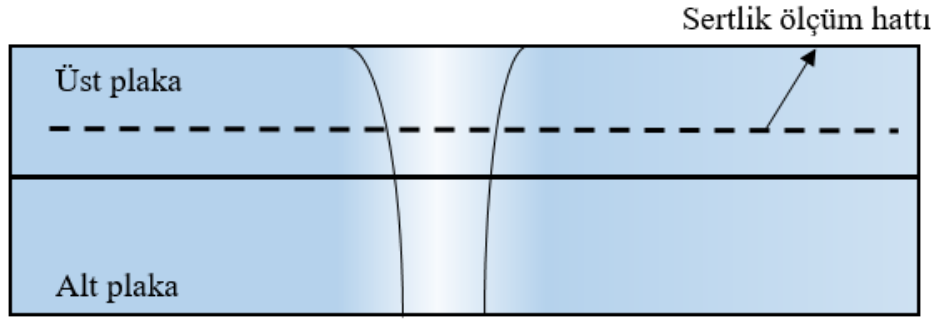


Şekil 3.6. Metalografik incelemede kullanılan cihazlar. **A)** Metkon Ecopress numune kalıplama cihazı **B)** Metkon Forcipol zımparalama- parlatma cihazı **C)** Nikon Eclipse LV150NL mikroskobu

Mikro ve makro olarak mikroskopta incelenen numuneyi sonrasında Vickers yöntemiyle mikro sertlik ölçümü yapılmıştır. Numunenin üst plakasından üç farklı bölgeyi (TM, ITAB ve EB) kapsayacak şekilde 40 farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Ölçümler QNESS Q10M ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.7). Sertlik ölçüm hattı Şekil 3.8’te gösterilmiştir. Ölçüm noktaları arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0.3 mm’ dir.



Şekil 3.7. QNESS Q10M sertlik ölçüm cihazı



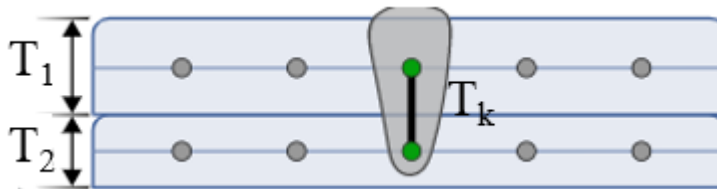
Şekil 3.8. Vickers mikro sertlik ölçüm hattı

3.5. Sonlu Elemanlar Modellemesi

3.5.1. Lazer kaynak modellenmesi

Yorulma performansı incelemenden önce bazı parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Oluşturulan numuneler simülasyon ortamında analiz edilebilmesi için Altair Optistruct ve Altair Radioss yazılımlarından yararlanılmıştır. Model zaman alıcı çözümlerin önüne geçmek için iki boyutlu elemanlar kullanarak kurulmuştur.

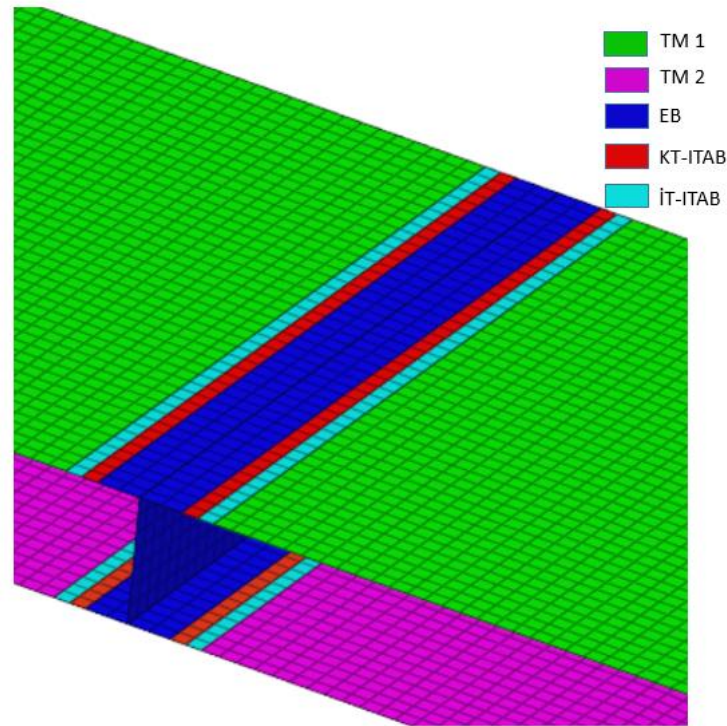
Kaynak modellemesi için Volvo yöntemi kullanılmıştır. Volvo yöntemi ince sac malzemelerde kaynak bölgelerinin yüzey elemanlar ile modellemesine dayanır. Modellenen kaynak yüzey elemanlarının kalınlık bilgisi için kaynak şekline göre ampirik formüller mevcuttur. Bu çalışmada bindirme kaynak yöntemi kullanıldığından Şekil 3.9 da gösterilen yöntemden destek alınmıştır. Model kurulurken sac malzemelerin orta yüzeyleri dikkate alınmıştır. Lazer bindirme kaynağı modellenmesinde kaynak elemanlarının kalınlığı FEA(Finite Element Analysis)yazılımları tarafından minumum sac kalınlığının %90 olacak şekilde olması önerilmektedir.



Şekil 3.9. Kaynak bölgesi yüzey eleman olarak modellemesi

$$T_k = 0.9\min(T_1, T_2) \quad (3.1)$$

Kaynak bölgesi temelde üç farklı bölgeden (EM, ITAB ve TB) oluşmaktadır. Özellikle ITAB'da EB'ne yakın olan kısım sert, TM'ye yakın olan kısım ise yumuşak özellik göstermektedir. Sonlu elemanlar modeli kurulurken ITAB ikiye ayrılmıştır. Bu bölgelerin boyutları yapılan metalografik incelemelerden yapılan ölçümler sayesinde belirlenmiştir. Kaynak bölgelerinin malzeme özellikleri ise Lee ve ark. yaptığı çalışmalarda ki gibi sertlik değerlerinden tahmin edilerek oluşturulmuştur. Homojen malzeme özellikleri göstermeyen iki boyutlu sonlu elemanlar modeli şekil 3.10'da gösterilmiştir. İki sac metal arasında bulunan bağlantı elemanlarının kalınlığı denklem (3.1) 'e göre 3.15 mm olarak modellenmiştir. Diğer bütün bölgelerin kalınlığı 3.5 mm'dir.

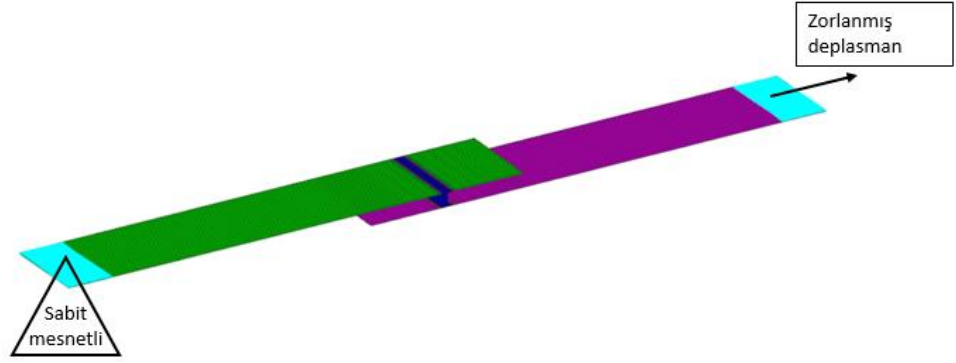


Şekil 3.10. Kaynak bölgesi sonlu elemanlar modeli

3.5.2. Çekme analiz modeli

Lazer kaynak numune modeli Altair Radioss çözücüsü sayesinde çekme testi analiz edilmiştir. Çekme aşamasında numunede ki yırtılma başlama noktasını ve numune kopma

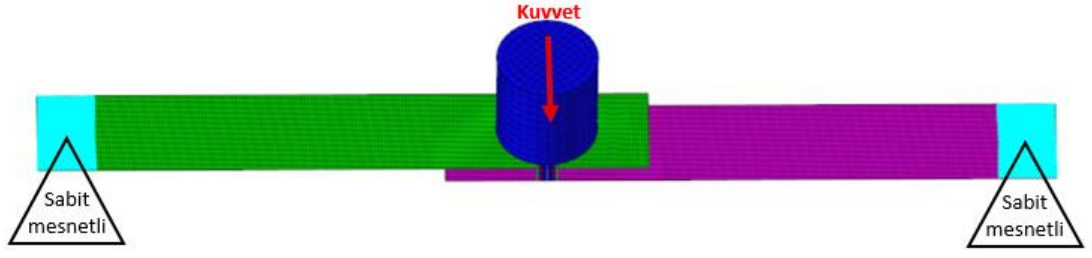
mukavemetini elde etmek için Altair Radioss çözücüsü kullanılmıştır. Temel malzemenin modellemesi için üretici firma tarafından verilen malzeme gerinme-gerilme grafiği kullanılmıştır. Malzeme modeli oluşturulurken mühendislik eğrisi gerçek eğriye dönüştürülmüştür. Yapılan analizler lineer olmayan analizler olduğu için malzeme kartı lineer olmayan analiz tipine uygun bir şekilde oluşturulmuştur. EB ve ITAB için mazleme kartları mikro sertlik ölçüm sonucundan elde edilen veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 3.11’te görüldüğü gibi numunenin bir ucu sabit mesnetli, diğer ucu ise zorlanmış deplasmana maruz bırakılmıştır. Zorlanmış deplasman saniyede 5 mm çekme işlemi yapılacak şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 3.11. Çekme testi analiz modeli

3.5.3. Yorulma analiz modeli

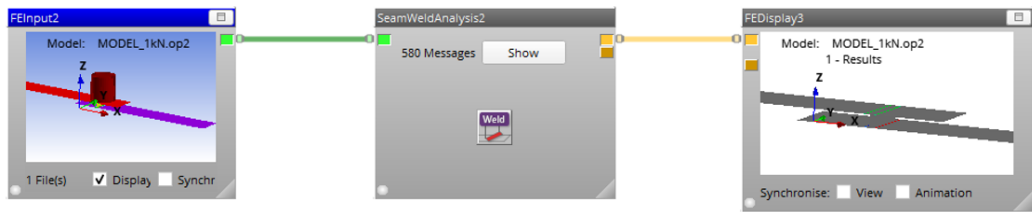
CP800 malzemesi genellikle araç süspansiyon ve çarpışma parçalarında kullanılmaktadır. Bu parçalar mevcut sınır şartlarında genellikle eğme yüküne maruz kalmaktadır. Bu çalışmada lazer kaynak yorulma performansı eğme yüküne karşı ölçülmüştür. Değişken yüklerin uygulanacağı nokta kaynak bölgesine dik bir şekilde seçilmiştir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi numune iki uç noktadan sabit tutularak tam ortadan yani kaynak bölgesinden eğmeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.12. Yorulma analiz modeli

Çalışmada 3 farklı değişken yük seçilmiştir. Yüksek ve düşük çevrim oranlarında ve arasında değerler elde etmek için 1 kN, 2 kN ve 3 kN yüklerinde yorulma analizleri yapılmıştır. Kuvvetler, ilk değer üst gerilme genlik ile akma sınırına yakın olacak şekilde seçilip sonrasında kademeli olarak kuvvet azaltılmasına göre seçilmiştir. Altair Optitruuct yazılımı kullanarak üç farklı kuvvette lineer statik analizler yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucu elde edilen gerilme değerleri ve analiz çıktı dosyaları yorulma analizi için nCode DesignLife yazılımına girdi olarak verilmiştir. nCode DesignLife yazılımında akış şeması şeklinde blok döngüler oluşturularak kaynak numunelerinin kuvvete dayanabileceği çevrim sayısı elde edilmiştir. Şekil 3.13’ te görüldüğü gibi lineer analiz sonuçlarının blok içine aktarılması ve sonrasında nCode DesignLife yazılımı içerisinde bulunan SeamWeld Yorulma modelinde kaynak bölgesinin yorulma performansına bakılmıştır.

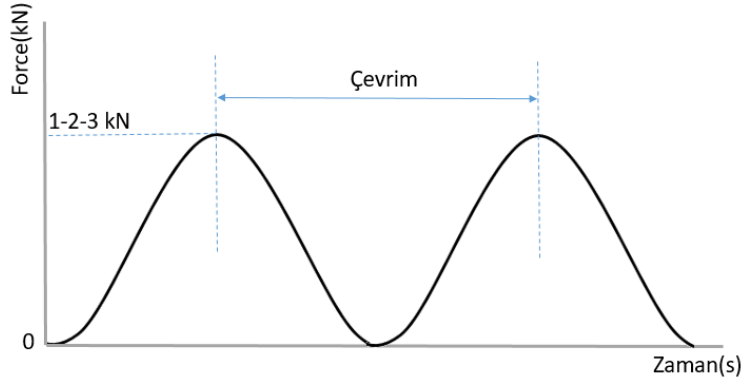


Şekil 3.13. nCode DesignLife akış şeması

SeamWeld modelinde kaynak bölgesinin malzeme bilgileri girilerek yorulma analizi oluşturulmuştur. Yapılacak olan fiziksel testlerden elde edilen sonuçlar ile çevrim sayısı-kuvvet grafiği oluşturulmuştur. Test sonucunda oluşan noktasal verilerin içinde kalacak şekilde bir eğri çizilmiştir. Bu eğrinin eğiminden kaynak bölgesindeki ilk yorulma

mukavemeti üssü(b) ve stress aralığı kesişimi (SRI) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler nCode arayüzünde kaynak bölgesinin malzeme tanımında girilmiştir.

Belirlenen üç farklı kuvvette yapılan lineer statik analizlerin tekrarlı olarak yapıldığında yapının ömrünü tayin etmek için bir sinüs grafiği sayesinde kuvveti tekrarlı bir şekilde uygulanmasına maruz bırakılmıştır. Sinüs grafiğinde iki tepe arası toplam bir çevrim sayısını oluşturmaktadır. Kuvvet uygulanıp geri tekrar sıfır konuma çekildiğinden R(ortalama gerilme) değeri de sıfır olmaktadır. Şekil 3.14'te yorulma analizi ve testleri için sinüs grafiği üzerinde kuvvetin uygulanışı gösterilmiştir.



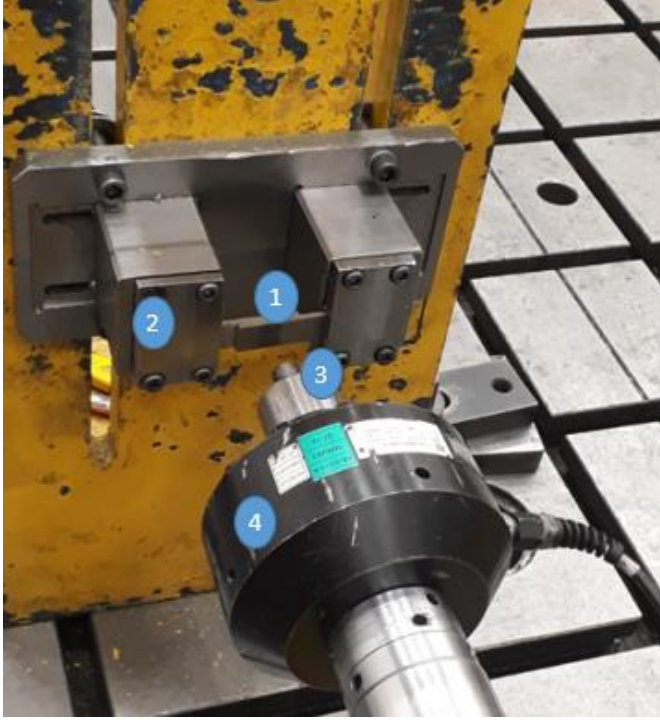
Şekil 3.14. Sinüs grafiğinde yorulma yükleme durumu

3.6. Yorulma Test Düzeneği

Lazer kaynak yorulma numunelerinin testleri için MTS (Malzeme Test Sistemi) cihazı kullanılmıştır. MTS cihazı hidrolik pistonlar sayesinde kuvvet veya deplasman girdisi vererek yapısal parçaları statik veya dinamik yüklemelerde test edilmesini sağlar. Yorulma numunelerini üç nokta eğme yorulmasına maruz bırakabilmek için iki ucdan sabitlenmiştir. Kaynak bölgesinin orta kısmına yük uygulayacak silindirik şeklinde bir darbe parçası konumlandırılmıştır.

Yorulma testi için tasarlanan fikstür şekil 3.15’te görülmektedir. Numaralandırılan unsurlar:

1. Test edilecek numune
2. Test fikstürü
3. Darbe parçası
4. Kuvvet sensörü (loadcell)



Şekil 3.15. Yorulma test düzeneği

Oluşturulan numuneler bindirme kaynak numuneleri olduğu için fiziksel test esnasında numuneler üzerinde herhangi bir ön gerilme olmaması için destek parçaları kullanılmıştır. Bu parçalar sayesinde kaynak numuneleri fikstüre düz bir eksenle bağlanmıştır.

3 farklı kuvvette üçer adet numune ile toplamda 9 adet numune yorulma testine tabi tutulmuştur. Kuvvetler sinüs eğrisi şeklinde numunelere uygulanarak kırılmaya başladığı ana kadar olan çevrim sayısı elde edilmiştir. Yapılan bütün yorulma testleri otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan 3 Hertz frekansında yapılmıştır.

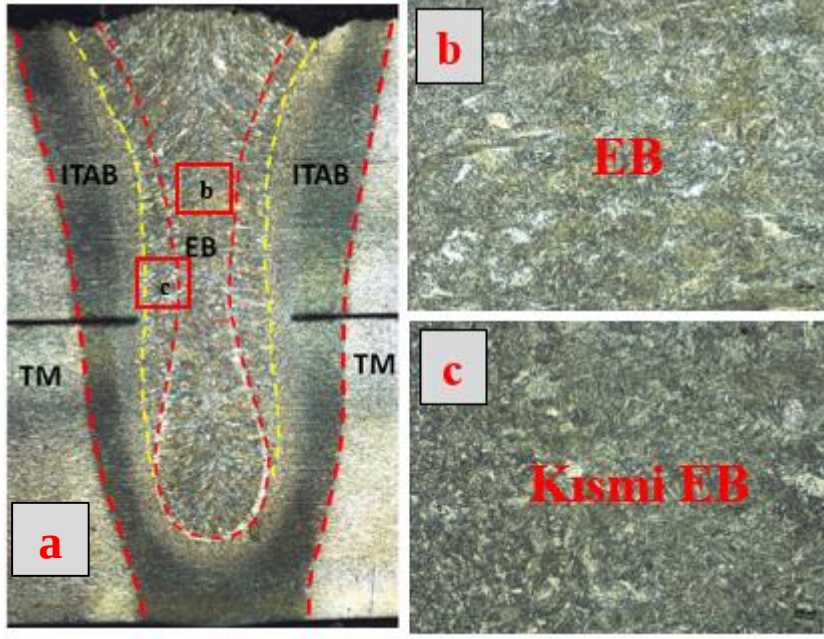
4. BULGULAR

4.1. Kaynak Bölgesinin Mikro ve Makro Yapılarının İncelenmesi

Lazer kaynak işlemi sonrasında numunelerden enine kesit alınarak makro ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, ısı girdisinin bağlantı için yeterli olduğu meydana gelen kum saati görüntüsünden anlaşılmaktadır. Dar ancak derin penetrasyon olduğu görülmektedir. Kaynak metali ergime sınırından kaynak merkezine doğru gelişen sütunlu taneler, epitaksiyel katılaşmanın sonucu olarak makro kesit görüntüsünde net bir şekilde görülmektedir. Isının kaçtığı yöne doğru tanelerin yönlendiği ve büyüdüğü görülmektedir.

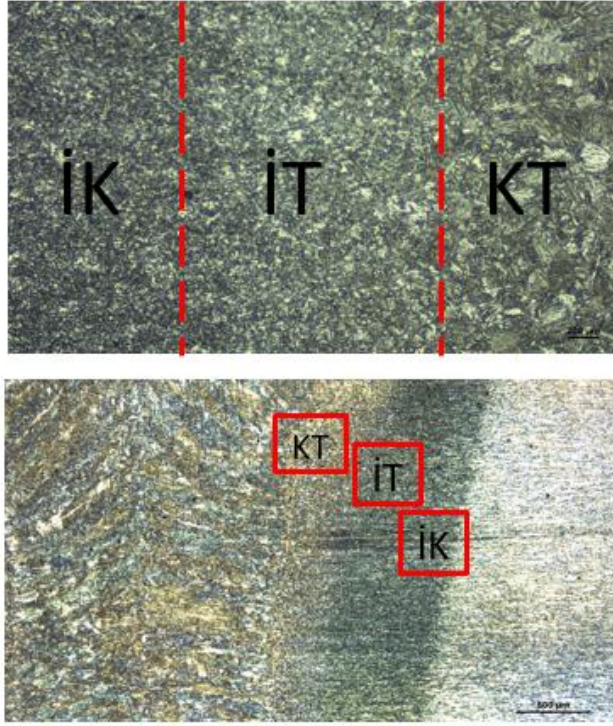
Kaynak metalinde oluşan mikro yapılar bölgede kaynak sırasında gerçekleşen termal çevrimlere, (sıcaklık gradyanlarına) yani soğuma hızına bağlıdır. Makro yapıdan (şekil 4.1) kaynak hızının yüksek olduğu, bu sebeple de soğuma hızının da doğru orantılı olarak yüksek olduğu söylenebilir. Kaynak bölgesi üç ana bölgeden meydana geldiği yapılan makro ve mikro incelemelerden anlaşılmaktadır. Ergimiş Kaynak Metali’ni sırasıyla Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve Temel Malzeme takip etmektedir.

Erime bölgesi maruz kalınan ısı girdisinden dolayı çeliğin erime sıcaklığının üstünde ki değerlere ulaşıldığı bir bölgededir. Erime bölgesi kendi içinde EB ve Kısmi EB olarak ikiye ayrılmıştır. Anahtar deliği çevresinde ITAB bölgesine geçmeden dar bir alanda Kısmi EB bölgesi oluşmuştur. ITAB bölgesi ise yüksek sıcaklığa maruz kalan fakat erime olayı olmayan, sıcaklığa bağlı olarak farklı mikro yapılara sahip bölgedir. Kaynak aşamasında uygulanan parametrelere göre bu bölgenin boyutları değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 4.1. Kaynak bölgeleri. **a)** Kaynak bölgesi makro yapısı **b)** Erimiş bölgesi **c)** Kısmi erime bölgesi

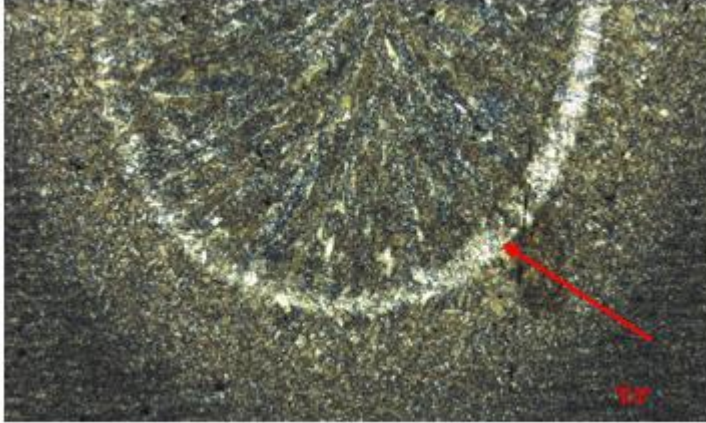
Meydana gelen termal çevrimlere bağlı olarak ITAB'ın kendi içinde bölgelere ayrıldığı mikro yapı resimlerinden anlaşılmaktadır. Bu çeliklerde genel yapının martenzit olduğu düşünüldüğünde mikro yapıda görülen (şekil 4.2) kaynak metalinin yapısındaki martenzit açıklanabilmektedir. Ergimiş kaynak metalinin mikroyapısı ana malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Kaynak bölgesindeki hızlı soğuma ve katılaşmanın bir sonucu olarak ITAB'ın dört alt bölgeye ayrılabilirdiği makro ve mikro görsellerden anlaşılmaktadır. Kaba taneli ITAB (KT-ITAB), ince taneli ITAB (İT-ITAB), inter kritik ITAB (İK-ITAB) ve alt kritik ITAB (AK-ITAB) (Lian Chen ve ark., 2020).



Şekil 4.2. Kesit alınan kaynaklı bağlantının ITAB bölgeleri

Ergime sınırının hemen yanında kaba taneli sert ITAB dikkat çekmektedir. Ergimiş metale yakın kaba taneli ITAB'ın maruz kaldığı yüksek sıcaklıklar dolayısıyla tanelerinin irileştiği görülmektedir. Kaba taneli ITAB bölgesinin Ac3(üst kritik sıcaklık çizgisi) sıcaklığının üzerine çıktığı ve yeniden kristalleştiği söylenebilir. Kaba taneli ITAB'ı temel Metal'e doğru ilerledikçe ince taneli ITAB takip etmektedir. Bu bölgede de kaba taneli ITAB'ta olduğu gibi yeniden kristalleşme devam etmekte olup tümüyle östenite dönüşen yapı hızlı soğumanın etkisi ile martenzite dönüşmektedir. Kaba taneli ITAB'ı takip eden yapı ince taneli yapı östenit başlangıç ve bitiş sıcaklıkları arasına maruz kaldığından yapının incelendiği ve nispeten kaba ve ince taneleri barındıran bir bölge oluşturduğu görülmektedir. Literatürde interkritik olarak adlandırılan bölgeyi de içinde barındırmaktadır. Alt kritik ITAB ise Ac1(alt kritik sıcaklık çizgisi) sıcaklığının altına maruz kaldığından mikro yapının temperlenmiş martenzitten oluştuğu ve bir miktar yumuşama eğilimi göstererek, azalan sertlik değerlerine sahip bir bölge oluşturduğu söylenebilir.

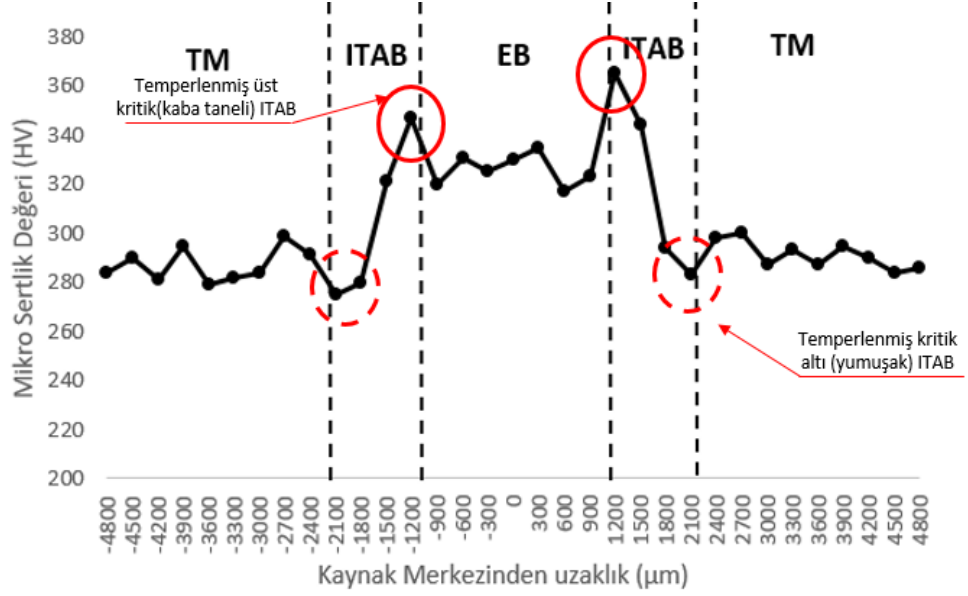
Delta fazından dışarı göç eden karbon numunenin hızlı soğuması sonucu geri difuze olamadığından anahtar deliği çevresinde kısmi ergime bölgesi beyaz bölge meydana gelmiştir. Meydana gelen hızlı soğuma yeterli difüzyon zamanı oluşmasını engellemiştir. Buda kısmi bir ergime bölgesi oluşmasına neden olmuştur. Şekil 4.3' te beyaz bölge gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Delta fazından dışarı göç eden karbonun oluşturduğu beyaz bölge

4.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

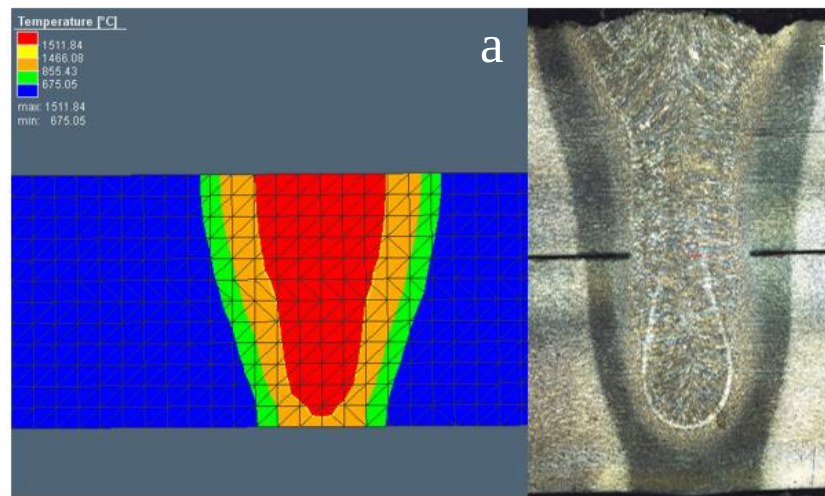
Kaynak bölgesini oluşturan üç bölgeden alınan mikro sertlik verileri HV cinsinden Şekil 4.4' te verilmiştir. EB bölgesi martenzit yapısından dolayı TM bölgesine göre sertlik değerleri yüksek görülmüştür. EB bölgesinde görülen ortalama sertlik değeri 325.8 HV' dir. ITAB bölgesinde ise EB bölgeye yakın olan kısımda sertlik değerinde önce artış sonra kaynak noktasından uzaklaştıkça sertlik değerinde düşüş gözlemlenmiştir. ITAB'da ortalama sertlik değeri 314 HV çıkarken, TM'ye yakın olan kısımda 280 HV, EB'ye yakın olan kısımda ise 365 HV değerine kadar çıkmaktadır. ITAB'da mikro yapı incelemelerinde de görüldüğü gibi kendi içinde iki bölgeye ayrılabilir: ince taneli ITAB ve kaba taneli ITAB. İnce taneli ITAB, EB' ye yakın olan kısımdır. Burada ince taneli martenzit yapıları olduğundan mikrosertlik değerleri EB'ye göre yüksek çıkmaktadır. TM' ye doğru ilerleyen ITAB bölgesinden tane boyutlarında büyüme görülmekte ve burada mikro sertlik değerleri TM'den daha düşük çıkmaktadır. Bu bölge yumuşama bölgesi olarakta adlandırılabilir. TM'de ortalama sertlik değerleri 290 HV çıkmaktadır.



Şekil 4.4. Mikro Sertlik Sonuçları

4.3. Simufact Welding Analiz Sonucu

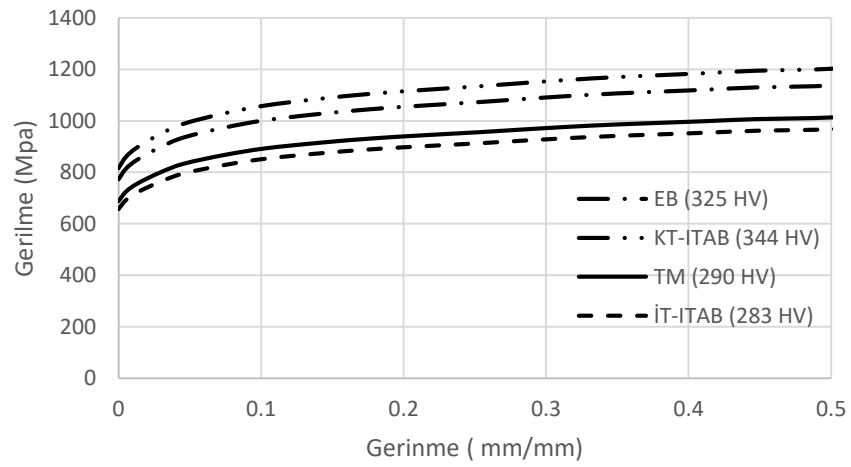
Simufact Welding yazılımında yapılan kaynak analizinde mevcut kaynak parametrelerine göre kaynak penetrasyon şekline bakılmıştır. Analiz sonucu oluşan kaynak penetrasyonu, mikro yapı görüntüsü alınmış kaynak numunesi ile karşılaştırılmıştır(Şekil4.5).Analiz sonucu mikro yapı görüntüsü ile benzerlik göstermektedir. Lazer kaynak parametrelerine dolayı yapı üzerinde oluşan ısı girdisi göre penetrasyon şekli ve derinliği değişmektedir.



Şekil 4.5. Kaynak analizi sonucu ve makroyapı karşılaştırma. **a)** Simufact Welding penetrasyon sonucu **b)** Lazer kaynak makro yapısı

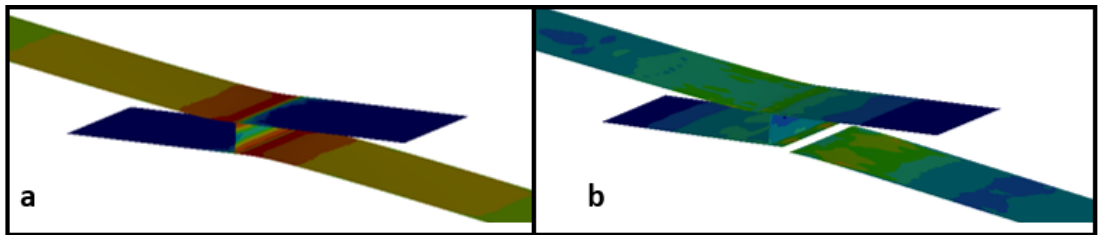
4.4. Çekme Analizi Sonucu

Lazer kaynak numunesi zorlanmış deplasman yükü uygulanarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kaynak bölgesinin malzeme kartları bölgesel olarak modele girilmiştir. Malzeme kartları oluşturulurken bölgesel olarak sertlik değerlerinden faydalanılmıştır. Lee ve ark. (2020) yaptığı çalışmalarda ki gibi sertlik değerlerinden bölgenin plastik gerinim ve gerilme grafiği tahmin edilmiştir. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi kaynak bölgelerinin malzeme grafiği oluşturulmuştur.



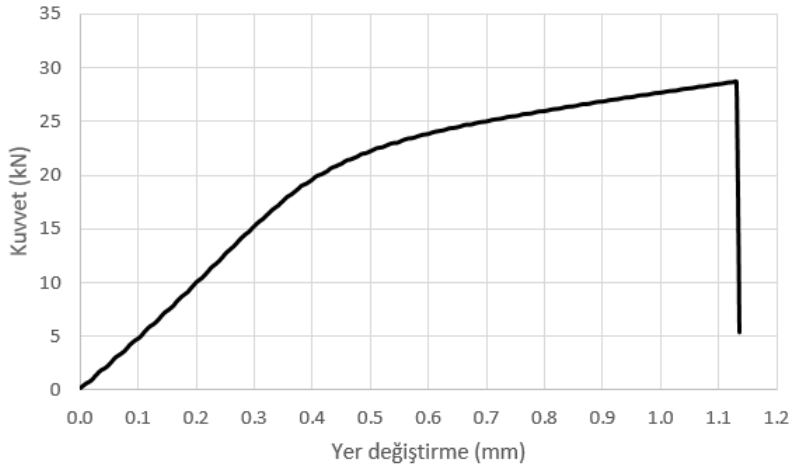
Şekil 4.6. Kaynak bölgelerinin malzeme grafikleri

Yapılan literatür çalışmalarında lazer kaynak numuneleri genelde ITAB’da kopmaktadır. Sonlu elemanlar analiz sonucunda çekmeye zorlanan numune de kopma İT-ITAB’da oluşmaktadır. Şekil 4.7’te kopmadan önceki ve kopma yaşandıktan sonra ki görseller verilmiştir. Altair Radioss analiz çözücüsü kullanılan analiz modelinde kopma yaşandığı anda kopmanın olduğu elemanlar silinmektedir.



Şekil 4.7. Çekme analizi sonuç görseli. **a)** Kopma olayı oluşmadan önceki adım **b)** Kopma olayının gerçekleştiği adım

Sabit zorlanmış deplasmana maruz bırakılan noktadan kuvvet ve deplasman verileri toplanmıştır. Numunenin kopma kuvveti analiz sonucunda yaklaşık 28,6 kN bulunmuştur. Yer değiştirme- kuvvet grafiği Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Kopma yaşandığı esnada numune 1.14 mm yer değiştirmiştir.



Şekil 4.8. Çekme analizi yer değiştirme-kuvvet grafiği

4.5. Yorulma Analizi Sonuçları

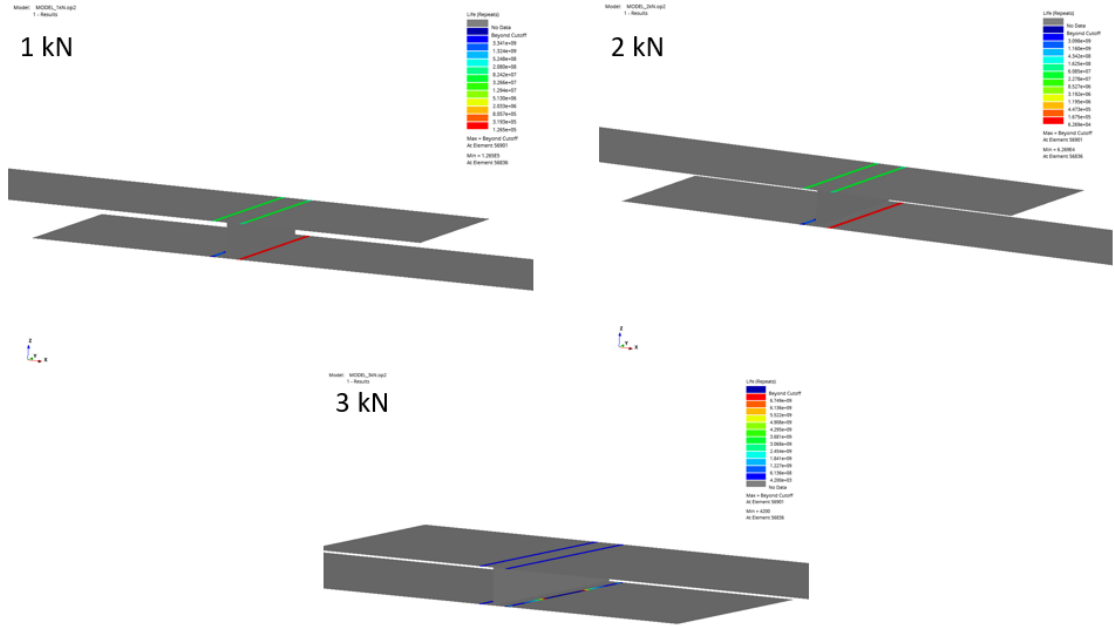
Üç farklı kuvvette yapılan yorulma ömür hesabı analizleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Buradaki değerler sonrasında fiziksel test sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılacaktır. Kaynak bölgesindeki ITAB bölgesi, en zayıf bölge olduğu için kaynağın ömrüne belirlemektedir. Yapılan literatür araştırmasından yola çıkarak EB’nin ITAB’dan daha dayanımlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Yorulma analizlerinde sadece kaynak bölgesinin ömür hesabı yapılmıştır. ITAB’da minimum ömür değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Yorulma Analiz Sonuçları

Uygulanan Kuvvet (kN)	1	2	3
Ömür (Çevrim)	126500	62690	4200

Şekil 4.9’de nCode DesignLife yazılımından alınan kuvvet değerlerine karşılık ömür konturları gösterilmiştir. Yorulma analizinde model olarak kaynak modeli kullanıldığından(SeamWeld) kaynak elemanları tanımlamaları yaptıktan sonra kaynak

bölgesine en yakın olan bölge yani ITAB’ın çevrim sayısı kontur olarak verilmektedir. Yazılım içerisinde kaynak modülü, kaynaklı yapılarda ITAB’dan parçanın kopacağını tahmin ederek ITAB’ın çevrim sayısını göstermektedir.



Şekil 4.9. Kuvvet değerlerine bölgesel çevrim sayılarının kontur grafiği

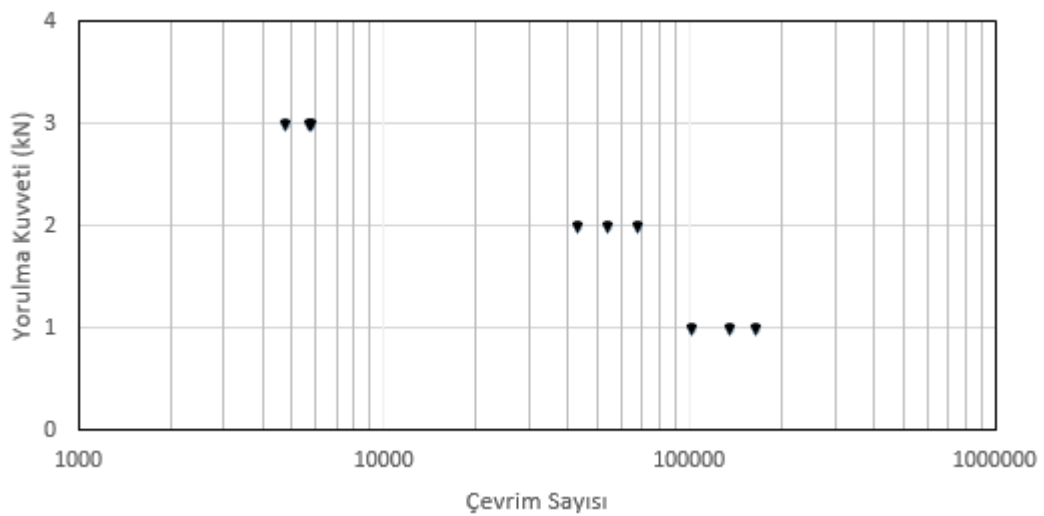
4.6. Yorulma Test Sonuçları

MTS sisteminde toplamda 9 adet parça test edilmiştir. Kuvvetin uygulanıp sıfıra çekilme anı bir çevrim olarak hesaplanmıştır. Yorulma ömür hesabında çatlak başlangıcı veya kırılmanın tam gerçekleştiği çevrim dikkate alınır. Yapılan testlerde kırılmanın gerçekleştiği çevrim dikkate alınarak ömür hesabı yapılmıştır. Çizelge 4.2’te kuvvet değerlerine göre hesaplanan çevrim değerleri verilmiştir. Çizelge 4.2’te aynı kuvvet altında deney numunelerinin çevrim sayıları arasında farklar görülmektedir. Bunun sebebi her numunenin eşit penetrasyon değerine sahip olmaması, test sistemindeki kayıplar veya sistemin her çevrimde stabil olarak çalışmamasından olabilir. Bu yüzden her kuvvet değerindeki çevrim ortalamalarının alınarak yorum yapılması daha sağlıklıdır.

Çizelge 4.2. Yorulma Test Sonuçları

Uygulanan Kuvvet (kN)	Ömür(Çevrim)	Ortalama Ömür(Çevrim)
1	101141	132857
	163329	
	134101	
2	53364	54414
	42546	
	67332	
3	5762	5370
	5619	
	4729	

Test sonucunda elde edilen kuvvet değerlerine karşılık gelen çevrim değerleri ile Şekil 4.10'da ki grafik oluşturulmuştur. Test verilerine göre kaynak bölgesinin yorulma grafiği Şekil 4.10'da ki noktalardan geçen bir grafik olarak kabul edilebilir. Kuvvet değerleri yüksek ve düşük çevrim bölgelerinde ömür tayin etmek için seçilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi hesaplanan çevrim sayıları düşük, yüksek ve ortasında değerler olmak üzere dağılmıştır. Yorulma grafiği oluşturmak veya daha net yorum yapmak için her yüksek ve düşük çevrim bölgelerinden veriler elde etmek gereklidir.



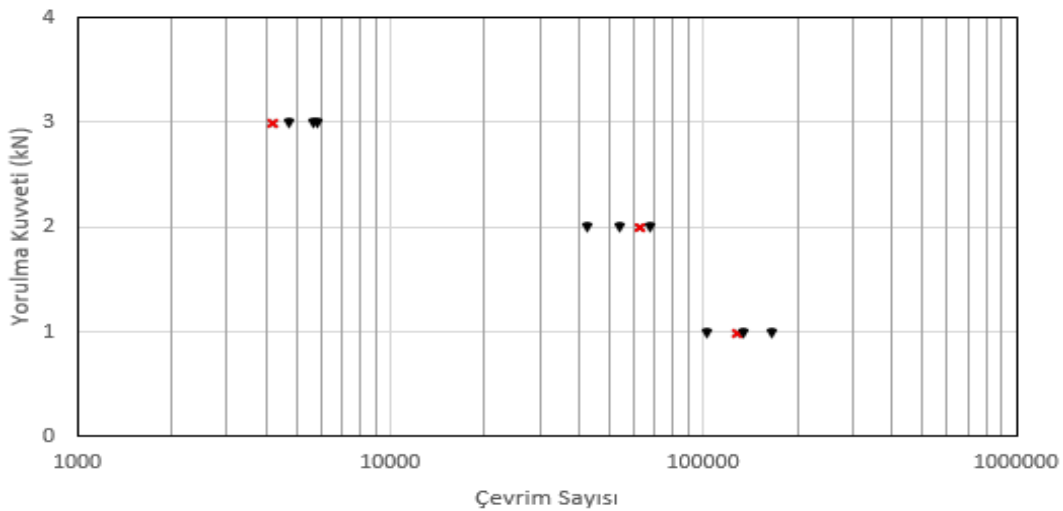
Şekil 4.10. Yorulma testi sonuçlarının çevrim sayısı-kuvvet grafiği

Yorulma test sonuçlarında kopmalar çoğunlukla kaynak dibindeki ITAB bölgesinde olmuştur. Şekil 4.11’de 2 kN kuvvet altında yorulma testi sonucu kopma yaşanmış bir numune görseli verilmiştir. ITAB’da akma mukavemeti TM ve EB’ye göre daha düşük olduğundan kopma ITAB’da gerçekleşmiştir. Kopan parçanın diğer kısmı kaynak bölgesinden diğer parçaya birleşik olarak kalmıştır.



Şekil 4.11. Yorulma testi sonucunda kopan numune

Bu verileri yorulma analizlerini kullanarak sanal ortamda numune üzerinde elde edilen ömür değerleri Şekil 4.12’de fiziksel test sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bilgisayar ortamında elde edilen veriler ile fiziksel test sonucu elde verilerin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. Kaynak bölgesi için yorulma grafiği elde edilmek istendiğinde Şekil 4.12’de ki veriler kullanarak S-N eğrisi oluşturulabilir.



Şekil 4.12. Yorulma testi ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma da birçok üretim sektöründe kullanılan lazer kaynak yönteminin sonlu elemanlar analizi yöntemiyle modelleme ve yorulma performanslarının analiz ve fiziksel test ile karşılaştırılması incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Yapılan metalografik incelemeler sonucunda kaynak bölgesindeki penetrasyon oranı ve şekli Simufact Welding içerisinde yapılan proses analizi sonucu ile benzer çıkmıştır.
- Mikro incelemeler sonucunda kaynak bölgesinin dibinde oluşan ITAB'ın kendi içinde ikiye ayrılarak yumuşak ve sert şeklinde oluştuğu görülmüştür.
- Lazer kaynak yönteminin sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu elemanlar kullanarak 5 farklı bölüme ayrılması yaklaşımı yapılan test sonuçlarına göre yüksek doğrulukta olduğu gözlemlenmiştir. Oluşturulan çekme analizi modelinde 26.8 kN kuvvetinde ITAB bölgesinde kopma yaşanmıştır.
- Kaynak bölgesinden alınan mikro sertlik değerlerinin oluşan bölgelerin mukavemetleri hakkında bilgi verdiği literatürde ve bu çalışmada görülmüştür.
- Eğme yönünde yükleme yapılan fiziksel test sonucunda oluşan ömür değerleri nCode DesigLife içerisinde bulunan SeamWeld modülü ile yapılan analiz sonuçları ile büyük çoğunlukla yakın çıkmaktadır.
- Numune bazında yapılan bu çalışma otomotiv başta olmak üzere bir çok sektörde ürün geliştirme çalışmalarında lazer kaynak prosesinin kullanıldığı parçalarda yorulma hesabı çalışmalarına ışık tutacaktır.

Bundan sonraki çalışmalarda kopma yüzeylerinin mikro yapı incelemeleri yapılarak ITAB'ın hangi bölgesinde kopma yaşandığına dair yorum yapılabilir. Kaynak bölgelerinin ayrı ayrı mukavemet bilgileri ve malzeme kartlarını oluşturmak için mikro çekme numuneleri oluşturularak ITAB VE EB'nin mukavemet bilgileri elde edilebilir. Yorulma grafiği kuvvet değerleri yerine gerilme değerlerine göre çizdirmek istenildiğinde yorulma testlerinde deney numunelerine gerinim ölçer bağlayarak veri toplanabilir. Toplanan veriler gerilmeye dönüştürülerek çevrim sayısı-gerilme grafiği oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- Acar, E. 2002. Thermo Mechanical Fatigue Analysis. Degree of Master Science, The Middle East Technical University, Department of Aeronautical Engineering, Ankara.
- Alpar, T., Çelenk, O., Çavdar K. 2021. Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Lazer Kaynağı Uygulamaları. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26: sayı:3, doi.org/10.17482/uumfd.960795
- Altıntaş, H. İ. 2018. Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Onarım Kaynağında Tungsten Elektrod İle Koruyucu Gazaltı Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri ve Etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Atmaca, E. S. 2021. Fiber Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen DP600 VE TRIP800 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Behera, A. (2020) Optimization of process parameters in laser welding of dissimilar materials, *Materials Today; Proceedings* 33 (2020), 5765-275, doi:10.1016/j.matpr.2020.07.148
- Benyounis, K. Y., Olabi, A. G., Hashmi, S. J. (2005) Effect of laser-welding parameters on the heat input and weld-bead profile, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165: 978-985, doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.060
- Büyükbayram, C., Balaban, G.B., Sever, A., Salihoğlu, B. (2015) Fatigue Assessment of welded armour aluminium structure with computational and test techniques, *Engineering Structural Integrity Assessment*.
- Chen, L., Nie, P., Qu, Z., Ojo, O. A., Xia, L., Li, Z., Huang, J. 2020. Influence of heat input on the changes in the microstructure and fracture behavior of laser welded 800MPa grade high-strength low-alloy steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 50(2019):, 132–141. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.007
- Convissar, R. A. 2016. Principles and Practice of Laser Dentistry. *Elsevier Mosby Inc.*, New York, USA, 328 pp.
- Çakmakkaya, M., Çolak, F., Kara, R., Karaağaçlı, A. (2020) Lazer kaynak yöntemiyle birleştirilen otomotiv endüstrisinde kullanılan farklı tür çeliklerin kaynak dikiş geometrisi ve nüfuziyetine kaynak parametrelerinin etkisi, *Journal of Materials and Mechatronics A*, 1(1), 1-11.
- Dattoma, V., De Giorgi, M., Nobile, R. (2004) Numerical evaluation of residual stress relaxation by cyclic load, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 39(6), 663-672

- Doğan, M. 2007. Taşıt Elemanlarında Yorulma Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Ergin, D. (2021) Sac Metal Birleştirmelerinde Lazer Kaynak Dikiş Formlarının Kaynak Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Fahlström, K. 2015. Laser Welding of Boron Steels for Light-Weight Vehicle Applications. *Licentiate Thesis*, University West, Department of Engineering Science Sweden.
- Farabi, N., Chen, D., L., Zhou, Y. (2011) Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints, *Journal of Alloys and Compounds*, 509(2011), 982-989, doi:10.1016/j.jallcom.2010.08.158
- Goyal, R., El-zein, M. (2020) Influence of laser weld shape on mechanical and fatigue behavior of single lap laser welded joints, *Journal of Advanced Joining Processes*, 1, doi:10.1016/j.jajp.2020.100018
- Güneş, C. 2012. Benzinli Enjörlerin Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Indhu, R., Manish, T., Vijayaraghavan, L., Soundarapandian, S. (2020) Microstructural and mechanical properties of complex phase steel to aluminium alloy welded dissimilar joint, *Procedia Manufacturing*, 48, 267-272, doi.org./10.1016/j.promfg.2020.05.047
- Kannatey, E. 2009. Principles of Laser Materials Processing, *John Wiley and Son Inc.*, New Jersey, USA, 820 pp.
- Karaağaçlı, A. 2019. Otomotiv Uygulamalarında Lazer Kaynak Parametrelerinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.
- Kekik, M. 2021. Yeni Nesil Araçlarda Kullanılan DP1000HF-CP800 Çelik Sacların Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Hasar Modunun Tespiti, *Doktora Tezi*, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Kuppuswamy, N., Schmidt, R., Seeger, F., Zhang, S. (2007) Finite element modeling of impact strength of laser welds for automotive applications, *WIT Transactions on the Built Environment*, 94, 375-384
- Lee, J., Asim, K., Pan, J. (2011) Modelling of failure mode of laser welds in lap-shear specimens of HSLA steel sheets, *Engineering Fracture Mechanism*, 78(2011), 374-396, doi:10.1016/j.engfracmech.2010.10.011

- Loudon, R. 2000. The Quantum Theory of Light (Third Edition). *Great Britian: Oxford University Press Inc.*, 3-426.
- nCode DesignLife. (2013). Fatigue Analysis of Seam Welded Structures Using nCode DesignLife [Whitepaper].
https://www.ncode.com/images/DesignLife/Downloads/Whitepaper_SeamWelds_nCodeDesignLife_201303-3.pdf
- Öner, U. 2007. Lazerle kesme parametrelerinin kesme aralığı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Özmen, D. 2007. Yarı Otomatik Av Tüfeği Mekanizmasının Yorulma Dayanımının Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Öztürk, E., Arıkan, H., Toros, S., Kayırcı, M. (2019) CO₂ lazer yöntemi ile birleştirilmiş çit fazlı çeliklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, *Fourth International Iron and Steel Symposium (UDCS'19)*
- Püskülcü, G., Koçlular, F. 2009. Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulaması. *Mühendis ve Makine*, 50: sayı:599.
- Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., Kong, C. J. 2007. Welding with high power fiber laser – A preliminary study, *Materials and Design*, 28, 1231--1237
- Sabırlı, S. 2012. Bir Raylı Taşıt Bogisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yorulma Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Salminen, A., Farrokhi, F., Unt, A., Poutiainen, I. (2016) Effect of optical parameters on fiber laser welding of ultrahigh strength steels and weld mechanical properties at subzero temperatures, *Journal of Laser Applications*, 28, 022415 (2016), doi: 10.2351/1.4943914
- Shigley, J. E. 2006. Shigley's mechanical engineering design. Eight edition.
- Su, Z. M., Lin, P. C., Lai, W. J., Pan, J., Cheng, G. J., Yen, H. W. (2020) Fatigue analyses and life predictions of laser-welded lap-shear specimens made of low carbon and high strength low alloy steels, *International Journal of Fatigue*, 140, doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105849
- Tsuda, H., Sunayama, Y., Daimaruya, M., Kobayashi, H. (2005) Fatigue strength of laser welded butt joints of different thickness steel sheets with underfilled weld beads, *Journal of Society of Materials Science*, 54(5), 546-552

- Uzun, R. O. 2010. Lazerlerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uzun, R. O., Keleş, Ö. (2012) Lazerle kaynak işleminde parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3), 509-517
- World Auto Steel. (2022, 10 Mayıs). Complex Phase Steel. <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel>
- Yang, Y. S., Lee, S. H. (1999) A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 94 (2-3), 151-156, doi:10.1016/S0924-0136(99)00094-1
- Yariv, A. 1989. Quantum Electronics (Third Edition). USA: John Wiley&Sons,1-337.
- You, D. Y., Gao, X. D., Katayama,S. 2013. Review of laser welding monitoring. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(3): 181-201.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Furkan Sinan ERÇEL
Doğum Yeri ve Tarihi : Gebze /03.01.1996
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Gebze Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi(2013)
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi-Makina Mühendisliği(2019)
Yüksek Lisans :Bursa Uludağ Üniversitesi-Konstrüksiyon ve İmalat(2022)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş.(2019-Devam)

İletişim (e-posta) : ercelfurkan@outlook.com

Yayınları :

Ergin, D., Erçel, F., S., Çallı, M. 2020. Bir Otomobil Parçasında Farklı Birleştirme Yöntemlerinin Doğal Frekansa Etkisi. 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress, 21-23 Ekim 2020, Alanya, Türkiye.

Erçel, F., S., Çıbık, M., Ergin, D., Çallı, M. 2020. Kalıp Tasarımında Ağsız Yöntemler Kullanarak Topoloji Optimizasyonu İle Döküm Ağırlığı Azaltma. 9. Uluslararası Bilimsel Araştırma Kongresi, 12-13 Aralık 2020, Türkiye.

Erçel, F., S., Akyel, O., Onaylı, A., Çallı, M. 2020. Bir Otomobil Arka Tampon Kirişinin Düşük Hızda Çarpışma Performansının İncelenmesi. 9. Uluslararası Bilimsel Araştırma Kongresi, 12-13 Aralık 2020, Türkiye.

Akyel, O., Erçel, F., S., Çallı, M. 2021. Araç Motor Koruma Sacı Optimizasyon Çalışması. International Conference on Material Science and Technology, 26-28 Kasım 2021, Nevşehir, Türkiye.

Ergin, D., Erçel, F., S., Çallı, M. 2021. A Study On An Automotive Acc Bracket Development. International Conference on Material Science and Technology, 26-28 Kasım 2021, Nevşehir, Türkiye.