

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER KAYNAKLI ÇELİK MALZEMELERİN DİNAMİK ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

NURŞAH YETMEZ

HAZİRAN 2022

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER KAYNAKLI ÇELİK MALZEMELERİN DİNAMİK ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

Nurşah YETMEZ

DANIŞMAN

: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

ZONGULDAK

Haziran 2022

KABUL:

Nurşah YETMEZ tarafından hazırlanan “Lazer Kaynaklı Çelik Malzemelerin Dinamik Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 30/06/2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Hamdi Alper ÖZYİĞİT
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç.Dr. Menderes KAM
Düzce Üniversitesi, Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal
Teknolojileri Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../20....

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Nurşah YETMEZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LAZER KAYNAKLI ÇELİK MALZEMELERİN DİNAMİK ANALİZİ

Nurşah YETMEZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Haziran 2022, 35 sayfa

Lazer kaynağı, ısı kaynağı olarak kullanılan lazer ışınının getirdiği yüksek güç yoğunluğu özelliğinin etkisi ile; düşük ısı girdisi, dar ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve derin nüfuziyet gibi avantajlara sahip bir kaynak yöntemidir. Bu avantajları ve bunun yanında otomasyona uygunluğu nedeni ile otomotiv, gemi, havacılık gibi endüstrilerde geniş kullanım alanına sahiptir.

Bu çalışmada S235JR sac malzemeler Nd:YAG lazer kaynağı yöntemi ile kaynaklanmıştır. Kaynak işleminde kaynak kalitesini doğrudan etkileyen güç (290 V ve 300 V), atım odak çapı (0.8 mm e 1 mm) ve atım süresi (5.5 ms ve 11 ms) parametreleri kullanılmıştır. Kaynak kalitesinin belirlenmesinde tahribatlı bir yöntem olan çekme testi kullanılmış, ayrıca kaynaklı parçalara modal analiz uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modal analiz mühendislik yapılarının dinamik karakteristiğinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için önemli bir teknolojidir. Bu karşılaştırmada amaç modal analizin kaynak kalitesinin tespitinde kullanılabilirliğini araştırmaktır.

ÖZET (devam ediyor)

Deneysel veriler ışığında lazer kaynak gücü ve atım odak çapının artmasının mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca modal analiz sonuçları ile çekme testlerini karşılaştırıldığında verilerdeki tutarlılık lazer kaynağında kaynak kalitesinin belirlenmesinde titreşim analizinin kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: S235JR malzeme, lazer kaynağı, lazer kaynak gücü, atım odak çapı, titreşim

Bilim Kodu: 625.03.00



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DYNAMIC ANALYSIS OF LASER WELDED STEEL MATERIALS

Nurşah YETMEZ

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Oğuz KOÇAR

June 2022, 35 pages

Laser welding is one of the most powerful welding methods which has many advantages such as low heat input and narrow heat affected zone (HAZ). These two parameters are directly related to deep penetration with the effect of high power density brought by the laser beam used as a heat source. Actually, due to these advantages and its suitability for automation, it is widely used in industrial applications such as automotive, ship and aviation.

In this study, S235JR sheet materials are welded by considering Nd:YAG laser welding method. Throughout the welding process, welding power (290 V and 300V), pulse focal diameter (0.8 mm vs 1 mm) and pulse duration (5.5 ms and 11 ms) parameters are taken into account directly for the sake of welding quality. At that point, tensile testing method, which is a destructive method, is used to determine the weld quality, and the results are compared with the results of modal analysis technique. Another point, modal analysis is an important technology for the development and optimization of dynamic characteristics of engineering structures. This type comparison shows to investigate the usability of modal analysis in determining the quality of the source.

ABSTRACT (continued)

In the light of experimental data, it has been observed that increasing the laser source power and the diameter of the pulse focus improves the mechanical properties of the welded structures. Moreover, when the modal analysis results are compared with the tensile tests, the consistency in the data shows that vibration analysis can be used to determine the welding quality in laser welding qualifications.

Keywords: S235JR steel, laser welding, laser welding power, pulse focal diameter, vibration

Science Code: 625.03.00



TEŞEKKÜR

Çalıőmam boyunca yardımları ile yanımda olan, yol gösteren, yazım süreci ve deneysel çalıőmalarımızda beraber çalıőtıėımız tez danıőmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR'a teşekkür ederim.

Deneysel çalıőmam için altyapı desteği ile çalıőmamın gerçekteőmesini sağlayan ERKLazer ve Argon Kaynak Teknolojileri ve çalıőanlarına teőekkürlerimi sunarım.

Son olarak maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teőekkürler ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 LAZER TANIMI VE TARİHÇESİ.....	3
2.2 LAZER KULLANIM ALANLARI.....	4
2.3 LAZER KAYNAK YÖNTEMİ.....	4
2.4 MODAL ANALİZ.....	10
BÖLÜM 3 MATERYAL METOD	17
3.1 MATERYAL.....	17
3.2 LAZER KAYNAK İŞLEMİ.....	18
3.2.1 Lazer Kaynak Parametreleri	18
3.2.2 Lazer Kaynak Makinesi	18
3.3 MODAL ANALİZ.....	20
3.4 ÇEKME TESTİ	21
BÖLÜM 4 BULGULAR.....	23
4.1 MODAL ANALİZ BULGULARI.....	23
4.2 ÇEKME TESTİ BULGULARI	26
BÖLÜM 5 SONUÇ VE TARTIŞMA	29
KAYNAKLAR.....	31
ÖZGEÇMİŞ	35



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Lazer sisteminin şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.2 Lazer kaynağında kaynak rejimlerinin şematik gösterimi.	5
Şekil 2.3 Lazer kaynağının güç yoğunluğunun diğer kaynak yöntemlerine göre yeri.....	6
Şekil 2.4 Basit kütle-yay sistemi.	10
Şekil 2.5 Düz plakada mod şekilleri.....	15
Şekil 3.1 Numunelerin kaynağında kullanılan kaynak makinesi görünüşü.	20
Şekil 3.2 Titreşim test düzeneği genel görünüşü.....	20
Şekil 3.3 Modal analiz deney düzeneği araçları.....	21
Şekil 3.4 Çekme testi deney numune ölçüleri.	22
Şekil 4.1 Atım odak çapı (0.8-1 mm) na göre modal analiz sonuçları: mod 1.....	23
Şekil 4.2 Atım odak çapı (0.8-1 mm) na göre modal analiz sonuçları: mod 2.....	24
Şekil 4.3 Lazer güç voltajı (290-300 V) na göre modal analiz sonuçları: mod 1	25
Şekil 4.4 Lazer güç voltajı (290-300 V) göre modal analiz sonuçları: mod2	25
Şekil 4.5 Kaynak parametrelerine göre gerilme/gerinim eğrileri.....	26
Şekil 4.6 Maksimum çekme gerilmesi değerleri	27



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Lazer ışını şiddetine göre kullanım alanları.....	4
Çizelge 3.1 S235JR sacın kimyasal özellikleri.	17
Çizelge 3.2 Kaynak telinin kimyasal özellikleri.	17
Çizelge 3.3 Lazer kaynağı kaynak parametreleri.	18
Çizelge 3.4 ALM 200 lazer kaynak makinesi teknik özellikleri.....	19





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

f	: Doğal Frekans
T	: Periyot
ω	: Açısal Doğal Frekans
X	: Yer Değişirme
X_0	: Genlik
M	: Kütle Matrisi
\ddot{U}	: İvme Vektörü
C	: Sönüm Matrisi
\dot{U}	: Hız Vektörü
K	: Rijitlik Matrisi
U	: Yer Değişirme Vektörü
$F_{(t)}$: Kuvvet Vektörü
$H(\omega)$: Frekans cevap fonksiyonu
ω_1	: Kaynaklı numunenin doğal frekansı
ω_{10}	: Saf numunenin doğal frekansı
X_1	: Kaynaklı numunenin yer değişimi
X_{10}	: Saf numunenin yer değişimi
ζ_1	: Kaynaklı numunenin sönüm oranı
ζ_{10}	: Saf numunenin sönüm oranı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

S235JR	: Alaşımısız yapısal çelik
Nd:YAG	: Neodyrium Doped Ytrium Aluminium Garned
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
HAZ	: Heat Affected Zone
TWB	: Taiolar Welded Blanks
FT	: Fourier Transform
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
FFT	: Fast Fourier Transform
Hz	: Hertz
LGV	: Lazer güç voltajı
AOÇ	: Atım odak çapı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Güçlendirilmiş bir ışık kaynağı olan lazerler dalga boylarına göre tıp, savunma, estetik müdahaleler gibi pekçok alanda kullanıldığı gibi üretim sektöründe kesme, kaynak gibi farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Kaynak uzun yıllardır kullanılan ve vazgeçilemeyecek konumda olan bir birleştirme yöntemidir. Ancak teknoloji ilerledikçe ve gelişen dünyada ihtiyaç ve beklentiler değiştikçe kaynak yöntemleri ve elbette kaynak işleminden istenen kalite beklentileri değişmektedir. Ayrıca süregelen kalite kontrol yöntemlerine alternatif oluşturacak kalite kontrol yöntemleri araştırılmakta ve çalışmalar bu yönde sürdürülmektedir.

Lazer kaynağı yüksek dikiş kalitesi sağlamakta ayrıca otomasyon ve seri üretime uygun oluşu ile pekçok sektörde ihtiyaçlara cevap vermekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynağın yapılmasının ardından önemli bir basamak olan kaynak kalitesinin tesbiti söz konusu olduğunda karşımıza tahribatlı ve tahribatsız yöntemler çıkmaktadır. Tahribatlı yöntemler bilindiği üzere yapılarına kaynağa zarar verilerek gerçekleştirilebilmektedir. Tahribatsız yöntemler ise belli yatırım veya hizmet satın almayı gerektirdiği gibi, ayrıca yorum açısından dar bir bakış açısına sahiptir. Dinamik bir analiz yöntemi olan Modal Analiz ise kaynak kalitesinin yorumlanmasında farklı yükler altında malzemenin davranışlarının incelenmesini mümkün kılarak daha farklı ve geniş bir bakış açısına sahip olmamıza olanak tanımaktadır. Otomotivden, uçaklara ve hatta elektronik parçalara kadar geniş bir kullanıma sahip olan lazer kaynağının kullanıldığı parçalar çalışma esnasında titreşime maruz kalan parçalardır.

Bu çalışmada sanayide çokça kullanılmakta olan çelik malzeme Nd:YAG katı hal lazer kaynağı ile kaynatılarak kaynak kalitesinin tespiti için çekme testi uygulanmıştır. Ayrıca kaynak dikişinin dinamik karakteristiğinin belirlenmesi için modal analiz yapılmıştır. Yapılan çekme testi ve modal analiz sonuçları karşılaştırılarak modal analizin kaynak kalitesini belirleme kullanılabilirliği araştırılmıştır.



BÖLÜM 2

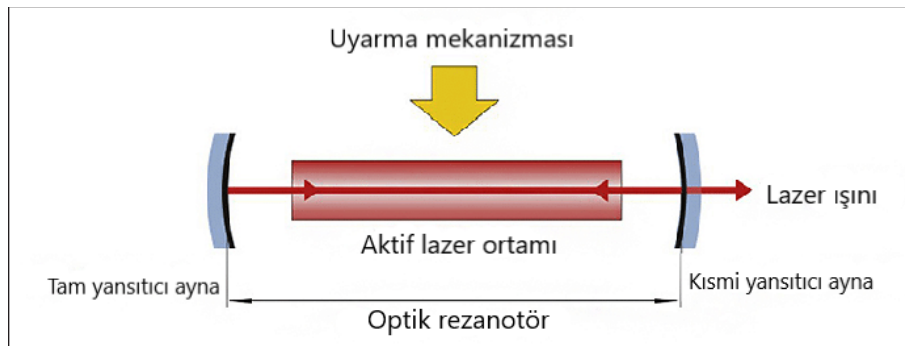
KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 LAZER TANIMI VE TARİHÇESİ

1960 yılında ilk optik lazerin Theodore Mainman tarafından icat edilmesinden itibaren, lazer bilimsel olarak geliştirilmiş ve 70'li yılların başından itibaren endüstride kaynak ve kesme uygulamalarında farklı türleri ile boy göstermiş, günümüzde de bu varlığını artırarak sürdürmektedir.

Uyartılı ışınla yoluyla ışık amplifikasyonu şeklinde tercüme edilen “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” cümlesini baş harflerinden LASER kelimesi türetilerek literatüre girmiştir. Lazer tek dalga boyuna sahip ve aynı faza sahip bir ışığın üretildiği ve kuvvetlendirildiği bir sistemdir. Bu sistem: aktif lazer ortamı, uyarma mekanizması ve optik rezonatörden oluşmaktadır.

Lazerler genel olarak kullanılan aktif lazer ortamının fiziksel özelliklerine göre dört ana başlıkta tanımlanır: katı hal lazerleri, gaz lazerleri, sıvı (dye) lazerleri ve yarı iletken lazerler (Dahotre and Harimkar 2008).



Şekil 2.1 Lazer sisteminin şematik gösterimi (Malíčková et al. 2018 - Black and Jobling 2014).

2.2 LAZER KULLANIM ALANLARI

Birleştirme tekniği olarak lazer teknolojisinin getirdiği yenilik, lazer ışınının bir noktaya odaklanması ve böylece oldukça yüksek miktarda enerji yoğunluğunun elde edilmesidir. Bu yoğunluğun 10^6 W/cm^2 üzerinde olduğu söylenebilir. Bu durum lazer ışınının monokromatik (tek dalga boyuna sahip), koherent (aynı faza sahip) ve paralel olması sayesinde gerçekleşebilir.

Çok sayıda atom, molekül ve iyon uyarılarak lazer ışını üretebilmektedir. Malzeme işleme alanında eximer lazer (ArF, KrF, XeCl), katı hal lazerleri (yakut, Nd-YAG, Nd-cam), yarı iletken-diyot lazerler (SaAs, GaAlAs) ve gaz lazerleri (CO_2) kullanılmaktadır. Dalga boyları ve lazer ışını şiddeti lazer tiplerini belirlemektedir ve kullanım alanı bu parametrelere göre seçilmektedir.

Çizelge 2.1 Lazer ışını şiddetine göre kullanım alanları (Walsh 2002).

Kullanım Alanı	Güç Yoğunluğu
Yüzey Sertleştirme	$10^3\text{-}10^4 \text{ Wcm}^{-2}$
Kimyasal Buhar Biriktirme	$10^3\text{-}10^4 \text{ Wcm}^{-2}$
Yüzey Alaşımlama ve Kaplama	$10^5\text{-}10^6 \text{ Wcm}^{-2}$
Yüzey Eritme ve Kaynaklama	$10^5\text{-}10^7 \text{ Wcm}^{-2}$
Delme ve kesme	$>10^7 \text{ Wcm}^{-2}$

2.3. LAZER KAYNAK YÖNTEMİ

Kaynak geçmişte olduğu gibi günümüzde de yaygınlıkla kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Yeni nesil malzemeler, yeni ihtiyaçlar, kalite beklentileri ve otomasyon gibi yeni parametreler farklı tür kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi ve varolanların iyileştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Lazer kaynağı iki veya daha fazla (aynı tip veya farklı tip) malzemenin ısı kaynağı olarak lazer ışını kullanılarak birleştirilmesi yöntemidir. Düşük ısı girdisi, ilave malzeme gerektirmemesi, derin nüfuziyet, yüksek işlem hızı gibi avantajları nedeni ile oldukça etkili ve hassas bir kaynak yöntemi olup, metal, plastik, seramik gibi farklı malzemelerde uygulanabilmektedir (Sun et al. 2016 - Jones 2013 - Miyamoto 2013).

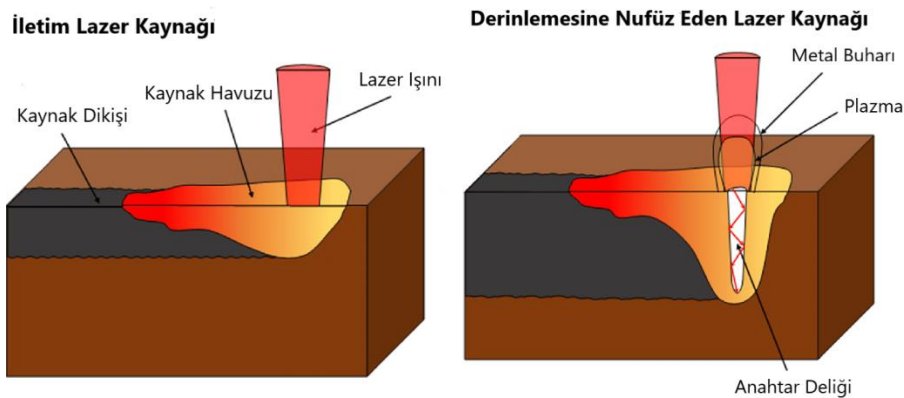
Lazer kaynak yönteminde birleştirilecek malzemeye yapılan enerji transferi diğer geleneksel kaynak yöntemlerinden farklıdır. Lazer kaynağından çıkan ışınlar yönlendirme aynalarından yansıtılarak odaklama mekanizmasına gelir. Odaklanma neticesinde lazer ışınının yoğunlaştırıldığı alanda ergime ve buharlaşma meydana gelir (Uzun ve Keleş 2012).

Lazer kaynağında iki farklı rejim uygulanabilmektedir;

- İletim Lazer Kaynağı (Conduction Laser Welding)
- Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı (Keyhole Laser Welding)

İki tip arasındaki temel fark güç yoğunluğudur. Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağında uygulanan güç yoğunluğu malzemenin buharlaşmasını sağlayacak kadar yüksektir, ancak iletim lazer kaynağında güç yoğunluğu bu noktaya ulaşmaz. Kaynak havuzu açıktır. Isı dağılımı kontrol altında tutulabilir. Bağlama oranının düşük olması dezavantajdır. Kaynak derinliği fazla olmayan ince metallerin birleştirilmesinde kullanılır (Helm et al. 2020).

İletimsel lazer kaynağın malzeme yüzeyine iletilen lazer ışını malzeme yüzeyinde absorbe edilerek ısının kaynama noktasına gelmesi ile olur. Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı yönteminde lazer ışın demetinin malzeme yüzeyine odaklanarak malzeme buharlaştırılır ve anahtar deliği adı verilen bir çukur oluşturur. İş parçası veya ışın sabit hızla hareket ettirilerek geriye estetik ve dar bir kaynak dikişi bırakır. Kaynak havuzu kapalıdır. Bu kaynak rejiminde derin nüfuziyet, küçük ITAB ve yüksek verimlilik sağlanır. Öteyandan yüksek porozite, süreksizlik ve sıçrıntı oluşumu bu yöntemin dezavantajlarıdır. Ayrıca mekanik özellikleri olumsuz etkilemesi açısından alüminyum kaynağı için uygun değildir (Katayama 2013).

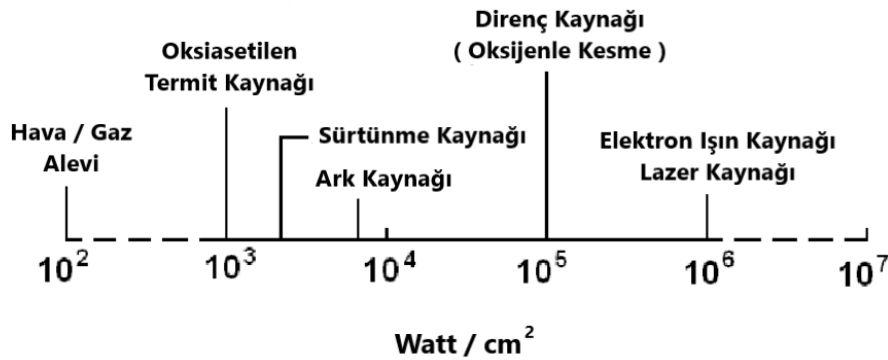


Şekil 2.2 Lazer kaynağında kaynak rejimlerinin şematik gösterimi (Helm et al. 2020).

Kaynak esnasında ısı kaynağı olarak kullanılan lazer ışınının sağladığı yüksek güç yoğunluğu beraberinde yüksek verimlilik, derin nüfuziyet, yüksek kaynak hızı gibi özellikler getirmiş; bu özellikler lazer kaynağının otomotiv, gemi, havacılık, mikro-elektronik ve bunun gibi endüstrilerde tercih edilmesinde etken rol oynamıştır (Cai et al. 2020).

Örneğin yüksek güç yoğunluğunun beraberinde getirdiği dar kaynak dikişi, yüksek kaynak hızı, kaynak esnasında düşük ısı girdisi gibi özellikler, pillerin içinde ısıya duyarlı kimyasalların olmasından dolayı; lazer kaynağı elektrikli araçlar için kullanılan lityum-iyon otomobil pillerinin üretiminde tercih edilen kaynak yöntemlerinden biri olarak tercih edilmektedir (Das et al. 2018).

Lazer kaynağı yüksek güç yoğunluğu ile diğer kaynak yöntemleri arasında öne çıkmaktadır ve bu durum lazer kaynağının tercihinde önemli bir etkidir (Koleva and Mladenov 2011).



Şekil 2.3 Lazer kaynağının güç yoğunluğunun diğer kaynak yöntemlerine göre yeri (Koleva and Mladenov 2011).

Pekçok lazer kaynağı sistemi mevcut olmakla birlikte endüstride CO₂ ve Nd:YAG lazer kaynakları yaygın kullanıma sahiptir (Walsh 2002).

Katı hal lazerlerin veriminin daha yüksek olması, yüksek odaklanma kapasitesi nedeni ile geniş kullanım alanının olması, çıktı parametrelerinin geliştirilebilir esneklikte olması ve ışın kalitesinin daha iyi olması gaz (CO₂) lazerlere göre avantajları olarak gösterilebilir (Evin and Tom 2017). Ayrıca katı hal lazerleri, lazer ışınını fiber optik kablolar aracılığıyla taşıma imkanı sağlar. İşlemler ışın üreticisinden bağımsız ve birden fazla kabloyla farklı yerlerde

yapılabilir. Dolayısıyla katı hal lazerleri ile seri üretim ve otomasyon mümkün hale gelir. Katı hal lazerleri tıbbi, askeri alanlar gibi pekçok farklı kullanım biçimlerinde karşımıza çıkmaktadır (Koecher and Bass 2003).

Lazer kaynağında, çelik ve alüminyum malzemeler için katılaşma çatlakları ve porozite en yaygın hatalardır (Kristen et al. 1999).

Kaynak işlemi esnasında kaynatılan malzemenin kimyasal kompozisyonunda bulunan sülfür ve fosfor katılaşma çatlaklarına neden olmaktadır. Buna ek olarak lazer kaynağında kaynatılan numunelerin kalınlığı arttıkça termal gerilmelerden dolayı kaynak birleşim noktalarında katılaşma çatlakları oluşumu gözlemlenmektedir (Dixon and Ritter 2001). Otomotiv üreticileri bağlantı parçalarının lazer kaynağı ile kaynatılması esnasında katılaşma çatlaklarının oluştuğunu bildirmiştir (Agarwal et al. 2019).

Lazer kaynağında derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı yönteminde oluşan kaynak havuzunun (keyhole) düzensizliği ve nüfuziyette oluşan kısmi çökme poroziteye neden olabilir. Ayrıca koruyucu gazın gereğinden yüksek veya düşük hızda akışında porozite oluşumunda etken olarak gösterilebilir (Matsunawa and Katayama 2001).

Yine otomotiv sektöründe sıklıkla çinko kaplı çelik saclar lazer kaynağı ile kaynatıldığında yüzeyden çinkonun buharlaşma yoluyla ayrılması ve kaynak boşluklarının oluşması görülebilmektedir. Schmidt ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bu konu irdelenmiştir (Schmidt et al. 2008).

Lazer kaynağı literatür incelemesinde bu kaynak türünün özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın kullanımı göze çarpmaktadır (Altay 2021-Tuncel 2020).

Tuncel ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, modern otomotiv endüstrisinde kullanılan DP600 ve DP1000 çelik saclar darbeli Nd:YAG lazer kaynağı yöntemi ile çift taraflı olarak birleştirilmiştir. Dolgu malzemesi kullanılmadan yapılan bu kaynak dikişinde mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Darbe frekansının artırılması ile nüfuziyet ve ısı tesiri altındaki bölgede artış gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynaklı birleştirmenin mukavemetinde darbe frekansına bağlı olarak artmıştır. Kaynak bölgesinde makro gözenekler gözlemlenmiştir (Tuncel et al. 2020).

Sun ve arkadaşlarının çalışmasında soğuk haddelenmiş 1mm kalınlığındaki DP590 çelik sac 300W darbeli Nd:YAG lazer kaynağı yöntemi ile kaynaklanmış ve darbe frekansı parametre

olarak kullanılmıştır. Darbe frekansı değişiminin kaynak morfolojisi, mikroyapı, mekanik özellikler ve şekillenebilirlik üzerinde etkisi araştırılmıştır. Darbe frekansının artışı ile nüfuziyet artmış, sabit kaynak hızında ısı girdisi artış göstermiştir. Isı girdisindeki artış ısı tesiri altındaki bölgede mikroyapı değişimlerine sebep olmuş ve bu değişim kaynak kesit alanında sertlik değerinin olumsuz yönde etkilenmesine, çekme dayanımı ve şekillendirilebilirliğin artmasına yol açmıştır (Sun et al. 2016).

Taiolar welded blanks (TWB) farklı kalınlık, dayanım veya yüzey kaplaması olan çelik sacların lazer kaynağı ile birleştirilmesi yöntemidir. Yöntem otomotiv endüstrisinde araç ağırlığını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. Gong ve arkadaşları yine otomotiv endüstrisinde mekanik özellikleri nedeni ile tercih edilen yüksek dayanımlı çelikler olan dual fazlı DP780 ve DP780 çelikleri TWB yöntemi kullanılarak lazer kaynağı ile farklı dikiş açılarında birbirlerine kaynaklanmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir (Gong et al. 2016).

Hong ve Shin çalışmasında otomotiv endüstrisinde kullanılmakta olan çinko kaplı çelikler, magnezyum alaşımları, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımlarının lazer kaynağı ile kendi içinde ve birbirleri ile birleştirilmesi durumunu analiz etmiştir. Bu malzemelerin lazer kaynağı ile kaynaklanabilirliği; kaynak sırasında ve sonrasında karşılaşılabilecek mikroyapı değişimleri, kaynak hataları, mekanik özellikler (sertlik, çekme dayanımı vb.) incelenmiştir (Hong and Shin 2017).

Cui ve arkadaşları farklı kalınlıklardaki 304 östenitik paslanmaz çelik (3 mm ve 6 mm) plakalara fiber lazer kaynağı ile alın kaynağı yapmıştır. Yapılan kaynak sonrası mikroyapı özellikleri ve mikrosertlik değerleri incelenmiştir. Kaynak sonrası nüfuziyet iyi olup, 2 kW güçte makro hatalar göze çarpmaktadır. Isıdan etkilenen bölge çok az olup, kaynak sonrası ince tane yapısı nedeni ile yüksek mikrosertlik değerleri elde edilmiştir (Cui et al. 2013).

P'ns ve Molian'ın bu çalışmasında 60 µm inceliğindeki AISI 304 paslanmaz çelik malzemeye Nd:YAG lazer kaynağı uygulanmış ve karakterizasyonu yapılmıştır. Lazer kaynağı esnasında düşük ısı girdisi ile beraber daha ince bir kaynak dikişi elde edilmiş ayrıca daha az porozite, daha estetik bir yüzey ve daha güçlü kaynak dikişi elde edilmiştir (P'ns and Molian 2008).

Mazmudar ve Patel araştırma makalesinde lazer kaynağında mekanik özellikleri ve mikroyapıyı etkileyecek parametreler üzerine yapılan dikkate değer çalışmaları incelemiştir. Kaynak bağlantısında Mn, Cr bulunmasının erilme dayanımı ve korozyon yorulma direncini artıracığı, ısı girdisi arttıkça nüfuziyetteki artış, odak pozisyonunun ince plakaların yüksek

güçlü fiber lazer kaynağında anahtar parametre olması gibi konulara değinilmiştir. Ayrıca kaynak girdileri kaynak birleşim yerinin kalitesinde önemli bir etkiye sahiptir. Birleşimin kalitesi kaynak damla geometrisi, mekanik özellikler ve çarpılma gibi özellikler ile açıklanabileceği ifade edilmiştir (Mazmuder and Patel 2013).

Lazer kaynağını anlayabilmek için kesin modellerin ve deneysel verilerin kombinasyonuna ihtiyaç vardır. Bu kombinasyon bizim lazer kaynağını derinlemesine anlamamızı dolayısıyla kaynak kalitesini, proses kontrolünü ve proses etkinliğini iyileştirmemizi sağlar. Svenungsson çalışmasında anahtar deliği lazer kaynağı modellenmesini incelemiştir. 2001 yılında Ki ve arkadaşlarının (Ki et al. 2001) geliştirdiği ilk modelden itibaren ışın-malzeme etkileşimi ve sıvı akışı ile ilgili pekçok model geliştirilmiş büyük bir kısmına bu inceleme makalesinde değinilmiştir (Svenungsson et al. 2015).

Gerçek zamanlı izleme teknolojilerinin etkili kullanımı, kaynak etkinliğinin ve kaynak kalitesinin artmasında büyük öneme sahiptir. Cai ve arkadaşları çalışmalarında geçmiş on yılda lazer kaynağının gerçek zamanlı izlenmesi ile yapılan araştırmaların sonuçlarını ve bu alandaki gelişmeleri incelemiştir (Cai et al. 2020).

Benzer şekilde You ve arkadaşlarının çalışması, lazer kaynağının gerçek zamanlı izlenmesi hakkında bir genel bakış içermektedir. Lazer kaynağının gerçek zamanlı izlenmesi olası kaynak hatalarının tespitinde ve bilgisayar destekli kontrolün gerçekleştirilmesinde önemli yere sahiptir (You et al. 2014).

Birçok araştırmacı, lazer kaynağının proses parametrelerinin metalurjik ve mekanik etkilerine odaklanmıştır. Gerçek zamanlı izleme ve proses parametreleri optimizasyonu konusunda çalışmalar yapılmıştır. Magnezyum alaşımları, titanium alaşımları ve polimerler gibi yüksek teknoloji malzemelerinin lazer kaynağı konusunda çalışmalar yapılmıştır (Chen et al. 2010 - Costa et al. 2007 - He 2012).

Ancak kompleks ve karmaşık şekilli veya üç boyutlu malzemelerin kaynak analizleri çok maliyetli ve zordur. Bu alanda kullanılacak en etkin yöntemlerden biri de sonlu elemanlar metodudur (Finite Element Method-FEM). He yazdığı inceleme makalesinde sonlu elemanlar yöntemi ile analiz çalışmaları incelemiş, proses, hata modellenmesi, yorulma davranışları, dinamik karakteristik konularına değinmiştir (He 2012).

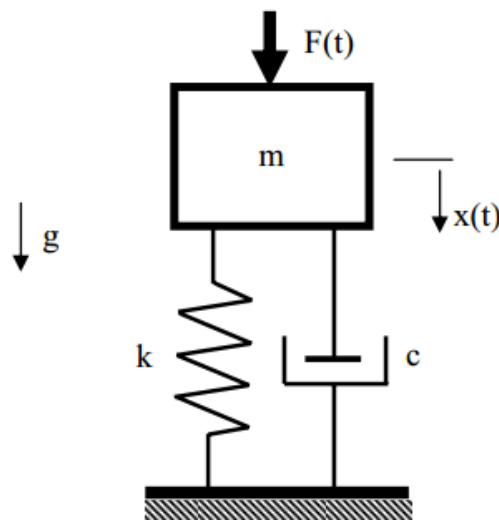
Stavridis ve arkadaşları çalışmalarında, önemli kalite değerlendirme tekniklerini incelemeyi ve bunların potansiyellerini belirlemeyi amaç edinmişlerdir (Stavridis et al. 2018).

Lazer kaynağının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi çalışmalarında çoğunlukla kaynak prosesinin simulasyonuna odaklanılmıştır (De et al. 2003 - DongandWei 2006). Lazer kaynağının yorulma davranışları ile ilgili çalışmalar da mevcuttur(Cho et al. 2004). Ancak lazer kaynaklı bir yapının dinamik davranışının modellenmesi ile ilgili çalışmalara rastlanmamaktadır (Husainet al. 2009).

2.4. MODAL ANALİZ

Lazer kaynağı kullanılan pekçok sistem titreşim altında çalışmaktadır. Bu sistemlerde oluşacak rezonans sistemde hasarların oluşmasına neden olur. Bahsi geçen bu sistemlerde rezonansın görülmemesi için bilinmesi gereken doğal frekanslar, mod şekilleri, sönümlenme oranı gibi titreşim parametrelerinin belirlenmesi işlemine **Modal Analiz** denir. Modal analiz parametrelerini belirlemek için yapıya modal çekiç yardımı ile kuvvet uygulanır ve ivmeölçer aracılığıyla frekans cevap fonksiyonu (FRF) toplanır. Bilgisayar ortamına aktarılan veriler yardımı ile titreşim parametreleri hesaplanır .

Modal analiz yapılırken önemli bir titreşim parametresi olan doğal frekans değerleri hesaplanmaktadır. Bütün sistemler dış kuvvete maruz kaldıklarında titreşim eğilimi gösterdikleri bir doğal frekansa sahiptir. Doğal frekans kütle ve kalınlığın yapı içinde dağılıma şekline bağlıdır. Şekil 2.4 'de verilen basit bir kütle - yay sisteminden yola çıkarak sönümsüz ve serbest titreşimler için doğal frekans değerleri hesaplanmıştır (Şenveli 2018).



Şekil 2.4 Basit kütle - yay sistemi (Şenveli 2018).

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU(t) = F(t) \quad (2.1)$$

M : Kütle Matrisi

C : Sönüm Matrisi

K : Rijitlik (Direngenlik) Matrisi

U : Genelleştirilmiş yer değiştirme vektörü

\dot{U} : Yerdeğiştirme vektörünün birinci türevi (Hız vektörü)

\ddot{U} : Yerdeğiştirme vektörünün ikinci türevi (İvme vektörü)

F(t) : Genelleştirilmiş kuvvet vektörü

Sistem sönümsüz kabul edilmektedir; bu nedenle C=0, serbest titreşim kabulü nedeniyle F(t)=0 değerini almaktadır. Bu koşullarda denklem:

$$M\ddot{U} + KU(t) = 0 \quad (2.2)$$

(2.2) numarası ile verilen homojen denklemin çözümü:

$$U = \varphi \cos(\omega t - \theta) \quad (2.3)$$

$$\ddot{U} = -\varphi \omega^2 \cos(\omega t - \theta) \quad (2.4)$$

(2.3) ve (2.4) denklemleri, denklem (2.2)'de yerine konulduğunda:

$$-M\varphi \omega^2 \cos(\omega t - \theta) + K\varphi \cos(\omega t - \theta) = 0 \quad (2.5)$$

$\cos(\omega t - \theta) \neq 0$ durumu için çözüme gidildiğinde:

$$[-\omega^2 M + K]\varphi = 0 \quad (2.6)$$

Eşitliği sağlanmaktadır. Elde edilen sonuç n adet homojen denklemi ifade etmektedir. Denklem sisteminin determinantının sıfıra eşit olması durumunda bir çözüm vardır.

$$\Delta = |-\omega^2 M + K| = 0 \quad (2.7)$$

(2.7) denklemi karakteristik bir denklemdir. $\omega^2 = \lambda$ eşitliği ile determinant polinom şeklindedir.

$$\Delta = 0 = a_0 + a_1 \omega^2 + a_2 \omega^4 + a_3 \omega^6 + \dots + a_n \omega^{2n} \quad (2.8a)$$

$$\Delta = 0 = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \lambda^i) \quad (2.8b)$$

ω 'lar sisteme ait doğal frekanslardır. $\omega = \pm\sqrt{\lambda}$ iken $\{\lambda_k\}_{k=1,2,\dots,n}$ veya $\{\pm\omega_k\}_{k=1,2,\dots,n}$ olacak şekilde n adet kök vardır. Sistemin sahip olduğu her bir doğal frekans değeri denklem (2.6)'yı sağlamaktadır.

Frekans cevap fonksiyonu, herhangi bir sisteme uygulanan kuvvetin sistemde meydana getirdiği değişimdir. Bu değişim deplasman, hız yada ivme olabilir.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.9)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.10)$$

Denklem (2.9) Fourier dönüşümleri yapılarak yazılırsa:

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (2.11)$$

Titreşim analizinde farklı noktalardan alınan titreşim sinyalleri, farklı kuvvet ve etkenlerden dolayı karmaşık bir dalga formu içermektedir ve bu durum zaman-dalga formundaki grafikleri inceleyerek sonuçların değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. İvmeölçerden, zaman-dalga formunda alınan sinyaller yazılım içerisinde Fourier Dönüşümü (Fourier Transform) kullanılarak frekans bandında spektrumlar oluşturulur. Spektrumda yer alan frekanslar hatanın türünü ve kaynağını, frekans genlikleri ise hatanın şiddetini göstermektedir.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi ift} dt \quad (2.12)$$

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-2\pi ift} dt \quad (2.13)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-2\pi ift} dt \quad (2.14)$$

Birim darbe etkisi için bu fonksiyonları açarsak:

$$\begin{aligned} \delta(t-a) &= 0 & t &\neq a \\ \delta(0) &= \infty & t &= a \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-a) dt = 1 \quad (2.16)$$

Denklem (3.26)'da $\delta(t-a)$ ifadesi herhangi bir zaman fonksiyonu ile çarpılırsa $t=a$ anı dışında sonuç sıfır olacaktır.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t-a) dt = f(a) \quad 0 < a < \infty \quad (2.17a)$$

$$\hat{F} = Fdt = mdv \quad (2.17b)$$

m kütlesine etki eden kuvvet \hat{F} , doğal frekansın ω_n olduğu sönümsüz bir sistemin tepkisi:

$$X = \frac{\hat{F}}{m\omega_n} \sin \omega_n t = \hat{F}h(t) \quad (2.18a)$$

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_n} \sin \omega_n t \quad (2.18b)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.18c)$$

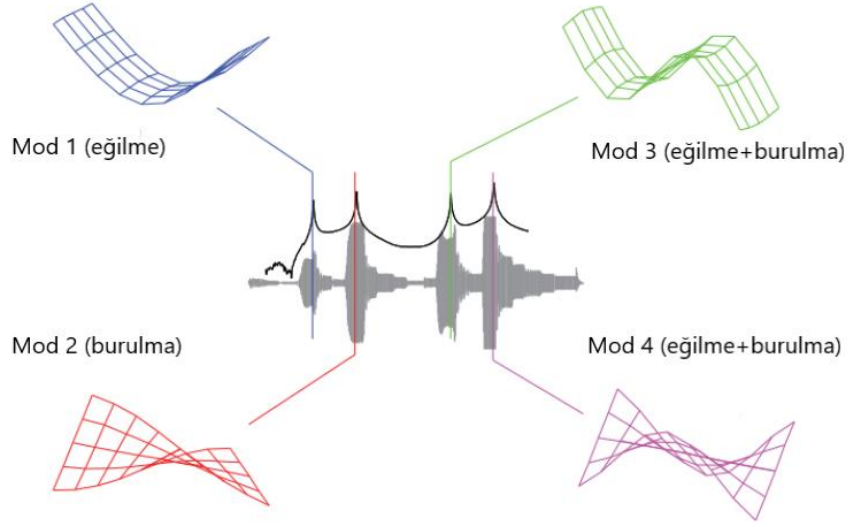
Fiziksel bir yapının veya sistemin rezonans frekansını, sönümlenme oranı ve mod şeklini belirleyen frekans cevap fonksiyonu, titreşim analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Rezonansta ise yapı doğal frekansta bir kuvvet etkisinde kaldığında titreşim cevabı oluşturur. Diğer bir deyişle, doğal frekansa denk bir dinamik kuvvet frekansına maruz kalan nesne rezonansa girer.

Sönümlenme bir sistemin doğal olarak enerjii dağıtma şeklidir. Tek serbestlik derecesinde sönümleyici (c) yoksa kütle yay sistemi (m ve K) sonsuza kadar hareket halinde kalacaktır. Sönümlenme ne kadar yüksek olursa, sistem yanıtı o kadar çabuk sifira düşer. Rezonans frekansındaki sistem tepki genliği, artan sönümlenme ile azaltılır.

Bir sistemin birden fazla doğal frekansı vardır ve yapı her doğal frekansta farklı titreşir. Belirli frekansta hareket biçimi mod şeklini verir.

Serbest titreşim durumunda düz bir plakanın doğal frekans değerlerinde mod şekilleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Düz plakada mod şekilleri (Avitable 2018).

Birinci doğal frekansa baktığımızda ilk eğilme deformasyonun dağılımı görülmektedir (mod 1). İkinci doğal frekansa baktığımızda ise ilk burulma deformasyonunun dağılımı görülmektedir (mod 2). Üçüncü ve dördüncü doğal frekansta ise ikinci eğilme ve ikinci burulma deformasyon dağılımları görülmektedir (mod 3 ve mod 4). Modal analiz mühendislik yapılarının dinamik karakteristiğinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için önemli bir teknolojidir. Sadece mekanik yapılarda değil; inşaat yapılarında, biyomekanik problemlerde, uzay teknolojilerinde, akustik enstrümanlardaulaştırma ve nükleer uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır (He and Fu 2001).

Günümüz tasarımlarında yapının veya ürünü hafif olması önemli bir beklentidir. Ancak yapıların veya sistemlerin daha hafif tasarlanması ve üretilmesi, bu yapıların titreşime karşı daha hassas olmasına sebep olmaktadır (He and Fu 2001). Bu durumdan yola çıkarak Modal verilerin dinamik analizde önemi anlaşılmaktadır.

Ewins çalışmasında, dizaynda modal testin önemli rolünü açıklamıştır. Deneysel modal analizin metodunu özetlemiş ve bu alanda geliştirilen yeni teknolojileri değerlendirmiştir. Ayrıca deneysel modal analiz yönteminde varolan kısıtlamalar ve problemleri tanımlamıştır (Ewins 2000).

Husain ve arkadaşları çalışmalarında, lazer spot welding ile kaynaklanmış bir yapıyı sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiş, ardından yapının modal analiz yöntemi ile doğal frekans değerlerini bularak ilk aşamada yapılan model bulunan test değerlerine göre güncellemiştir. Böylelikle lazer spot welding ile kaynaklanan yapının hasar analizi yapılmıştır (Husain et al. 2009).

Husain ve Ouyang çalışmalarında, titreşim kökenli hata bulma yöntemlerini incelemiştir ve lazer spot weld ile kaynatılmış bir yapıda hata tespit çalışmaları yapmışlardır. Doğal frekans ve mod şekilleri bilgileri hata tesbitinde belirleyici olmuştur (Husain and Ouyang 2011).

Ayrıca modal analizin farklı malzeme türlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için de kullanıldığı bilinmektedir. Erdoğan tez çalışmasında, yüksek mukavemet özelliği ile bilinen cam elyaf takviyeli kompozit malzeme ile üretilen yaprak yayların modal analizini hem deneysel hemde bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalı olarak yapmıştır (Erdoğan 2016).

Literatür çalışmasında lazer kaynağının yüksek güç yoğunluğuna sahip bu nedenle farklı endüstrilerde, farklı malzeme tipleri ve üretim türleri için geniş kullanım alanına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Kaynak kalitesinin belirlenmesinde çekme testi, sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemesi literatürde karşımıza çıkan ancak kaynaklı malzemenin tahribatı ile gerçekleştirilebilen yöntemlerdir. Bunun yanında hasar tespiti, titreşim altındaki yapının dinamik karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılan ve tahribatsız bir yöntem olan modal analiz, çalışmaya literatürde eksiliği anlaşılan bir bakış açısı kazandırmıştır. Lazer kaynağının sıkça kullanıldığı bilinen otomotiv, uçak, gemi endüstrisi gibi alanlarda ürünlerin titreşim altında çalıştığı göz önüne alınırsa, bu çalışmada modal analiz yönteminin özellikle seçildiği söylenebilir.

BÖLÜM 3

MATERYAL METOD

Bu bölümde, lazer kaynak uygulamasında kullanılan malzeme, kaynak işleminin gerçekleştirildiği cihaz bilgileri, modal analiz ve çekme testi bilgileri verilmiştir.

3.1. MATERYAL

Çalışmada kullanılan; 1.5 mm S235JR kalite, ticari olarak temin edilen sacın kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 S235JR sacın kimyasal özellikleri.

Malzeme	C	Mn	P	S	N	Cu	Si	Fe
235JR	0.170	1.40	0.035	0.035	0.012	0.550	-	Temel

Mekanik özellikleri; akma mukavemeti 235 MPa, çekme mukavemeti min. 340 MPa ve kopma uzaması %25 olan (Yürük ve ark. 2017) numuneler 115 x 50 x 1.5 mm ölçülerinde kesilerek, yüzeyleri asetonla ve parlatma diski ile temizlenmiştir. İki adet numunere ferans numune olarak 50 x 230 ölçülerinde kesilmiştir.

Lazer kaynağında B11 DIN 1.5125 standardında 0.5 mm çapında dolgu teli ile besleme yapılmıştır. Kullanılan dolgu telinin kimyasal içeriği Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Kaynak telinin kimyasal özellikleri.

Element	C	Si	Mn
Oran (%)	0.07	0.9	1.45

3.2. LAZER KAYNAK İŞLEMİ

3.2.1. Lazer Kaynak Parametreleri

Çalışmada kaynak parametrelerilazer kaynak gücü (V), atım süresi (ms), atım frekansı (Hz), atım odak çapı (mm) olarak belirlenmiştir. Nd:YAG lazer kaynak yöntemi ile yapılam kaynakta kullanılan parametreler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Lazer kaynağı kaynak parametreleri.

Lazer Kaynak Gücü (V)	Atım Süresi (ms)	Atım Frekansı (Hz)	Atım Odak Çapı (mm)
290	5.5	9.0	0.8
290	5.5	9.0	1.0
300	11	9.0	1.0

3.2.2. Lazer Kaynak Makinesi

Nd:YAG lazer kaynağında ALM 200 THE NO.1 MOBİLE LASER kaynak makinesi kullanılmıştır. Kullanılan kaynak makinesi mobil olduğundan iş parçasına veya iş parçası lazer kaynak sistemine taşınabilmektedir. Çoğu durumda, kalıbın sökülmesi gerekmemektedir, bu durum kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Lazer kaynağı sadece birkaç dakika içinde kullanıma hazır hale gelmektedir. Lazer kolu, elektro hidrolik frenler ile hızlıca istenilen çalışma konumuna getirilebilmekte ve sabitlenebilmektedir. Joystick ile manuel olarak, yarı otomatik olarak veya darbe fonksiyonlu olarak harici bir işletim ünitesi ile kaynak yapılabilmektedir.

Kaynak işlemi Gebze Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren "ERKLazer ve Argon Kaynak Teknolojileri" firmasında yapılmıştır.

Kaynak cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 ALM 200 lazer kaynak makinesi teknik özellikleri.

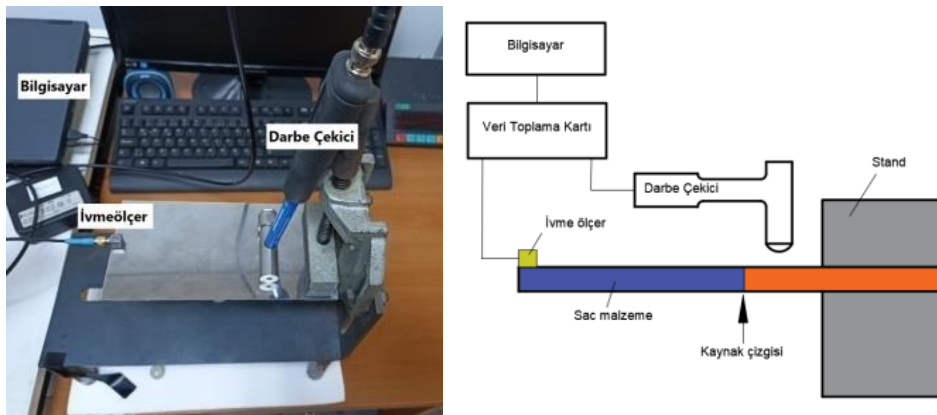
Ortalama Güç	200 W
Tepe Darbe Gücü	7,5 Kw
Darbe Enerjisi	9 J
Darbe Süresi	0,5 – 20 ms
Darbe Frekansı	100 Hz
Kaynak Nokta Çapı	0,2 – 2 mm
Odaklama Optiği	150 mm
Görüntüleme Sistemi	Gözlük kullananlar için uygun gözlere sahip Leica dürbünler
Çalışma Aralığı	Kol işleme kafasının hareketi manuel olarak veya kumanda kolu ile motorla çalıştırılabilir.
Hareket hızı (X, Y, Z)	0-25 mm/s
X, Y	145 x 120 mm
Z	1300 mm
En Düşük Çalışma Noktası	510 mm
En Yüksek Çalışma Noktası	1560 mm
Kol Hareketi	1300 mm



Şekil 3.1 Numunelerin kaynağında kullanılan kaynak makinesi görünüşü.

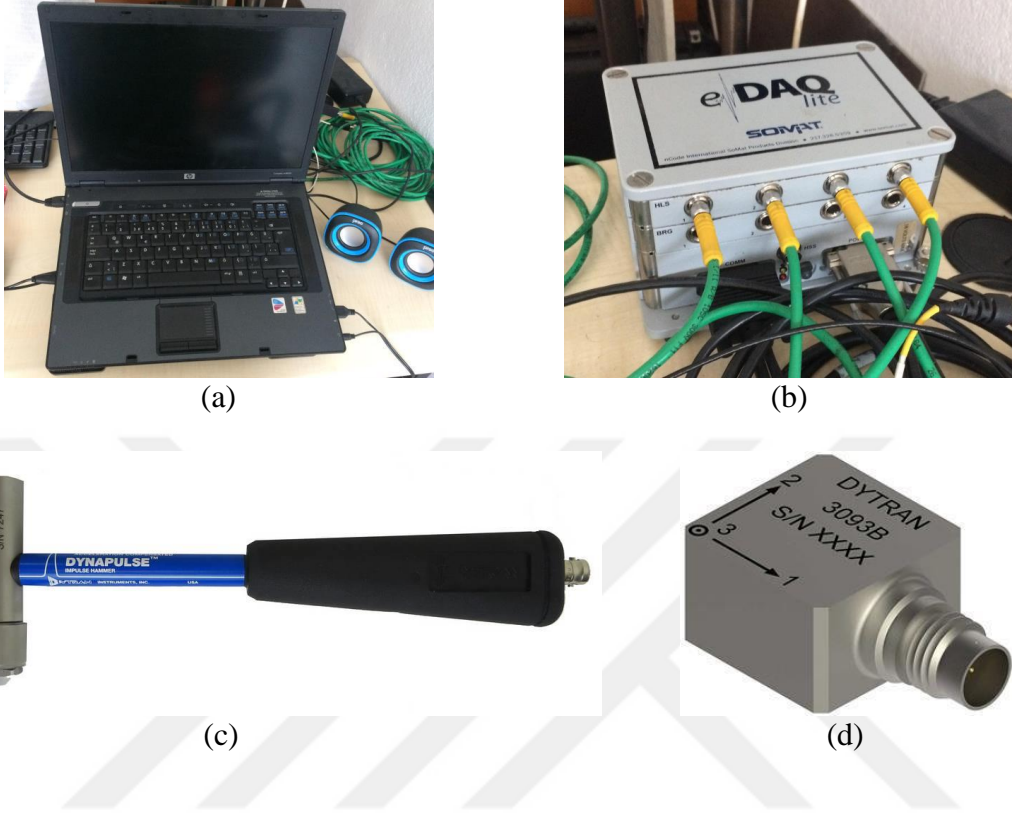
3.3. MODAL ANALİZ

Kaynak işleminden çıkan numunelere modal analiz uygulanmıştır. Deneyde darbe çekici (Dynapulse) ile uygulanan darbe sonucunda oluşan farklı modlardaki doğal frekans değerleri ivmeölçer (Model No: 3093B, Dytran Instruments, Inc., ABD) aracılığı ile toplanmış, veriler mikroişlemci tabanlı bir veri toplama sistemi olan SoMat™ eDAQ-lite ve nCodeGlyphWorks yazılımı (HBM, Inc., ABD) aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Titreşim test düzeneği genel görünüşü.

Modal analiz deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.3'te verilmiştir.

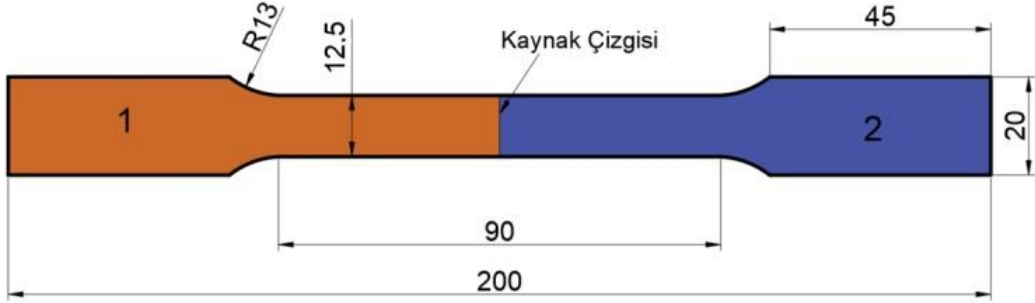


Şekil 3.3 Modal analiz deney düzeneği araçları a) Bilgisayar (nCode ve Infield), b) Veri toplayıcı (eDAQ), c) Darbe çekici, d) İvmeölçer.

3.4. ÇEKME TESTİ

Tahribatsız bir yöntem olan Modal Analizin ardından, kaynaklı numuneler Çekme Testi için ASTM E8 (Rafi et al. 2014) standardına göre hazırlanmıştır. Çekme numuneleri kaynak çizgisi ortada kalacak şekilde kesilerek analize uygun hale getirilmiştir. Çekme testleri Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarlarında 35 Ton kapasiteli TS EN ISO 7500-1, ASTM E4 10002-2, BS1610, DIN51221'e göre CLASS 1 / 0.5 hassasiyetindeki çekme cihazında oda sıcaklığında 1 mm/dk çekme hızında yapılmıştır.

Çekme testi numune ölçüleri Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 Çekme testi deney numune ölçüleri.

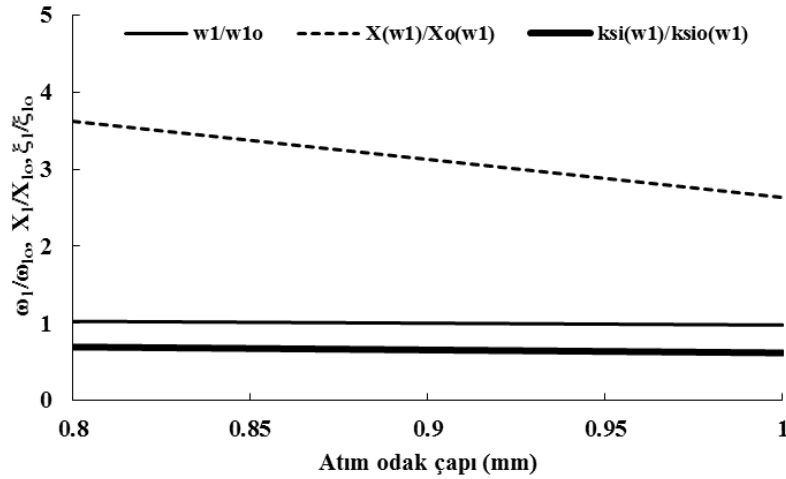
BÖLÜM 4

BULGULAR

4.1 MODAL ANALİZ BULGULARI

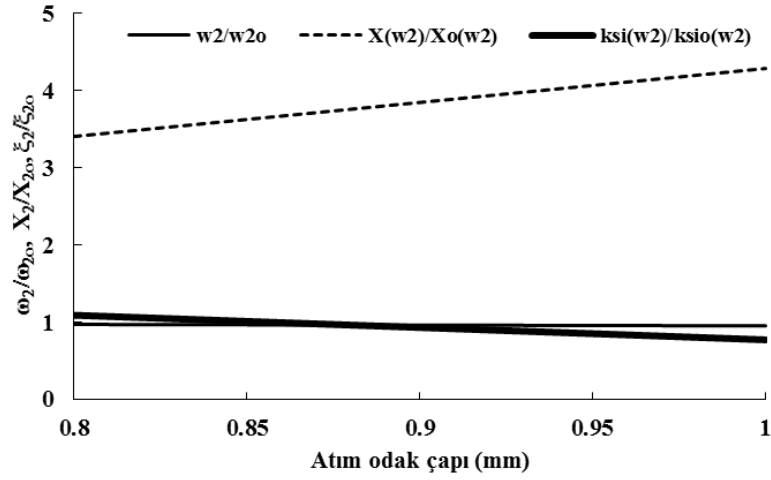
Nd:YAG lazer kaynağı ile kaynaklanmış numunelere uygulanan modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri atım odak çapı ve lazer kaynak gücü parametreleri gözönünde bulundurularak incelenmiştir.

Şekil 4.1 de lazer kaynağı esnasında atım odak çapındaki artışın doğal frekans (ω_1/ω_{10}), yer değiştirme fonksiyonu (X_1/X_{10}) ve sönüm oranında (ζ_1/ζ_{10}) neden olduğu değişim görülmektedir. Atım odak çapı parametre olarak alındığında mod 1'de doğal frekans değerinde çok az bir düşüş görülmüş, yer değiştirme fonksiyonunda düşüş görülmüştür. Sönüm oranında ise değişim gözlenmemiştir.



Şekil 4.1 Atım odak çapı (0.8-1 mm) na göre modal analiz sonuçları: mod 1.

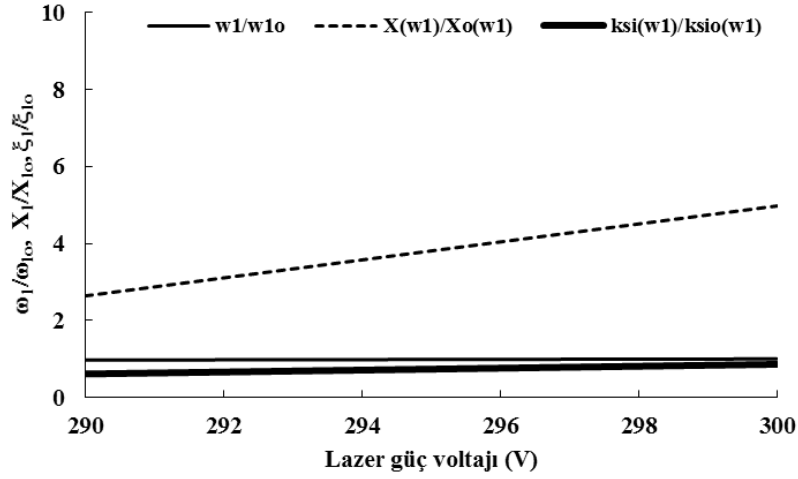
Yine atım odak çapındaki artışın mod 2 de doğal frekans (ω_1/ω_{10}), yer değiştirme (X_1/X_{10}) ve sönüm oranında (ζ_1/ζ_{10}) etkisi Şekil 4.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre mod 2’de atım odak çapı karşısında doğal frekansta değişim görülmemiş ancak yer değiştirme fonksiyonunda artış görülmüştür. Ayrıca yine mod 2’de sönüm oranında düşüş görülmüştür.



Şekil 4.2 Atım odak çapı (0.8-1 mm) na göre modal analiz sonuçları: mod 2.

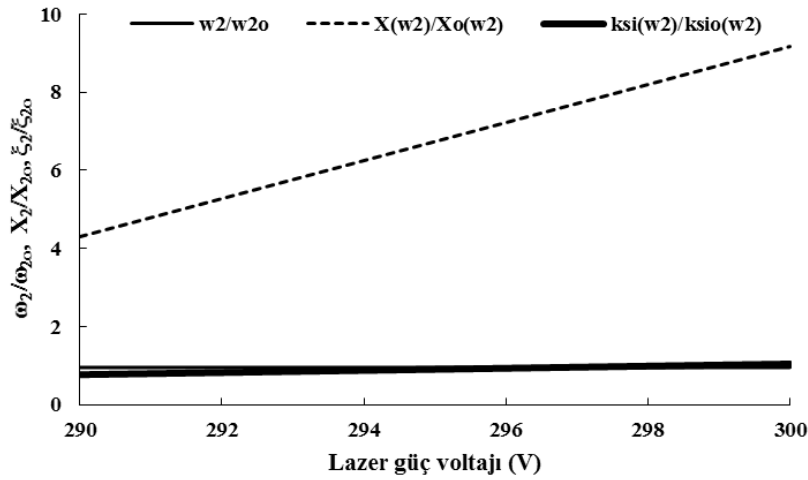
Değerlendirmeye alınan diğer bir parametre ise lazer kaynak gücüdür. Literatür çalışmasında elde edilen bilgilerin ışığında lazer kaynağı esnasında uygulanan lazer kaynak gücü artışının nüfuziyeti, dolayısıyla mukavemeti olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Modal analiz verileri lazer kaynak gücü parametresi göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.3'te lazer kaynak güç voltajındaki artışın doğal frekansı (ω_1/ω_{10}) değiştirmedeği, sönüm oranında (ζ_1/ζ_{10}) azalmaya neden olduğu görülmüştür. Ayrıca yer değiştirme fonksiyonunda (X_1/X_{10}) artış net bir biçimde görülmektedir.



Şekil 4.3 Lazer güç voltajı (290-300 V) göre modal analiz sonuçları: mod 1.

Şekil 4.4'te lazer güç voltajında artışın mod 2'de yer değiştirme fonksiyonunda (X_2/X_{20}) artışa neden olduğu açık bir biçimde görülmektedir. Aynı durumda doğal frekans (ω_2/ω_{20}) değişim göstermemiş, sönüm oranı (ζ_2/ζ_{20}) ise artış göstermiştir.



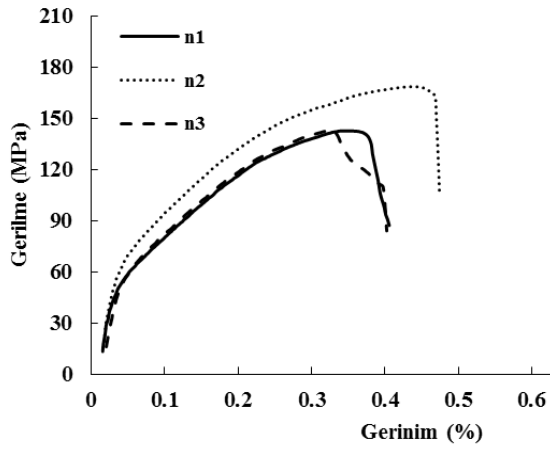
Şekil 4.4 Lazer güç voltajı (290-300 V) göre modal analiz sonuçları: mod 2

Modal analiz ile elde edilen dinamik değerler, kaynak güç voltaj parametresinin mekanik özelliklerle doğrudan ilişkili olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Diğer bir ifade ile yer değiştirme tepki fonksiyonu ve sönümlenme oranındaki değişim; tokluk, maksimum çekme mukavemeti değerlerinde değişim hakkında bize ipucu vermektedir.

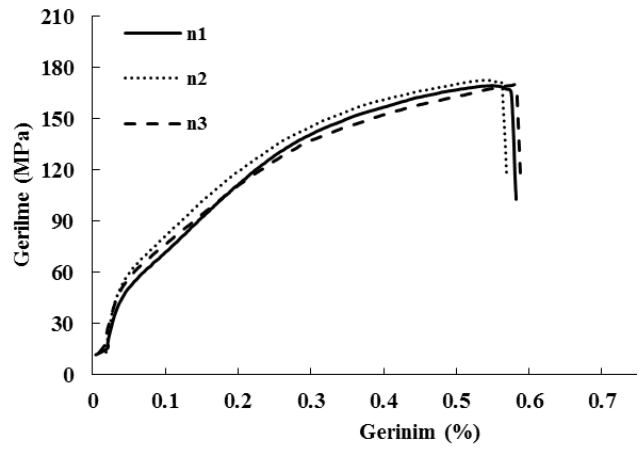
4.2 ÇEKME TESTİ BULGULARI

Kaynaklanmış ve titreşim analizi yapılmış numunlere çekme testi yapılarak mekanik özellikleri incelemiştir. Çekme testi sonuçlarına göre elde edilen gerilme/gerinim eğrileri Şekil 4.4 a, b ve c’de verilmiştir.

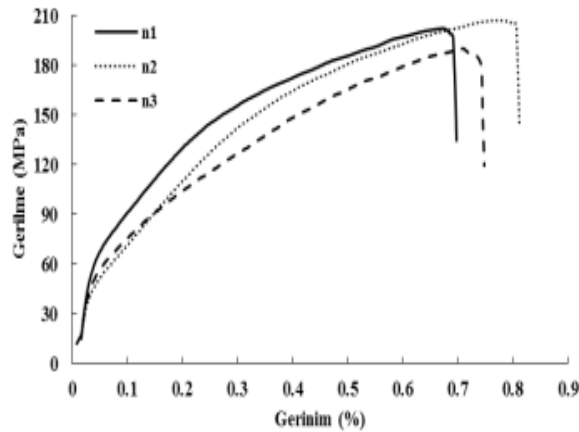
Elde edilen gerilme/gerinim grafikleri incelendiğinde atım odak çapındaki artışın (Şekil 4.4 a,b) tokluk değerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Diğer taraftan lazer kaynak gücündeki artış (Şekil 4.4 b,c) tokluk değerinin büyük oranda artmasına, bununla birlikte elastik modülde artışa yol açmıştır.



(a)



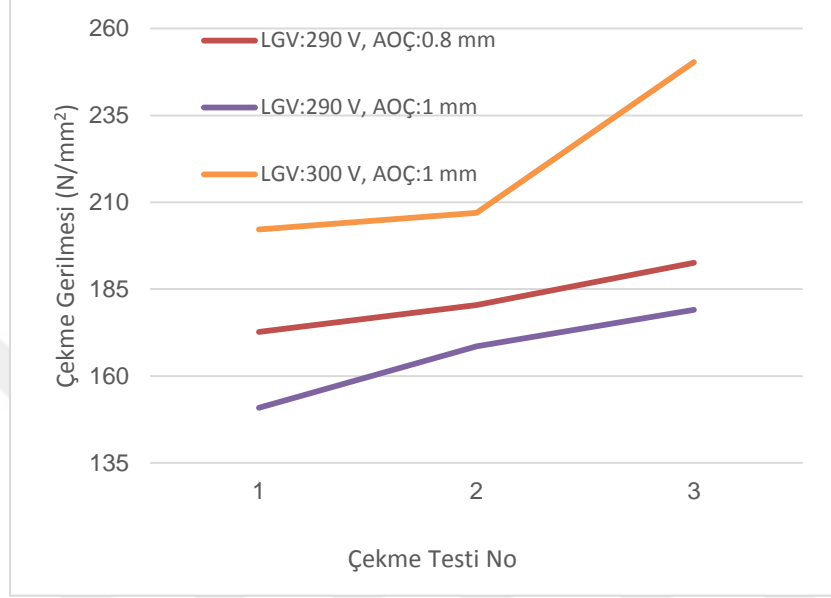
(b)



(c)

Şekil 4.5 Kaynak parametrelerine göre gerilme/gerinim eğrileri a) Lazer güç voltajı= 290 V, atım odak çapı= 0.8 mm, b) Lazer güç voltajı= 290 V, atım odak çapı= 1 mm, c) Lazer güç voltajı= 300 V, atım odak çapı= 1 mm.

Çekme mukavemet değerlerinin verildiği Şekil 4.5 incelediğinde, güç artışıyla birlikte çekme mukavemetinin arttığı görülmektedir. Literatür bilgileri ile uyum gösteren çekme testi verileri gücün artmasıyla birlikte kaynak nüfuziyetinin artmasının mekanik özellikleri iyileştirdiği şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.6 Maksimum çekme gerilmesi değerleri (LGV: Lazer güç voltajı, AOÇ: Atım odak çapı).

Yapılan modal analiz ve çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında, verilerin birbirini destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Bu noktada statik ve dinamik yüklemelere karşı kaynaklı bölge performansı açısından elde edilen benzerlik, kaynaklı yapılardaki sürekliliğinin ve artık gerilmenin mekanik performansa bağlı etki azlığını göstermektedir.



BÖLÜM 5

SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan lazer kaynağı düşük ısı girdisi nedeni ile çok düşük bir ITAB ve öz bölgesine sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum mekanik özellikleri etkileyen faz dönüşümleri, kalıntı gerilmeler ve hızlı soğumaya bağlı kaynak hataları gibi etkenleri ortadan kaldırarak mekanik açıdan kaliteli bir kaynak dikişi elde edilmesini sağlamaktadır. Kaynak dikişinin kalite değerlendirmesinde tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, lazer kaynaklı S235JR sac malzemenin lazer kaynak gücü ve atım odak çapı parametreleri altında mekanik tepkileri incelenmiştir. Nd:YAG lazer kaynağı yöntemi kullanılarak kaynaklanan çelik numunelere titreşim analizinin bir alt kolu olan modal analiz ve çekme testi uygulanmıştır. Kaynak parametreleri lazer kaynak voltajı 290 V ve 300 V, atım odak çapı 0.8 mm ve 1 mm ve atım süresi 5.5 ms ve 11 ms olarak belirlenmiştir.

Titreşim analizi sonuçları değerlendirildiğinde atım odak çapındaki artışın mod 1’de yer değiştirme fonksiyonunda azalmaya neden olduğu, mod 2’ de ise yer değiştirme fonksiyonunda artışa neden olduğu görülmektedir. Literatür bilgilerine dayanarak lazer kaynağında uygulanan lazer ışınındaki güç artışının nüfuziyeti artırdığı, dolayısıyla mukavemeti olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Kaynak parametresi olarak lazer güç voltajı değerlendirmeye alındığında, bu parametredeki artışın mod 1 ve mod 2’de yer değiştirme fonksiyonunda yüksek artış sağladığı dikkat çekmektedir. Kaynaklı bölgenin dinamik yüklemeler altındaki davranışı, lazer kaynak güç parametresinin mekanik özelliklerle büyük oranda ilişki içinde olduğunu göstermektedir.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde atım odak çapında artışın çekme mukavemetinde artışa yol açtığı görülmektedir. Lazer kaynak gücündeki artışın yine çekme mukavemetinde büyük oranda artışa neden olduğu, beraberinde tokluk değerini arttırdığı görülmektedir. Ayrıca gerilim –gerinim eğrilerinden yola çıkarak, kaynak gücü artışın elastik modülde artmaya neden olduğu dikkat çekmektedir.

Kaynaklı numuneye yapılan iki farklı analiz sonuçları incelendiğinde elde edilen verilerin birbirini destekleyici nitelikte olduğu söylenebilir. Özellikle lazer kaynak gücünün artırılması ile görülen yer değiştirme fonksiyonundaki artış, çekme testi sonuçlarından elde edilen elastik modül artışı ile uyum göstermektedir. Başka bir ifadeyle kaynak kalifikasyonunda modal analiz bize farklı ve çok yönlü bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Bu tez çalışmasında yapılan çalışmalara destekleyici nitelikte olarak gelecekte numuneye sertlik testi yapılarak, kaynak dikişindeki sertlik değişimi incelenebilir. Kaynak dikişindeki nüfuziyet bilgileri verilere dayanarak yorumlanmıştır. Kaynak dikişinden kesit alınarak parametrelerin nüfuziyet üzerinde etkisi gözlemlenebilir. Ayrıca kaynak dikişi ve ısı tesiri altındaki bölgede oluşan fazlar XRD yöntemi kullanılarak tespit edilebilir. Kaynak bölgesine darbe testi uygulanarak malzemenin mekanik davranışları hakkında daha fazla veri elde edilerek, çalışmada daha geniş bir bakış açısı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Agarwal G, Kumar A, Richardson I M, Hermans M J M** (2019) Evaluation of solidification cracking susceptibility during laser welding in advanced high strength automotive steels. *Material & Design*, Volume 183.
- Altay M** (2021) Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yüksek Mukavemetli DP1200 Çeliğinde Lazer Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 138s.
- Avitabile P** (2018) Modal Testing – A Practitioner’s Guide. *The Society for Experimental Mechanics and John Wiley & Son’s Ltd*, ISBN Hardback: 9781119222897.
- Black S and Jobling L** (2014) Physical principle of LASER. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 15, 11 : 530-532.
- Cai W, Wang J Z, Jiang P, Cao L C, Mi G Y, Zhaou Q** (2020) Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring : A critical review of recent literature. *Journal of Manufacturing Systems*, 57 : 1-18.
- Chen Q, Yan H G, Chen J H, Zeng P L, Yu Z H, Su B** (2010) Laser beam welding of AZ31 magnesium alloy with filler strip. *Material and Manufacturing Processes*, 25, 11 : 1227-1232.
- Cho S K, Yang Y S, Son K J, Kim J Y** (2004) Fatigue strength in laser welding of the lap joint. *Finite Element in Analysis and Design*, 40 : 1059-1070.
- Costa A, Miranda R, Quintino L, Yapp D**(2007) Analysis of beam material interaction in welding of titanium with fiber lasers. *Materials and Manufacturing Process*, 22, 7 : 798-803.
- Cui C Y, Cui X G, Ren X D, Lui T T, Hu J D, Wang Y M** (2013) Microstructure and microhardness of fiber laser butt welded joint of stainless steel plates . *Materials and Design*, 49 : 761-765.
- Dahotre N B and Harimkar S P** (2008) Laser Fabrication of Materials. *Springer*, Boston, MA.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Das A, Li D, Williams D and Greenwood D** (2018) Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing. *World Electric Vehicle Journal*,9,22.
- De A, Maiti S K, Walsh C A, Bhadeshia H K D H** (2003) Finite element simulation of laser spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 8 (5) : 377-384.
- Dixon B F and Ritter J C** (2001) Solidification cracking in high strength steels welded by electron beam and laser beam processes. *In Today and Tomorrow in Science and Technology of Welding and Joining, Proceedings 7 th International JWS Symposium*, Kobe, Japan.
- Dong Z B, Wei Y H** (2006) Three dimensional modelling weld solidification cracks in multipass welding. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 46 : 156-165.
- Erdoğan G** (2016) Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Modal Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 121s.
- Ewins D J** (2000) Basics and state-of-the-art of modal testing. *Sadhana*, 25 (3) : 207-220.
- Evin E and Tom M** (2017) The Influence of Laser Welding on the Mechanical Properties of Dual Phase and Trip Steels. *Metals* : 1-16.
- Gong H, Wang S, Knysh, Korkolis Y P** (2016) Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced-and ultra-high-strength steels. *Materials and Design*,90 : 1115-1123.
- He X** (2012) Finite Element Analysis of Laser Welding : A State of Art Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(12) : 1354-1365.
- Helm J, Schulz A, Olowinsky A, Dohrn A, Poprawe R** (2020) Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics. *Welding in the World*.
- He J and Fu Z F** (2001) Modal Analysis. *Butterworth-Heinemann*, England, ISBN : 07506 5079 6.
- Husain N A and Ouyang H** (2011) Detection of damage in welded structure using experimental modal data. *9th International Conference on Damage Assessment of Structure, Journal of Physics:Conference Series*, 305 : 012220.
- Husain N A, Khodaparast H H, Snaylam A, James S, Sharp M, Dearden G and Ouyang H** (2009) Modal testing and finite element model updating of laser spot welds. *7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Journal of Physics:Conference Series*, 181 : 012024

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hong K M, Shin Y C** (2017) Prospects of laser welding technology in the automotive industry : A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 254 : 46-69.
- Joners I** (2013) 10-Laser Welding of Plastics. Handbook of Laser Welding Technologies, *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials* : 280-300.
- Katayama S** (2013) Handbook of Laser Welding Technologies. *Woodhead Publishing Series Electronic and Optical Materials Number:41*, s.613.
- Ki H, Mohanty P S and Mazumder J** (2001) Modelling of high density laser materials interaction using fast level set method. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 34 (3) : 364-372.
- Koecher W and Bass M** (2003) Solid-State Lasers : A Graduate Text. 1st ed, ISBN: 0-387-95590-9, *Springer*, NewYork, 408.
- Koleva E G, Mladenov G M** (2011) 4.Experience on electron beam welding. *Practical Aspects and Applications of Electron Beam Irradiation* : 95-133.
- Kristen J K, Hansen L E, Nielsen S E, Borggreen K** (1999) Laser welding of C-Mn and duplex stainless steels. *In Assessment of Power Beam Welds, European Symposium*, Geesthacht, Germany.
- Malíčková I, Fridrichová J, Bačík P, Milovská S, Škoda R, Illášová L, Štubňa J**(2018) Laser effect in the optical luminescence of oxides containing Cr. *Acta Geologia Slovaca*, 10(1) : 27-34.
- Matsunawa A and Katayama S** (2001) Mechanism and prevention method of imperfection occurred in high power laser welding. *In Joint Symposium between JWRI and TWI*, Osaka, Japan.
- Mazmudar C P and Patel K** (2013) A Literature Review on Effect of Laser Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure. *International Journal of Scientific Research &Development Vol.1, Issue10* : 2102-2105.
- Miyamoto I** (2013) 11-Laser Welding of Glass. Handbook of Laser Welding Technologies, *Woodhead Publishing Series in Electronic and OpticalMaterials* : 301-331.
- P'ns D, Molian P** (2008) Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils. *Materials Science and Engineering A*, 486 : 680-685.
- Rafi H K, Pal D, Patil N, Starr T L, Stucker B E** (2014) Microstructure and mechanical behavior of 17-4 precipitation hardenable steel processed by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23,12 : 4421-4428.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Schmidt M, Otto A, Kägeler A** (2008) Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets. *CIRP Annals*, Volume 57, Issue 1, 213-216.
- Stavridis J, Papacharalampopoulos A and Stavropoulos P** (2018) Quality assessment in laser welding : a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 : 1825-1847.
- Sun Q, Di H S, Li J C, Wang X N**(2016)Effect of pulse frequency on microstructure and properties of welded joints for dual phase steel by pulsed laser welding. *Materials and Design*, 105 : 201-211.
- Svenungsson J, Choquet I, Kaplan A F H** (2015) Laser welding process-a review of keyhole welding modeling. *Physics Procedia*, 78 : 182-191.
- Şenveli E** (2018) Taşıt titreşim kaynağı tespit yöntemleri ve uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 73s.
- Tuncel O** (2020) Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Farklı Türdeki Yüksek/Ultra Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Mekanik ve Mikroyapı İlişkilerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 220s.
- Tuncel O, Aydın H, Cetin S** (2020) Microstructural and Mechanical Properties of Nd:YAG Laser Welded Dissimilar DP600-DP1000 Steel Sheets. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 015901 (20) : 155-164.
- Uzun R O ve Keleş Ö** (2012) Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Journal of Engineering and Architecture of Gazi University*,27,3 : 509-517.
- Walsh C A** (2002) Laser Welding-Literature Rewiev. Materials Science and Metallurgy Department, University of Cambridge, Cambridge, UK.
- You D Y, Gao X D and Katayama S** (2014) Review of laser welding monitoring. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(3) : 181-201.
- Yürük A, Bozkurt B ve Kahraman N** (2017) S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mig kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 21,2 : 90-97.

ÖZGEÇMİŞ

Lisans eğitimini 2008 yılında Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (İngilizce) bölümünde tamamlamıştır. Ortadoğu Teknik Üniversitesi'nde Uluslararası Kaynak Mühendisliği eğitimi alarak Kaynak Mühendisi ünvanını 2012 yılında almıştır. Özel sektörde Kalite Kontrol Sorumlusu ve Kaynak Mühendisi olarak çalışmıştır.