YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN LAZER KAYNAĞINDA PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mahdı HEJAZI

T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN LAZER KAYNAĞINDA PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mahdi HEJAZI
0009-0005-7248-5195

Doç. Dr. Celalettin YÜCE
(Danışman)

Yüksek Lisans TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN LAZER KAYNAĞINDA PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mahdi HEJAZI

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Celalettin YÜCE

Lazer kaynak yöntemi, yüksek güçlü lazer ışınının dar bir alana odaklanmasıyla derin nüfuziyet, yüksek dayanım, hassasiyet ve yüksek kaliteli birleştirme gibi avantajlar sunmaktadır. Kaynak bölgesinde istenilen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi, doğru proses parametrelerinin seçimine bağlıdır.

Bu çalışmada, fiber lazer kaynak teknolojisiyle DP1180 ve DP600 çeliklerin birleştirilmesinde osilasyon türü (lineer ve dairesel), ilerleme hızı ve osilasyon genliği gibi parametrelerin kaynak geometrisi, mikro yapı, mikro sertlik ve mekanik dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kaynak geometrisi incelemelerinde, lineer osilasyon türüyle yüksek ilerleme hızlarında daha derin penetrasyon, dar erime bölgesi (EB) ve ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) genişlikleri elde edilmiştir. Dairesel osilasyon türü, düşük ilerleme hızlarında daha geniş EB ve ITAB ile daha yüksek penetrasyon sağlamıştır. Mikro sertlik değerlendirmelerinde, lineer osilasyon türü düşük genlik ve yüksek ilerleme hızlarında daha yüksek EB ve ITAB sertlikleri sunmuştur. Dairesel osilasyon türü ise yüksek genliklerde daha yüksek mikro sertlikler sağlamıştır. Mekanik dayanım açısından, lineer osilasyon türü yüksek ilerleme hızlarında daha iyi çekme dayanımı sunarken, dairesel osilasyon türü düşük genliklerde daha yüksek dayanım göstermiştir.

Lazer gücü 1200 W, frekans 100 Hz ve farklı ilerleme hızı-genlik kombinasyonlarıyla yapılan deneyler, belirli koşullarda lineer osilasyon türünün dar EB ve ITAB genişlikleriyle derin penetrasyon, dairesel osilasyon türünün ise daha yüksek çekme dayanımı sağladığını göstermiştir.

Sonuç olarak, osilasyon türü ve proses parametrelerinin kaynak performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve optimize edilebileceği koşullar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fiber lazer kaynak, Yüksek mukavemetli çelik, İlerleme hızı, Genlik

2025 xviii + 96 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS IN LASER WELDING OF HIGH STRENGTH STEELS

Mahdı HEJAZI

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

Supervisor: Assoc. Prof. Celalettin YÜCE

The laser welding method offers various advantages, such as deep penetration, high strength, precision, and high-quality joining, by focusing a high-power laser beam on a narrow area. Achieving the desired mechanical properties in the weld zone depends on selecting appropriate process parameters.

In this study, the effects of process parameters such as oscillation type (linear and circular), travel speed, and oscillation amplitude on the weld geometry, microstructure, microhardness, and mechanical strength were investigated in the joining of DP1180 and DP600 steels using fiber laser welding technology.

Examinations of weld geometry revealed that linear oscillation at high travel speeds produced deeper penetration and narrower widths of the fusion zone (FZ) and heat-affected zone (HAZ). In contrast, circular oscillation at lower travel speeds resulted in wider FZ and HAZ widths and higher penetration. Microhardness evaluations showed that linear oscillation with low amplitudes and high travel speeds yielded higher FZ and HAZ hardness. Circular oscillation generally provided higher microhardness values at high amplitudes. In terms of mechanical strength, linear oscillation demonstrated better tensile strength at high travel speeds, while circular oscillation exhibited higher strength at low amplitudes.

Experiments conducted with a laser power of 1200 W, a frequency of 100 Hz, and various speed-amplitude combinations showed that linear oscillation achieved deeper penetration with narrower FZ and HAZ widths, whereas circular oscillation delivered higher tensile strength.

In conclusion, the effects of oscillation type and process parameters on weld performance were analyzed, and the conditions under which performance could be optimized were identified.

Key words: Fiber laser welding, High-strength steel, Travel speed, Amplitude

2025 xviii + 96 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim sürecimde, tez konusunun belirlenmesinden, deneylerin gerçekleştirilmesine ve elde edilen sonuçların akademik bir değere dönüştürülmesine kadar her aşamada bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Celalettin Yüce'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını FOA-2022-1098 numaralı "Araç Yapısal Parçalarında Kullanılan Farklı Türdeki Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Lazer Kaynak ile Birleştirilmesinde Proses Parametre Etkilerinin İncelenmesi" başlıklı öncelikli alan araştırma projesi kapsamında destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, aldığım tüm kararları destekleyen sevgili anne ve babama; fedakârlıkları, anlayışları ve her zaman yanımda olan kıymetli eşim Alya'ya teşekkür ederim. Ayrıca, yaptığım çalışmaların örnek teşkil ederek daha ileri seviyelere taşınmasını ve bilimle topluma katkı sağlamasını temenni ederim.

Mahdi HEJAZI
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... Vİİİ
ABSTRACT ..... İX
TEŞEKKÜR X
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... Xİİİ
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... XİV
ÇİZELGELER DİZİNİNİ ..... XVİİİ
1.GİRİŞ 1
2. KURUMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. LAZER IŞINI 3
2.1.1. Lazerin Temel Prensipler 3
2.1.2. Lazer Işının Üretilmesi 4
2.1.3. Lazer Işığının Özellikleri 5
2.2. LAZER ÇEŞİTLERİ 5
2.2.1.Yarı iletken lazerler 5
2.2.2. Katı lazerler 6
2.2.3. Gaz lazerler 6
2.2.4. Sıvı lazerler 7
2.2.5. Fiber lazerler 7
2.2.6. Bazı lazer türlerin karşılaştırılması 8
2.3. LAZERLE KAYNAK İŞLEMİ 9
2.4. LAZER KAYNAK İŞLEM PARAMETRELERİ 14
2.4.1. Lazer Gücü ve Kaynak İlerleme Hızı 14
2.4.2. Odak mesafesi 15
2.4.3. Lazer dalga Modu 16
2.4.4. Koruyucu Gaz Türü ve Debisi 16
2.5. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI 17
3.MATERYAL VE YÖNTEM 23
3.1. MATERYAL 23
3.2. YÖNTEM 24
3.2.1 Lazer Kaynak Ünitesi ve Özellikleri 24
3.2.2. Deney Tasarımı ve Lazer Kaynak Uygulaması 24
3.2.3 METALOGRAFİK İNCELEME 27
3.2.4. Mikrosertlik Ölçümü 29
3.2.5. Çekme Testi 30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 32
4.1. KAYNAK GEOMETRİSİ İNCELEMELERİ 32
4.1.1. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda ilerleme hızın kaynak geometrisine etkisi 33
4.1.2. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda genliğin kaynak geometrisine etkisi 37
4.1.3. Dairesel (Circular) osilasyon modunda ilerleme hızın kaynak geometrisine etkisi 41
4.1.4. Dairesel (Circular) osilasyon modunda Genliğin kaynak geometrisine etkisi 46
4.1.5. Osilasyon Türü kaynak geometresine etkisi 50
4.2. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI 63
4.2.1. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda ilerleme hızın mikro sertliğine etkisi 63
4.2.2. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda Genliğin mikro sertliğine etkisi 66

4.2.3. Dairesel osilasyon modunda ilerleme hızın kaynak mikro sertliğine etkisi.....69
4.2.4. Dairesel osilasyon modunda Genliğin kaynak mikro sertliğine etkisi.....72
4.2.5. Osilasyon Türü kaynak mikro sertliğine etkisi 75
4.3 MEKANİK DAYANIM İNCELEMELERİ 81
4.3.1 Lineer (Zig-zag) osilasyon türünde ilerleme hızın mekanik dayanıma etkisi.....81
4.3.2 Lineer (Zig-zag) osilasyon türünde genliğin mekanik dayanıma etkisi.....82
4.3.3 Dairesel (Circular) osilasyon türünde ilerleme hızın mekanik dayanıma etkisi 82
4.3.4 Dairesel (Circular) osilasyon türünde genliğin mekanik dayanıma etkisi 83
4.3.5. Osilasyon türü mekanik dayanıma etkisi 84
5. SONUÇ 90
KAYNAKLAR 93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
H_V	Vickers sertlik
µm	Mikro metre
MPa	Mega Paskal
kW	Kilowatt

Kısaltmalar	Açıklama
AHSS	Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler
TM	Temel malzeme
EB	Erime bölgesi
ITAB	Isı altında kalan bölge

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Kendiliğinden ışıma ve soğurma……..	4
Şekil 2.2.	Uyarılmış ışıma……	4
Şekil 2.3.	Lazer ışığın üretilmesi (Cebeci 2021)……	5
Şekil 2.4.	Yarı iletken lazer sistemi (Arcan 2011)…….	6
Şekil 2.5.	Gaz lazer sistemi yapısı (Arcan 2011)……	7
Şekil 2.6.	Lazer kaynak yöntemi şematik gösterimi (Ai ve ark. 2017)……	9
Şekil 2.7.	Diğer kaynak yöntemlerinin güç yoğunluğu ile karşılaştırıldığında lazer kaynağının yoğunluğu (Koleva ve ark. 2011)……	10
Şekil 2.8.	Fiber lazerin çalışma prensibi (Atmaca 2021)……	11
Şekil 2.9.	Farklı lazer türlerinde ışının yönlendirilmesinin şematik gösterimi a) CO2 lazeri, b) Katı hal lazer üreteci (Fiber, Nd:YAG) (Yüce 2018)……...……	12
Şekil 2.10.	Kaynak hızının kaynak geometrisine etkisi: (a) Uygun kaynak hızı, (b) Hızlı kaynak hızı, (c) Düşük kaynak hızı (Steen 2003).	15
Şekil 2.11.	Gaussyen ışın odak mesafesi ve ışın çapları (Prakash ve Kumar 2017)……	15
Şekil 2.12.	Lazer dalga modları: (a) sürekli dalga modu; (b) darbe dalga modu (Huı-Chı Chen 2010)……	16
Şekil 2.13.	Yüce (2020) çalışmasında Kaynaklı numunelerin farklı osilasyon genliklerinde mikroyapı görüntüleri a) 0.5 mm, b) 1 mm, c) 1.5 mm ve d) 2 mm……	17
Şekil 3.1.	Lazer kaynak denemelerinin gerçekleştirildiği cihaza ait görüntüler……	24
Şekil 3.2.	Yaygın lazer ışını wobble modları……	25
Şekil 3.3.	Çalışmada kullanılan Alın kaynığı şematik gösterimi……	26
Şekil 3.4.	Lazer kaynaklı numunelere ait örnek görüntü……	27
Şekil 3.5.	Lazer kaynaklı numunelerden su jeti ile kesilmiş numune görüntüleri……	27
Şekil 3.6.	(a) STRUERS Labotom-3 metalografik kesme cihazı (b) Metkon Ecopress 100 numune kalıplama cihazı……	28
Şekil 3.7.	(a) Metkon Forcipol zımparalama-parlatma cihazı, (b) Nikon Eclipse MA100 ters metal mikroskobu……	29
Şekil 3.8.	Metkon Duroline-M Sertlik Ölçüm Cihazı……	29
Şekil 3.9.	Vickers mikro sertlik ölçüm hatı……	30
Şekil 3.10.	Çekme testlerinin gerçekleştiği çekme-basma cihazı görüntüsü.	30
Şekil 3.11.	Çekme deneyi numune boyutları……	31
Şekil 4.1.	Kaynaklı numunede mikro yapı bölgeleri (EB: Erime Bölgesi, ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge, TM: Temel Malzeme)……	32
Şekil 4.2.	a) A1 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A1 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	34
Şekil 4.3.	a) A2 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A2 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	34
Şekil 4.4.	a) A8 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A8	

	Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	34
Şekil 4.5.	Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin Penetrasyon derinliğine etkisi……	35
Şekil 4.6.	Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimi EB genişliğine etkisi……	36
Şekil 4.7.	Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızın değişimi ITAB genişliğine etkisi……	37
Şekil 4.8.	a) A3 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A3 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	38
Şekil 4.9.	a) A4 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A4 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	38
Şekil 4.10.	a) A5 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A5 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	39
Şekil 4.12.	Şekil 4.12. Lineer (zig-zag) osilasyonda Genlik değişimi EB genişliğine etkisi……	40
Şekil 4.13.	Şekil 4.13. Lineer (zig-zag) osilasyonda Genlik değişimi ITAB genişliğine etkisi……	41
Şekil 4.14.	a) B1 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B1 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	42
Şekil 4.15.	a) B2 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B2 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	43
Şekil 4.16.	a) B8 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B8 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	43
Şekil 4.17.	Dairesel osilasyonda ilerleme hızı değişiminin kaynak derinliğine etkisi……	44
Şekil 4.18.	Dairesel osilasyonda ilerleme hızı değişiminin EB genişliğine etkisi……	44
Şekil 4.19.	Dairesel osilasyonda ilerleme hızın değişimi ITAB genişliğine etkisi……	45
Şekil 4.20.	a) B3 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B3 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	46
Şekil 4.21.	a) B4 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B4 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	46
Şekil 4.22.	a) B5 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B5 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri……	47
Şekil 4.23.	Dairesel osilasyonda genlik değişiminin Penetrasyon derinliğine etkisi……	48
Şekil 4.24.	Dairesel osilasyonda Genlik değişimi EB genişliğine etkisi…	48
Şekil 4.25.	Dairesel osilasyonda Genlik değişimi ITAB genişliğine etkisi.	49
Şekil 4.26.	80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi……	50
Şekil 4.27.	80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi……	51
Şekil 4.28.	80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi……	52
Şekil 4.29.	70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi……	53
Şekil 4.30.	70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü	53

EB genişliğine etkisi……
Şekil 4.31. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi…… 54
Şekil 4.32. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi…… 55
Şekil 4.33. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi…… 55
Şekil 4.34. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi…… 56
Şekil 4.35. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi…… 57
Şekil 4.36. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi…… 57
Şekil 4.37. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi…… 58
Şekil 4.38. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi…… 59
Şekil 4.39. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi…… 59
Şekil 4.40. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi…… 60
Şekil 4.41. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi…… 61
Şekil 4.42. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi…… 61
Şekil 4.43. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi…… 62
Şekil 4.44. “A1” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 63
Şekil 4.45. “A2” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 64
Şekil 4.46. “A8” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 64
Şekil 4.47. Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi…… 65
Şekil 4.48. “A3” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 66
Şekil 4.49. “A4” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 67
Şekil 4.50. “A5” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 67
Şekil 4.51. Lineer (zig-zag) osilasyonda genlikteki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi…… 68
Şekil 4.52. “B1” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 69
Şekil 4.53. “B2” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 70
Şekil 4.54. “B8” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 70
Şekil 4.55. Dairesel osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi…… 71
Şekil 4.56. “B3” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 72
Şekil 4.57. “B4” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 73
Şekil 4.58. “B5” deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi… 73
Şekil 4.59. Dairesel osilasyonda genlikteki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi…… 74
Şekil 4.60. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü

mikro sertliğine etkisi…… 75
Şekil 4.61. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi…… 76
Şekil 4.62. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi…… 77
Şekil 4.63. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi…… 78
Şekil 4.64. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi…… 79
Şekil 4.65. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi…… 80
Şekil 4.66. Lineer (Zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisi…… 81
Şekil 4.67. Lineer (Zig-zag) osilasyonda genlik değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisi…… 82
Şekil 4.68. Dairesel (Circular) osilasyonda ilerleme hızının çekme dayanımı üzerindeki etkisi…… 83
Şekil 4.69. Dairesel (Circular) osilasyonda genlik değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisi…… 84
Şekil 4.70. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi…… 85
Şekil 4.71. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi…… 85
Şekil 4.72. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi…… 86
Şekil 4.73. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi…… 87
Şekil 4.74. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi…… 88
Şekil 4.75. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi…… 88

ÇİZELGELER DİZİNİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	Lazer türlerin karşılaştırması (Verhaeghe ve ark 2005)……	8
Çizelge	3.1.	Deneylerde Kullanılan DP600 ve DP1180 malzemelerinin kimyasal özellikleri (% ağırlık)……	23
Çizelge	3.2.	Deneylerde Kullanılan DP600 ve DP1180 malzemelerinin mekanik özellikleri……	23
Çizelge	3.3.	Lazer kaynak denemelerine ait parametreler……	26
Çizelge	4.1.	Lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanarak Lazer kaynaklı deney numunelerinin kaynak geometri bilgileri……	33
Çizelge	4.2.	Dairesel (Circular) osilasyon türü kullanarak Lazer kaynaklı deney numunelerinin kaynak geometri bilgileri……	42

1.GİRİŞ

Yüksek güçlü lazer ışınları ile malzemelerin ergitilmesi prensibine dayanan lazer kaynak yöntemi, derin nüfuziyet, yüksek dayanım, istenilen kaynak geometrisinin elde edilebilmesi, düşük ısı girdisi oluşturarak dar bir ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) yaratması, seri üretime ve otomasyona uygunluk, ek malzeme ve işlem gerektirmemesi gibi avantajları sayesinde otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP (Dual Phase) çelikleri, iki fazlı bir yapıya sahiptir ve ferritik matriste martenzit fazlarının dağılımı ile karakterizedir. Ferritik faz, çeliğe süneklik kazandırırken, martenzit faz, mukavemeti artırmaktadır. DP çelikleri, yüksek mukavemet ve uzama özellikleri sunmanın yanı sıra süreksiz bir akma davranışı göstermemektedir. Bununla birlikte, ısıl işlem sırasında yüksek sertleşme potansiyeline sahip olmaları nedeniyle "BH (Bake Hardenable)" etkisi sergilerler. Bu etki, martenzit faz dönüşümünden sonra ortaya çıkmaktadır. Otomotiv üretiminde, martenzit dağılımlı DP çeliklerin kullanımı, bu çeliklerin yüksek dinamik yük sönümleme enerjisi sayesinde darbe dayanımını artırmakta ve araç güvenliğine önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında DP600 ile DP1180 çelik sacları fiber lazer kaynağında Wobble head teknolojisi kullanılarak alın formatında birleştirilmiştir. Lazer kaynak yöntemindeki en etkili işlem parametreleri ilerleme hızı, osilasyon genliği ve osilasyon türü (wobble modu) kaynak geometrisi, mikro yapı, mikro sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Çalışmanın Kaynak Araştırması bölümünde, öncelikle lazer teknolojisi tanıtılmış ve bu teknolojinin temel bileşenleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Fiber lazer kaynağı yöntemi ele alınmış ve bu yöntemin uygulanmasında önemli rol oynayan proses parametreleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bölümün sonunda, lazer kaynak yöntemiyle yüksek mukavemetli çelik malzemelerin birleştirilmesine yönelik literatürde yer alan çalışmalar değerlendirilmiş ve bu çalışmaların sonuçları özetlenmiştir.

Materyal ve Yöntem kısmında çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, uygulanan yöntemler ve kullanılan araçlar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri tanıtılmış, malzemelere uygulanan süreçler

detaylandırılmıştır. Mekanik ve metalürjik özelliklerin incelenmesi sırasında kullanılan cihazlar tanıtılarak bu cihazların teknik özellikleri ve çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca, numunelerin hazırlanması, test prosedürleri ve analiz yöntemleri adım adım açıklanmıştır.

Çalışmanın Bulgular kısmında, kaynaklanan deney numuneleri osilasyon türüne göre iki ana gruba ayrılmıştır. İlk grupta, osilasyon türü ve genliği sabit tutularak üç farklı ilerleme hızı kullanılmış ve ilerleme hızının kaynak geometrisi, mikro sertliği ve mekanik dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci grupta ise, ilerleme hızı sabit tutularak üç farklı osilasyon genliği ile kaynaklar yapılmış ve osilasyon genliğinin kaynak geometrisi, mikro sertlik ve mekanik dayanım üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, iki farklı osilasyon türü kullanılarak yapılan kaynaklar üzerinde osilasyon türünün kaynak geometrisi, mikro sertlik ve mekanik dayanımına olan etkisi de analiz edilmiştir. Bu analizler, her iki parametrenin (osilasyon türü ve ilerleme hızı) kaynak kalitesini ve performansını nasıl şekillendirdiğini ortaya koymuştur.

Çalışmanın Sonuç kısmında ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve çıktılar sunulmuştur.

2. KURUMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Lazer Işını

Lazer, Albert Einstein 1916 yılında Işık için yayılma teorisini ve Uyarılmış radyasyon kavramını geliştirmesi ile ortaya çıkmıştır. Enishtein teorisine göre bir atom uyarılmış ışıma enerjisini düşük bir enerji seviyesine indirdiğinde bir foton yayar, fotonun yaymasının sonucu enerji üretilir. Bu teroiye dayanarak İlk mikrodalga lazer olan MASER (Microwave Amplification by Stimulation Emission of Radiation), Charles Townes ve diğerleri tarafından icat edildi (ION 2005).

MAZER "Microwave Amplication by Stimulated Emission of Radiation" ingilizce kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuştur olup, ışınım yayınımının uyarılmasıyla yükseltilmiş mikrodalga anlamına gelmektedir. O yıllarda MASER'e olan ilgi önemli ölçüde artmasına rağmen günümüzde sadece yalnızca radyo astronomi gibi kısıtlı alanlarda kullanılmaktadır. MASER'in keşfinden sonra, optik alanda uygulanabilirliği üzerine çalışmalar yapılmış ve bunun sonucunda lazer üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. İlk çalışan lazer 1960 yılında Theodore H. Maiman (Yakut lazeri) bulunmuştur. Ardından P.P.Sorokin ve M.J. Stevenson tarafından Uranyum lazerini bulunmuştur. C. Kumar ve N. Patel, 1963 yılında karbondioksit lazerini keşfetti. 1964'te Joseph Geusic ve diğerleri Nd:YAG lazeri bulmuşlar. Argon lazerleri 1970'lerde üretilmiştir (ION 2006, Cebeci 2021, Mungan 2006).

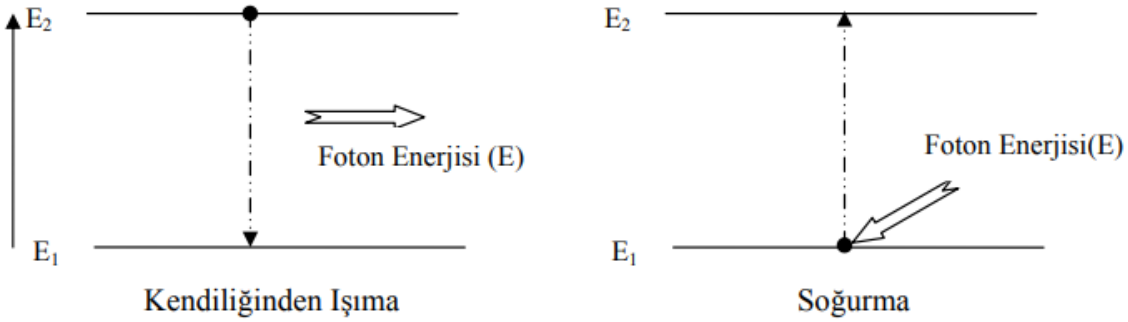
2.1.1. Lazerin Temel Prensipler

Lazer kelimesi (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) inglizce "Uyarılmış ışıma ile kuvvetlendirilmiş ışık" kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuştur.

Lazerler uyarılmış ışıma ilkesine göre çalışır. Bu ilke Kendiliğinden Işıma, Soğurma (yutma) ve Uyarılmış Işıma olmak üzere üç temel esasa dayanmaktadır.

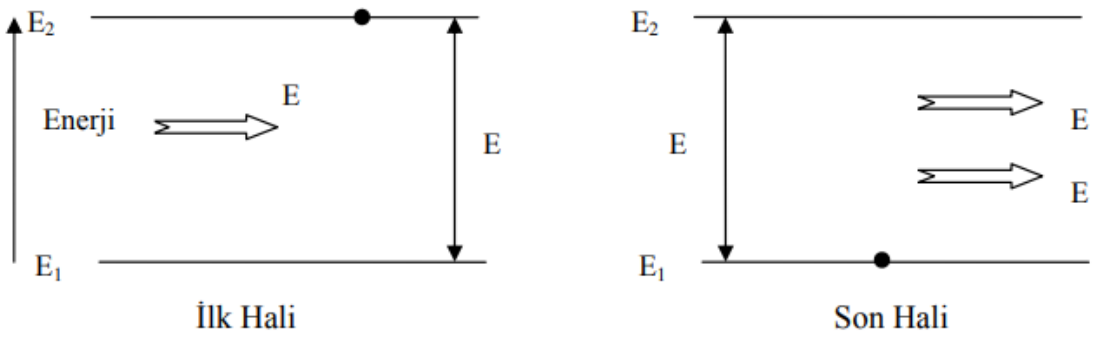
- E_1=Düşük seviyeli atomun enerjisi
- E_2 = Yüksek seviyeli atomun enerjisi
- E = Foton enerjisi
- $E=E_2 - E_1$

Kendiliğinden ışıma: Yüksek seviyede olan atomun kendiliğinden foton yaymasını sonucu bulunduğu yüksek seviyeden daha düşük seviyeli atom haline geçmesidir. Soğurma: Düşük seviyedeki atomun foton soğurmasını ile yüksek seviyeli atomun enerji haline geçmesidir.



Şekil 2. 1. Kendiliğinden ışıma ve soğurma

Uyarılmış ışıma: Atomun foton zorlanmasının sonucu bulunduğu yüksek seviyeden düşük seviyeli atom seviyesine inmesi olayıdır. Olaydaki foton enerjisi (E) düşük seviyeli atomun enerjisi (E1) ve yüksek seviyeli atomun enerjisi (E2) farkına eşittir. Bunun sonucu olarak atomdan iki foton uzaklaşır. İki fotonun hareketi eşzamanlı olması ışık güçlenmesine neden olur (Mungan 2006).

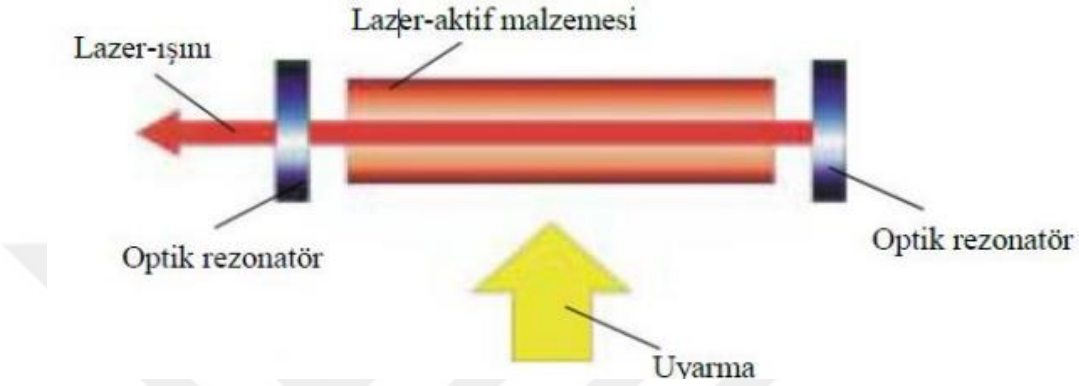


Şekil 2. 2. Uyarılmış ışıma

2.1.2. Lazer Işının Üretilmesi

Rezonans hücresi; Lazer sistemin temel elemanıdır. Hücrenin bir kısmında tamamen yansıtan ve diğer kısmında kısmen yansıtan iki ayna vardır ve içerisi katı veya sıvı bir madde ile doldurulur. Ortamdaki enerji aktif ortamın uyarlaması nedeniyle atomlara ulaşır. Atomlar enerji alarak bulundukları enerji seviyesinden daha yüksek enerji

seviyesine ulaşmaları sonucu karasız hale gelirler ve fazla enerjiyi fotonlar şeklinde yayarak tekrar düşük enerji seviyeye yani kararlı hale gelirler. Yayılan fotonlar tam yansıtan ayna tarafından yansıtarak diğer fotonların yayılmasına neden olurlar. Foton sayısı belli bir seviyeye geldiğinde kısmi yansıtmalı aynadan dik olarak gelen fotonlar bu aynadan geçerek lazer ışınını oluşur (Cebeci 2021).



Şekil 2.3. Lazer ışığın üretilmesi (Cebeci 2021).

2.1.3. Lazer Işığının Özellikleri

1 .Tek renkli olması

2 .Uyumluluk

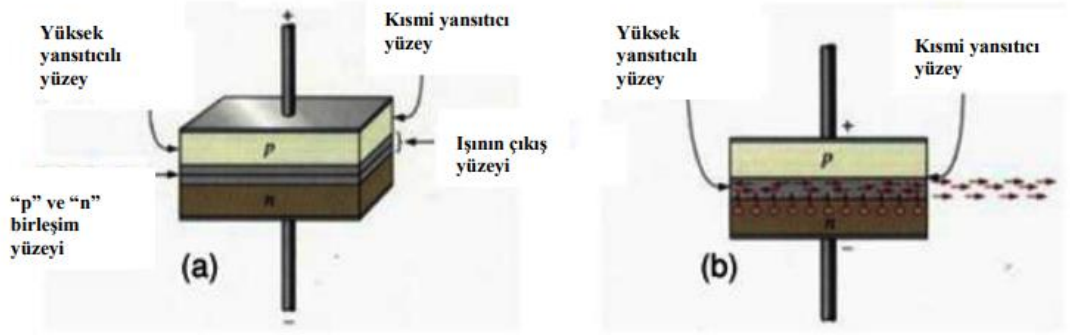
3 .Yüksek Yoğunluk

4. Paralellik (Yönlendirilebilir olması)

2.2. Lazer Çeşitleri

2.2.1.Yarı iletken lazerler

Yarı iletken malzemelerden yapılmış olup farklı türden yarın iletken malzemeleri yan yana düz bir şekilde dizildikten sonra yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirilir. Düzenekten akımın geçmesini neticesinde eklem bölgesinde Lazer ışığı oluşur. Yüksek verimliliği ve düşük güç tüketiminden dolayı düşük maliyeti nedeniyle telefon, televizyon gibi birçok alanda tercih edilmektedir (Erdoğan 2007, Eksilmez 2021).



Şekil 2.4. Yarı iletken lazer sistemi (Arcan 2011).

2.2.2. Katı lazerler

Bu tür lazerler katı malzemelerde çalışır, Ti (titanyum), Cr (krom) veya Nd (Neodim) ve Yb (İterbiyum) gibi nadir elementlerin iyonları iletim elemanı olarak kullanılır. Bu malzemeler, genellikle bir aktif ortama sahiptir ve lazer ışığı üretmek için Optik pompalama işlemi uygulanır. Katı hal lazerler, yüksek güç üretilmesi, uzun ömürleri ve kararlılıkları nedeniyle birçok uygulamada kullanılır. Nd:YAG (neodimyum-yag) lazerleri, tıbbi cerrahi, endüstriyel kesme ve kaynaklama gibi birçok alanlarda yaygın olarak kullanılan bir katı lazer türüdür (Eksilmez 2021, Higgins 1995).

2.2.3. Gaz lazerler

Gaz lazerleri, lazer ortamı olarak gazı kullanır. Gaz lazerleri, uyarılmış emisyona dayalı olarak çalışır: gazdaki atomlar veya moleküller, daha yüksek bir enerji düzeyine uyarılır ve harici bir enerji kaynağı tarafından uyarıldığında fotonlar yayar. Gaz lazerlerde kullanılan gazlar, genellikle helyum, neon, argon, karbondioksit (CO_2) ve azot gibi elementlerdir. Gaz lazerler, Verimlilikleri ve yüksek güçlü lazer ışınları üretme yetenekleri nedeniyle bilimsel, endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar (Gerges 2023, Higgins 1995).



Şekil 2.5. Gaz lazer sistemi yapısı (Arcan 2011).

2.2.4. Sıvı lazerler

Bu tür lazerler, aktif bir sıvı ortamda optik bir kazanç sağlayarak lazer ışığının üretilmesini sağlar. Sıvı lazerler, genellikle düşük enerji gereksinimine sahip olup, lazer ışığının geniş bir spektrumda ayarlanabilmesi avantajına sahiptir (Higgins 1995).

2.2.5. Fiber lazerler

Bu lazerler, lazer enerjisini optik fiber içinde yönlendirerek ve yoğunlaştırarak çalışır. Bir aktif fiber ortamına pompalama enerjisi uygulayarak lazer ışığının üretilmesidir. Genellikle nadir elementleri (erbiyum, iytriyum ve holmiyum) ile güçlendirilmiş fiber, aktif ortam olarak kullanılır. Bu aktif fiber, pompalama enerjisi ile uyarılır ve içerisindeki atomların enerji seviyeleri arasındaki geçişler sonucunda lazer ışığı üretilir. Fiber lazerde sistemleri lazer kaynağına göre tek emitörlü, modüler ve yüksek güçlü fiber lazerler olarak sınıflandırılır. Optik fiberlerle ise tek kaplamalı (single-clad) ve çift kaplamalı (double-clad) fiberler olarak ikiye ayırılır (Taccheo 2013, Giuseppe 2014, Hashemzadeh 2014).

Fiber lazerin avantajları:

-Yüksek ışın kalitesi
- Çıkış gücü yüksektir
- Düşük maliyetli
- Işın iletiminde esnekliği
- Çoklu çıkış potansiyeli

- Işın şekillendirme potansiyeli
- Çok amaçlı makine potansiyeli

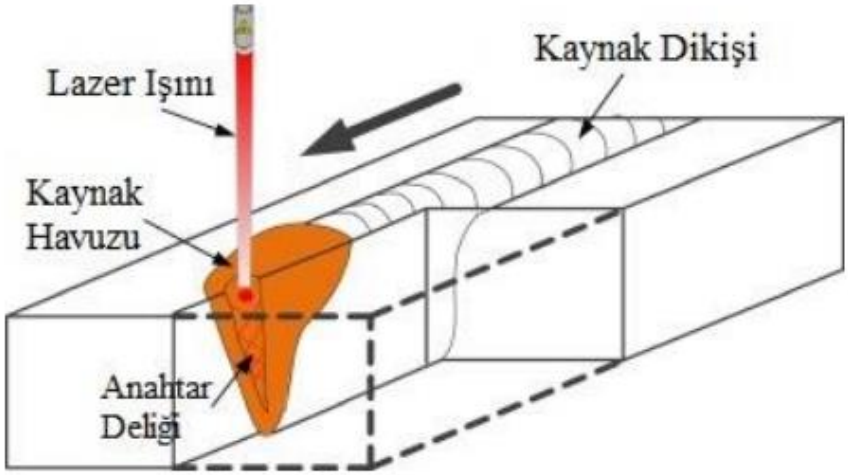
2.2.6. Bazı lazer türlerin karşılaştırılması

Çizelge 2.1. Lazer türlerin karşılaştırması (Verhaeghe ve ark 2005).

Lazer Özellikleri	Gaz lazer (Karbonoksit lazeri)	Katı hal lazer (Nd:YAG)	Fiber lazer (Yb-Fiber)
Lazer ortamı	Gaz Karşımı	kristal çubuk	katkılı fiber
Dalga boyu (nm)	10,600	1060	1070
Çıkış gücü[a] (KW)	15 KW'a Kadar	6 KW'a Kadar	20 KW'a Kadar
Tipik Işın kalitesi[b] (mm.mrad)	3,7	12	20
	3,7	<12	1,8
Güç verimliliği (%)	5-8	10-20	20-30
KW başında yaklaşık maliyeti (Bin dolar $)	60	150-180	130-150
Lazer mobilitesi	Düşük	Düşük	Yüksek
a-ticari olarak geçerli b-üst kısım maksimum diğerler, alt kısım 1 KW için optimum değerler			

2.3. Lazerle Kaynak İşlemi

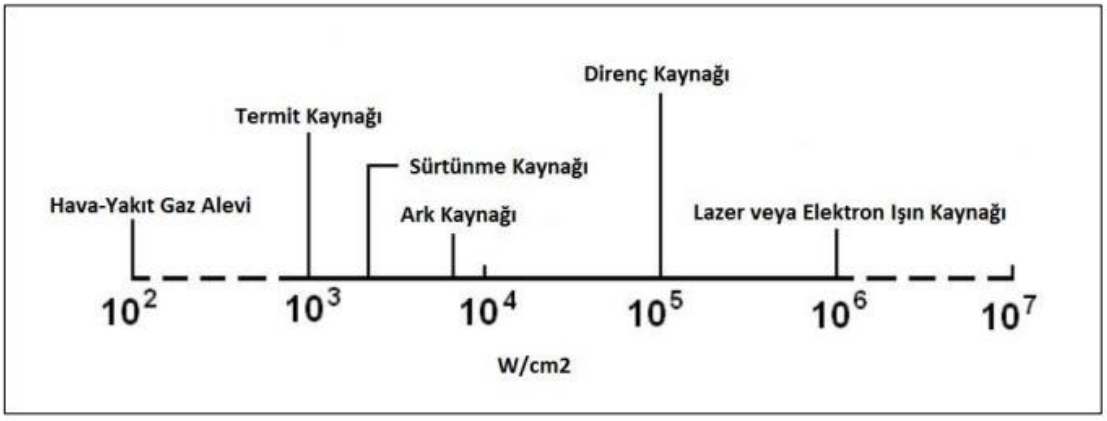
Son yıllarda, birçok endüstride verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla lazer kaynağının kullanımı büyük bir gelişme göstermiştir. Lazer kaynağı, yüksek güç yoğunluğuna sahip bir lazer ışını (10^6–10^8 W/cm²) iş parçası yüzeyine yönlendirilerek ve malzemeyi eriterek veya buharlaştırarak kaynak işlemi gerçekleştirir. Bu süreçte, lazer ışını malzeme yüzeyine odaklanarak yoğun ısı oluşturur ve malzeme erir veya buharlaşır. Bu şekilde iş parçaları birleştirilebilir veya malzeme üzerinde değişiklikler yapılabilir. Yöntem şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Lazer kaynak yöntemi şematik gösterimi (Ai ve ark. 2017)

Lazer kaynağı, endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir ve birçok avantajlı özelliği bulunmaktadır. Bunlar arasında yüksek kaynak hızları, yüksek ışın kalitesi, yüksek güç seviyesi, yüksek hassasiyet, boşluksuz kaynak üretebilme kabiliyeti, yüksek verimlilik ve yüksek performans gibi özellikler yer almaktadır (Chen ve ark. 2011). Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek ışın kalitesi yüksek kaynak nüfuziyeti sağlamaktadır (Farrokhi ve ark. 2015). Lazer kaynağı, geniş bir endüstri alanında yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Otomotiv, havacılık, savunma, tıp, elektronik, elektrik üretimi ve şebekeleri, kimya endüstrisi, nükleer enerji, petrol ve gaz endüstrileri gibi birçok sektörde önemli bir rol oynamaktadır. (Iordachescu ve ark. 2011). Otomotiv endüstrisinde Lazer kaynağı, yüksek güç yoğunluğu, derin nüfuziyet ve dar kaynak dikişi özellikleri sayesinde

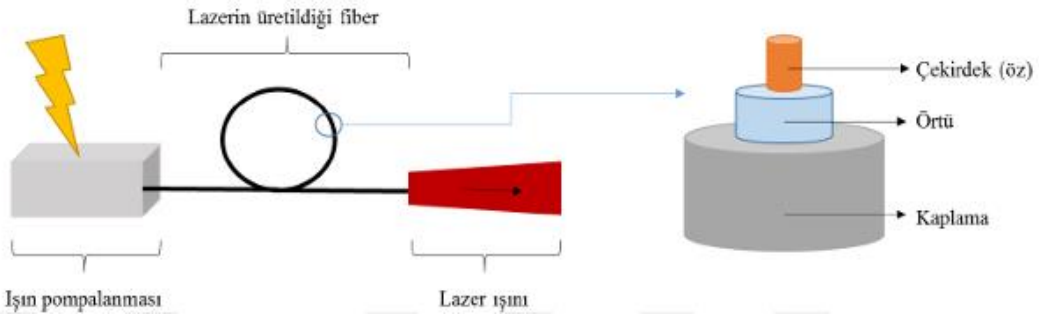
otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Lazer kaynağının güç yoğunluğunun diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Diğer kaynak yöntemlerinin güç yoğunluğu ile karşılaştırıldığında lazer kaynağının yoğunluğu (Koleva ve ark. 2011).

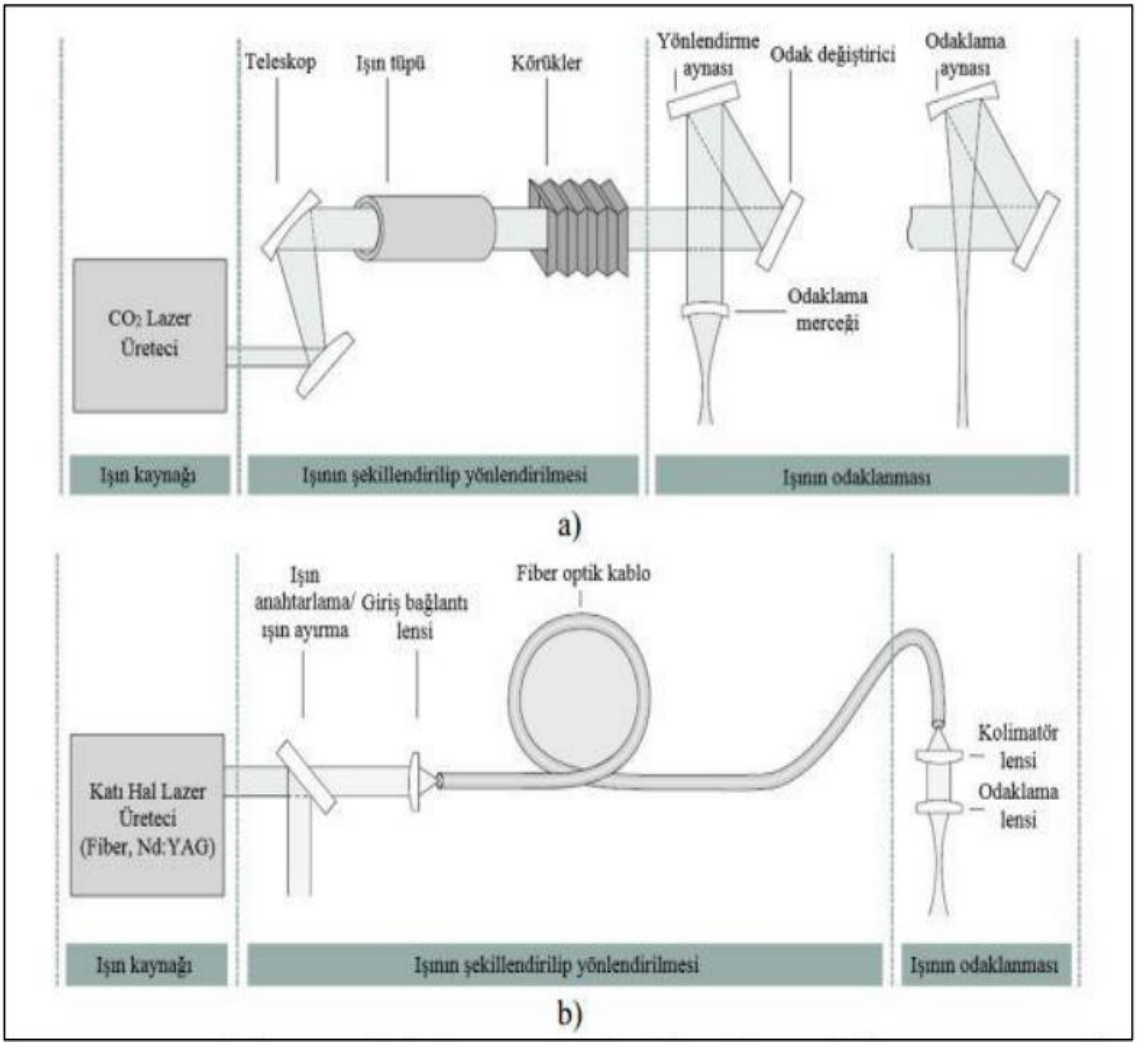
Yüksek güç yoğunluğu sayesinde yüksek kaynak hızlarına ulaşılabilir. Lazer kaynağında, yüksek güç yoğunluğunun ve hızlı kaynak hızının bir araya gelmesi, düşük ısı girdisi sağlayarak ergime bölgesi (EB) ve Isı Tesiri Altındaki Bölge'de (ITAB) oluşabilecek metalürjik heterojenlikleri en aza indirir. Düşük ısı girişi, kaynaklı parçalardaki termal deformasyonları azaltır ve kaynak sonrası işlem gereksinimlerini minimuma indirir (Nayak ve ark. 2015, Yüce ve ark. 2016).

Fiber lazer kaynağı: Son yıllarda, endüstriyel uygulamalarda mükemmel ışın kalitesi ve yüksek parlaklığa sahip olan yeni nesil yüksek güçlü fiber lazerler giderek artan bir ilgi görmektedir. Piyasada bulunan yüksek güçlü fiber lazerler, 1,07 mikronluk dalga boyunda ışın yayan iterbiyum katkılı çok katmanlı fiber bobinlerden yapılmaktadır. (Quintino ve ark. 2007, H. Chen ve ark. 2011).



Şekil 2.8. Fiber lazerin çalışma prensibi (Atmaca 2021)

Fiber lazerlerin, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok avantajı bulunmaktadır. Daha yüksek verimliliğe sahip olmaları, lamba veya diyot pompalı çubuk lazerlere göre daha az enerji tüketmelerini sağlar. Ayrıca, kompakt tasarımları sayesinde kurulumları daha kolaydır. İnce fiberlerin kullanılması, iyi ışın kalitesi ve küçük odak çapı sağlar, bu da hassas işlemler için idealdir. Pompa diyotlarının daha uzun ömre sahip olması, diyot pompalı lazerlerin aksine, yatırım maliyetlerinin daha uygun seviyelerde olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, sac metal malzemelerin birleştirilmesinde yüksek kaynak hızı kullanılabilir. Bu da yüksek güçteki fiber lazerlerin, yüksek güçteki CO2 lazerlere kıyasla daha verimli olmalarını sağlamaktadır (Parkes ve ark. 2013, Singla 2017, Xu ve ark. 2013).



Şekil 2.9. Farklı lazer türlerinde ışının yönlendirilmesinin şematik gösterimi a) CO2 lazeri, b) Katı hal lazer üreteci (Fiber, Nd:YAG) (Yüce 2018).

Fiber lazer kaynak yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Penetrasyon derinliği yüksektir ve ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) genişliği konvansiyonel yöntemlere göre daha dardır, bu da daha dar kaynaklar yapılabilmesini sağlar.
- ITAB genişliğinin dar olması nedeniyle malzeme yapısının değişmesi kaynaklı ITAB hasar olasılığı konvansiyonel yöntemlere göre daha düşüktür.
- Yüksek malzeme işleme hızları sağlanabilir.
- Mükemmel ışın kalitesi sayesinde yüksek kalitede malzeme işleme gerçekleştirilebilir.

- Küçük boyutlu, kompakt, sağlam ve taşınabilir olmaları, mobil işleme kabiliyeti sağlar.
- Rahat ve basit kullanım özelliğine sahiptirler.
- Uzun işletme ömürleri vardır ve ilave tesisat gerektirmeden sanayi elektriği ile çalışabilirler.
- Çeşitli üretim endüstrilerinde ve tamir işlerinde kullanılabilirler.
- Yüksek güç, düşük ışın sapması, esnek ışın iletimi, fiber-optik kablo sayesinde basit ışın iletimi, temiz kaynak yüzeyi, konsantre ısı kaynağı ve yüksek verimlilik gibi ek avantajları vardır (Ovalı ve ark. 2014, Atmaca 2021).

Fiber lazer kaynak yönteminin dezavantajları ise şunlardır:

- Kaynak alanının geometrisi nedeniyle dolgu malzemesinin kaynak havuzuna sokulma güçlüğü vardır.
- Lazer ışın demetinin darlığı nedeniyle alın birleştirme kaynaklarında birleştirme yerlerinin tamamen düz olması gerekmektedir.
- Yatırım maliyetleri yüksektir (Atmaca 2021).

2.4. Lazer Kaynak İşlem Parametreleri

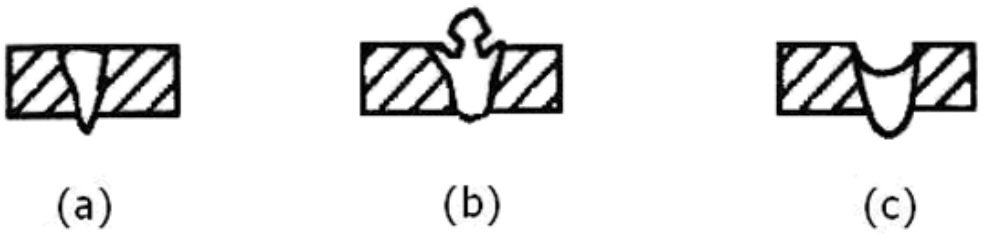
Lazer kaynak işleminde, lazer gücü, ilerleme hızı, lazer modu (darbeli veya sürekli), odak mesafesi, koruyucu gaz türü ve debisi gibi doğrudan işlem kalitesini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, kaynak geometrisi, ısıdan etkilenen bölgelerdeki mikroyapı, kaynak kusurlarının oluşumu gibi kaynak kalitesini belirlemektedir. İstenilen kaynak kalitesine ulaşabilmek ve kaynak hatalarını önleyebilmek için uygun işlem parametrelerinin kullanılması gerekmektedir (Yüce 2018, Hui-Chi Chen 2010).

2.4.1. Lazer Gücü ve Kaynak İlerleme Hızı

Endüstride lazer kaynak işleminde 10 KW'a kadar güç kaynakları kullanılmaktadır. Lazer gücü, ışının malzeme içerisindeki penetrasyonunu ve kaynak yöntemini (iletim veya nüfuziyet) doğrudan etkilemektedir. Optimum nüfuziyetin sağlanması için lazer gücü ile birlikte kaynak hızı parametresi de optimize edilmelidir. Diğer işlem parametreleri sabit tutulduğunda, artan lazer gücü ile penetrasyon miktarı ve kaynak dikişinin derinlik/genişlik oranı artmaktadır. Ancak ilerleme hızı arttıkça bu etki azalmaktadır. Sabit parametreler altında artan ilerleme hızı, kaynak dikişinin penetrasyonunu azaltmaktadır. Lazer gücü ile kaynak hızı optimize edilmediği durumlarda yetersiz penetrasyon oluşmaktadır. Kaynak hızı V, lazer gücü P ile birlikte Isı girdisi Q belirlenmektedir.

$$Q\ [\,\mathrm{kJ/mm}] = \frac{P\ [\mathrm{KW}]}{V\ [\mathrm{mm/s}]}$$

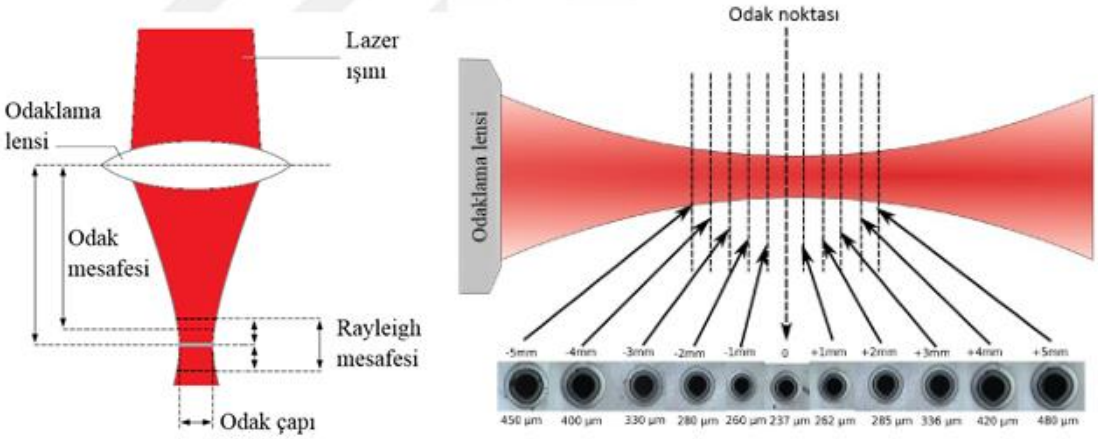
İşlem parametreleri sabit tutulduğunda, artan lazer gücü ve azalan ilerleme hızı ile kaynak işleminde uygulanan ısı girdisinin seviyesi artar. Bu durumun tersine, artan ilerleme hızı ve azalan lazer gücü ile ısı girdisi seviyesi azalır. Lazer gücü ve ilerleme hızı, kaynak derinliği ve genişliği gibi kaynak geometrisini etkiler. Azalan ilerleme hızı, kaynak bölgesindeki eriyik havuzunun daha geniş ve büyük hale gelmesine neden olabilmektedir. Buna karşılık, daha yüksek bir kaynak hızı, eriyik havuzunun merkezinde güçlü bir akış oluşturarak anahtar deliğinde yeniden dağılımı sınırlamaktadır. (Fahlström 2015, Yüce 2018, Schubert 2001).



Şekil 2.10. Kaynak hızının kaynak geometrisine etkisi: (a) Uygun kaynak hızı, (b) Hızlı kaynak hızı, (c) Düşük kaynak hızı (Steen 2003)

2.4.2. Odak mesafesi

Lazer kaynak sürecinde lazer ışınının yoğunluğunu ve spotun çapını belirleyen odak mesafesi önemli bir parametredir. Lazer kaynağında lazer ışını, optik mercekler yardımıyla kaynak yapılacak bölgeye odaklanır. Kaynak işlemi, son odaklama merceğinin odak noktasında gerçekleştirilir. Kullanılan lazer ışınının çapı ve optik merceklerin boyutlarına bağlı olarak odaklanmış ışının çapı belirlenir. Odak mesafesi değiştikçe lazer spotunun boyutları da değişir.

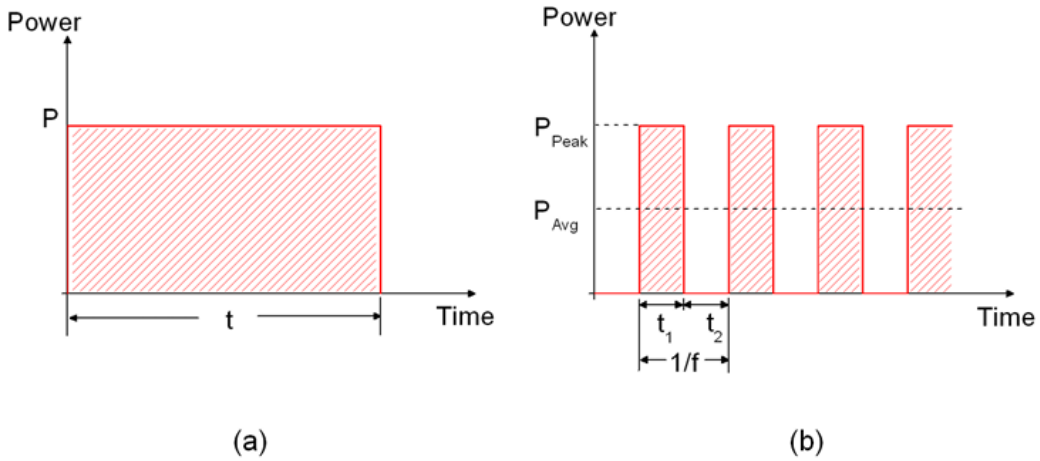


Şekil 2.11. Gaussyen ışın odak mesafesi ve ışın çapları (Prakash ve Kumar 2017)

Odak noktasının yanlış seçilmesi durumunda, lazer ışını malzemenin buharlaşmasına neden olabilir. Bu buharlaşma sürecinde ortaya çıkan buhar, plazma oluşturarak istenen lazer gücünün malzemeye ulaşmasını engeller (Yüce 2018).

2.4.3. Lazer dalga Modu

Lazer dalga modu (güç iletim yöntemi), sürekli dalga (CW) modu ve darbe dalga (PW) modu olarak iki farklı moda ayrılmaktadır. Şekil 2.12(a) ve Şekil 2.12(b) bu modları göstermektedir. Bu iki iletim yöntemi arasında farklı sonuçlar elde edilebilir. Sürekli dalga (CW) lazer kaynağı işleminde, belirli bir kaynak malzemesi kalınlığı için kaynak hızı arttıkça lazer gücü de artırılmalıdır. Özellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir lazer sistemi için yüksek bir lazer gücüyle çalışarak yüksek bir kaynak hızı elde edilebilmektedir.



Şekil 2.12. Lazer dalga modları: (a) sürekli dalga modu; (b) darbe dalga modu (Hui-Chi Chen 2010).

PW (pulsed wave) lazer kaynağı, kaynak sürecinde aralıklı lazer ışını güçleri uygulayarak eritme ve katılaşma süreçlerini aynı anda gerçekleştirmektedir. Bu yöntem, ısıtma ve soğutma hızlarını hassas bir şekilde kontrol etme avantajı sağlar. Bu özellikleri sayesinde, PW lazer kaynağı, özellikle ısıya duyarlı malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem düşük kaynak hızı gerektirmektedir. (Quintino 2007, Berretta 2007, Torkamany 2006).

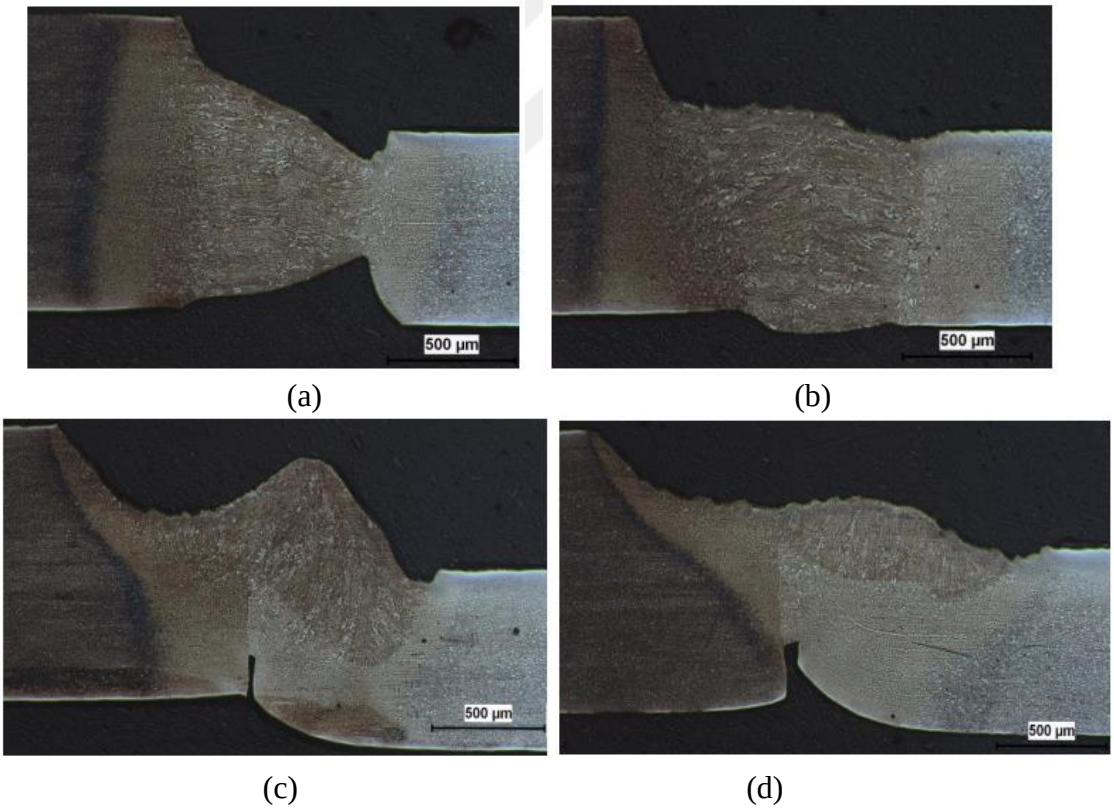
2.4.4. Koruyucu Gaz Türü ve Debisi

Koruyucu gaz türü ve debisi, lazer kaynağında kaynak kalitesini etkileyen önemli faktörlerdir. Kaynak işleminde, koruyucu gazın kullanım amacı; kaynağın oksidasyonunu önlemek, kaynak esnasında oluşan plazmayı uzaklaştırmak, lazer ışınının yansımasını azaltmak ve optik merceği sıçramalardan korumaktır. Günümüzde, helyum ve argon

gazları, metalurjik olarak nötr davranışlarından dolayı lazer kaynağında yaygın olarak tercih edilmektedir (Yüce 2018, Steen 2003).

2.5. Literatür Araştırmaları

Yüce (2020) çalışmasında DP1180 çeliği ve DP600 çeliği üzerinde dairesel salınımlı lazer kaynağının farklı osilasyon genliklerinin etkileri incelenmiştir. Proses parametreleri olarak lazer gücü 2 KW, ilerleme hızı 70 mm/s, osilasyon frekansı 290 Hz ve dört farklı osilasyon genliği (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm) kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, daha düşük salınım genlikleriyle kaynak genişliğinin arttığı ancak penetrasyon derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Daha yüksek salınım genliklerinin ise düzgün hazırlanmamış yüzeylerin birleştirilmesinde avantajlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, kaynaklanmış levhaların çekme dayanımlarının tüm genlik seviyelerinde yüksek mukavemetli çelik (AHSS) baz metalinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. (Yüce 2020).



Şekil 2.13. Yüce (2020) çalışmasında Kaynaklı numunelerin farklı osilasyon genliklerinde mikroyapı görüntüleri a) 0,5 mm, b) 1 mm, c) 1,5 mm ve d) 2 mm.

Zeng ve ark. (2024) çalışmalarında, Salınımlı Lazer Işın Kaynağı (OLBW) yöntemi ile 430 ve 5Cr15MoV paslanmaz çeliklerinin birleştirilmesi sırasında osilasyon genliğinin kaynak morfolojisi, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, artan salınım genliğinin kaynak morfolojisini daha düzgün ve homojen hale getirdiğini, yüzeyde belirgin kusurlar oluşmadığını göstermiştir. Ayrıca, kaynak metalinin genişliği salınım genliğiyle birlikte artış göstermiştir. Mikro yapı analizlerinde, ışın salınımının kaynak merkezindeki eş eksenli tane oranını artırdığı tespit edilmiştir. Mekanik testler sonucunda, en yüksek mikro sertlik değeri 1,5 mm salınım genliğinde elde edilirken, kaynaklı numunelerin çekme mukavemeti 477 MPa olarak ölçülmüş ve 430 paslanmaz çeliğin ana malzeme dayanımıyla karşılaştırılabilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Yang ve ark. (2023) çalışmalarında, QP980 çeliğinin alın kaynakları, 0,1 mm lazer nokta çapına sahip salınımlı lazer kaynağı yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Araştırmada, lazer ışınının dairesel yörüngede salınımının kaynak morfolojisi, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Salınım genliğinin artışıyla birlikte enerji birikim alanının genişlediği ve enerji tepe değerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, kaynak enine kesitinin çivi benzeri bir yapıdan sırasıyla fincan-konik ve W tipi bir şekle dönüşmesine neden olmuştur. Kaynak bölgesi; ergime bölgesi, iç ısıdan etkilenmiş bölge ve dış yumuşama bölgesi olarak üç ana bölgeye ayrılmıştır. Ergime bölgesi ve iç ısıdan etkilenmiş bölge, tipik lat martenzit yapısıyla karakterize edilmiş ve en yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. Yumuşama bölgesi ise martenzit, temperlenmiş martenzit, ferrit ve tutulmuş östenit fazlarından oluşarak en düşük sertliği göstermiştir. Lazer kaynağına kıyasla, ışın salınımı önceden oluşmuş blok martenzitin parçalanmasını teşvik ederek yumuşama bölgesinin genişliğini azaltmış ve sertliğini artırmıştır. Salınım genliği arttıkça ergime ve yumuşama bölgesinin genişliği artmasına rağmen, tüm kaynaklı numuneler %97 bağlantı verimliliği göstererek ana malzemede kırılma meydana getirmiştir.

Jia ve ark (2016) 1,2 mm kalınlığındaki DP600 ve DP980 çelik sacların fiber lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde odaklanmış ve odaklanmamış ışın etkisi incelenmiştir. Proses parametreleri olarak ilerleme hızı: 4 m/dk, lazer gücü: 4 KW ve odak mesafesi: 0 mm (odaklanmış ışın) ve 10 mm (odaklanmamış ışın) kullanılmıştır.

Çalışmanın sonucunda odaklanmamış lazerle yapılan işlemlerin, ısıl etki bölgesinin (ITAB) sertliğini azalttığı, ancak kaynak bölgesinin sertliğini etkilemediği belirlenmiştir. Odaklanmamış lazerle yapılan işlemlerin, hafifçe artan akma mukavemeti dışında, odaklanmış lazerle yapılan işlemlerle benzer çekme davranışı sergilediği belirlenmiştir. Bütün birleşimler, ana metallere kıyasla daha yüksek akma mukavemeti ve daha düşük süneklik göstermiştir. Kaynak bölgesi, birleşim boyunca en yüksek sertliği (456Hv) göstermiştir. DP980 tarafı ciddi ITAB yumuşaması yaşamış (282Hv), DP600 tarafında ise çok küçük bir sertlik düşüşü (5Hv) görülmüştür (Jia ve ark 2016).

Wang ve ark. (2016) çalışmalarında 1,5 mm kalınlığındaki DP1000 kalite çelik plakaları alın birleştirme olacak şekilde 2 KW lazer gücüne sahip Nd:YAG yöntemini kullanarak kaynaklamışlardır. Bu işlem sırasında farklı kaynak hızları ve 1 mm odak mesafesi uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, ana malzemenin mikro yapısının ferrit ve martenzit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir, ayrıca maksimum çekme dayanımının yaklaşık 1034 MPa olduğu belirlenmiştir (Wang ve ark. 2016).

Çavuşoğlu ve diğerleri (2023) çalışmalarında fiber lazer kaynak parametrelerinin 1,4 mm kalınlığındaki TWIP980 çelik levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapısal açıdan etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, lazer gücü sabit 4 KW iken farklı ilerleme hızları (100, 125, 130 ve 1500 mm/s) ve odak mesafeleri (-1, 0 ve +1 mm) kullanılarak lazerle kaynak yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, kaynak hızı arttıkça gerilme ve kaynak genişliği azalmıştır. En yüksek gerilme ve kaynak genişliği, 100 mm/s kaynak hızında elde edilmiştir. +1 mm odak mesafesinde, diğer odak mesafelerine kıyasla daha iyi bir kaynak dikişi gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu odak mesafesinde daha yüksek gerilme ve uzama değerleri elde edilmiştir. En iyi enerji absorpsiyonu, lazer gücü 4 KW, kaynak hızı 130 mm/s ve odak mesafesi +1 mm kombinasyonunda elde edilmiştir (Çavuşoğlu ve diğerleri 2023).

Razmpoosh ve ark. (2020) çalışmalarında, presle sertleştirilmiş 22MnB5 çeliğinin, TRIP1100 ve MMn-TRIP çelikleriyle fiber lazer kaynak kullanılarak birleştirilmesinin dinamik çekme özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Bu süreçte lazer gücü 4 KW, ilerleme hızı 8 m/dk ve odak mesafesi 200 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada koruyucu gaz kullanılmamıştır. Sonuçlarda, MMn-TRIP-PHS bağlantılarında Erime Bölgesinde

(EB) sınırlı bir karışım gözlemlenmiştir; bu durum, MMn-TRIP tarafındaki interdendritik bölgelerde Mn ayrışmasına yol açmıştır. MMn-TRIP tarafına yakın EB yapısı belirgin bir şekilde korunmuş austenit içermektedir. Ancak, TRIP1100-PHS bağlantısının EB'inde tamamen martenzitik bir yapı tespit edilmiştir. 22MnB5 ve TRIP1100 taraflarının ısıl etkilenmiş bölgelerinde (ITAB) belirgin bir ITAB yumuşaması ölçülmüştür; bu durum, malzemelerin başlangıç martenzitinin lokal olarak tavlanmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, MMn-TRIP HAZ'de yumuşama gözlemlenmemiştir (Razmpoosh ve ark. 2020).

Yüce ve ark. (2016) çalışmalarında, Taguchi metodunu kullanarak 1,5 mm kalınlığındaki fiber lazer kaynaklı yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) ve martenzitik (MART) çeliklerin kaynak parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Lazer gücü, kaynak hızı ve odak pozisyonunun ek yerlerinin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak, kaynak dikişlerinin çekme yükünü (TL) maksimize etmek ve ısı girdisini (HI) minimize etmek amacıyla optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada, kaynak ilerleme hızı en etkili işlem parametresi olarak bulunmuş ve lazer gücü ile etkileşiminin kaynak dikişlerinin HI ve TL üzerindeki etkisi izlenmiştir. Yüksek hız veya düşük lazer gücü nedeniyle HI yeterli olmadığında, kaynak dikişinin geometrisinin uygun şekilde oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, aşırı HI uygulandığında, ITAB genişlemiş ve bu da TL'nin azalmasına neden olmuştur. HSLA tarafının sertliği, ITAB'dan EB'ye kadar keskin bir artış gösterirken, MART tarafında ITAB'da bir yumuşama bölgesi gözlemlenmiştir. Optimum lazer kaynak işlem parametre kombinasyonu, 45 mm/s kaynak hızı, 1750 W lazer gücü ve -0,4 mm odak pozisyonu olarak belirlenmiştir (Yüce ve ark. 2016).

Zhao ve ark. (2013) çalışmasında, 0,8 mm kalınlığındaki DP600, DP800, DP1000 ve M1500 çelikleri fiber lazer ile kaynaklanmış ve kaynak hızının kaynak dikişi geometrisi, mikroyapı, mikroyerleşme ve çekme özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, sabit lazer gücü olarak 1500 W kullanılmış ve 15 ila 40 mm/s arasında değişen ilerleme hızları uygulanmıştır. Sonuçlarda, dört çelik türü de benzer kaynaklanabilirlik göstermiştir. Tam geçiş, yaklaşık 30 mm/s kaynak hızında sağlanmış, ancak kabul edilebilir bir kaynak genişliği için kritik kaynak hızı 25 mm/s olarak belirlenmiştir. Erime

Bölgesi sertliğinin karbon eşdeğeri (CE) ile doğrusal bir ilişki gösterdiği gözlemlenmiştir; karbon içeriği ile Erime Bölgesi sertliği arasında ise daha düşük bir doğrusal uyum bulunmuştur. Maksimum ITAB yumuşamasının çelik sınıflarıyla arttığı belirlenmiş, bu durumun daha güçlü çeliklerin yüksek martenzit içeriğinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Temperleme süresinin kaynak hızının ters karekökü ile orantılı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, kaynak hızındaki azalma, daha uzun bir temperleme süresi ve daha yüksek ITAB yumuşamasına yol açmıştır (Zhao ve ark. 2013)

Grünenwald ve ark. (2018) çalışmalarında, 8 mm kalınlığındaki S235J2C çeliği ile 12 mm ve 15 mm kalınlığındaki S355MC çelikleri kullanılarak 10 KW gücündeki fiber lazer ışını ile bead-on-plate kaynakları üretilmiştir. Çalışmada, osilasyon frekansının kaynak kesitinin şekli üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Osilasyon frekansı 100 Hz ile 1000 Hz arasında değiştirilmiş ve kaynak hızı, lazer gücü ve odak noktası pozisyonu da çeşitli şekillerde ayarlanmıştır. Çalışmanın sonucunda, 200 Hz aralığında düşük osilasyon frekanslarında yüksek genliklerin, düşük kaynak hızları veya 10 KW'a kadar yüksek lazer güçleri ile kombinasyonunun, kaynak dikişinin geometrisi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Grünenwald ve ark. 2018).

Hao ve arkadaşları (2015) çalışmalarında, 3 mm kalınlığındaki AISI304 paslanmaz çeliğin fiber lazer kaynağında ışın osilasyon parametrelerinin kaynak morfolojileri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Proses parametreleri olarak lazer gücü 2 KW, koruyucu gaz olarak argon debisi 18 L/dk, osilasyon genlikleri 0,5, 1, 1,5 ve 2,5 mm, osilasyon frekansları ise 10, 20, 50, 100, 200, 500 ve 1000 Hz olarak belirlenmiştir. Çalışmada, osilasyon frekansının artmasıyla kaynak kesitinde üstten alta doğru genişlik farkının giderek azaldığı ve sonunda kaybolduğu gözlemlenmiştir. Osilasyon frekansı 10 Hz civarındayken, kaynak kesiti ince bir çivi formunda, geleneksel lazer anahtar deliği kaynağına benzer bir yapı sergilemiştir. Frekansın 20 Hz ile 1000 Hz arasında artmasıyla kaynak kesiti sırasıyla kısa çivi, V-şekli ve U-şekline dönüşmüştür. Kaynak modu, kaynak hızına bağlı olarak üç farklı moda ayrılmıştır: 24 m/dk hızın altında anahtar deliği modu, 24 m/dk ile 48 m/dk arasında kararsız mod ve 48 m/dk üzerinde ısı iletim modu. 24 m/dk hızın altında, kaynak nüfuziyet derinliği kaynak hızına ters orantılı olarak keskin bir şekilde azalırken, 24 m/dk ile 48 m/dk arasında daha yavaş bir azalma görülmüştür. (Hao ve ark. 2015).

Kuryntsev ve ark. (2015) çalışmalarında, 10 mm kalınlığındaki 1449-27/23CR çeliği, 9MnSi5 çeliği ve 321S12 paslanmaz çeliğinde fiber lazer kaynağı ile yapılan ikinci salınımlı kaynak pasosunun yapısal çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada ilk kaynak pasosu, salınımsız ışın modunda 15-36 mm/s ilerleme hızı ve 8-12,5 KW lazer gücü ile gerçekleştirilmiştir. İkinci paso ise, salınımlı ışın modunda 8-10 mm/s ilerleme hızı ve 3-4 KW lazer gücü ile yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, salınımlı lazer modunda uygulanan ikinci kaynak pasosunun, tavlama etkisi ile dikişin üst ve orta kısımlarında mikrosertliği azalttığı gözlemlenmiştir. Kaynak metalinin daha iri bir yapıya sahip olması nedeniyle, deney numunelerine ait kaynak metalinin tokluğu ana metalin yaklaşık %50'si kadar bulunmuştur. Kaynak bölgesinin sünekliği ana metale yakın olsa da dikişin üst yüzeyinin kök kaynağının yüzeyine göre daha sünek olduğu tespit edilmiştir (Kuryntsev ve ark. 2015).

Bandyopadhyay ve ark (2016) çalışmalarında 1,2 mm kalınlığındaki DP980, DP600 ve IFHS çeliklerini, farklı kaynak hızları kullanarak Yb-fiber lazer yöntemiyle kaynaklamıştır. DP980 lazer kaynaklı sacların kaynak bölgesi mikrosertliği, mikroyapısı ve şekillendirilebilirliği, DP600 ve mikro-alaşımlı geçişsiz yüksek mukavemetli çelik lazer kaynaklı saclarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, ITAB dış kısmında oluşan yumuşak bölgenin, DP980 lazer kaynaklı saclarının şekillendirilebilirliğinde önemli bir azalmaya neden olduğu; bu durumun gerilim yığılması ve erken kırılmadan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, füzyon bölgesi oranı, yumuşak bölge genişliği ve kaynak yüzey pürüzlülüğü gibi kaynak kalitesine etki eden lazer işlem parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla Box-Behnken tasarımına dayalı yüzey yanıt yöntemi uygulanmıştır. Yüzey yanıt yöntemi (RSM), optimize edilmiş kaynak parametrelerinin lazer gücü 1,77 KW, kaynak hızı 7 m/dak ve odak pozisyonunun sac yüzeyinde olduğunu öngörmüştür. Optimize edilmiş parametreler kullanılarak üretilen DP980 lazer kaynaklı saclar üzerinde Erichsen çekme testi gerçekleştirilmiş ve çekme yüksekliğinin %13,58 arttığı bulunmuştur. DP980 lazer kaynaklı sacların üretiminde tam nüfuziyet sağlanarak, yumuşak bölge genişliğinde %67 ve yumuşama oranında %55'lik önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Bununla birlikte, optimize edilmiş parametrelerle üretilen lazer kaynaklı sacların yumuşak bölgelerinde hâlâ gerilim yığılması ve ardından gelen kırılma meydana gelmiştir.

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışmada kaynak işlemlerinde 0,8 mm kalınlığında DP600 çeliği ve 1 mm kalınlığında DP1180 çeliği sacları kullanılmıştır. Kullanılan çelik sacların kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde Kullanılan DP600 ve DP1180 malzemelerinin kimyasal özellikleri (% ağırlık)

Malzeme	C	Mn	Si	diğer
DP600	0,08	0,84	0,19	Cr, Mo
DP1180	0,14	2,7	0,7	Cr, Mo, Nb, Ti, B

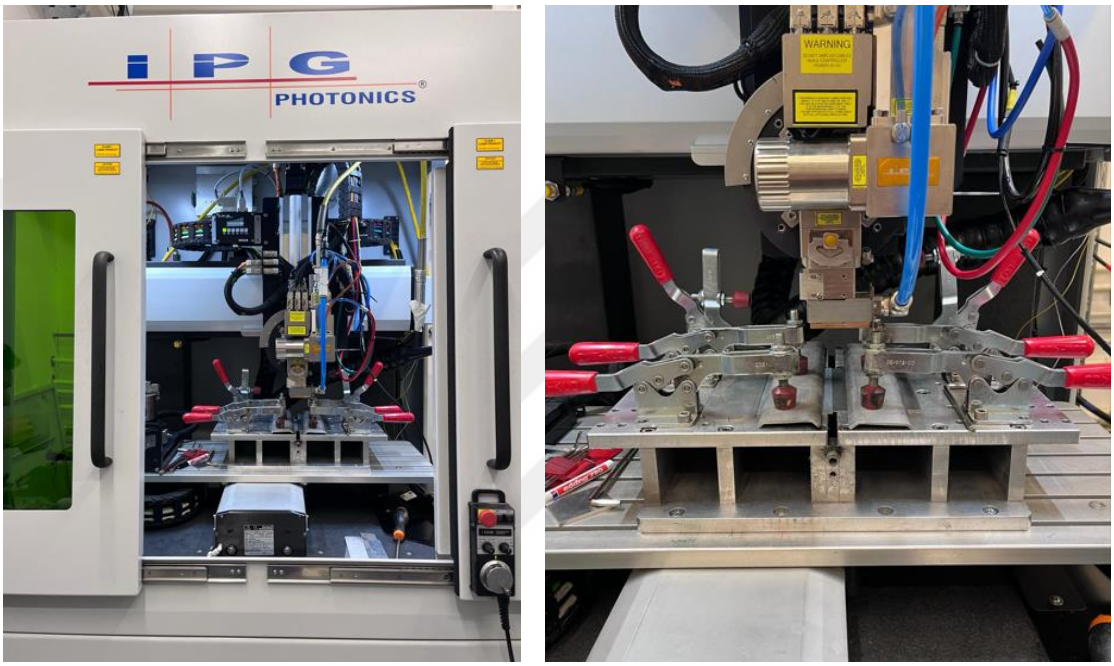
Çizelge 3.2. Deneylerde Kullanılan DP600 ve DP1180 malzemelerinin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama(min) (%)
DP600	365	620	27
DP1180	855	1220	9,9

3.2. Yöntem

3.2.1 Lazer Kaynak Ünitesi ve Özellikleri

Proje kapsamındaki lazer kaynak işlemi için IPG Photonics firmasından hizmet alımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 5 KW lazer gücüne sahip, 100 mikron fiber çapına sahip FLW D30 model lazer kaynak kafası kullanılmıştır. Denemelerin gerçekleştirildiği cihazın görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.

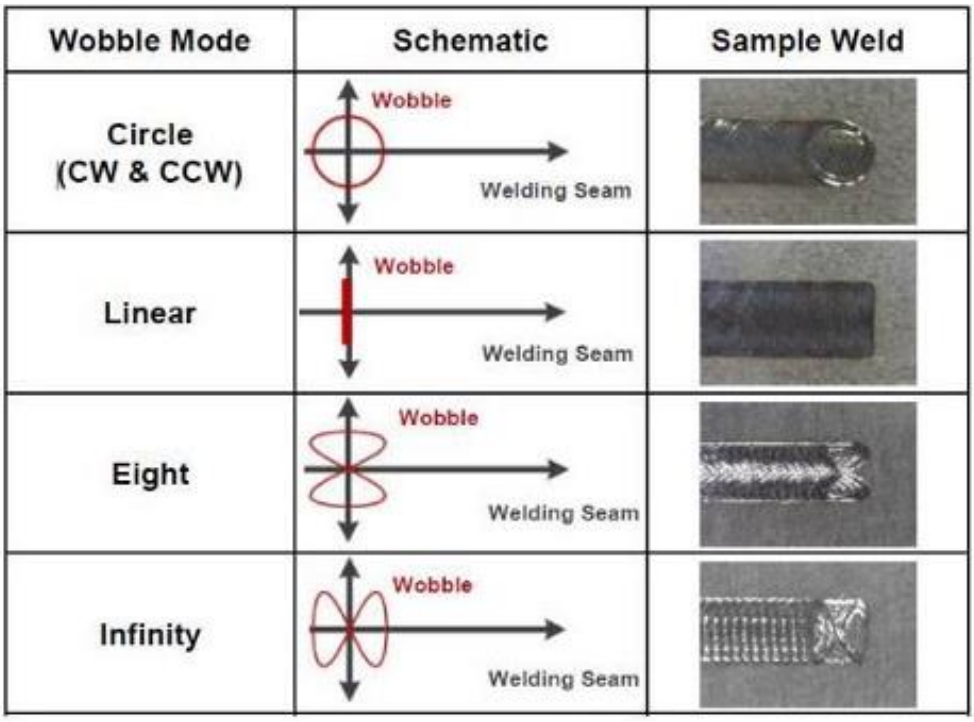


Şekil 3.1. Lazer kaynak denemelerinin gerçekleştirildiği cihaza ait görüntüler

3.2.2. Deney Tasarımı ve Lazer Kaynak Uygulaması

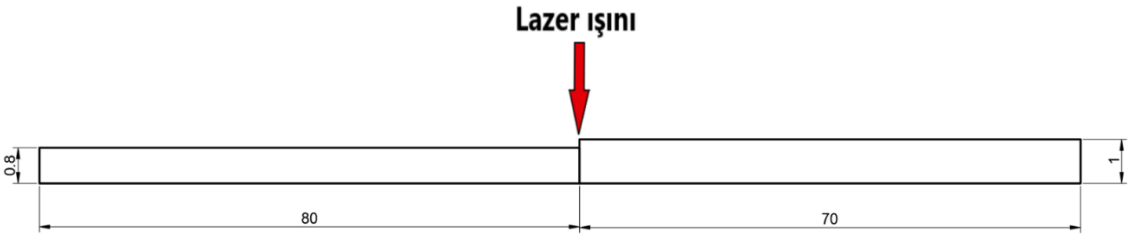
Wobble head teknolojisi lazer ışının yüksek frekanslarda salınım yapmasına imkan veren bir uygulamadır. Lazer ışını farklı salınım hareketlerini bu teknoloji sayesinde yapabilmektedir. Özellikle lazer kaynak işleminde kullanılan wobble head teknolojisi sayesinde kalitesi yüksek bağlantıların elde edildiği literatürden görülmüştür. Yaygın olarak kullanılan lazer osilasyon modları ise, enine salınım (zig-zag), dairesel (circular) ve boyuna salınım olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Salınımlı lazer kaynağında ikincil hareket olarak gösterilen bu salınım, lazer ışınının kaynak yolu boyunca besleme hareketinden, yani ana ilerleme hareketinden farklı olarak üst üste gelen doğrusal veya eğrisel (dairesel veya eliptik) hareket ile meydana gelebilmektedir. Besleme hızı ile lazer

ışınının salınım frekansı arasındaki orana bağlı olarak, lazer ışınının ana yolu boyunca sürekli bir kaynak dikişi elde edilir.



Şekil 3.2. Yaygın lazer ışını wobble modları

Yüksek salınım frekansı, lazer ışınının düzgün bir şekilde üst üste binmesine neden olur, bu da kısmi malzeme erimesiyle sonuçlanır ve böylece besleme ekseni boyunca sürekli bir kaynak dikişi oluşturur. Aksine, yüksek kaynak hızları, lazer ışınının ardışık olana geçişinden eritilen malzeme kısmı arasında daha büyük bir mesafe belirler; sonuç olarak, lazerin yeniden erimesi çok daha sınırlıdır. Bu da termal bozulmalar gibi farklı termal hasarları meydana getirebilir. Prosesin en önemli parametreleri ise Lazer Gücü (W), İlerleme Hızı (m/dak), Odak Mesafesi (mm), Osilasyon Türü (dairesel, zig-zag, lineer vb.), Frekans (Hz), Genlik (mm), Lazer Işın Açısı (°), Koruyucu Gaz Türü ve Debisidir (Altay 2021, Sabir 2019). Çalışma kapsamında alın kaynak formatında DP600 (0,8 mm)-DP1180 (1 mm) malzeme kombinasyonunda kaynak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3).



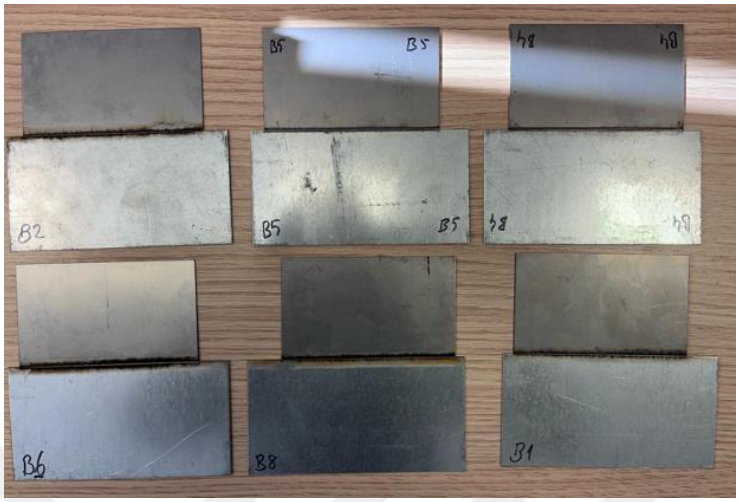
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan Alın kaynağı şematik gösterimi

Lazer kaynak işlemi ile birleştirilen numunelerde wobbler modundaki önemli parametreler olan ilerleme hızı (mm/s) ve osilasyon genliği (mm) etkileri incelenmiştir. Yapılan kaynaklar dairesel (circular) ve Lineer (zig-zag) osilasyon modlarında gerçekleştirilmiştir. Kaynak denemeleri esnasında koruyucu gaz kullanılmamıştır. Gerçekleştirilen kaynaklara ait özet bilgiler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Lazer kaynak denemelerine ait parametreler

No	Osilasyon Türü	Malzeme 1	Malzeme 2	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Genlik (mm)	Frekans (Hz)
B1	Dairesel (Circular)	DP600	DP1180	1200	80	0,5	100
B2		DP600	DP1180		70		
B8		DP600	DP1180		50		
B4		DP600	DP1180	1200	60	1	100
B5		DP600	DP1180			1,5	
B3		DP600	DP1180			0,5	
No	Osilasyon Türü	Malzeme 1	Malzeme 2	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Genlik (mm)	Frekans (Hz)
A1	Lineer (Zig-Zag)	DP600	DP1180	1200	80	0,5	100
A2		DP600	DP1180		70		
A8		DP600	DP1180		50		
A4		DP600	DP1180	1200	60	1	100
A5		DP600	DP1180			1,5	
A3		DP600	DP1180			0,5	

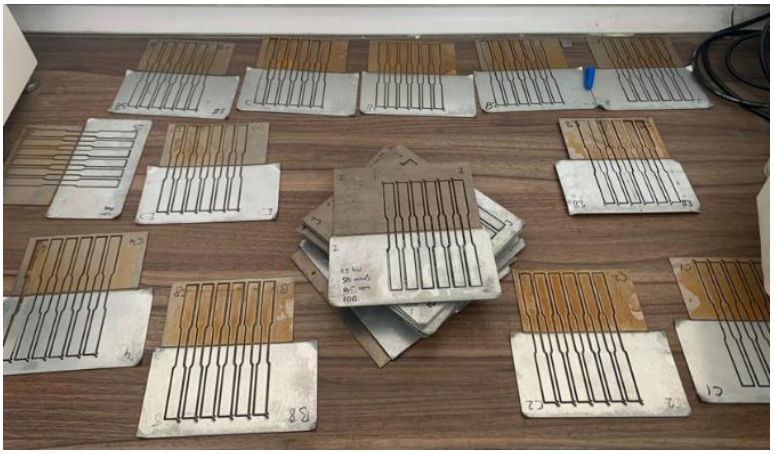
Lazer kaynak işleminde 12 adet kaynak gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen parçalara ait örnek görüntüler Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Lazer kaynaklı numunelere ait örnek görüntü.

3.2.3 Metalografik İnceleme

Lazer kaynak uygulaması gerçekleştirildikten sonra, metalografik incelemeler ve çekme deneyleri için kaynaklanmış plakalardan kaynak bölgesinin ısı girdisine maruz kalıp hasar görmemesi için su jeti tezgâhında numuneler alınmıştır.



Şekil 3.5. Lazer kaynaklı numunelerden su jeti ile kesilmiş numune görüntüleri.

Metalografik incelemeler için lazer kesimle elde edilen numuneler, STRUERS Labotom-3 marka metalografik kesme cihazı kullanılarak kaynak enine kesiti yönünde kesilmiştir. Elde edilen bu numuneler, Metkon ECOPRESS 100 marka numune kalıplama cihazı ile bakalite alınmıştır. Kullanılan Metalografik kesme cihazı ve Numune kalıplama cihazı fotoğrafları Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.6. (a) STRUERS Labotom-3 metalografik kesme cihazı (b) Metkon Ecopress 100 numune kalıplama cihazı.

Bakalite alınmış numunelere, zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler, Metkon FORCIPOL 2V cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işleminde sırasıyla 180, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 gritlik SiC su zımparaları kullanılmıştır. Parlatma işlemleri ise sırasıyla 6 µm, 3 µm elmas ve 1 µm alümina (Al_2O_3) solüsyonları ile yapılmıştır.

Mikroyapıyı incelemek için gerçekleştirilen dağlama işleminde %3 Nital çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözelti, 97 gram etanol (C_2H_5OH) ve 3 gram nitrik asit (HNO_3) içermektedir. Dağlama işlemi sırasında dağlayıcı, parlatılmış yüzeye 8-10 saniye süreyle uygulanmış ve ardından su ile yıkanmıştır. Bu işlem, içyapının ortaya çıkarılmasını sağlamıştır. Numunelerin mikroyapısı, NIKON ECLIPSE MA100 ters metal mikroskobu ve CLEMEX görüntü analiz programı kullanılarak çeşitli büyütmelerde görüntülenmiştir. Metalografik incelemelerde kullanılan zımparalama-parlatma cihazı ve optik mikroskop fotoğrafları Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

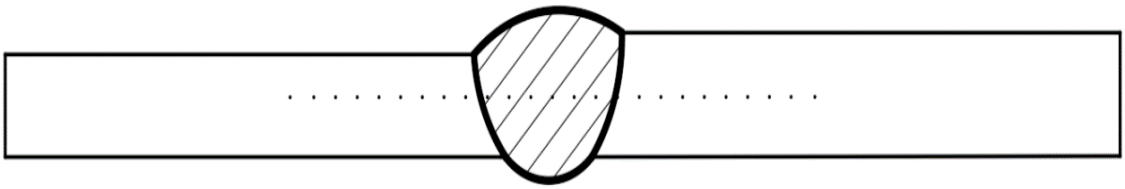
Şekil 3.7. (a) Metkon Forcipol zımparalama-parlatma cihazı, (b) Nikon Eclipse MA100 ters metal mikroskobu

3.2.4. Mikrosertlik Ölçümü

Mikro sertlik ölçümleri, Vickers metodu ile METKON Duroline-M sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Bu ölçümler sırasında 200 gramlık bir yük 10 saniye boyunca uygulanmış ve ölçümler arasındaki mesafe 150 mikron olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Metkon Duroline-M Sertlik Ölçüm Cihazı



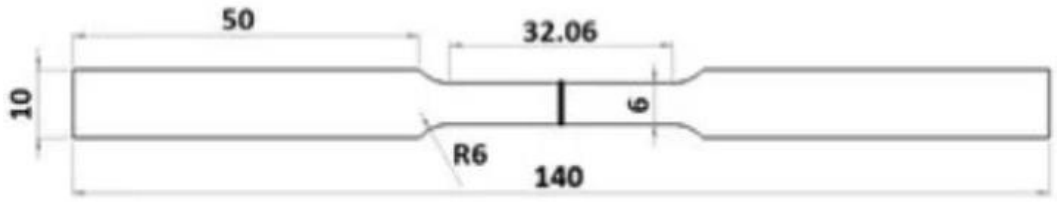
Şekil 3.9. Vickers mikro sertlik ölçüm hattı

3.2.5. Çekme Testi

Çalışma kapsamındaki çekme testleri, Celtron marka yük hücresi ve MF (Mess- & Feinwerktechnik) marka otomatik ekstansometre ile donatılmış UTEST-7014 marka üniversal çekme-basma test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.10). DP600 80 x 150 mm ve DP1180 70 x 120 mm boyutlarındaki kaynaklı plakalardan altı adet ASTM E8/E8M standartlarına uygun numune su jeti tezgâhında çıkarılmış, çekme testlerinde kaynak yönü ve çekme yönü birbirine dik olacak şekilde elde edilen çekme kuvvetlerinin ortalaması alınmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.10. Çekme testlerinin gerçekleştiği çekme-basma cihazı görüntüsü

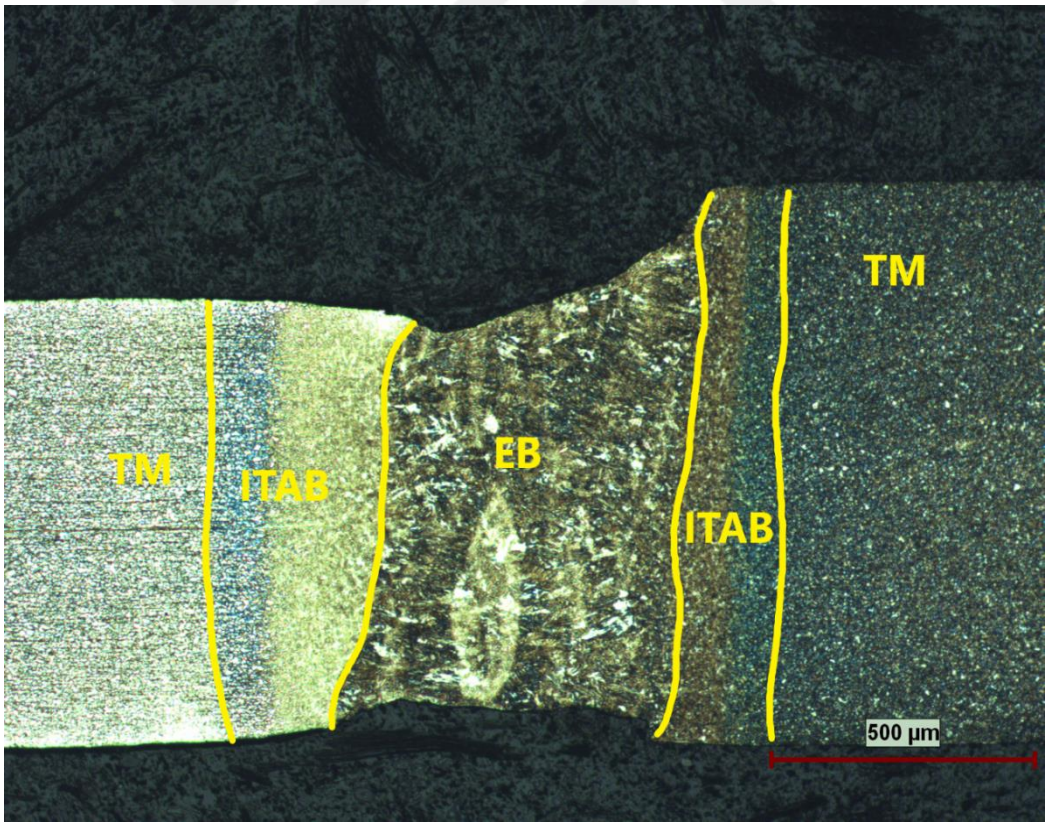


Şekil 3.11. Çekme deneyi numune boyutları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kaynak Geometrisi İncelemeleri

İdeal bir kaynaklı birleştirmede, kaynak genişliğinin minimum, penetrasyon derinliğinin ise maksimum olması istenir. Kaynak kalitesini değerlendirmek için penetrasyon derinliğinin kaynak genişliğine oranı incelenir. Kaynak geometrisi inceleme bölümünde; penetrasyon derinliği, erime bölgesinin (EB) genişliği ve ITAB bölgesinin genişliği incelenerek osilasyon türü ve proses parametrelerinin kaynak kalitesine etkisi değerlendirilmiştir. Kaynak bölgesinin mikroyapısı genellikle erime bölgesi (EB), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve temel malzeme (TM) olmak üzere üç ana bölümden oluşur. ITAB, malzemelerin tamamen erimediği ancak yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı bir alandır ve mikroyapısı sıcaklığa bağlı olarak faz dönüşümlerine göre değişir. Bu bölgelerin kaynak geometrileri, proses parametrelerine bağlı olarak farklılık gösterir ve farklı geometrik uzunluk değerleri elde edilir. Çalışma kapsamında üretilen kaynaklı örneklerin genel mikroyapı bölgeleri Şekil 4.1'da sunulmuştur.



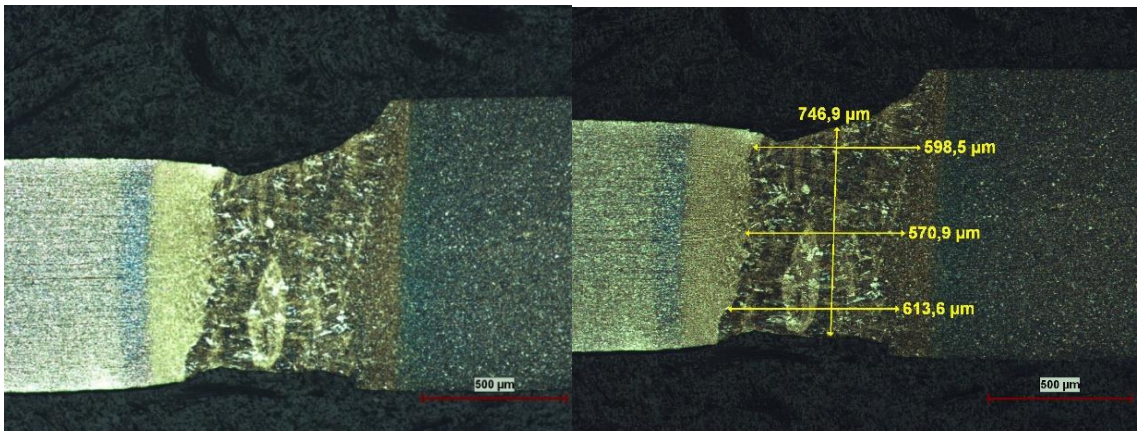
Şekil 4.1. Kaynaklı numunede mikro yapı bölgeleri (EB: Erime Bölgesi, ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge, TM: Temel Malzeme)

4.1.1. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda ilerleme hızın kaynak geometrisine etkisi

Lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanılarak, sabit genlikte (0,5 mm) ve farklı ilerleme hızlarıyla "A1", "A2" ve "A8" deney numunelerinde, ilerleme hızındaki değişimin kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir.

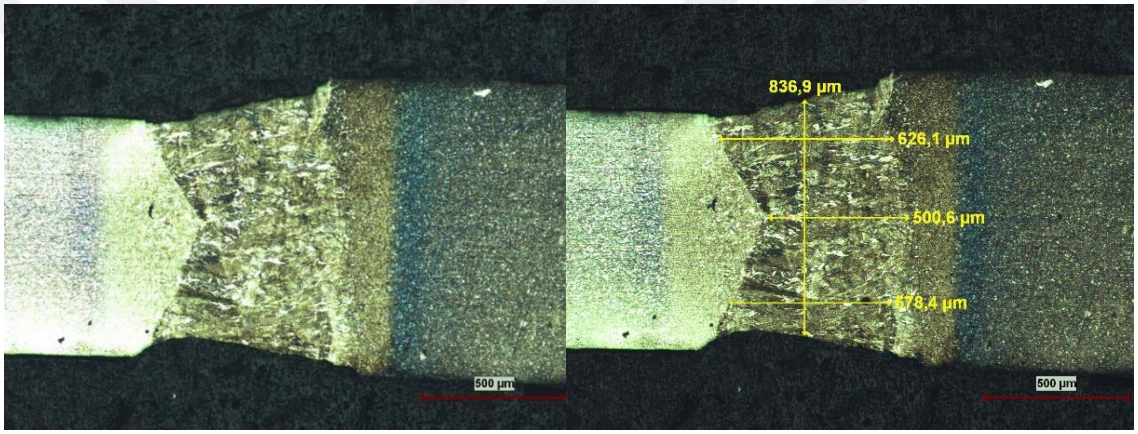
Çizelge 4.1. Lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanarak Lazer kaynaklı deney numunelerinin kaynak geometri bilgiler

Deney No	Max Genişlik (µm)	Min Genişlik (µm)	DP600 ITAB Genişliği (µm)	DP1180 ITAB Genişliği (µm)	Tam birleşme Mesafesi (µm)
A1	1157,1	1084,5	334,7	198,2	594,3
A2	1284,7	1249,5	460	300,8	568,3
A8	1320,7	1292	274,9	328,3	647,8
A3	1484,2	1415,5	456,1	356	689,6
A4	1888	1852,5	490,1	407,8	978,1
A5	2174	1954,6	192,1	276,4	1576,3



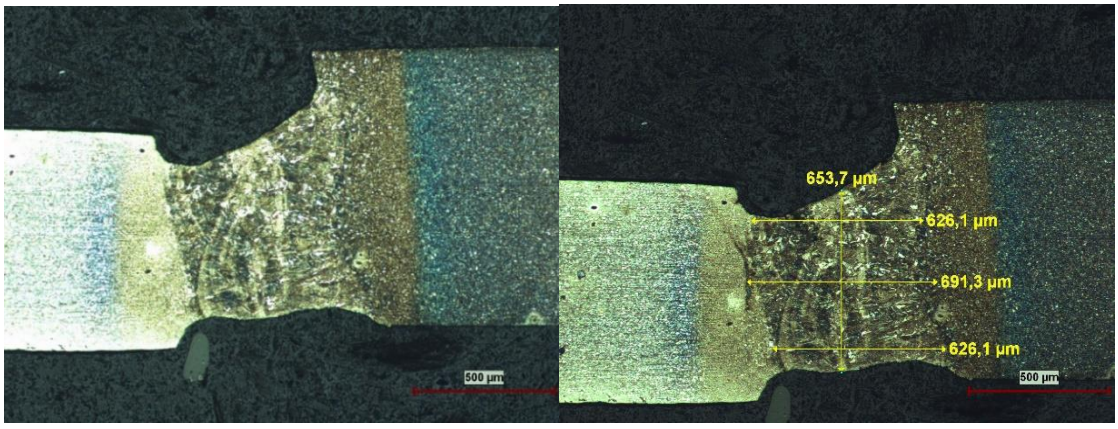
(a) (b)

Şekil 4.2. a) A1 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A1 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

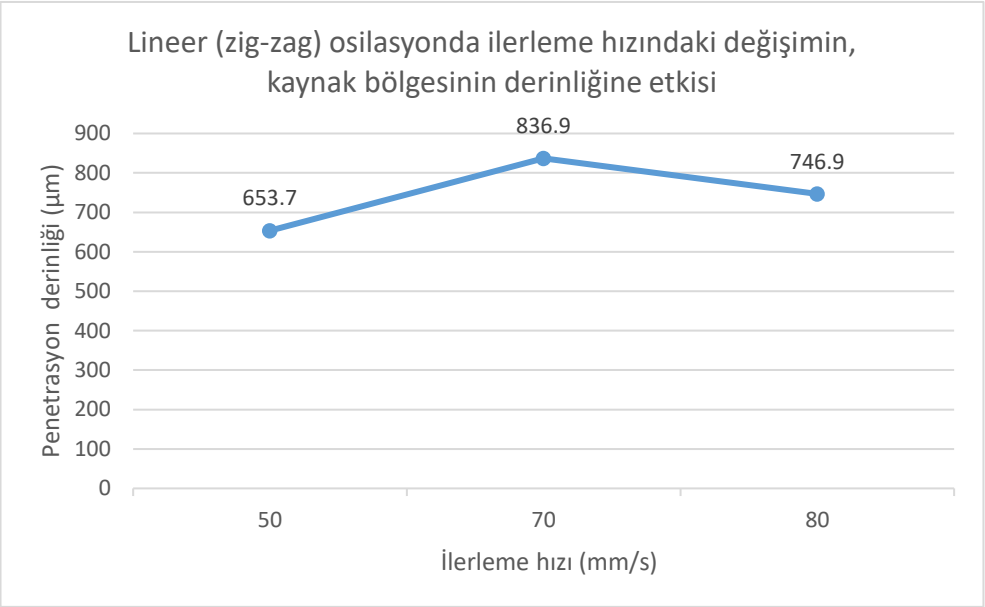
Şekil 4.3. a) A2 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A2 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.4. a) A8 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A8 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri

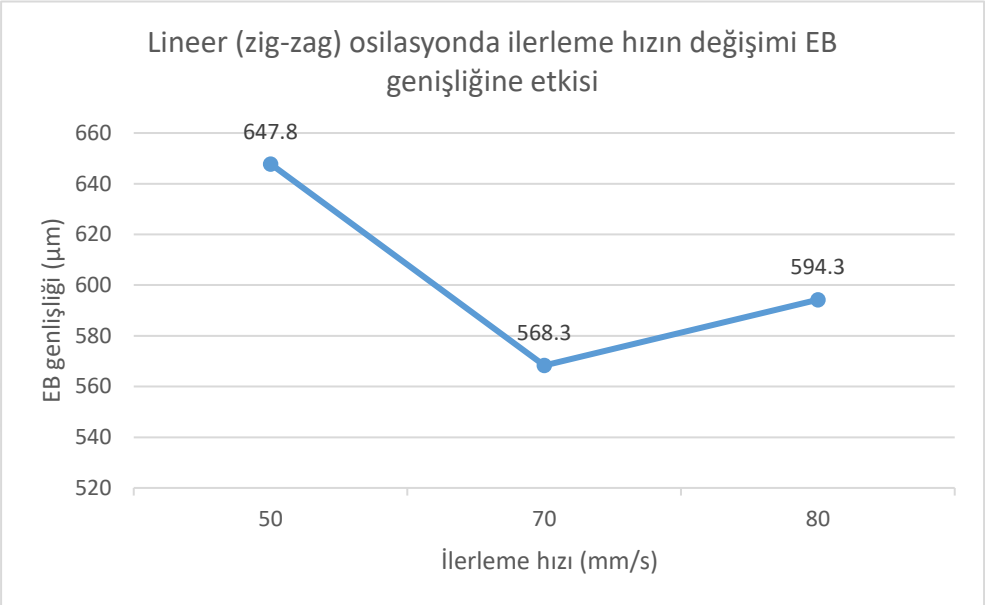
“A1”, “A2” ve “A8” deney numuneleri, eşit genlik (0,5 mm) parametresi ile Lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanılarak birleştirilmiştir. “A1” deney numunesinde İlerleme hızı 80 mm/s, “A2” deney numunesinde İlerleme hızı 70 mm/s ve “A8” deney numunesinde İlerleme hızı 50 mm/s parametreleri kullanılmıştır. Penetrasyon derinliği incelemesinde “A1” deney numunesinde 746,9 µm, “A2” deney numunesinde 836,9 µm ve “A8” deney numunesinde 653,7 µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.5. Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin, Penetrasyon derinliğine etkisi

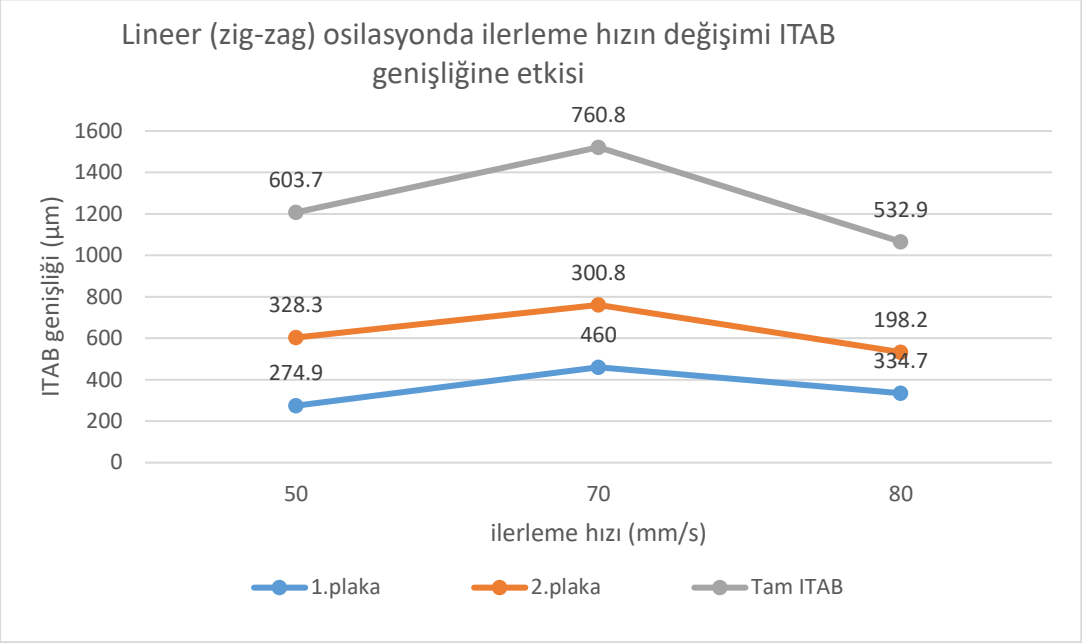
Ölçülen değerlere göre “A1”, “A2” ve “A8” numunelerinde tam penetrasyon elde edildiği gözlemlenmiştir. Yüksek ilerleme hızlarında daha yüksek penetrasyon derinlikleri elde edilmiştir. En derin penetrasyon, “A2” numunesinde 70 mm/s ilerleme hızında 836,9 µm olarak ölçülmüştür.

EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, “A1” deney numunesinde 594,3 µm, “A2” deney numunesinde 568,3 µm ve “A8” deney numunesinde 647,8 µm olarak tespit edilmiştir. Yüksek ilerleme hızlarında daha düşük EB genişlikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimi EB genişliğine etkisi

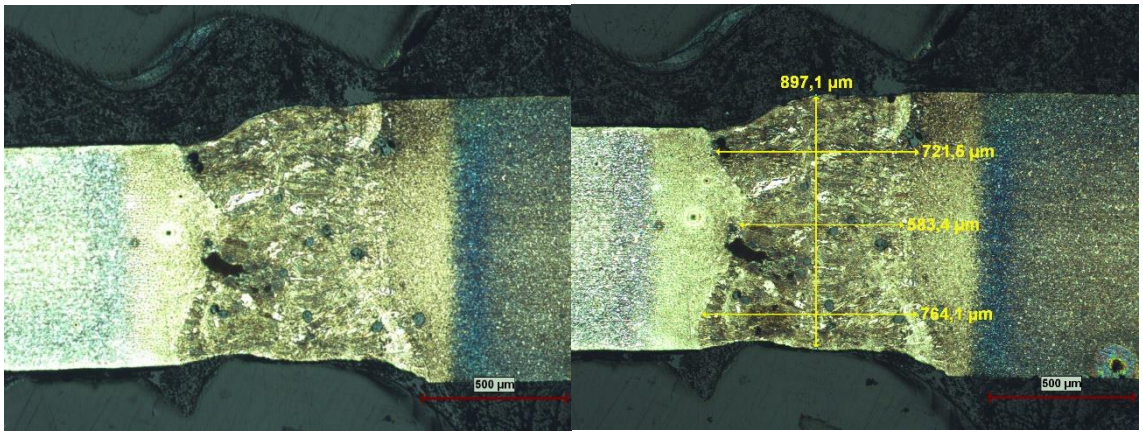
ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A1” deney numunesinde 334,7 µm, “A2” deney numunesinde 460 µm ve “A8” deney numunesinde 274,9 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A1” deney numunesinde 198,2 µm, “A2” deney numunesinde 300,8 µm ve “A8” deney numunesinde 328,3 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A1” deney numunesinde 532,9 µm, “A2” deney numunesinde 760,8 µm ve “A8” deney numunesinde 603,7 µm’dir. Ölçülen değerlere göre sabit genlikte (0,5 mm) yüksek ilerleme hızlarında daha düşük ITAB genişlikleri gözlemlenmiştir. En dar ITAB genişliği (532,9 µm) 80 mm/s ilerleme hızında elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızın değişimi ITAB genişliğine etkisi

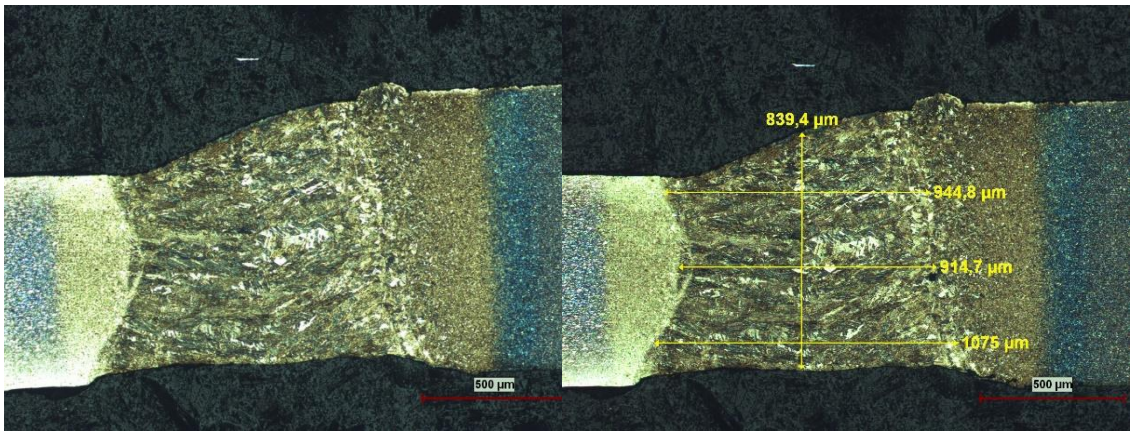
4.1.2. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda genliğin kaynak geometrisine etkisi

Lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanılarak, sabit ilerleme hızı (60 mm/s) ve farklı Genliklerle "A3", "A4" ve "A5" deney numunelerinde, genlikteki değişimin kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir.



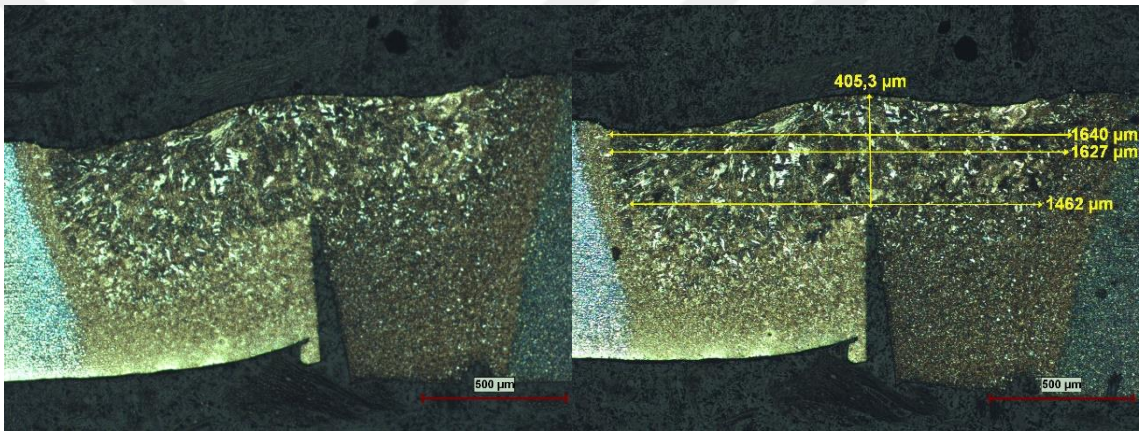
(a) (b)

Şekil 4.8. a) A3 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A3 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

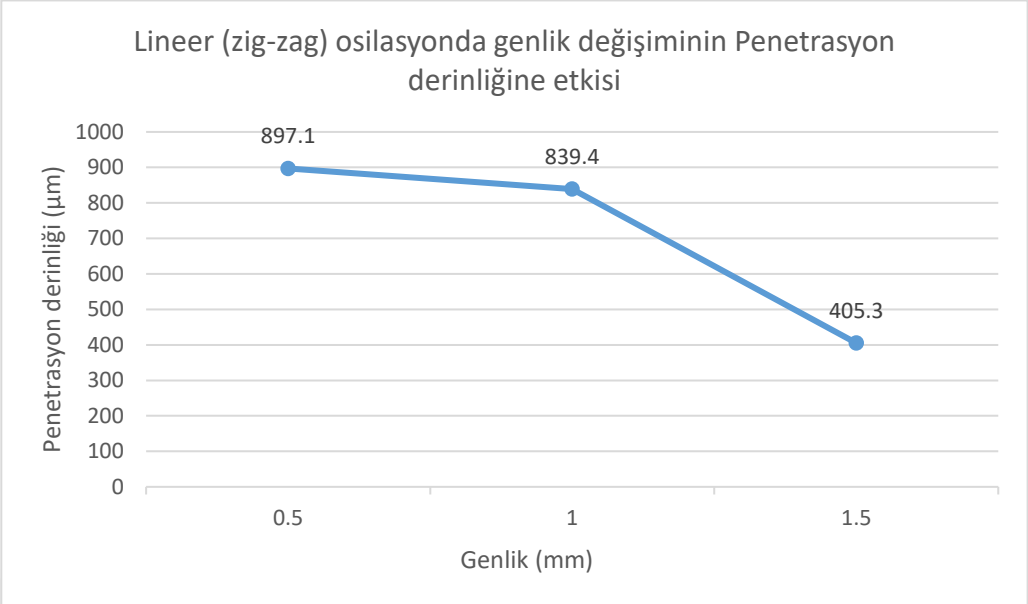
Şekil 4.9. a) A4 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A4 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.10. a) A5 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) A5 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri

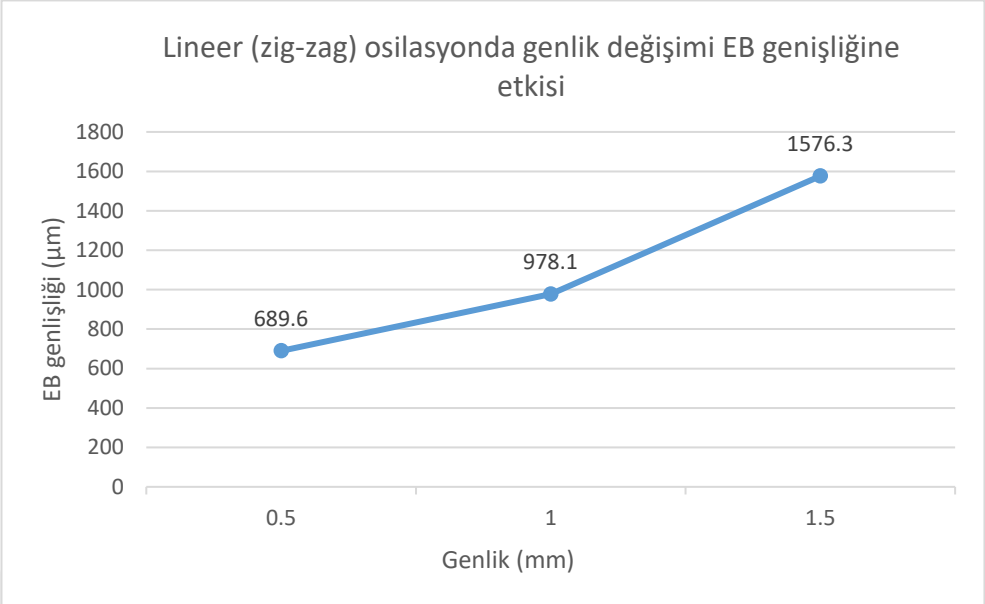
"A3", "A4" ve "A5" deney numuneleri ise, eşit ilerleme hızı (60 mm/s) parametresi ile Lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanılarak birleştirilmiştir. "A3" deney numunesinde Genlik 0,5 mm "A4" deney numunesinde Genlik 1 mm ve "A5" deney numunesinde Genlik 1,5 mm parametreleri kullanılmıştır. Penetrasyon derinliği incelemesinde "A3" deney numunesinde 897,1 µm, "A4" deney numunesinde 839,4 µm ve "A5" deney numunesinde 405,3 µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Lineer (zig-zag) osilasyonda genlik değişiminin penetrasyon derinliğine etkisi

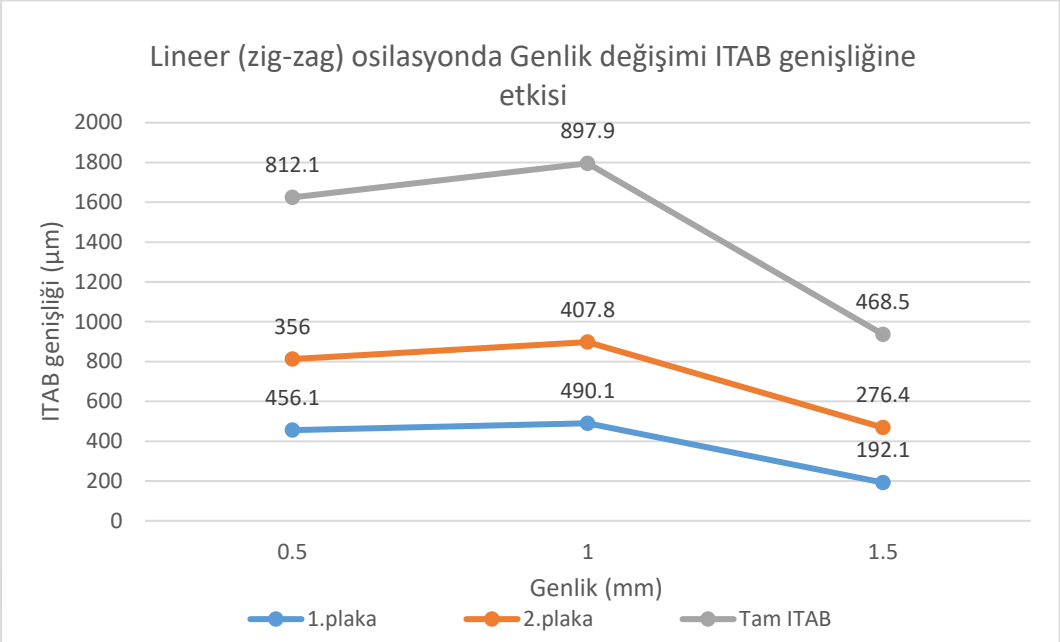
Ölçülen değerlere göre "A3" ve "A4" deney numunelerinde tam penetrasyon elde edildiği gözlemlenmektedir. "A5" deney numunesinde ise yeterli penetrasyon sağlanmamıştır. Düşük genliklerde daha yüksek penetrasyon derinlikleri elde edilmiştir. En derin penetrasyon "A3" deney numunesinde 0,5 mm genlikte 897,1 µm olarak tespit edilmiştir.

EB incelemesinde ölçülen değerler, genel olarak genlik değeri ile orantılıdır. "A3" Deney numunesinde 689,6 µm, "A4" Deney numunesinde 978,1 µm ve "A5" numunesinde 1576,3 µm EB uzunluklar elde edilmiştir. Düşük genliklerde daha düşük EB genişlikleri elde edilmiştir. En dar EB genişliği "A3" deney numunesinde 0,5 mm genlikte 689,6 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.12. Lineer (zig-zag) osilasyonda Genlik değişimi EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri "A3" deney numunesinde 456,1 µm, "A4" deney numunesinde 490,1 µm ve "A5" deney numunesinde 192,1 µm olarak ölçülmüştür. DP1180 ITAB genişlikleri "A3" deney numunesinde 356 µm, "A4" deney numunesinde 407,8 µm ve "A5" deney numunesinde 276,4 µm'dir. ITAB Tam genişlikleri ise "A3" deney numunesinde 812,1 µm, "A5" deney numunesinde 897,9 µm ve "A5" deney numunesinde 468,5 µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. Lineer (zig-zag) osilasyonda Genlik değişimi ITAB genişliğine etkisi

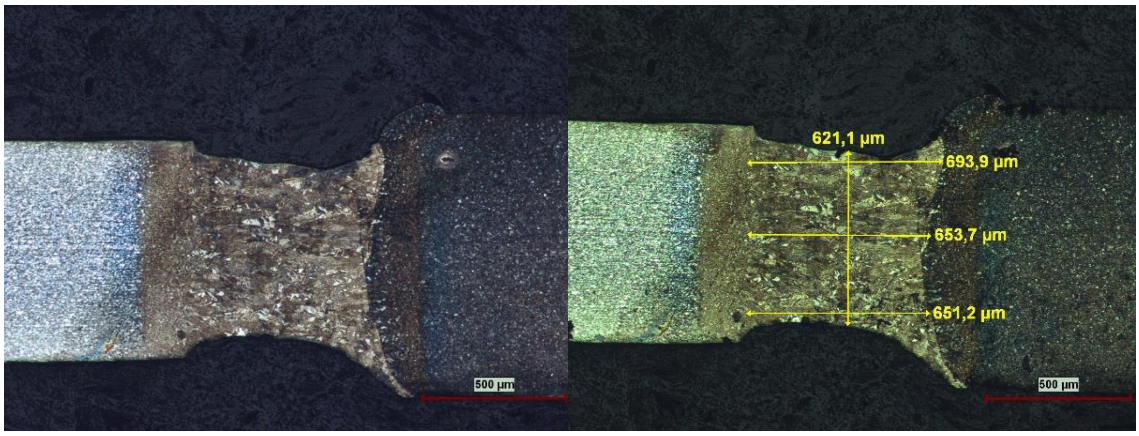
Ölçülen değerlere göre sabit ilerleme hızında (60 mm/s) düşük genliklerde daha yüksek ITAB genişlikleri gözlemlenmiştir. En dar ITAB genişliği 1,5 mm genlikte 468,5 µm olarak elde edilmiştir.

4.1.3. Dairesel (Circular) osilasyon modunda ilerleme hızın kaynak geometrisine etkisi

Dairesel (Circular) osilasyon türü kullanılarak, sabit genlikte (0,5 mm) ve farklı ilerleme hızlarıyla “B1”, “B2” ve “B8” deney numunelerinde, ilerleme hızındaki değişimin kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir.

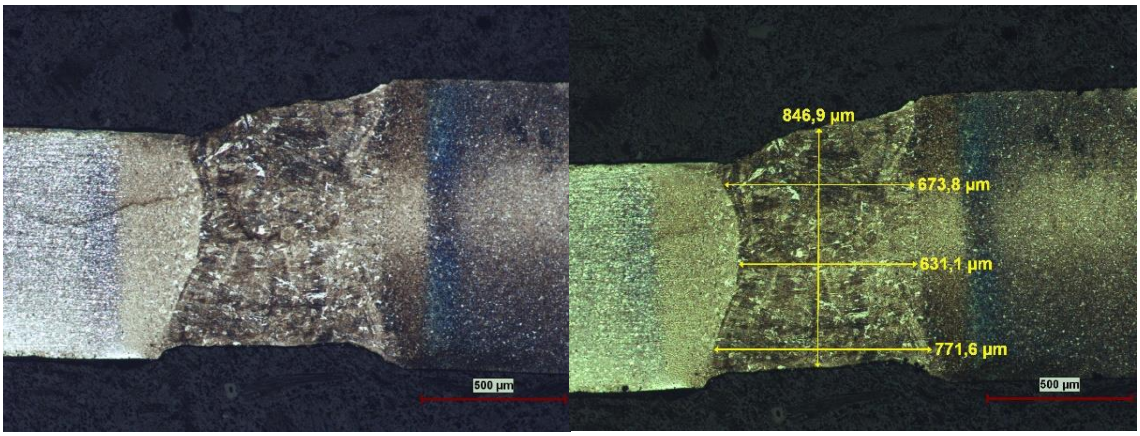
Çizelge 4.2. Dairesel (Circular) osilasyon türü kullanarak Lazer kaynaklı deney numunelerinin kaynak geometri bilgileri

Deney No	Max Genişlik (µm)	Min Genişlik (µm)	DP600 ITAB Genişliği (µm)	DP1180 ITAB Genişliği (µm)	Tam birleşme Mesafesi (µm)
B1	1215,5	1125,9	277,4	257,7	666,2
B2	1332,8	1248,1	408,6	276,1	692,1
B3	1355,7	1312,8	376,8	320,1	653,7
B4	2002,2	1953,1	459,7	672,3	834,6
B5	1937,3	1858,6	290,3	355,3	811,8
B8	1393,4	1293,6	361,2	364,2	684,6



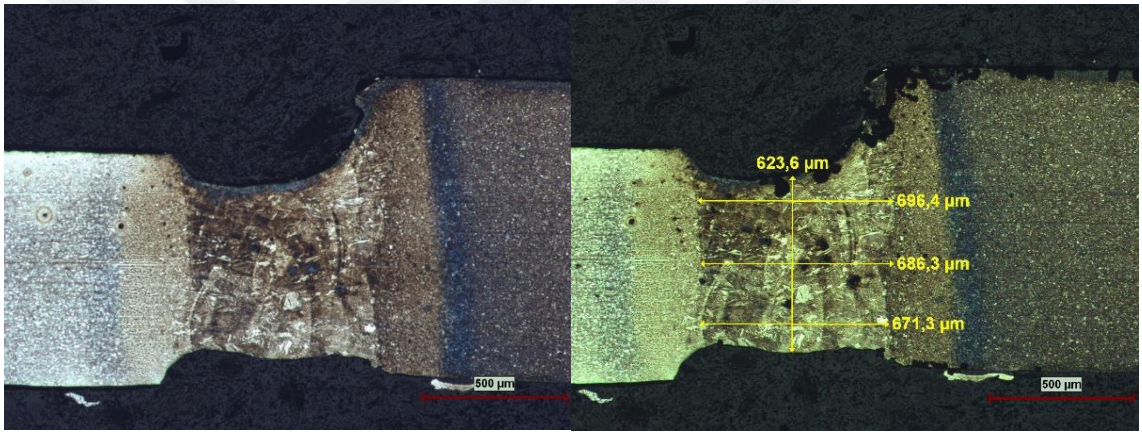
(a) (b)

Şekil 4.14. a) B1 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B1 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

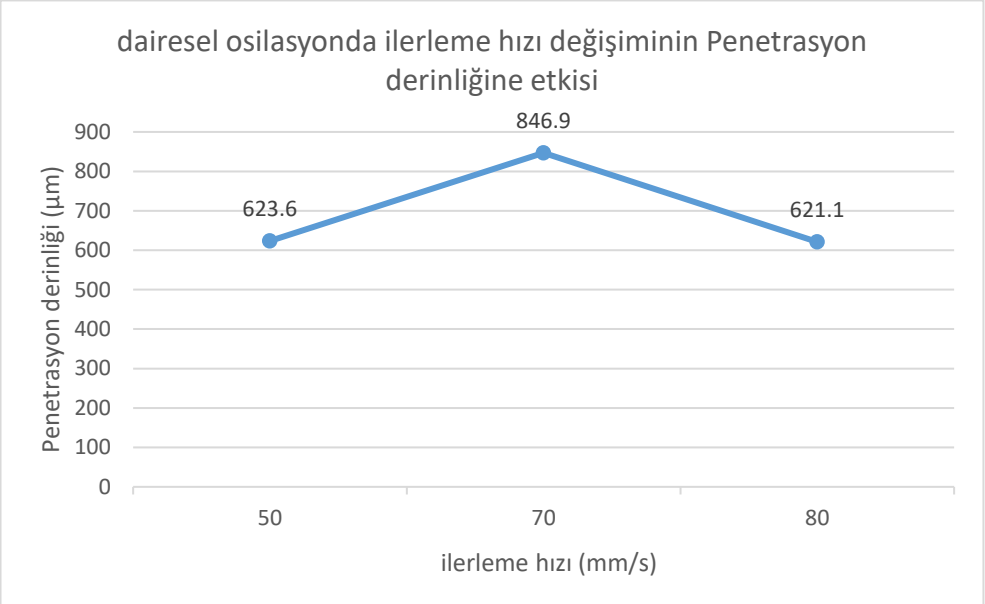
Şekil 4.15. a) B2 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B2 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

Şekil 4.16. a) B8 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B8 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri

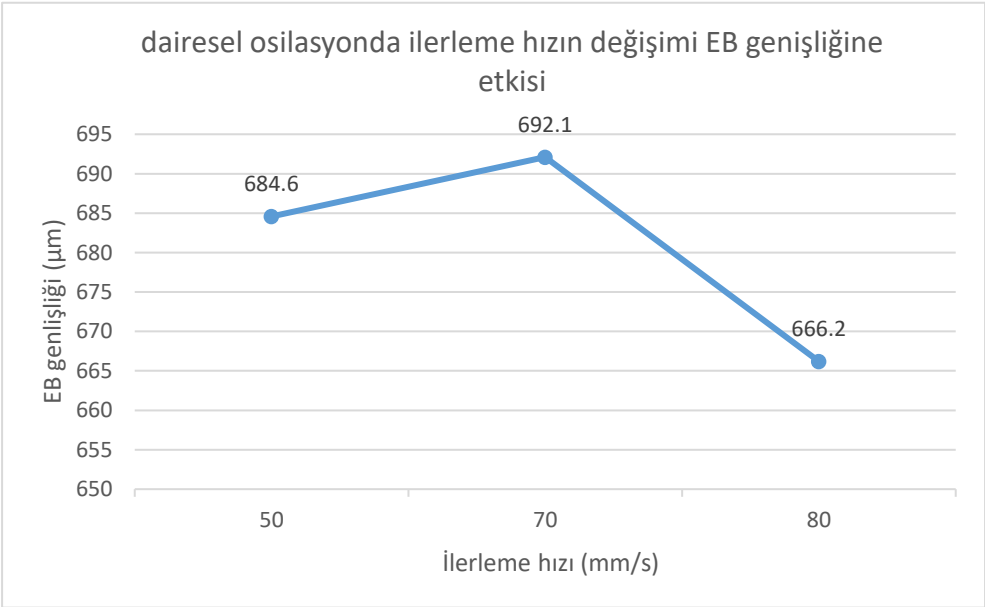
"B1", "B2" ve "B8" deney numuneleri, eşit genlik (0,5 mm) parametresi ile Dairesel osilasyon türü kullanılarak birleştirilmiştir. "B1" deney numunesinde İlerleme hızı 80 mm/s, "B2" deney numunesinde İlerleme hızı 70 mm/s ve "B8" deney numunesinde İlerleme hızı 50 mm/s parametreleri kullanılmıştır. Penetrasyon derinliği incelemesinde, "B1" deney numunesinde 621,1 µm, "B2" deney numunesinde 846,9 µm ve "A8" deney numunesinde 623,6 µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. Dairesel osilasyonda ilerleme hızı değişiminin kaynak derinliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre düşük ilerleme hızlarında daha yüksek penetrasyon derinlikleri elde edilmiştir. En derin penetrasyon "B2" deney numunesinde 70 mm/s ilerleme hızında 846,9 µm olarak ölçülmüştür. Tüm numunelerde tam penetrasyon sağlanmıştır.

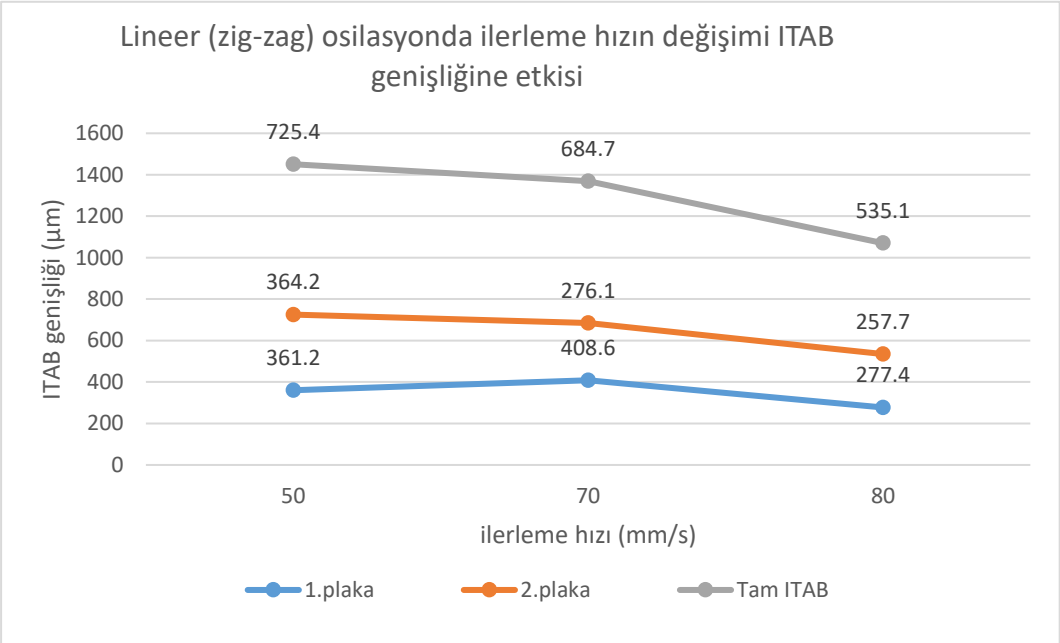
EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, "B1" deney numunesinde 666,2 µm, "B2" deney numunesinde 692,1 µm ve "B8" deney numunesinde 684,6 µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.18. Dairesel osilasyonda ilerleme hızı değişiminin EB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre Yüksek ilerleme hızlarında daha düşük EB genişlikleri elde edilmiştir. En dar EB genişliği 80 mm/s ilerleme hızında 666,2 µm olarak ölçülmüştür.

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri "B1" deney numunesinde 277,4 µm, "B2" deney numunesinde 408,6 µm ve "B8" deney numunesinde 361,2 µm'dir. DP1180 ITAB genişlikleri "B1" deney numunesinde 257,7 µm, "B2" deney numunesinde 276,1 µm ve "B8" deney numunesinde 364,2 µm'dir. ITAB Tam genişlikleri ise "B1" deney numunesinde 535,1 µm, "B2" deney numunesinde 684,7 µm ve "B8" deney numunesinde 725,4 µm'dir.

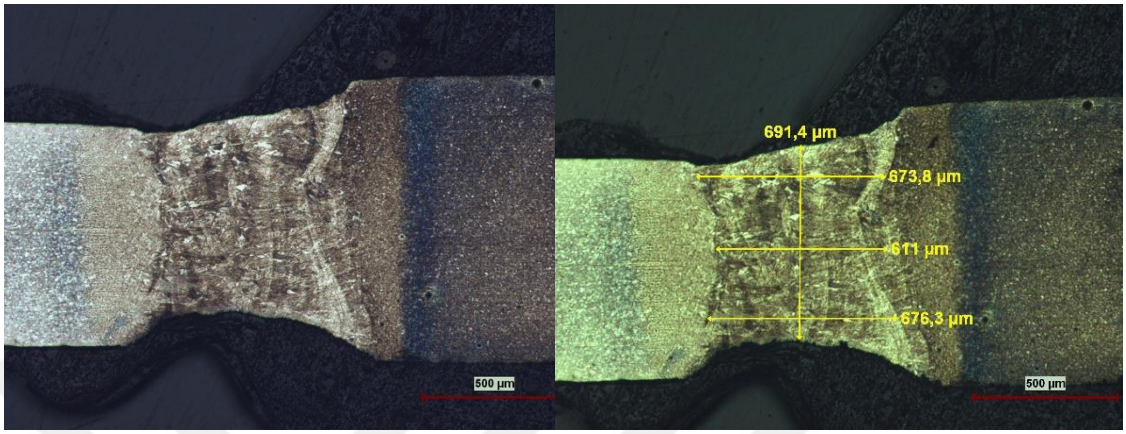


Şekil 4.19. Dairesel osilasyonda ilerleme hızın değişimi ITAB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre sabit genlikte 0,5 mm yüksek ilerleme hızlarında daha düşük ITAB genişlikleri elde edilmiştir. En dar ITAB genişliği 80 mm/s ilerleme hızında 364,2 µm olarak ölçülmüştür.

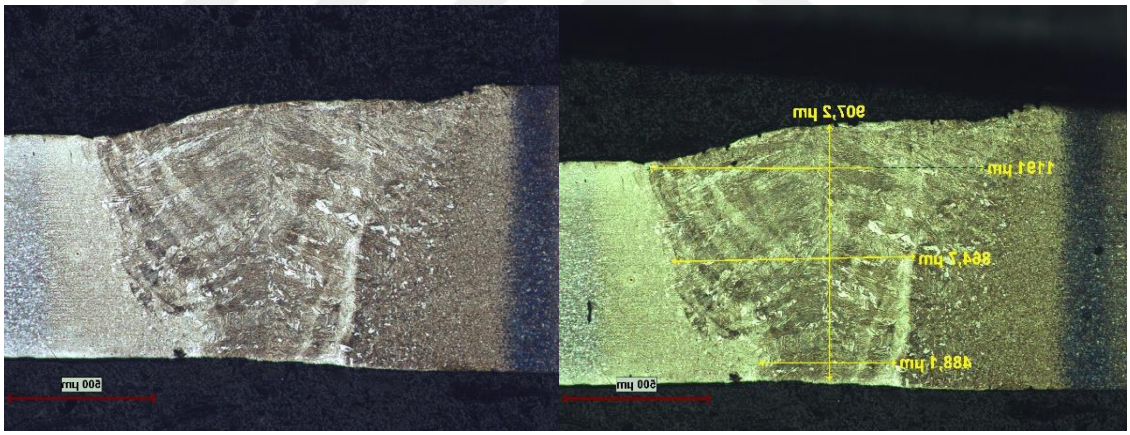
4.1.4. Dairesel (Circular) osilasyon modunda Genliğin kaynak geometrisine etkisi

Dairesel (Circular) osilasyon türü kullanılarak, sabit ilerleme hızı (60 mm/s) ve farklı Genliklerle “B3”, “B4” ve “B5” deney numunelerinde, genlikteki değişimin kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir.



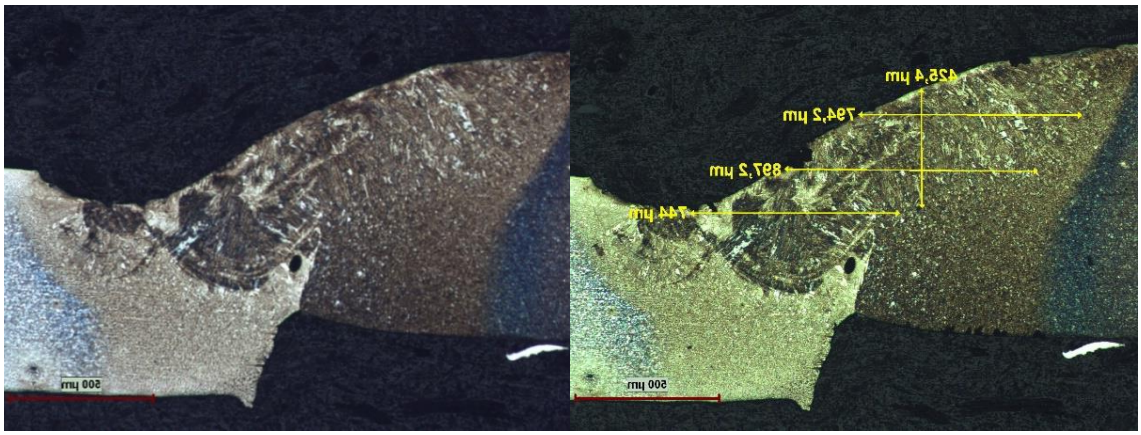
(a) (b)

Şekil 4.20. a) B3 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B3 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

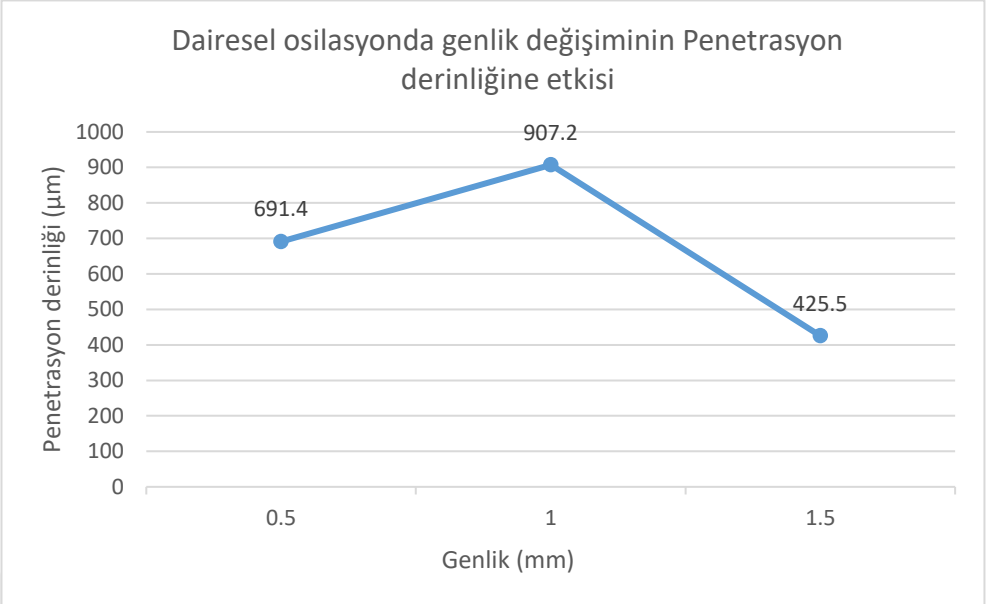
Şekil 4.21. a) B4 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B4 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri



(a) (b)

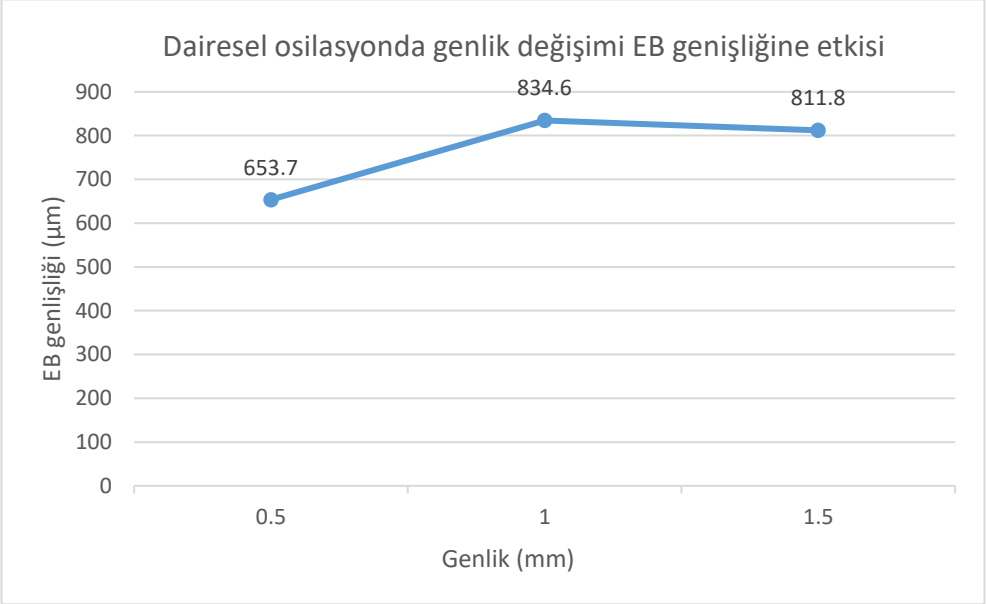
Şekil 4.22. a) B5 Deney numunesine ait genel mikroyapı görüntüsü, b) B5 Deney numunesine ait mikroyapı ölçüm görüntüleri

"B3", "B4" ve "B5" deney numuneleri, eşit ilerleme hızı (60 mm/s) parametresi ile Dairesel osilasyon türü kullanılarak birleştirilmiştir. "B3" deney numunesinde Genlik 0,5 mm "B4" deney numunesinde Genlik 1 mm ve "B5" deney numunesinde Genlik 1,5 mm parametreleri kullanılmıştır. Penetrasyon derinliği incelemesinde "B3" deney numunesinde 691,4 µm, "B4" deney numunesinde 907,2 µm ve "B5" deney numunesinde 425,5 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, "B3" ve "B4" deney numunelerinde tam penetrasyon elde edildiği gözlemlenmektedir. "B5" deney numunesinde ise yeterli penetrasyon sağlanmamıştır. Düşük genliklerde daha yüksek penetrasyon derinlikleri elde edilmiştir. En derin penetrasyon "B4" deney numunesinde 1 mm genlikte 907,2 µm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.23. Dairesel osilasyonda genlik değişiminin Penetrasyon derinliğine etkisi

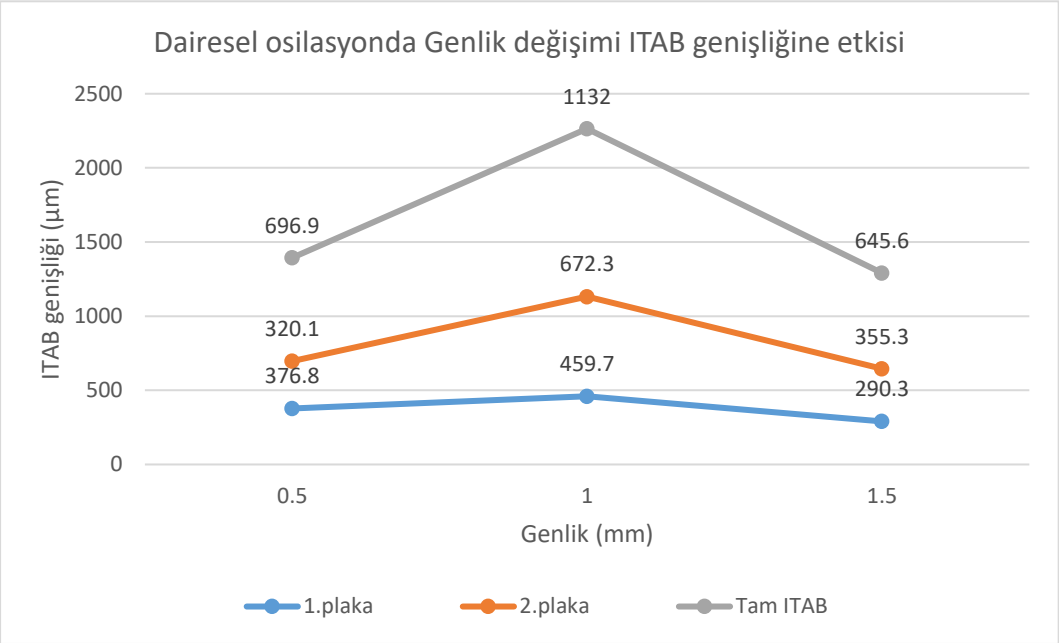
EB incelemesinde ölçülen değerler, "B3" Deney numunesinde 653,7 µm, "B4" Deney numunesinde 834,6 µm ve "B5"numunesinde 811,8 µm EB uzunluklar elde edilmiştir.



Şekil 4.24. Dairesel osilasyonda Genlik değişimi EB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre düşük genliklerde daha düşük EB genişlikleri elde edilmiştir. En dar EB genişliği "B3" deney numunesinde 0,5 mm genlikte 653,7 µm olarak ölçülmüştür.

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “B3” deney numunesinde 376,8 µm, “B4” deney numunesinde 459,7 µm ve “B5” deney numunesinde 290,3 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “B3” deney numunesinde 320,1 µm, “B4” deney numunesinde 672,3 µm ve “B5” deney numunesinde 355,3 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “B3” deney numunesinde 696,9 µm, “B4” deney numunesinde 1132 µm ve “B5” deney numunesinde 645,6 µm’dir.



Şekil 4.25. Dairesel osilasyonda Genlik değişimi ITAB genişliğine etkisi

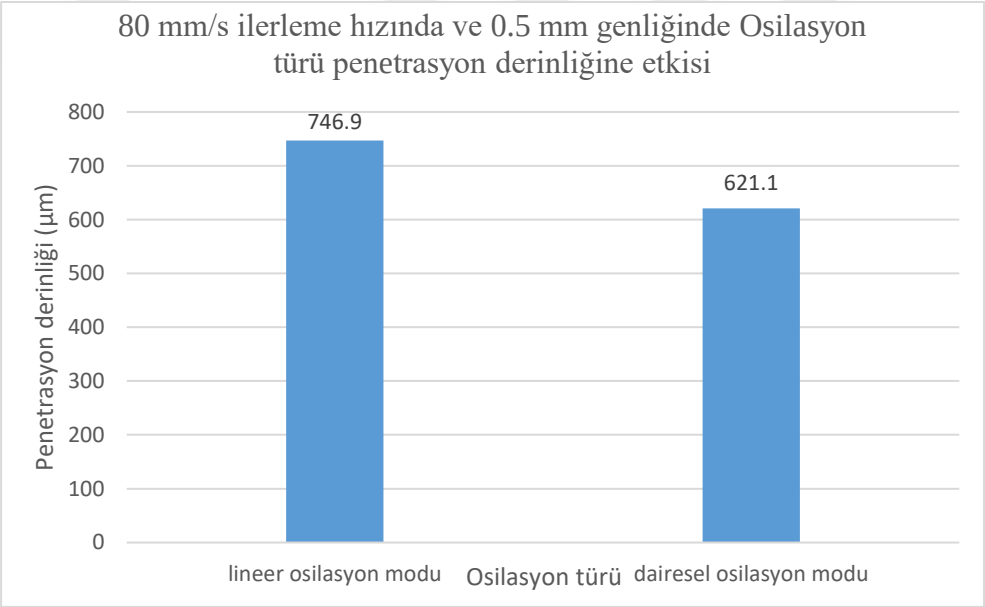
Ölçülen değerlere göre, yüksek genliklerde daha düşük ITAB genişlikleri elde edilmiştir. En dar ITAB genişliği “B5” deney numunesinde 1,5 mm genlikte 645,6 µm olarak tespit edilmiştir.

4.1.5. Osilasyon Türü kaynak geometresine etkisi

Çalışmada, fiber lazer kaynak yönteminde Wobble head teknolojisi kullanılarak osilasyon türünün (Wobble modu) kaynak geometrisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

"A1" ve "B1" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 80 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir. "A1" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B1" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

Penetrasyon derinliği incelemesinde, "A1" deney numunesinde 746,9 µm ve "B1" deney numunesinde 621,1 µm olarak tespit edilmiştir.

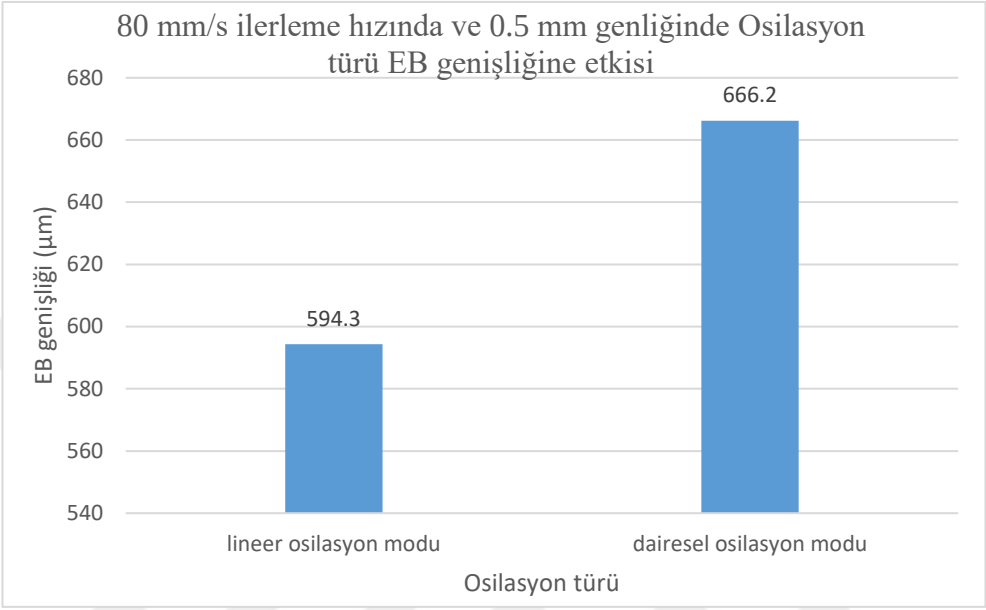


Şekil 4.26. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre, 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha derin penetrasyon elde edilmiştir.

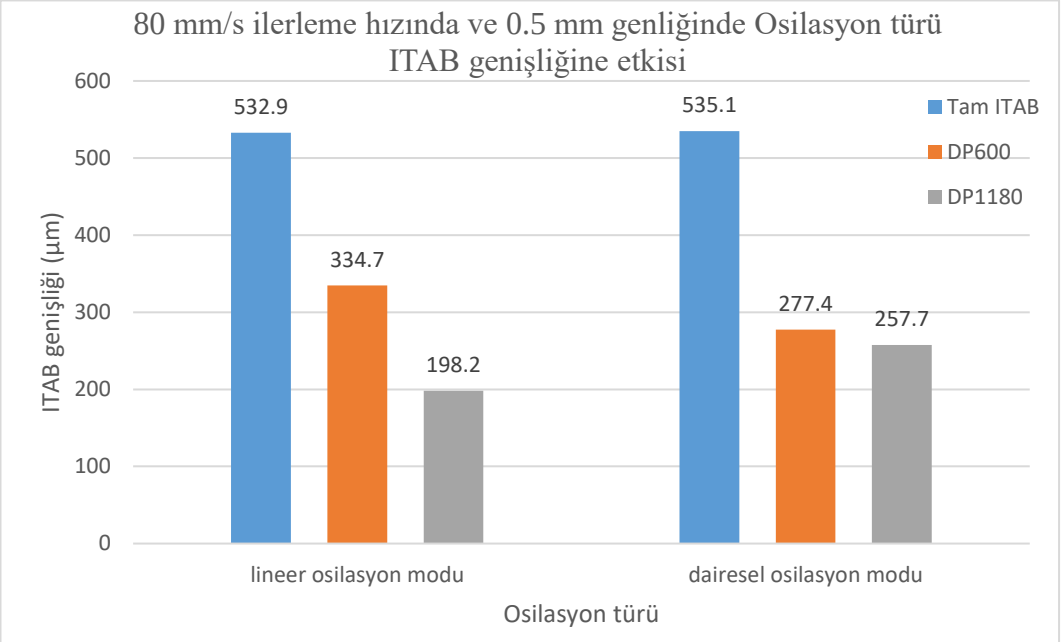
EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, “A1” deney numunesinde 594,3 µm ve “B1” deney numunesinde 666,2 µm olarak tespit edilmiştir.

Ölçülen değerlere göre, 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar EB genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.27. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A1” deney numunesinde 334,7 µm ve “B1” deney numunesinde 277,4 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A1” deney numunesinde 198,2 µm ve “B1” deney numunesinde 257,7 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A1” deney numunesinde 532,9 µm ve “B1” deney numunesinde 535,1 µm’dir.

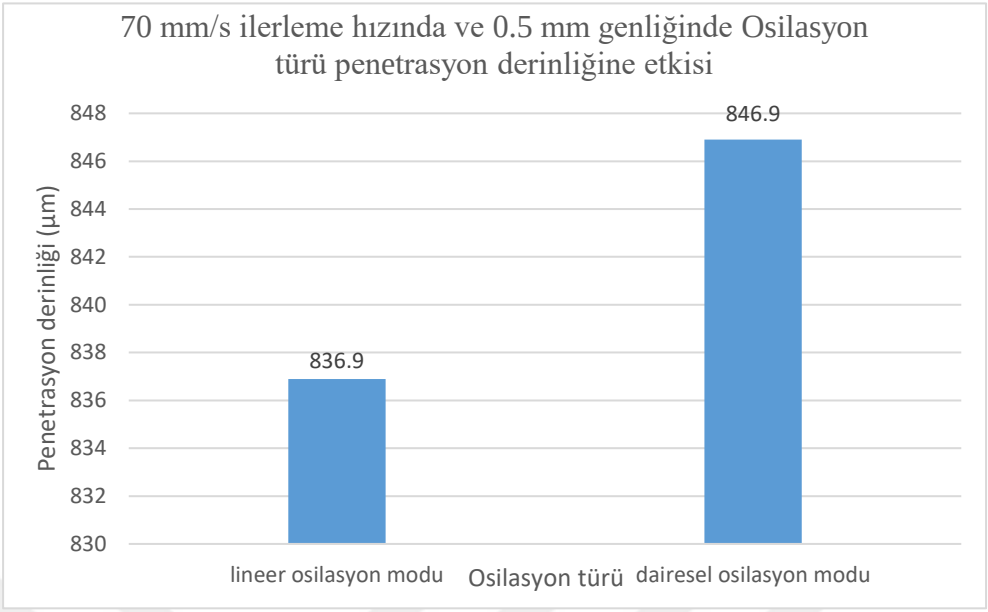


Şekil 4.28. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre, 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir.

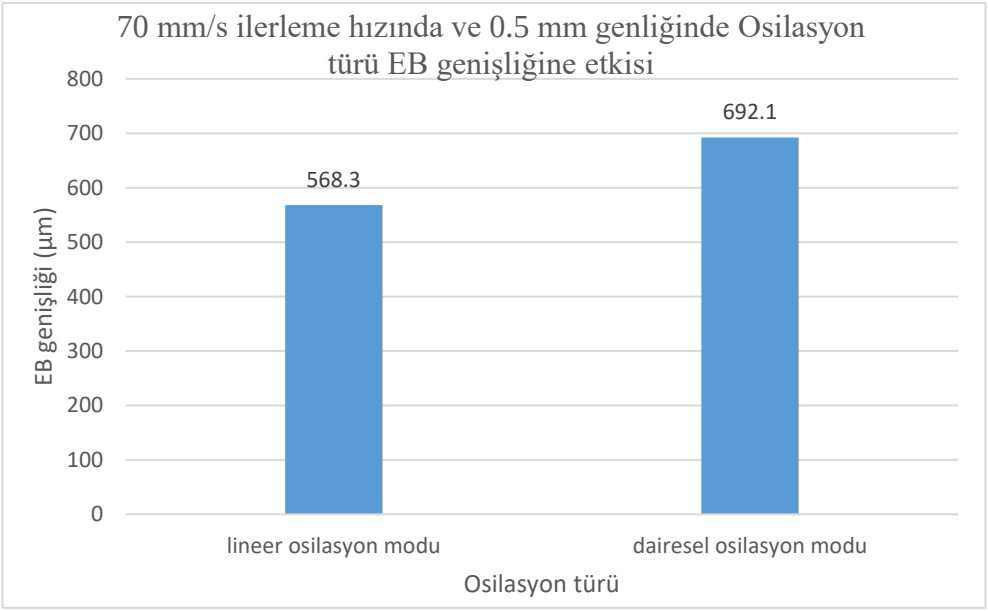
"A2" ve "B2" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 70 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir. "A2" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B2" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

Penetrasyon derinliği incelemesinde, "A2" deney numunesinde 836,9 µm ve "B2" deney numunesinde 846,9 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Dairesel osilasyon türünde daha derin penetrasyon elde edilmiştir.



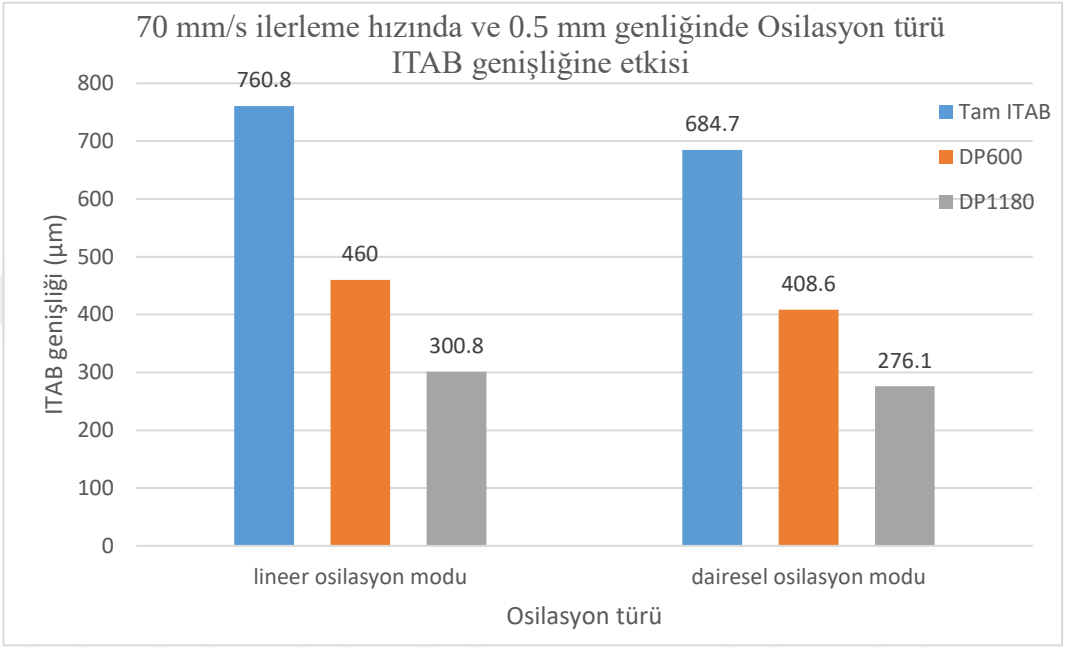
Şekil 4.29. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi

EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, "A2" deney numunesinde 568,3 µm ve "B2" deney numunesinde 692,1 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar EB genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.30. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A2” deney numunesinde 460 µm ve “B2” deney numunesinde 408,6 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A2” deney numunesinde 300,8 µm ve “B2” deney numunesinde 276,1 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A2” deney numunesinde 760,8 µm ve “B2” deney numunesinde 684,7 µm’dir.

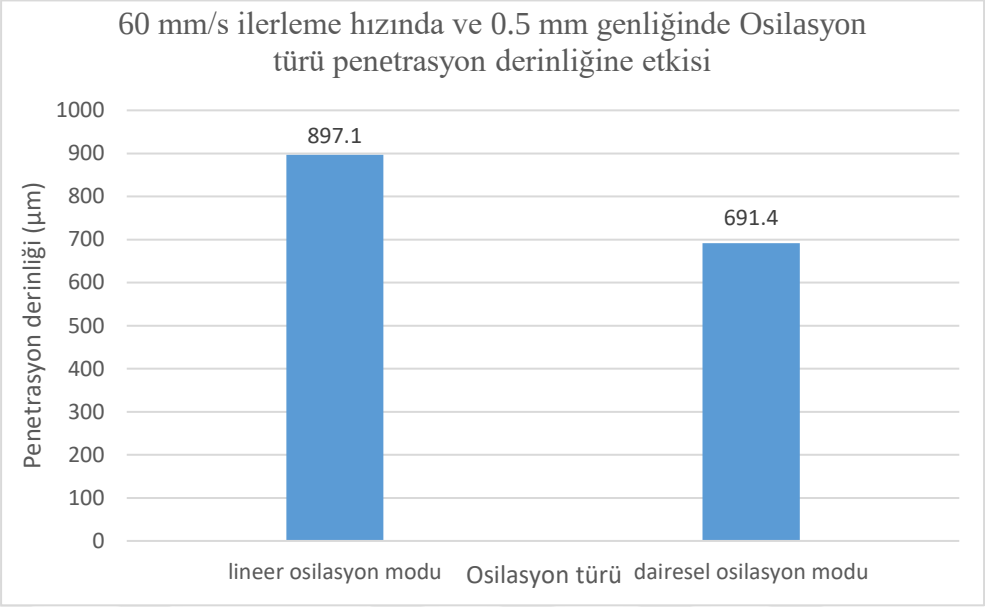


Şekil 4.31. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre, 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir.

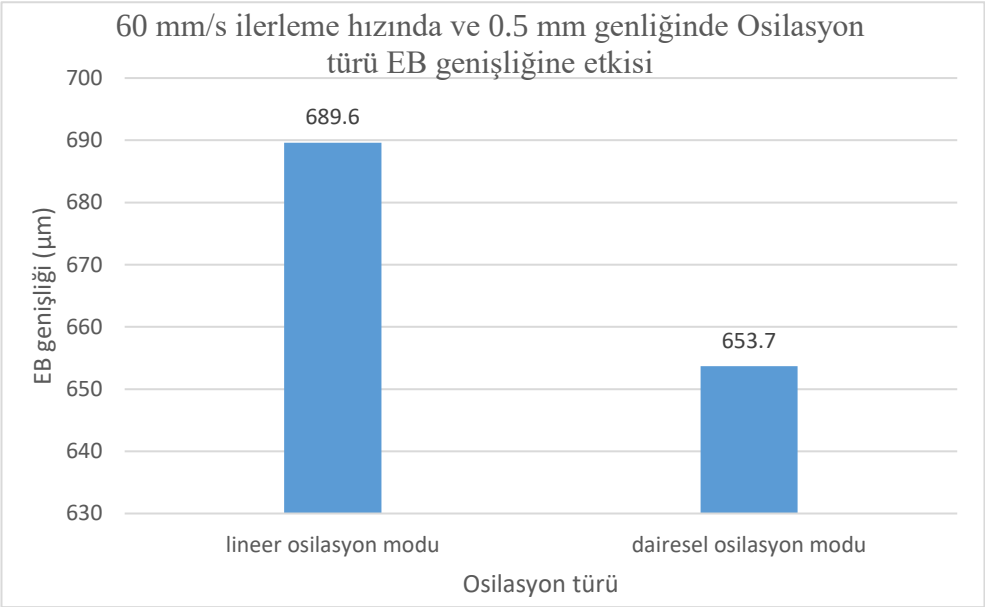
“A3” ve “B3” deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir. “A2” deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve “B2” deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

Penetrasyon derinliği incelemesinde, “A3” deney numunesinde 897,1 µm ve “B3” deney numunesinde 691,4 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Lineer osilasyon türünde daha derin penetrasyon elde edilmiştir.



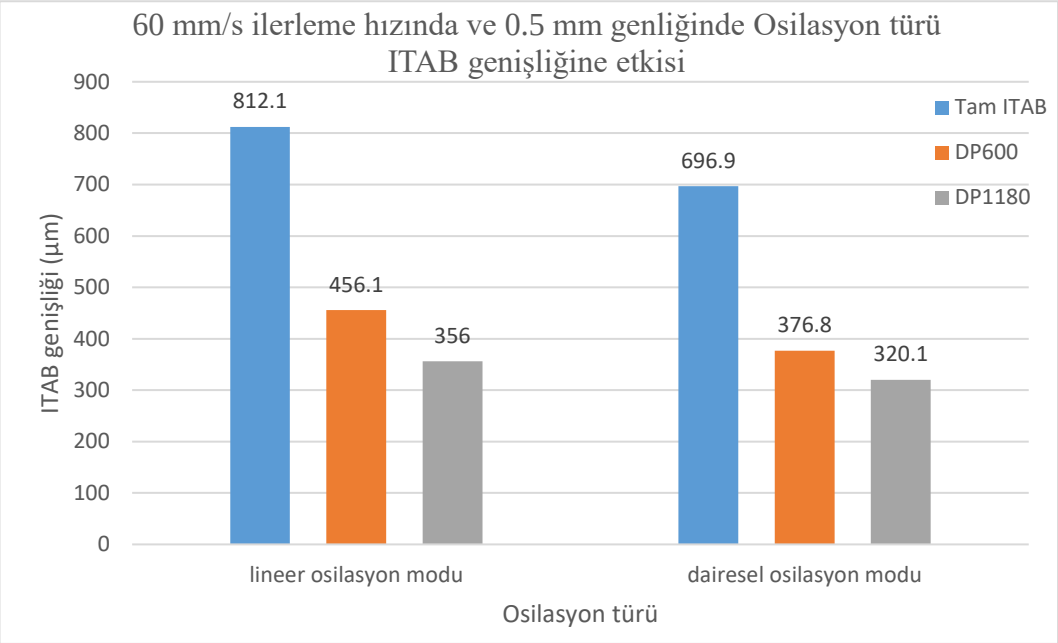
Şekil 4.32. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi

EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, "A3" deney numunesinde 689,6 µm ve "B3" deney numunesinde 653,7 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha dar EB genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.33. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A3” deney numunesinde 456,1 µm ve “B3” deney numunesinde 376,8 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A3” deney numunesinde 356 µm ve “B3” deney numunesinde 320,1 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A3” deney numunesinde 812,1 µm ve “B3” deney numunesinde 696,9 µm’dir.

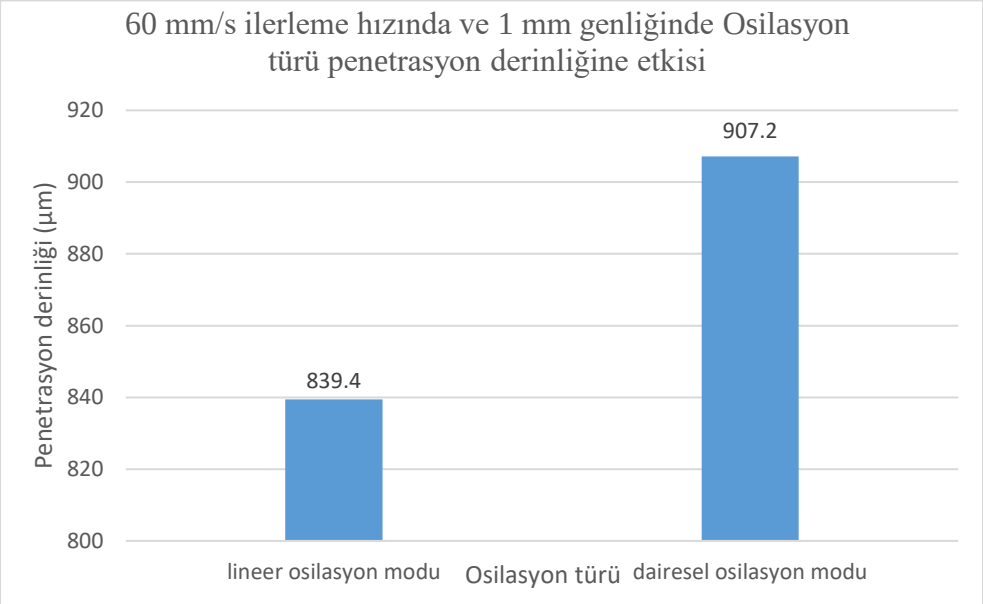


Şekil 4.34. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir.

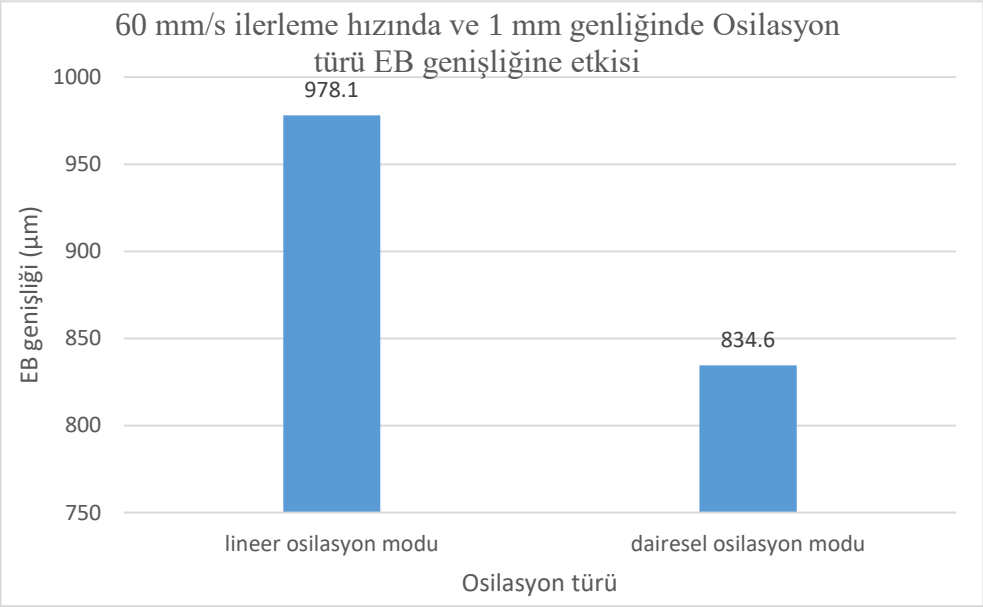
“A4” ve “B4” deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir. “A4” deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve “B4” deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

Penetrasyon derinliği incelemesinde, “A4” deney numunesinde 839,4 µm ve “B4” deney numunesinde 907,2 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha derin penetrasyon elde edilmiştir.



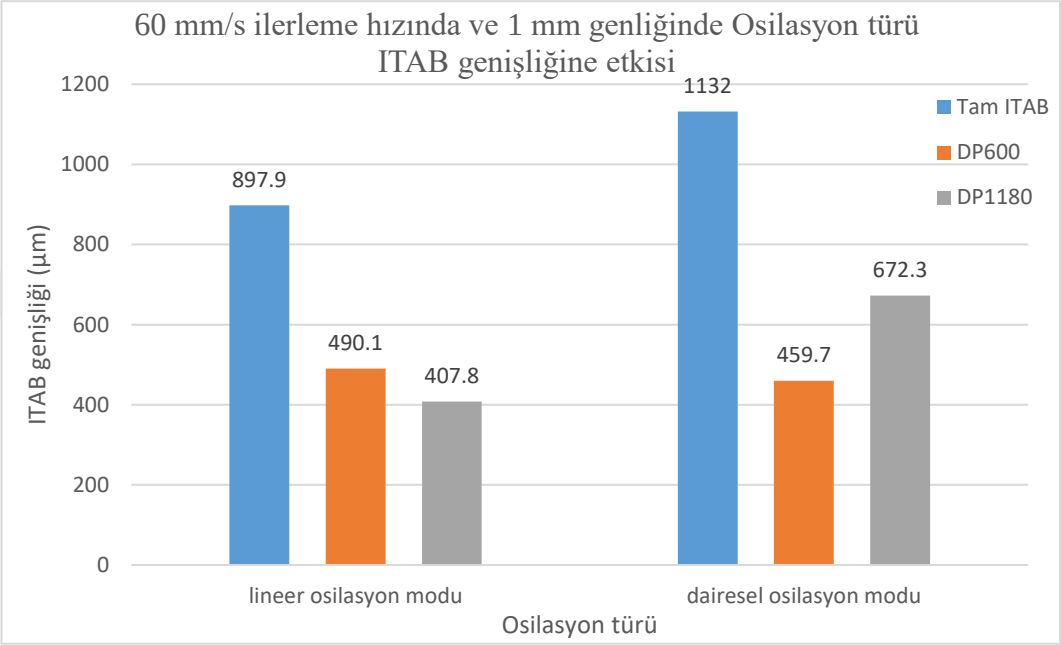
Şekil 4.35. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi

EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, "A4" deney numunesinde 978,1 µm ve "B4" deney numunesinde 834,6 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar EB genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.36. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A4” deney numunesinde 490,1 µm ve “B4” deney numunesinde 459,7 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A4” deney numunesinde 407,8 µm ve “B4” deney numunesinde 672,3 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A4” deney numunesinde 897,9 µm ve “B4” deney numunesinde 1132 µm’dir.

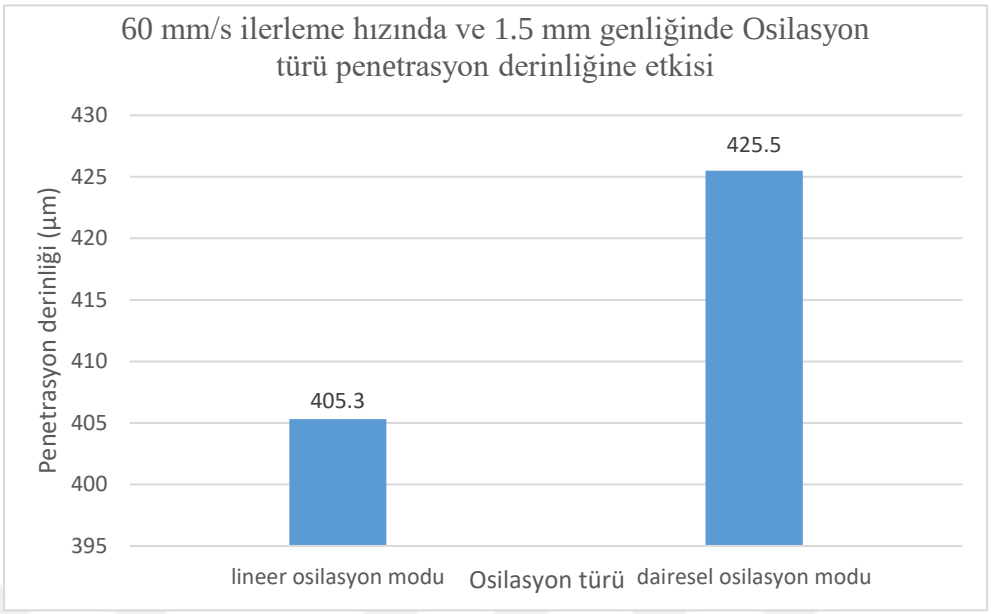


Şekil 4.37. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir.

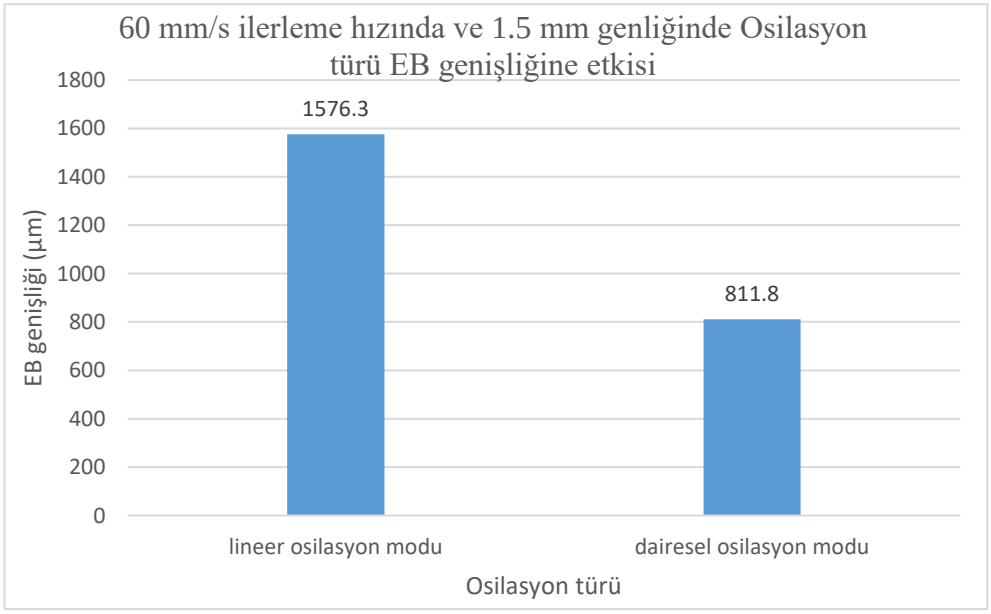
“A5” ve “B5” deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir. “A5” deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve “B5” deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

Penetrasyon derinliği incelemesinde, “A5” ve “B5” deney numunelerinde yeterli penetrasyon sağlanmamıştır. Penetrasyon derinliği “A5” deney numunesinde 405,3 µm ve “B5” deney numunesinde 425,5 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde yetersiz penetrasyon gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, dairesel osilasyon türünde daha derin penetrasyon elde edilmiştir.



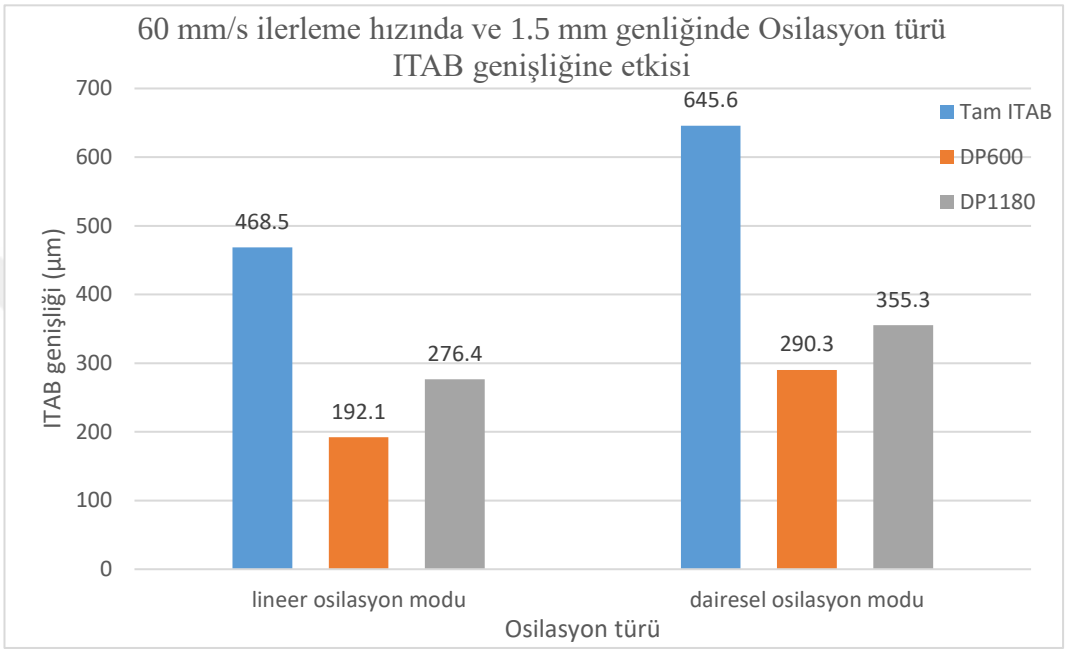
Şekil 4.38. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1.5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi

EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, "A5" deney numunesinde 1576,3 µm ve "B5" deney numunesinde 811,8 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha dar EB genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.39. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A5” deney numunesinde 192,1 µm ve “B5” deney numunesinde 290,3 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A5” deney numunesinde 276,4 µm ve “B5” deney numunesinde 355,3 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A5” deney numunesinde 468,5 µm ve “B5” deney numunesinde 645,6 µm’dir.

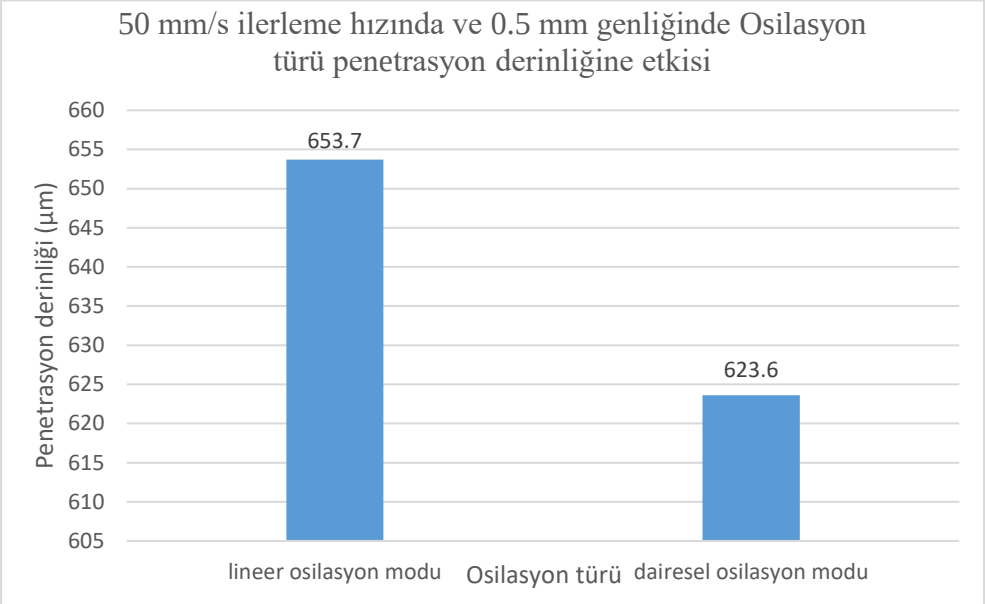


Şekil 4.40. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi

Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir.

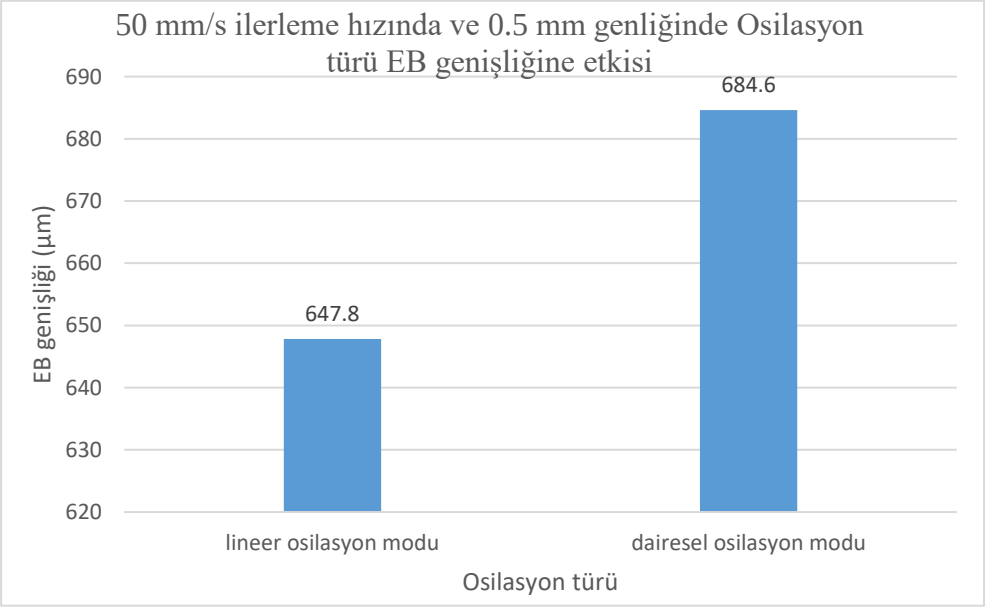
“A8” ve “B8” deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 50 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak bölgesinin geometrisine etkisi incelenmiştir. “A8” deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve “B8” deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

Penetrasyon derinliği incelemesinde, “A8” deney numunesinde 653,7 µm ve “B8” deney numunesinde 623,6 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Lineer osilasyon türünde daha derin penetrasyon elde edilmiştir.



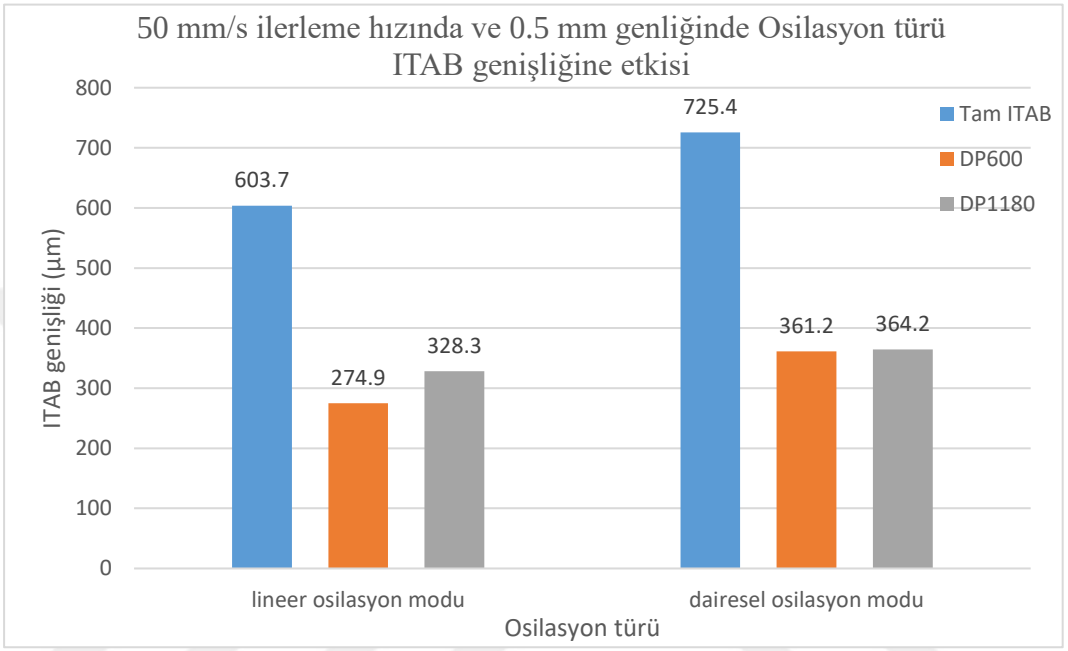
Şekil 4.41. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü penetrasyon derinliğine etkisi

EB genişlikleri incelemesinde ölçülen değerler, "A8" deney numunesinde 647,8 µm ve "B8" deney numunesinde 684,6 µm olarak tespit edilmiştir. Ölçülen değerlere göre, 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar EB genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.42. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü EB genişliğine etkisi

ITAB bölgesi incelendiğinde DP600 ITAB genişlikleri “A8” deney numunesinde 274,9 µm ve “B8” deney numunesinde 361,2 µm’dir. DP1180 ITAB genişlikleri “A8” deney numunesinde 328,3 µm ve “B8” deney numunesinde 364,2 µm’dir. ITAB Tam genişlikleri ise “A8” deney numunesinde 603,7 µm ve “B8” deney numunesinde 725,4 µm’dir.



Şekil 4.43. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü ITAB genişliğine etkisi

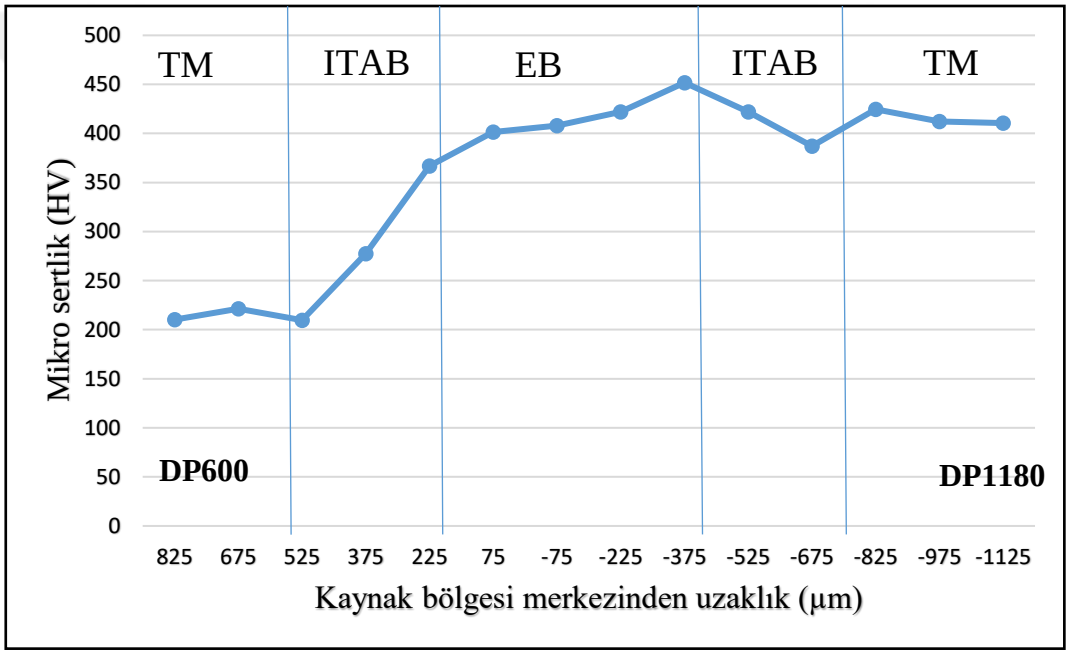
Ölçülen değerlere göre, 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir.

4.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde fiber lazer kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin ölçülen mikro sertlik değerleri yorumlanmıştır. Mikro sertlik grafiklerinde EB, ITAB, TM bölgeleri işaretlenmiş, bölgelerin sınırlarının tespitinde kaynak geometrisi değerlerinden de yararlanılmıştır.

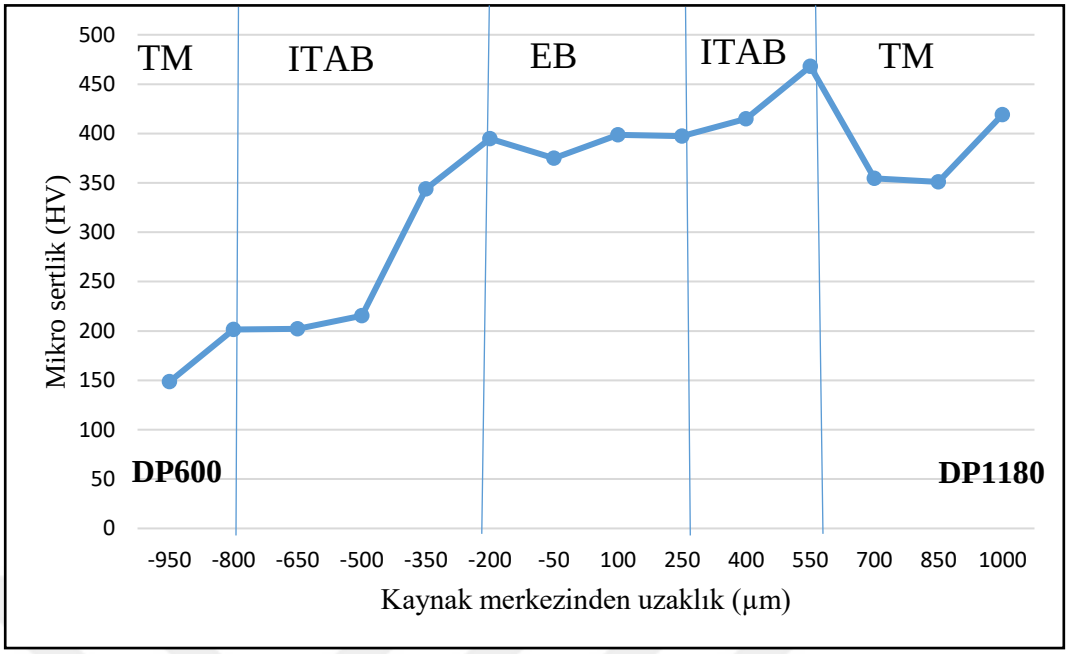
4.2.1. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda ilerleme hızın mikro sertliğine etkisi

"A1", "A2" ve "A8" deney numuneleri lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanarak sabit genlikte (0,5 mm) parametresi ile ilerleme hızın değişimi mikro sertlik değerlerine etkisini incelenmiştir.



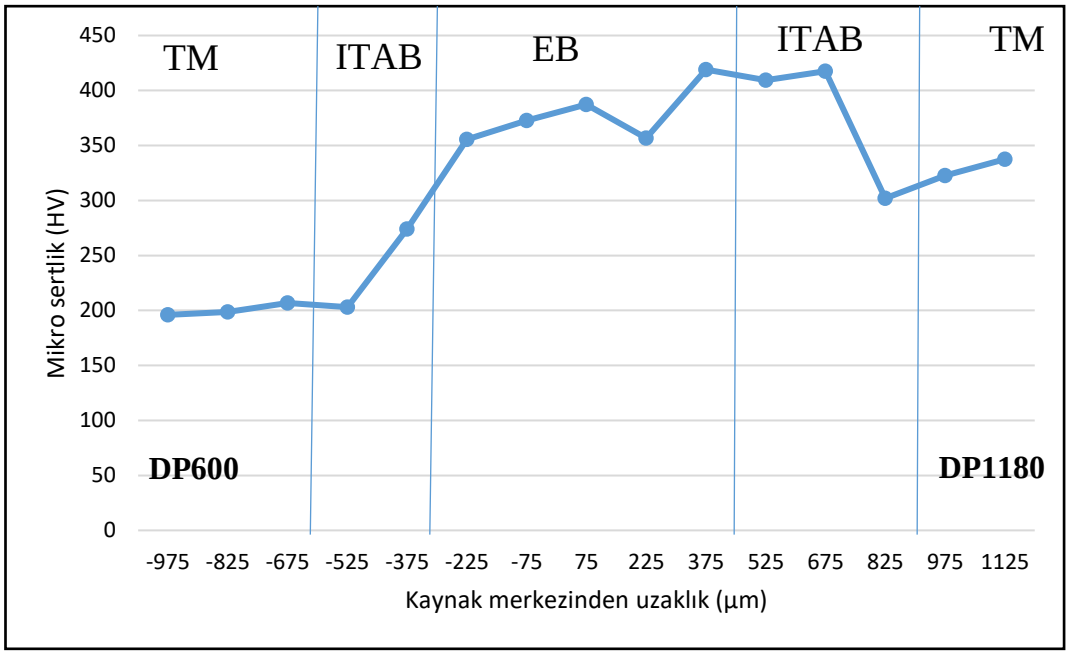
Şekil 4.44. "A1" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

"A1" deney numunesinde EB bölgesindeki martenzit yapısından dolayı, TM bölgesine kıyasla sertlik değerleri yüksek gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 420,75 $HV_{0,05.}$ ITAB bölgesinde, EB bölgesine yakın kısımlarda sertlik değerlerinde başlangıçta bir artış, ardından kaynak noktasından uzaklaştıkça sertlikte bir düşüş gözlemlenmiştir. ITAB ortalama sertlik değeri 363,37 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.45. "A2" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

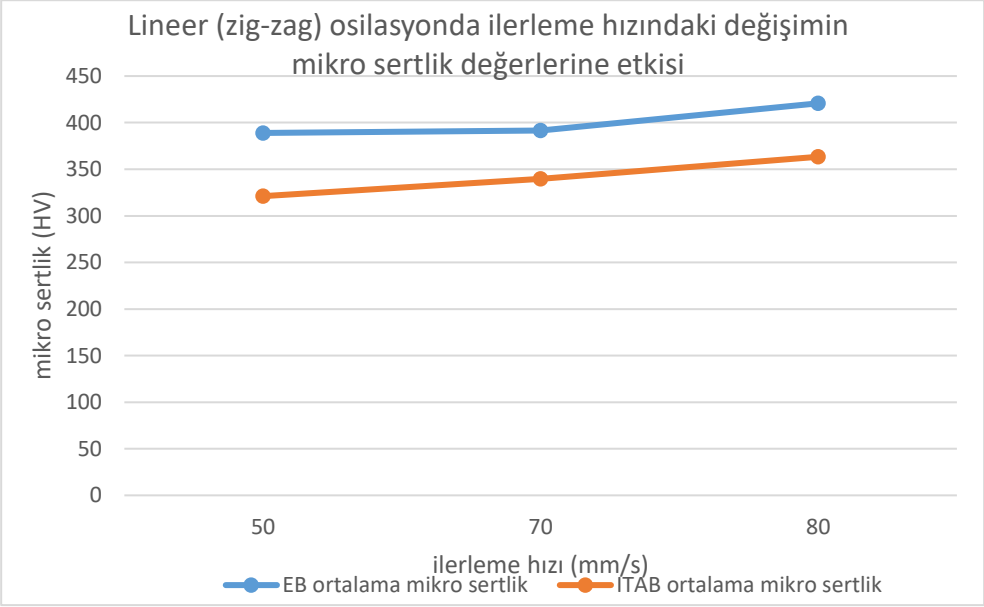
"A2" deney numunesinde EB bölgesindeki martenzit yapısından dolayı, TM bölgesine kıyasla sertlik değerleri yüksek gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 391,47 $HV_{0,05}$ ITAB bölgesinde, ITAB ortalama sertlik değeri 363,37 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.46. "A8" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

“A8” deney numunesinde, EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 388,96 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde, ITAB ortalama sertlik değeri 321,14 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.

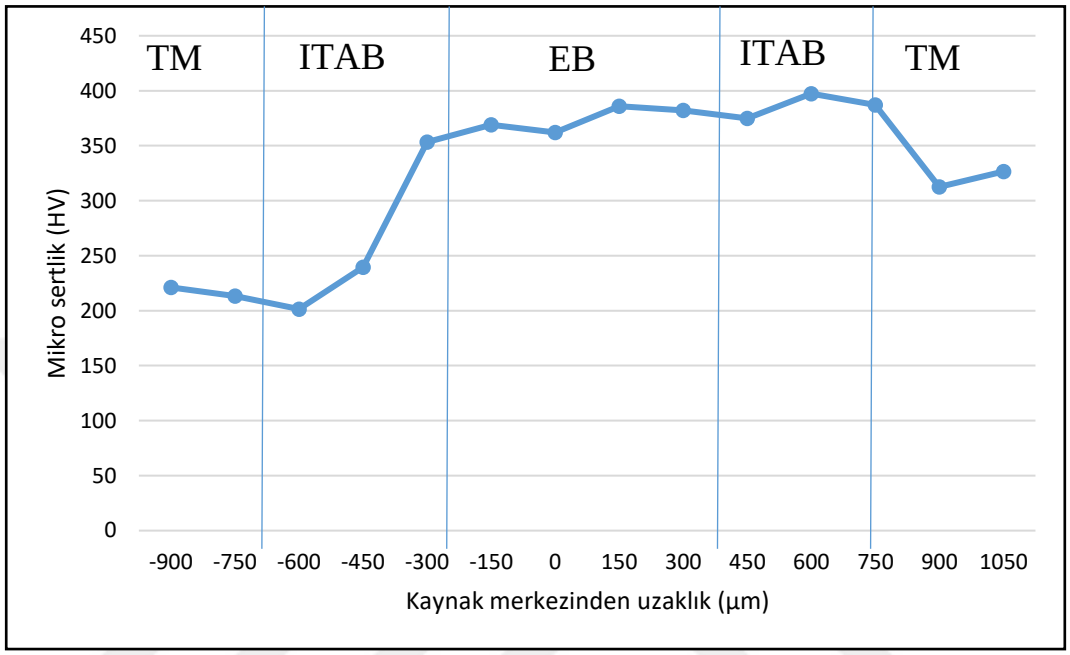
“A1”, “A2” ve “A8” deney numuneleri, lineer osilasyon türü kullanarak sabit genlik (0,5 mm) parametresi ile ilerleme hızın değişimi mikro sertlik değerlerine etkisini incelenmiştir. “A1” deney numunesinde İlerleme hızı 80 mm/s, “A2” deney numunesinde İlerleme hızı 70 mm/s ve “A8” deney numunesinde İlerleme hızı 50 mm/s parametreleri kullanılmıştır. EB sertlik ortalamaları “A1” deney numunesi için 420,75 $HV_{0,05}$, “A2” deney numunesi için 391,47 $HV_{0,05}$, “A8” deney numunesi için 388,96 $HV_{0,05}$ dir. Ölçülen değerlere göre artan ilerleme hızı ile daha düşük EB ortalama mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. ITAB bölgesinde mikro sertlik ortalamaları “A1” deney numunesi için 363,37 $HV_{0,05}$, “A2” deney numunesi için 339,76 $HV_{0,05}$, “A8” deney numunesi için 321,14 $HV_{0,05}$ dir. Ölçülen değerler genel olarak ilerleme hızıyla orantılıdır. “A1” numunesinde en yüksek, “A2” numunesinde yüksek ve “A8” numunesinde en düşük ITAB mikro sertlik ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 4.47. Lineer (zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi

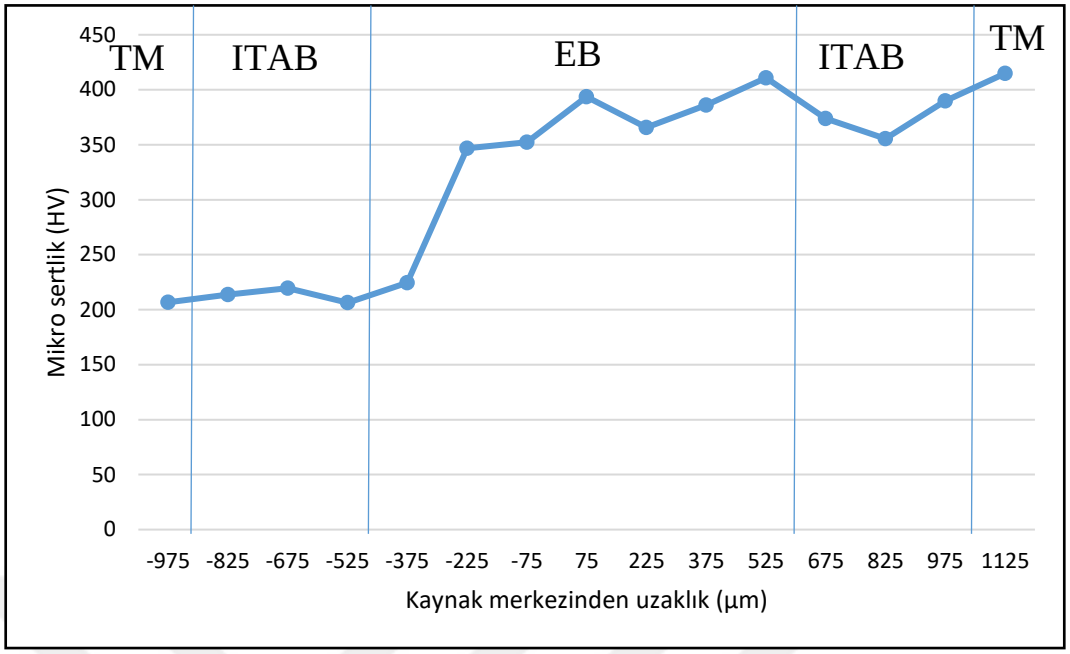
4.2.2. Lineer (zig-zag) osilasyon modunda Genliğin mikro sertliğine etkisi

"A3", "A4" ve "A5" deney numuneleri lineer (zig-zag) osilasyon türü kullanarak eşit ilerleme hızı (60 mm/s) parametresi ile genlik değişimi mikro sertlik değerlerine etkisini incelenmiştir.



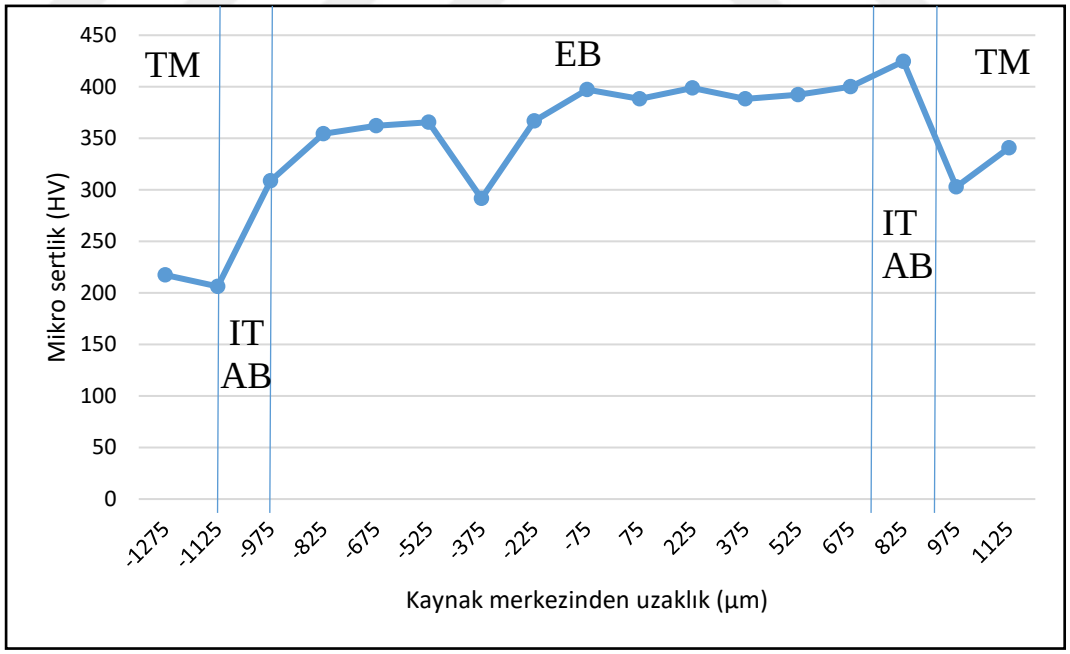
Şekil 4.48. "A3" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

"A3" deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 374,85 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 325,65 $HV_{0,05}$olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.49. "A4" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

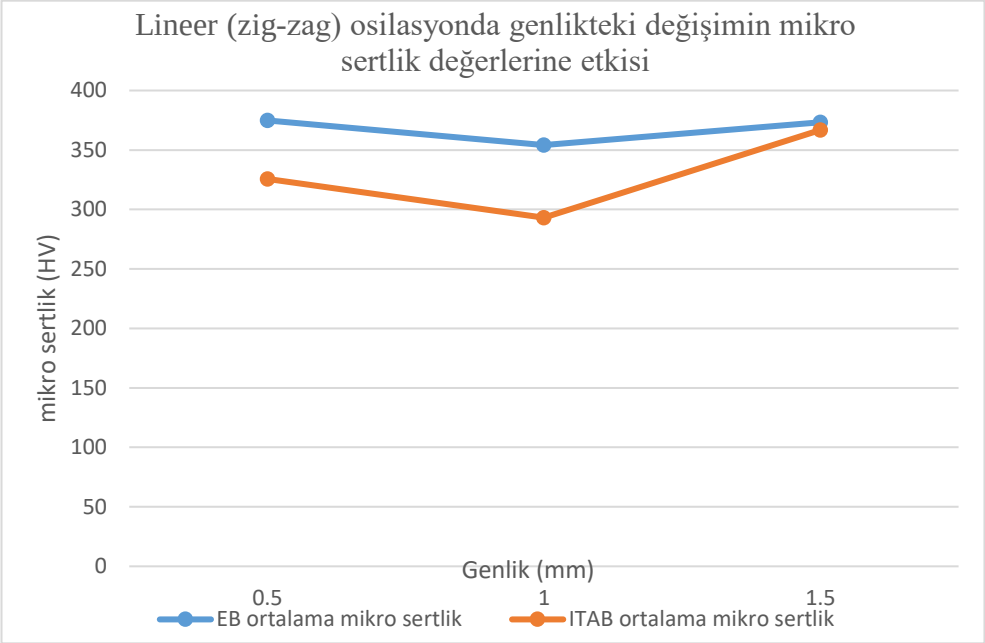
"A4" deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 354,15 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 293,12 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.50. "A5" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

“A5” deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 373,26 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 366,8 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.

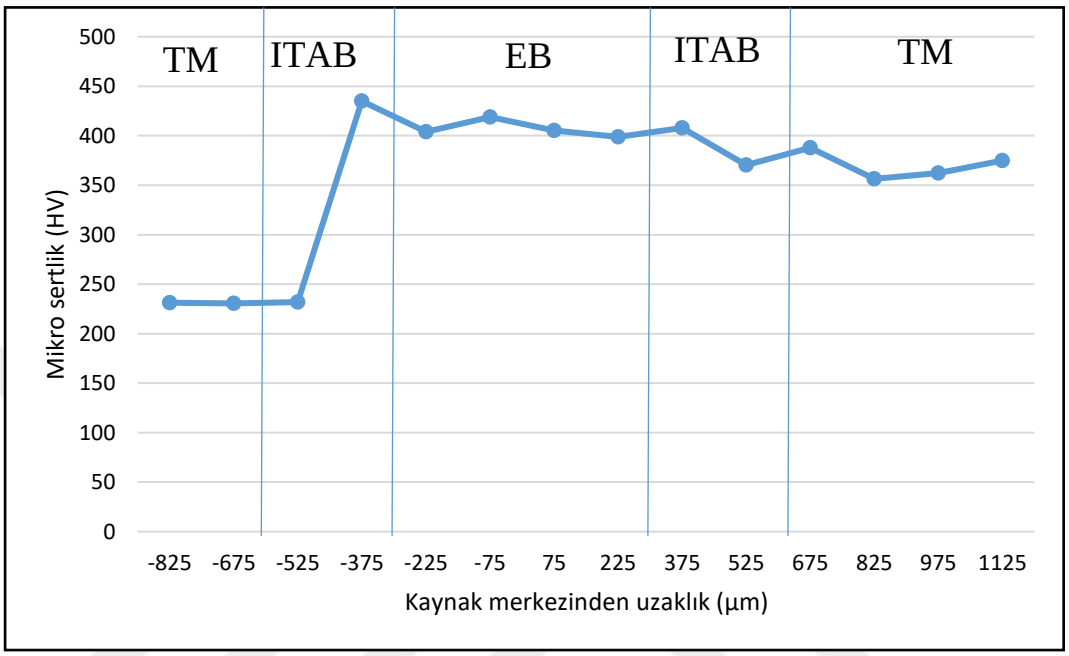
“A3”, “A4” ve “A5” deney numuneleri lineer osilasyon türü kullanarak eşit ilerleme hızı (60 mm/s) parametresi ile genlik değişimi mikro sertlik değerlerine etkisini incelenmiştir. “A4” deney numunesinde Genlik 1 mm, “A5” deney numunesinde Genlik 1,5 mm ve “A3” deney numunesinde Genlik 0,5 mm parametreleri kullanılmıştır. EB mikro sertlik ortalamaları “A3” deney numunesi için 374,85 $HV_{0,05}$, “A4” deney numunesi için 354,15 $HV_{0,05}$ ve “A5” deney numunesi için 373,26 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesinde mikro sertlik ortalamaları “A3” deney numunesi için 325,65 $HV_{0,05}$, “A4” deney numunesi için 293,12 $HV_{0,05}$ ve “A5” deney numunesi için 366,8 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.51. Lineer (zig-zag) osilasyonda genlikteki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi

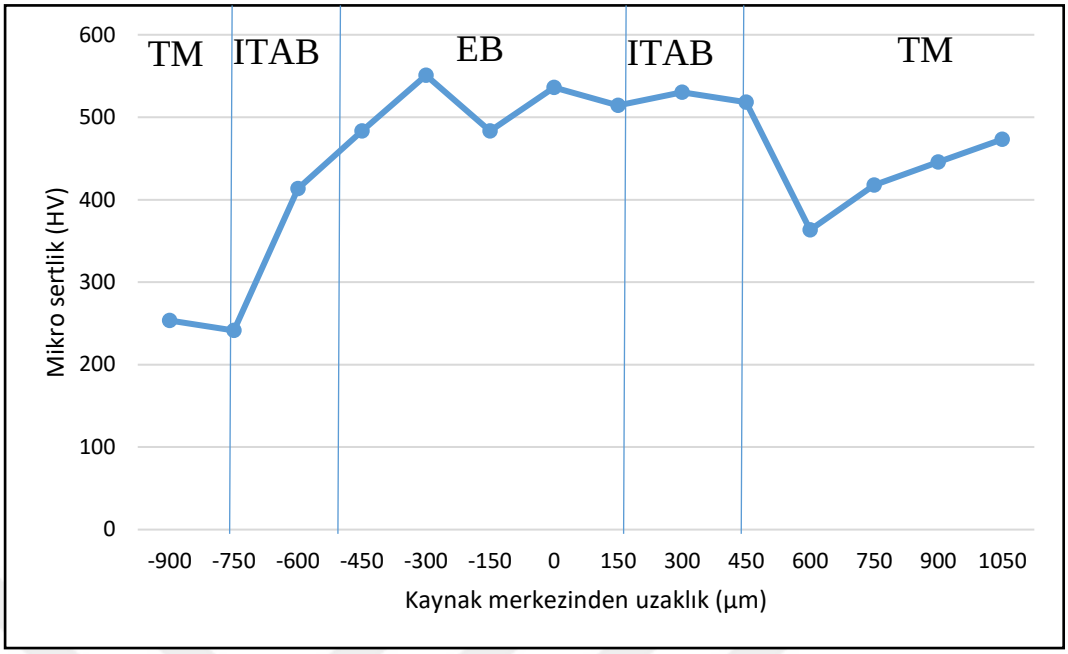
4.2.3. Dairesel osilasyon modunda ilerleme hızın kaynak mikro sertliğine etkisi

"B1", "B2" ve "B8" deney numunelerinde, dairesel osilasyon türü kullanılarak sabit genlik (0,5 mm) parametresi ile ilerleme hızındaki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi incelenmiştir.



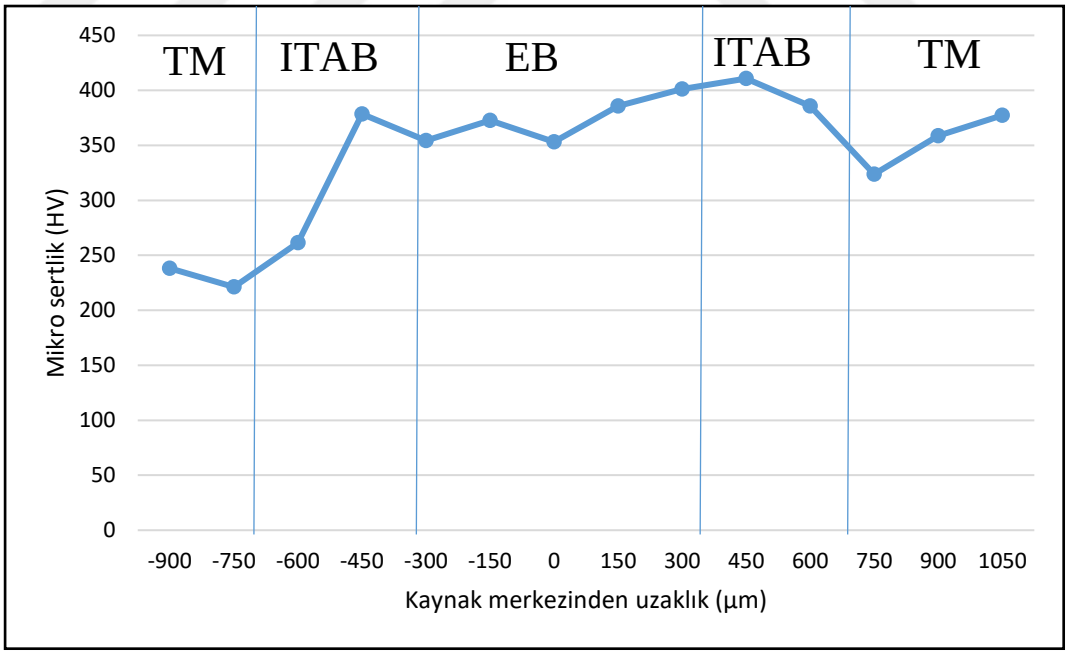
Şekil 4.52. "B1" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

"B1" deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 406,75 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 361,25 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.53. "B2" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

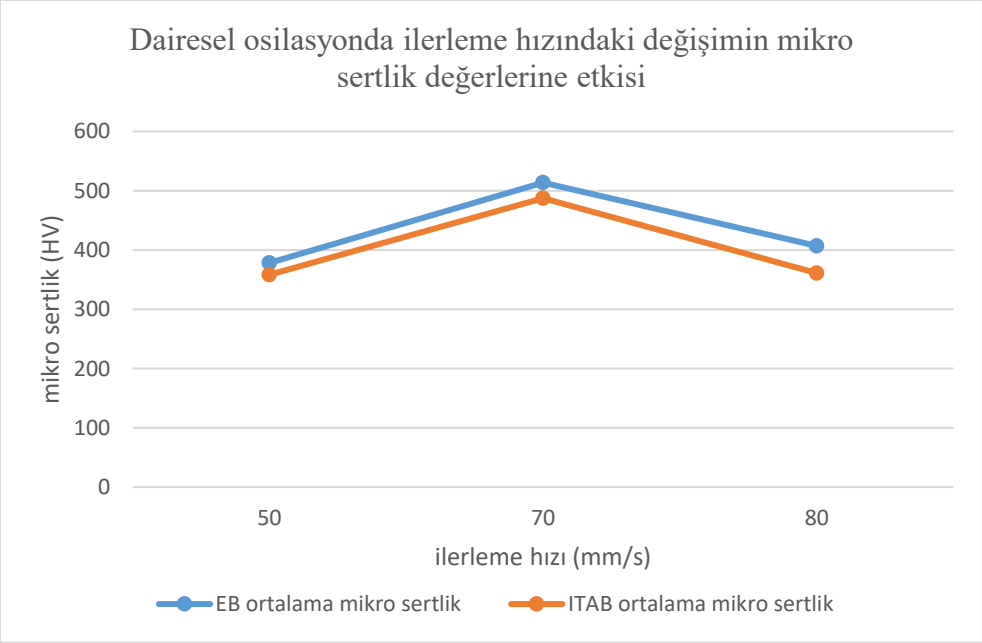
"B2" deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 513,66 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 487,3 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.54. "B8" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

“B8” deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 378,28 $HV_{0,05.}$ ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 358,24 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.

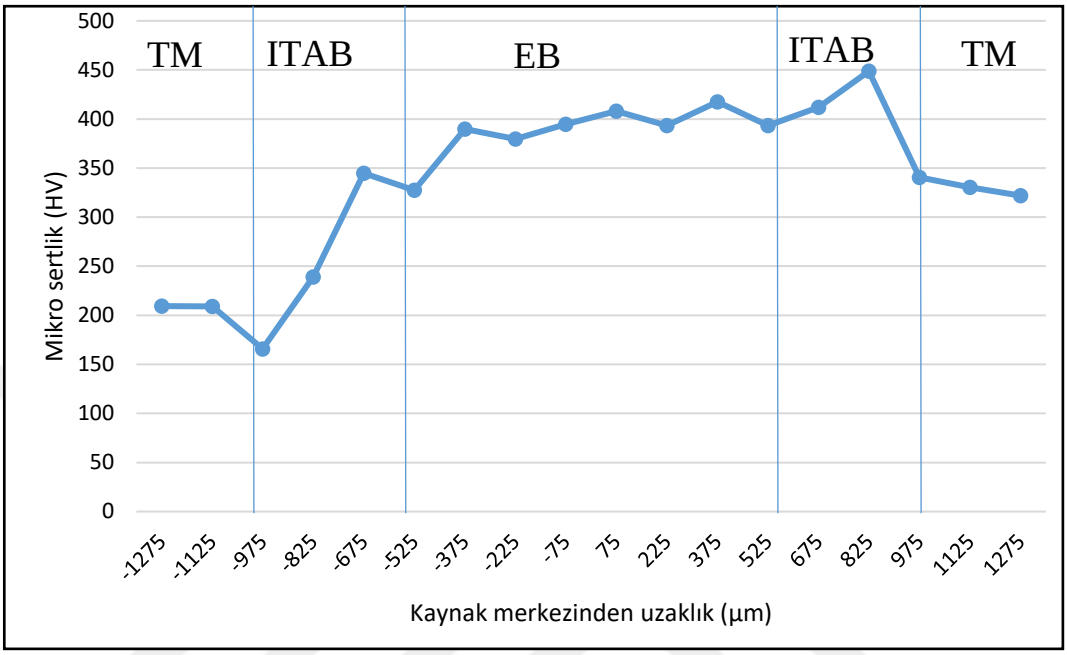
“B1”, “B2” ve “B8” Deney numuneleri Dairesel osilasyon türü kullanılarak sabit genlikte (0,5 mm) parametresi ile ilerleme hızın değişimi mikro sertlik değerlerine etkisini incelenmiştir. “B1” deney numunesinde İlerleme hızı 80 mm/s, “B2” deney numunesinde İlerleme hızı 70 mm/s ve “B8” deney numunesinde İlerleme hızı 50 mm/s parametreleri kullanılmıştır. EB sertlik ortalamaları “B1” deney numunesi için 406,75 $HV_{0,05}$, “B2” deney numunesi için 513,66 $HV_{0,05}$ ve “B8” deney numunesi için 378,28 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesinde mikro sertlik ortalamaları “B1” deney numunesi için 361,25 $HV_{0,05,}$ “B2” deney numunesi için 487,3 $HV_{0,05}$ ve “B8” deney numunesi için 358,24 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.55. Dairesel osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi

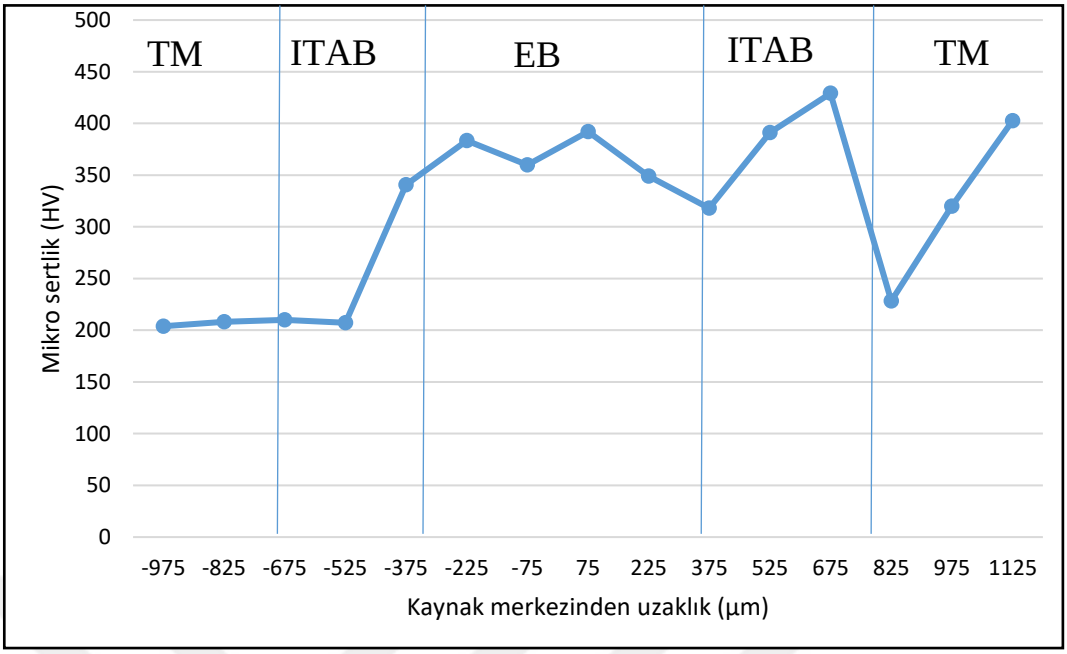
4.2.4. Dairesel osilasyon modunda Genliğin kaynak mikro sertliğine etkisi

"B3", "B4" ve "B5" deney numunelerinde, dairesel osilasyon türü kullanılarak eşit ilerleme hızı (60 mm/s) parametresi ile genlik değişiminin mikro sertlik değerlerine etkisi incelenmiştir.



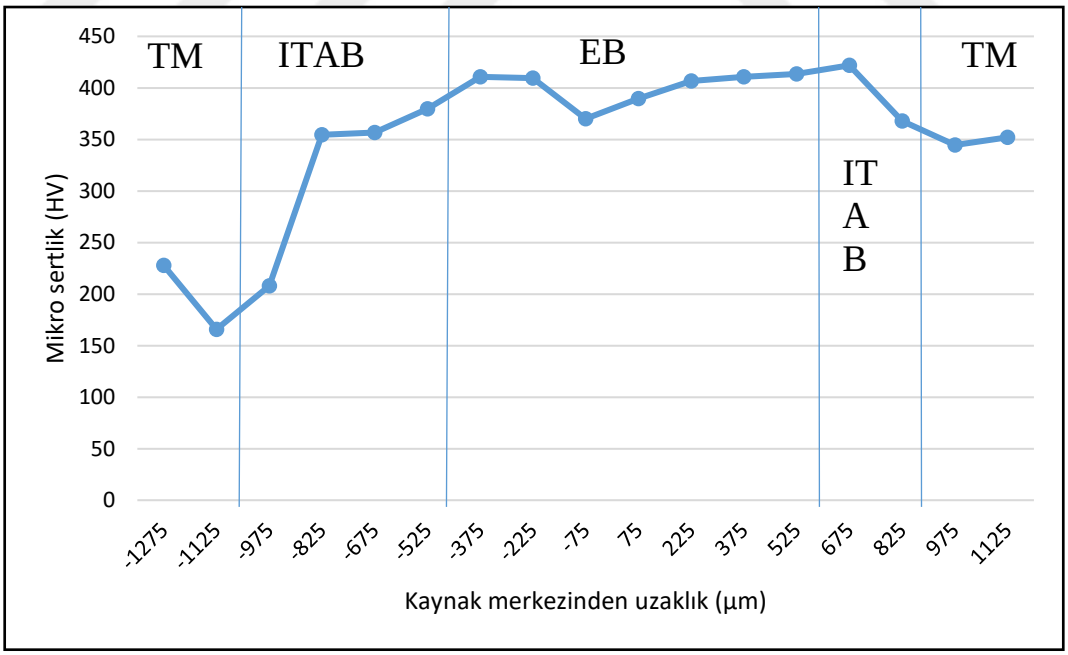
Şekil 4.56. "B3" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

"B3" deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 396,7 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 325,47 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.57. "B4" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

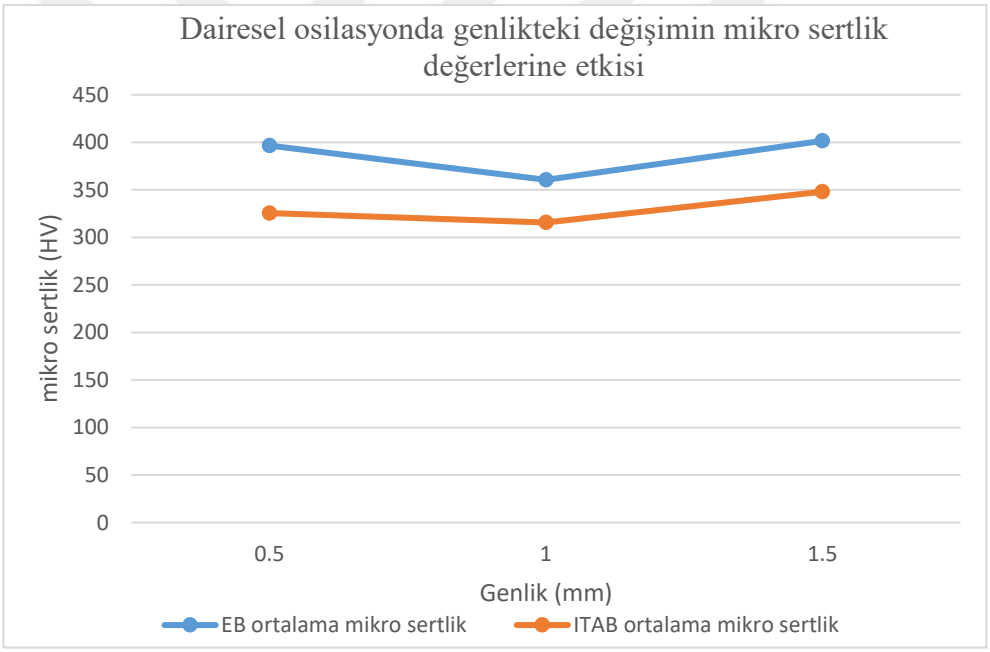
"B4" deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 360,52 $HV_{0,05}$. ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 315,64 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.58. "B5" deney numunesi kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

“B5” deney numunesinde EB bölgesindeki sertlik değerleri, TM bölgesine kıyasla daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. EB bölgesinde tespit edilen ortalama sertlik değeri 401,54 $HV_{0,05.}$ ITAB bölgesinde ITAB ortalama sertlik değeri 348,06 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür.

“B4”, “B5” ve “B3” deney numuneleri Dairesel osilasyon türü kullanarak eşit ilerleme hızı (60 mm/s) parametresi ile genlik değişimi mikro sertlik değerlerine etkisini incelenmiştir. “B3” deney numunesinde Genlik 0,5 mm, “B4” deney numunesinde Genlik 1 mm ve “B5” deney numunesinde Genlik 1,5 mm parametreleri kullanılmıştır. EB mikro sertlik ortalamaları “B3” deney numunesi için 396,7 $HV_{0,05}$, “B4” deney numunesi için 360,52 $HV_{0,05}$, “B5” deney numunesi için 401,54 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB mikro sertlik ortalamaları “B3” deney numunesi için 325,47 $HV_{0,05}$, “B4” deney numunesi için 315,64 $HV_{0,05}$ ve “B5” deney numunesi için 348,06 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir.



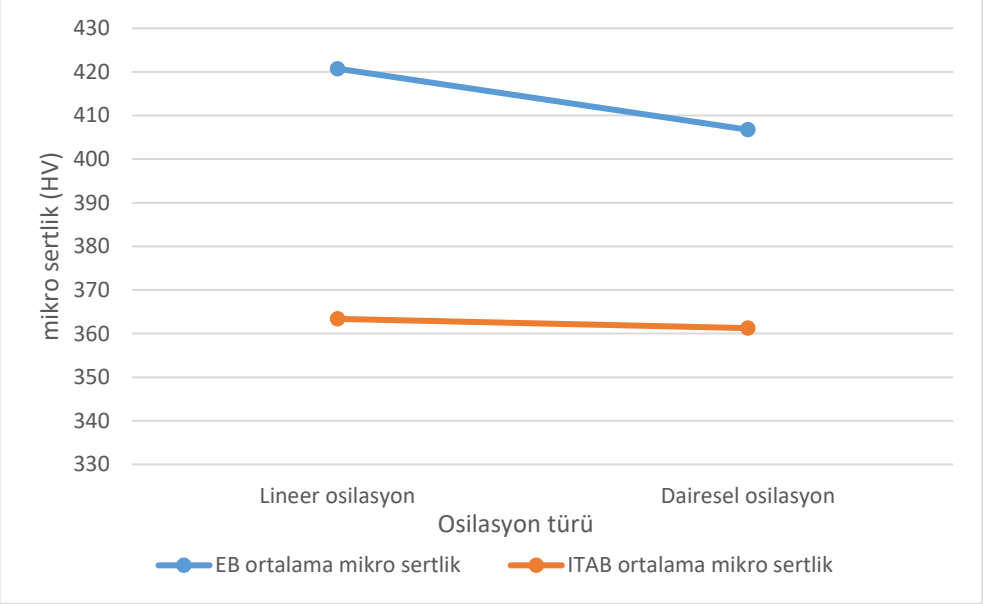
Şekil 4.59. Dairesel osilasyonda genlikteki değişimin mikro sertlik değerlerine etkisi

4.2.5. Osilasyon Türü kaynak mikro sertliğine etkisi

Mikrosertlik incelemelerinde, fiber lazer kaynak yönteminde Wobble head teknolojisi kullanılarak osilasyon türünün (Wobble modu) kaynak mikro sertliği üzerindeki etkisi son olarak araştırılmıştır.

"A1" ve "B1" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 80 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mikro sertliğine etkisi incelenmiştir. "A1" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B1" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

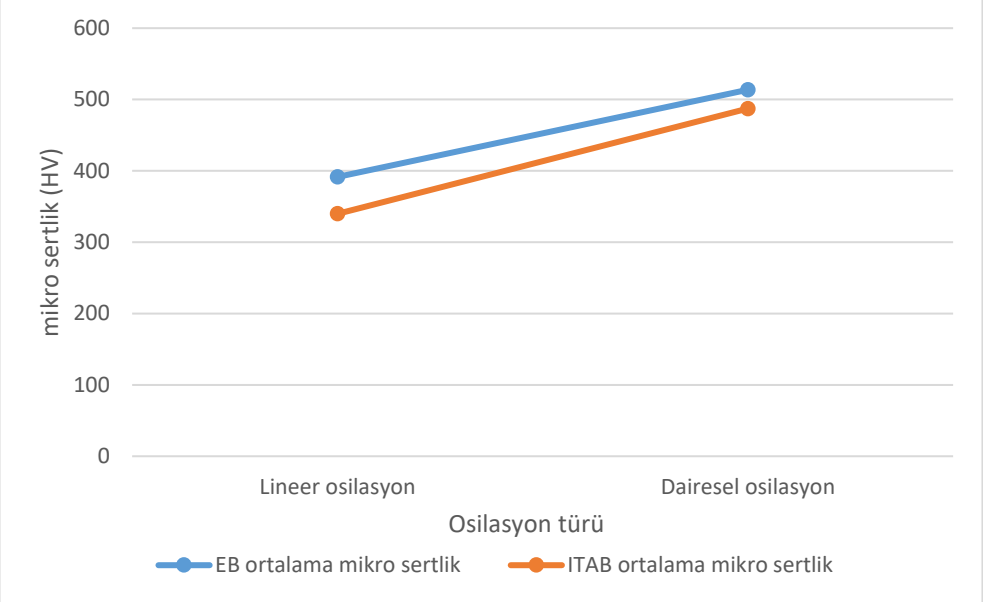
EB sertlik ortalamaları incelemesinde, "A1" deney numunesi için 420,75 $HV_{0,05}$ ve "B1" deney numunesi için 406,75 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki mikro sertlik ortalamaları ise "A1" deney numunesi için 363,37 $HV_{0,05}$ ve "B1" deney numunesi için 361,25 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 genliğinde lineer osilasyon türünde daha yüksek mikro sertlik ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 4.60. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi

"A2" ve "B2" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 70 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mikro sertliğine etkisi incelenmiştir. "A2" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B2" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

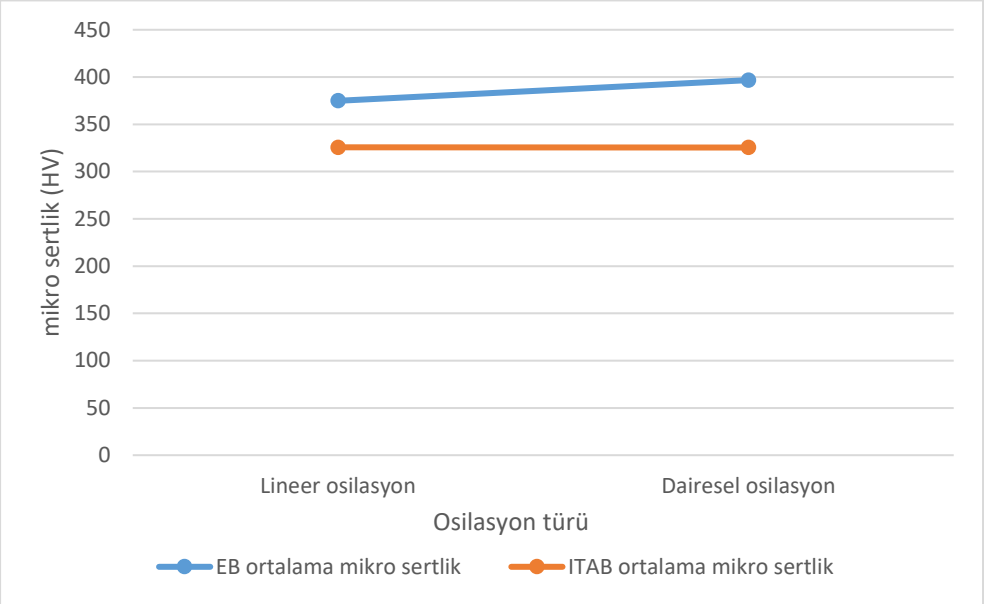
EB sertlik ortalamaları incelemesinde, “A2” deney numunesi için 391,47 $HV_{0,05}$ ve “B2” deney numunesi için 513,66 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki mikro sertlik ortalamaları ise “A2” deney numunesi için 339,76 $HV_{0,05}$ ve “B2” deney numunesi için 487,3 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek mikro sertlik ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 4.61. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi

“A3” ve “B3” deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mikro sertliğine etkisi incelenmiştir. “A3” deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve “B3” deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

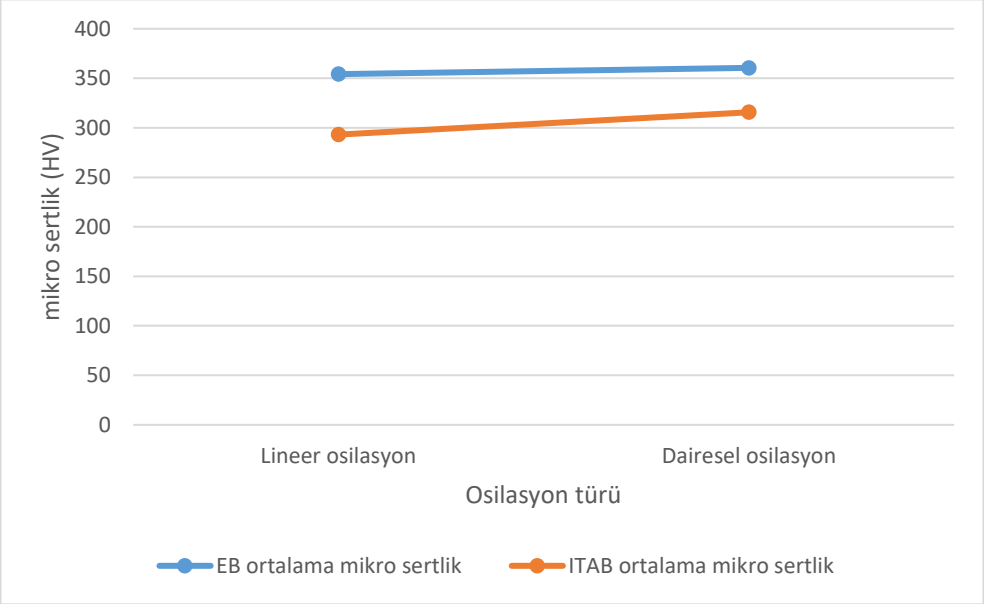
EB sertlik ortalamaları incelemesinde, “A3” deney numunesi için 374,85 $HV_{0,05}$ ve “B3” deney numunesi için 396,7 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki mikro sertlik ortalamaları ise “A3” deney numunesi için 325,65 $HV_{0,05}$ ve “B3” deney numunesi için 325,4 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek EB mikro sertlik ortalamaları elde edilmiştir. ITAB mikrosertlik ortalamaları ise birbirine yakın olmakla birlikte, lineer osilasyon türünde, dairesel osilasyon türüne kıyasla daha yüksek mikrosertlik ortalamaları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.62. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi

"A4" ve "B4" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mikro sertliğine etkisi incelenmiştir. "A4" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B4" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

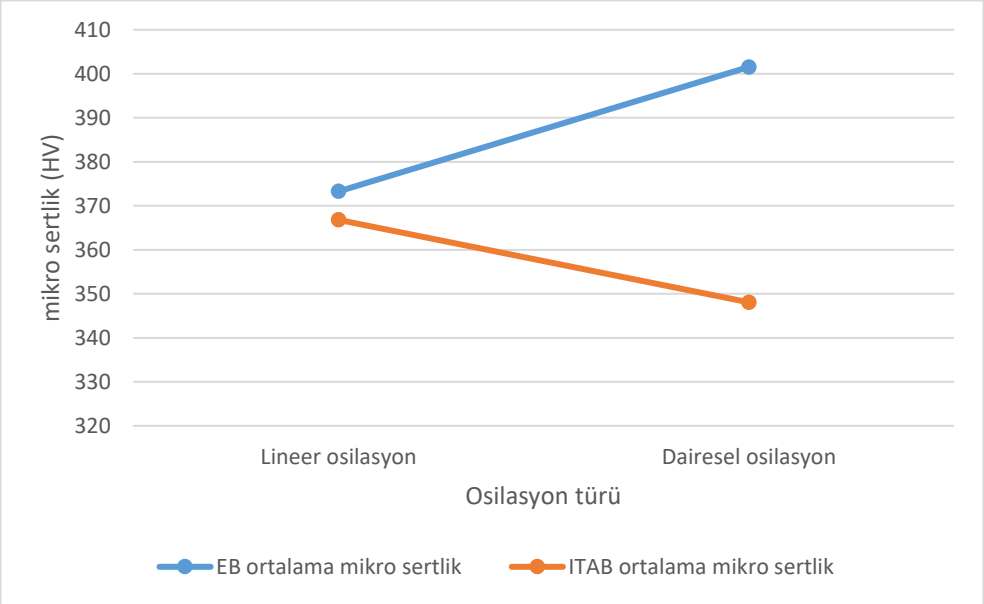
EB sertlik ortalamaları incelemesinde, "A4" deney numunesi için 354,15 $HV_{0,05}$ ve "B4" deney numunesi için 360,52 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki mikro sertlik ortalamaları ise "A4" deney numunesi için 293,12 $HV_{0,05}$ ve "B4" deney numunesi için 315,64 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek mikro sertlik ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 4.63. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi

"A5" ve "B5" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mikro sertliğine etkisi incelenmiştir. "A5" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B5" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

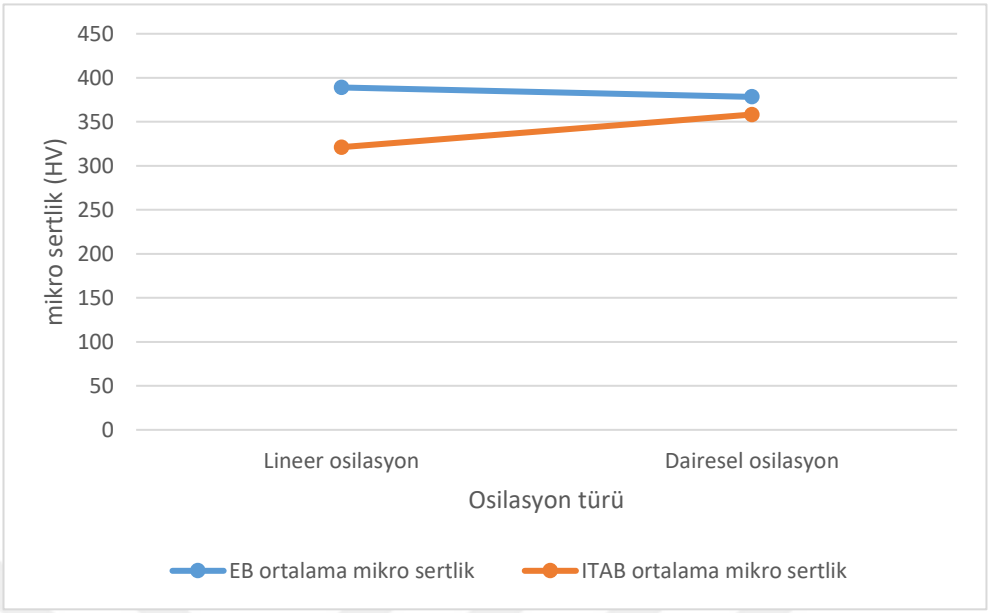
EB sertlik ortalamaları incelemesinde, "A5" deney numunesi için 373,26 $HV_{0,05}$ ve "B5" deney numunesi için 401,54 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki mikro sertlik ortalamaları ise "A5" deney numunesi için 366,8 $HV_{0,05}$ ve "B5" deney numunesi için 348,06 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde, dairesel osilasyon türü ile daha yüksek EB mikrosertlik ortalamaları elde edilmiştir. Bununla birlikte, lineer osilasyon türünde ITAB mikrosertlik ortalamalarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.64. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi

"A8" ve "B8" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 50 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mikro sertliğine etkisi incelenmiştir. "A8" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B8" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır.

EB sertlik ortalamaları incelemesinde, "A8" deney numunesi için 388,96 $HV_{0,05}$ ve "B8" deney numunesi için 378,28 $HV_{0,05}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki mikro sertlik ortalamaları ise "A8" deney numunesi için 321,14 $HV_{0,05}$ ve "B8" deney numunesi için 358,24 $HV_{0,05}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde, lineer osilasyon türünde daha yüksek EB mikrosertlik ortalamaları elde edilmiştir. Bunun aksine, dairesel osilasyon türü, ITAB mikrosertlik ortalamalarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



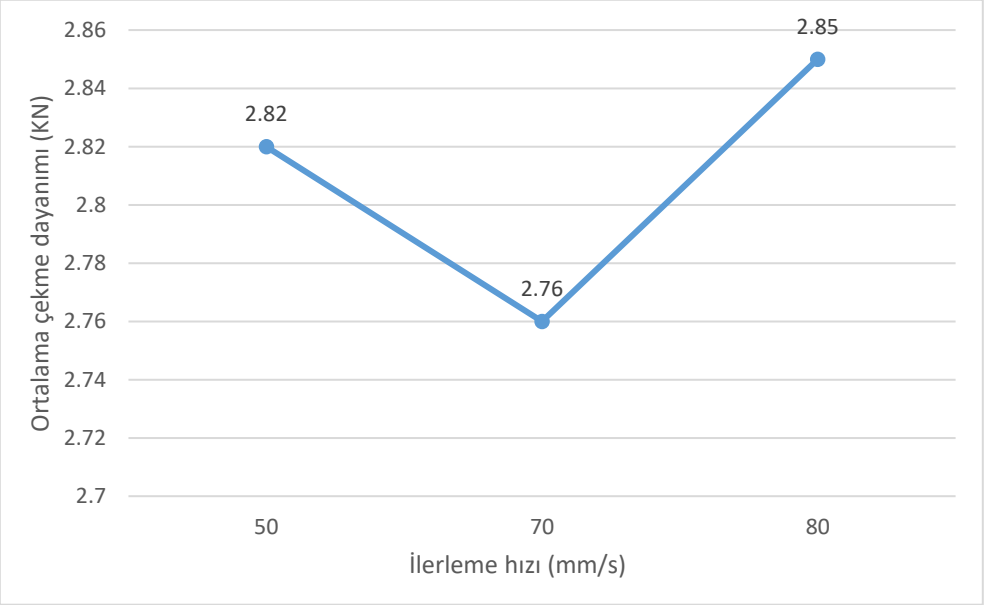
Şekil 4.65. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mikro sertliğine etkisi

4.3. Mekanik Dayanım İncelemeleri

Çalışmada 0,8 mm kalınlığında DP600 ile 1 mm kalınlığındaki DP1180 çeliklerinin fiber lazer kaynağında Wobble head teknolojisi kullanılarak ilerleme hızı (mm/s), genlik (mm) ve osilasyon türü mekanik dayanıma etkisi incelenmiştir.

4.3.1. Lineer (Zig-zag) osilasyon türünde ilerleme hızın mekanik dayanıma etkisi

Çalışma kapsamında ilk olarak "A1", "A2" ve "A8" deney numuneleri lineer (Zig-zag) osilasyon türü ile sabit lazer gücünde (1200 W), frekansta (100 Hz) ve genlikte (0,5 mm) üç farklı ilerleme hızında (50 mm/s, 70 mm/s ve 80 mm/s) denemeler yapılmış ve birleştirilen levhalardan alınan numuneler ile çekme testi gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri için tespit edilen ortalama çekme dayanımları "A1" deney numunesi için 2,85 KN, "A2" deney numunesi için 2,76 KN ve "A8" deney numunesi için 2,82 KN 'dur.

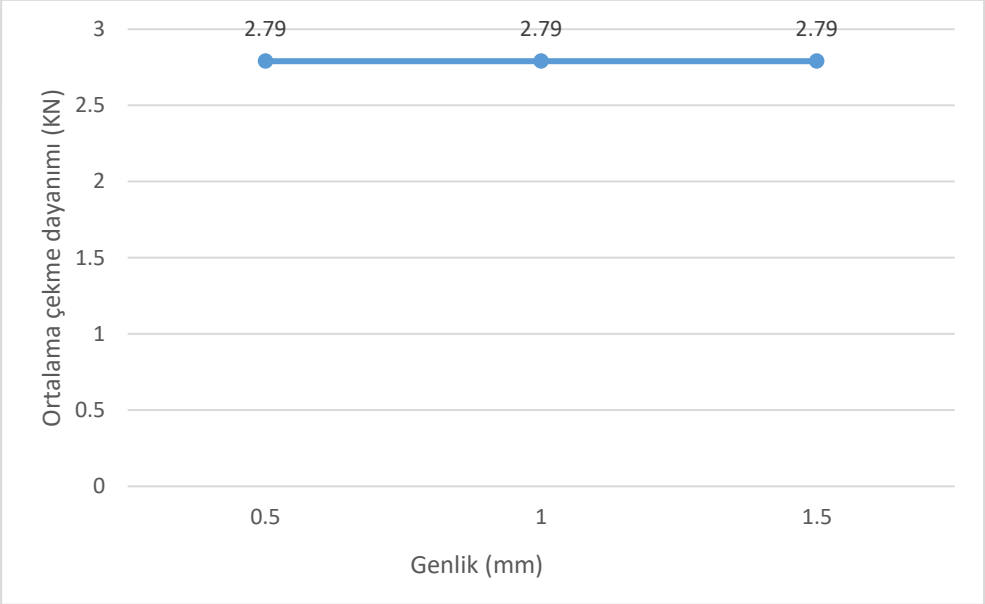


Şekil 4.66. Lineer (Zig-zag) osilasyonda ilerleme hızındaki değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisi

Ölçülen değerlere göre, kaynaklanmış levhaların çekme dayanımlarının tüm ilerleme hızı seviyelerinde DP600 baz metalinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek ilerleme hızlarında daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

4.3.2. Lineer (Zig-zag) osilasyon türünde genliğin mekanik dayanıma etkisi

Lineer (zig-zag) osilasyonda "A3", "A4" ve "A5" deney numuneleri yine sabit lazer gücünde (1500 W), frekansta (100 Hz) ve ilerleme hızında (60 mm/s) üç farklı genlikte (0 mm, 1 mm ve 1,5 mm) denemeler yapılmış ve birleştirilen levhalardan alınan numuneler ile çekme testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda, kaynaklanmış levhaların çekme dayanımlarının tüm genlik seviyelerinde DP600 baz metalinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Üç farklı genlikte aynı çekme dayanımının 2,79 kN olarak elde edildiği bulunmuştur.

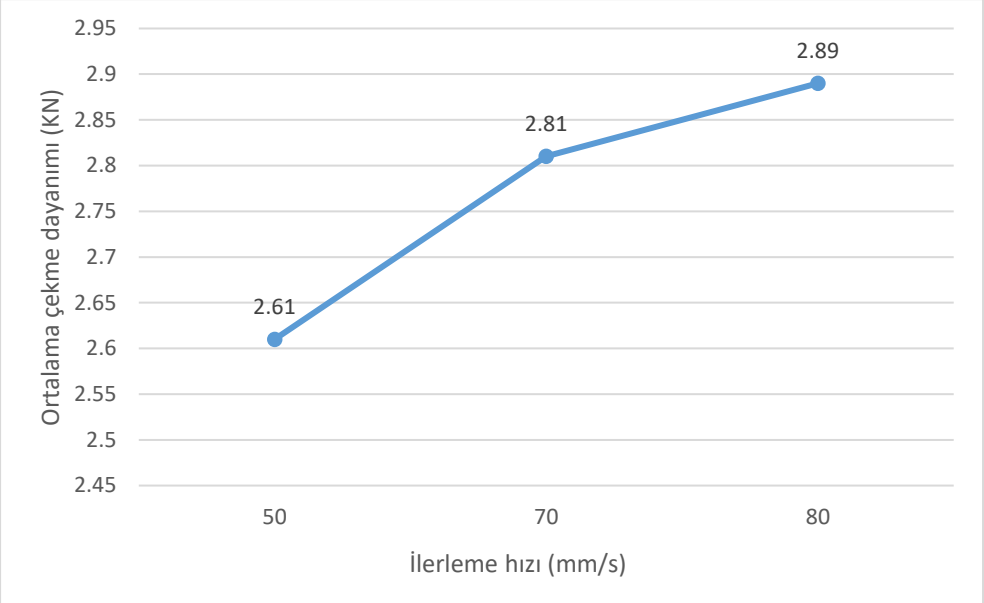


Şekil 4.67. Lineer (Zig-zag) osilasyonda genlik değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisi

4.3.3. Dairesel (Circular) osilasyon türünde ilerleme hızın mekanik dayanıma etkisi

Bu kapsamda ilk olarak "B1", "B2" ve "B8" deney numuneleri dairesel osilasyon türü ile sabit lazer gücünde (1200 W), frekansta (100 Hz) ve genlikte (0,5 mm) üç farklı ilerleme hızında (50 mm/s, 70 mm/s ve 80 mm/s) denemeler yapılmış ve birleştirilen levhalardan alınan numuneler ile çekme testi gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri için tespit edilen ortalama çekme dayanımları "B1" deney numunesi için 2,89 KN, "B2" deney numunesi için 2,81 KN ve "B8" deney numunesi için 2,61 KN 'dur. Yapılan testler sonucunda kaynaklanmış levhaların çekme dayanımlarının tüm ilerleme hızı seviyelerinde DP600 baz metalinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Artan ilerleme hızının ortalama çekme

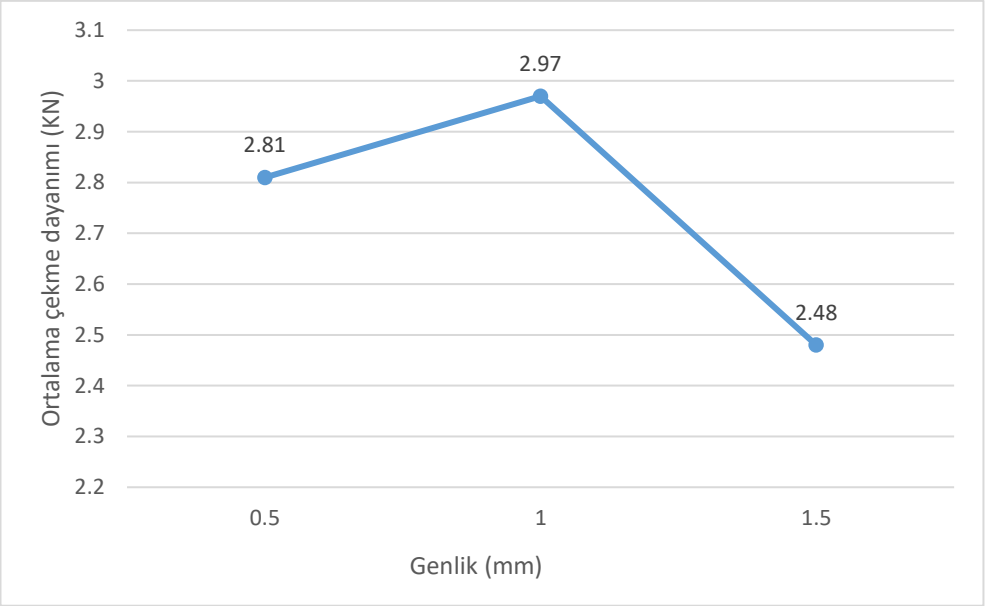
dayanımını (MPa) arttırdığı görülmüştür. En yüksek çekme dayanımının 2,89 KN ile 80 mm/s ilerleme hızında olduğu ölçülmüştür.



Şekil 4.68. Dairesel (Circular) osilasyonda ilerleme hızının çekme dayanımı üzerindeki etkisi

4.3.4. Dairesel (Circular) osilasyon türünde genliğin mekanik dayanıma etkisi

Dairesel (Circular) osilasyonda "B3", "B4" ve "B5" deney numuneleri yine sabit lazer gücünde (1500 W), frekansta (100 Hz) ve ilerleme hızında (60 mm/s) üç farklı genlikte (0 mm, 1 mm ve 1,5 mm) denemeler yapılmış ve birleştirilen levhalardan alınan numuneler ile çekme testi gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri için tespit edilen ortalama çekme dayanımları "B3" deney numunesi için 2,61 KN, "B4" deney numunesi için 2,81 KN ve "B5" deney numunesi için 2,89 KN 'dur. Yapılan testler sonucunda, kaynaklanmış levhaların çekme dayanımlarının tüm genlik seviyelerinde DP600 baz metalinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Düşük genliklerde daha yüksek çekme dayanımı elde edilirken, en yüksek çekme dayanımının 2,97 kN ile 1 mm genlikte olduğu gözlemlenmiştir.



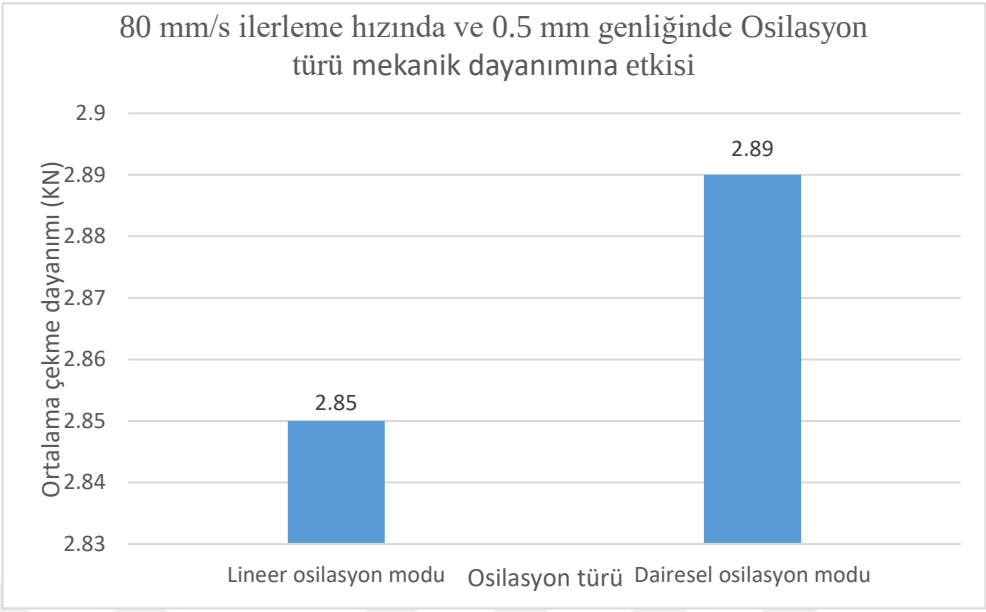
Şekil 4.69. Dairesel (Circular) osilasyonda genlik değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkisi

4.3.5. Osilasyon türü mekanik dayanıma etkisi

Çalışmada, Fiber lazer kaynak yönteminde Wobble head teknolojisi kullanılarak osilasyon türünün (Wobble modu) kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir.

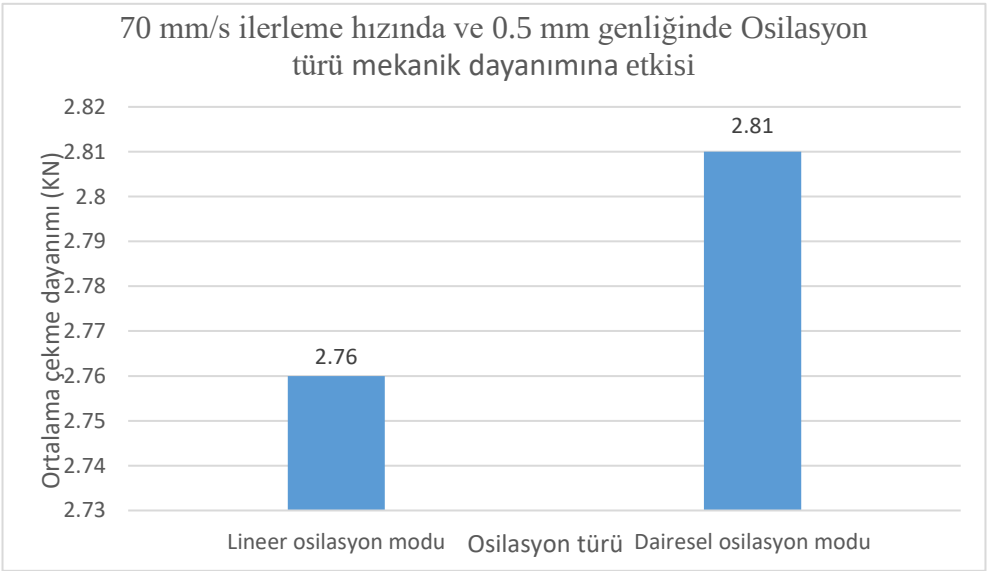
"A1" ve "B1" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 80 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir. "A1" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B1" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır. Mekanik dayanım incelemesinde ölçülen değerler, "A1" deney numunesinde 2,85 KN ve "B1" deney numunesinde 2,89 KN olarak tespit edilmiştir.

Ölçülen değerlere göre, 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek çekme dayanım ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 4.70. 80 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi

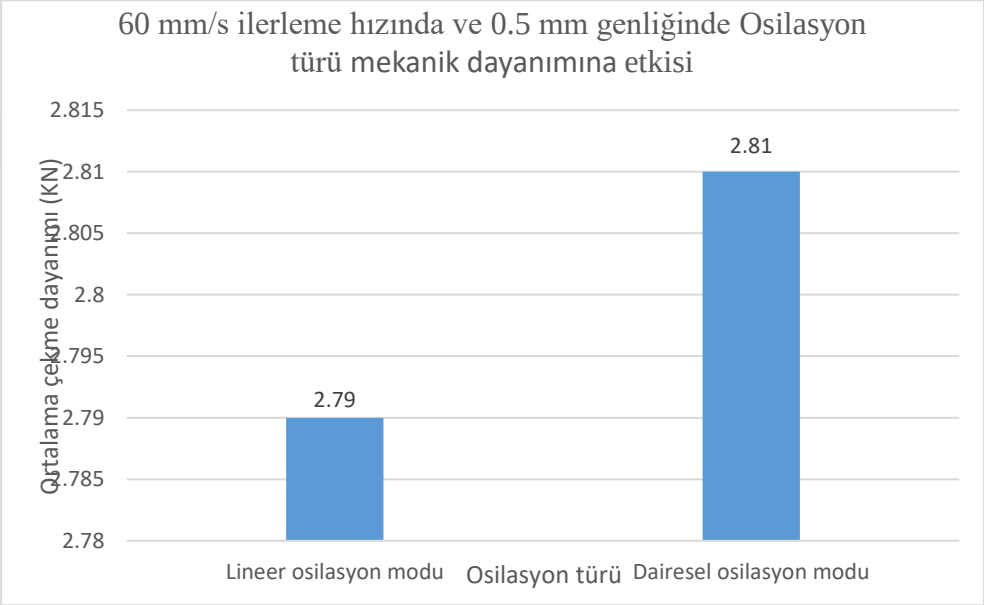
"A2" ve "B2" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 70 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir. "A2" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B2" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır. Mekanik dayanım incelemesinde ölçülen değerler, "A2" deney numunesinde 2,76 KN ve "B2" deney numunesinde 2,81 KN olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.71. 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi

Ölçülen değerlere göre, 70 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek çekme dayanım ortalamaları elde edilmiştir.

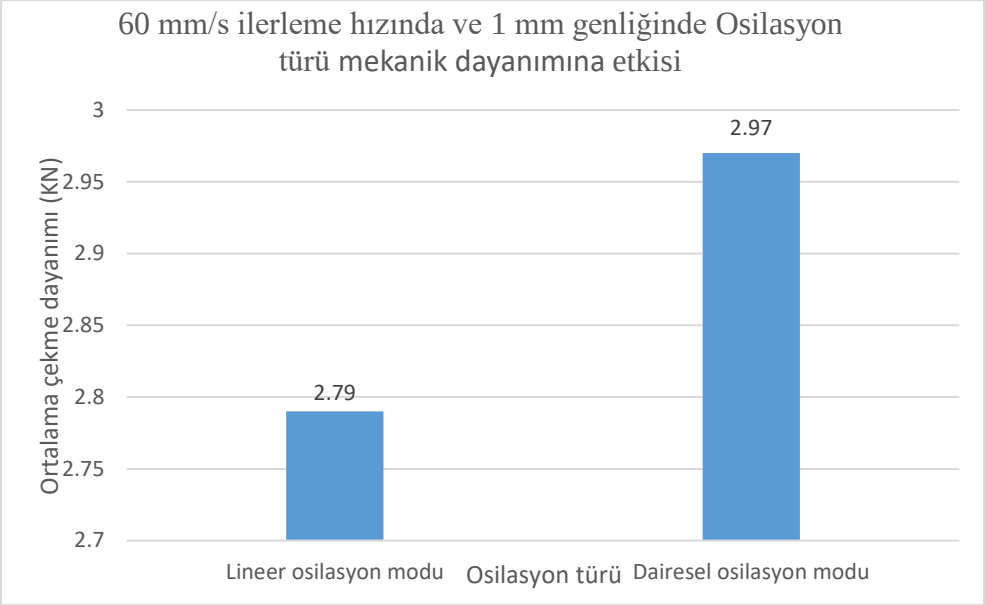
"A3" ve "B3" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir. "A3" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B3" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır. Mekanik dayanım incelemesinde ölçülen değerler, "A3" deney numunesinde 2,79 KN ve "B3" deney numunesinde 2,81 KN olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.72. 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi

Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek çekme dayanım ortalamaları elde edilmiştir.

"A4" ve "B4" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir. "A4" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B4" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır. Mekanik dayanım incelemesinde ölçülen değerler, "A4" deney numunesinde 2,79 KN ve "B4" deney numunesinde 2,97 KN olarak tespit edilmiştir.

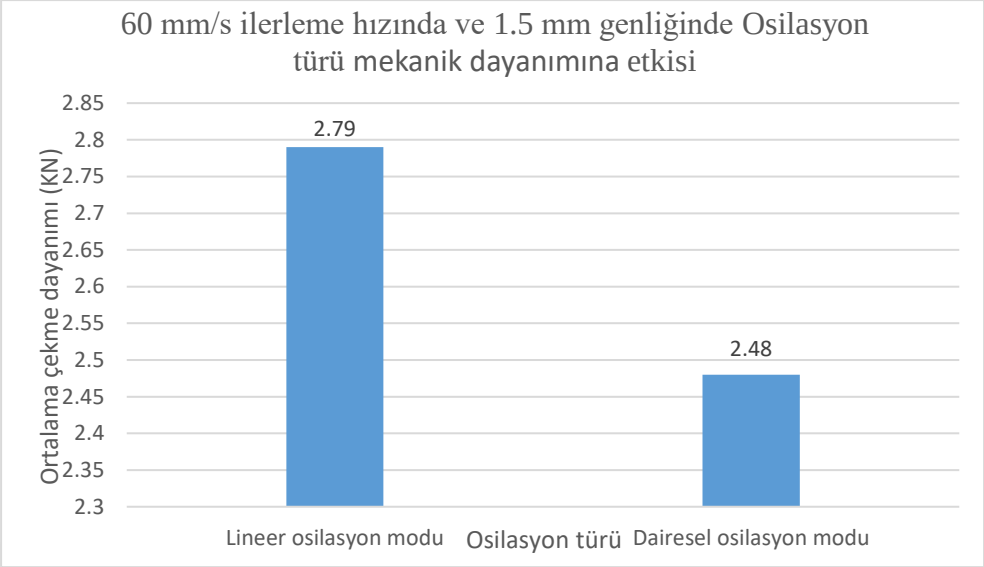


Şekil 4.73. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi

Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek çekme dayanım ortalamaları elde edilmiştir.

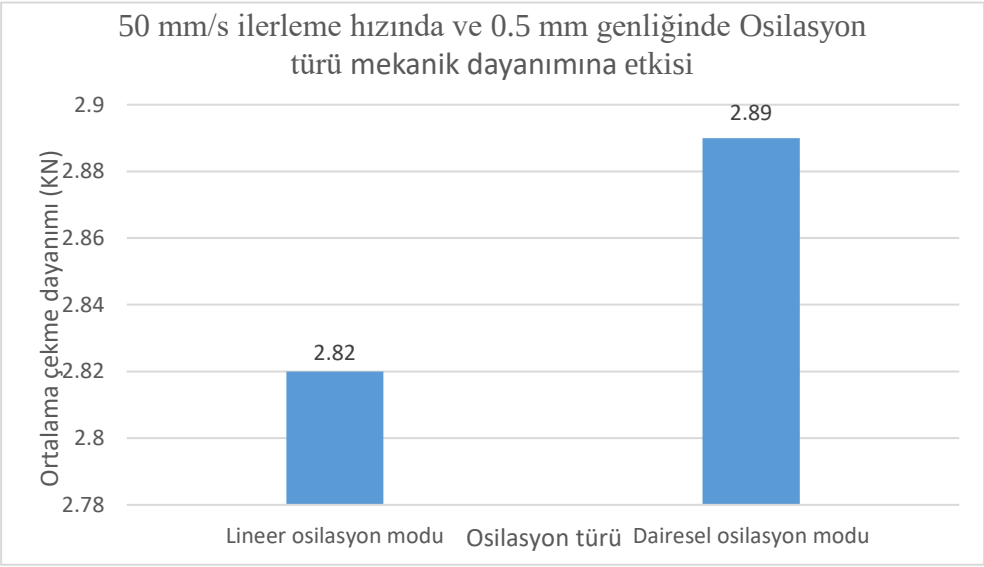
"A5" ve "B5" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir. "A5" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B5" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır. Mekanik dayanım incelemesinde ölçülen değerler, "A5" deney numunesinde 2,79 KN ve "B5" deney numunesinde 2,48 KN olarak tespit edilmiştir.

Ölçülen değerlere göre, 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde lineer osilasyon türünde daha yüksek çekme dayanım ortalamaları elde edilmiştir.



Şekil 4.74. 60 mm/s ilerleme hızında ve 1,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi

"A8" ve "B8" deney numunelerinde, lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 50 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametreleri kullanılarak osilasyon modunun kaynak mekanik dayanımına etkisi incelenmiştir. "A8" deney numunesinde Lineer (Zig-zag) ve "B8" deney numunesinde Dairesel (Circular) osilasyon modları kullanılmıştır. Mekanik dayanım incelemesinde ölçülen değerler, "A8" deney numunesinde 2,82 KN ve "B8" deney numunesinde 2,89 KN olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.75. 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde Osilasyon türü mekanik dayanımına etkisi

Ölçülen değerlere göre, 50 mm/s ilerleme hızında ve 0,5 mm genliğinde dairesel osilasyon türünde daha yüksek çekme dayanım ortalamaları elde edilmiştir.

5. SONUÇ

Bu araştırmada, fiber lazer kaynağında DP1180 ve DP600 Wobble head teknolojisi kullanılarak osilasyon türü (Wobble modu), ilerleme hızı (mm/s) ve osilasyon genliği (mm) gibi proses parametrelerinin kaynak geometrisi, mikro yapı, mikro sertlik ve mekanik dayanım üzerindeki etkileri incelemek için kapsamlı test süreçlerini içeren deneysel değerlendirme gerçekleştirilmiş, sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir;

Kaynak geometrisi incelemelerinde, lineer (zig-zag) osilasyon türü, yüksek ilerleme hızlarında enerji yoğunluğunu dar bir alana odaklayarak derinlemesine bir ısı girdisi sağlamaktadır. Bu durum, çevresel termal etkiyi sınırladığı için daha yüksek penetrasyon derinlikleri, daha dar EB ve ITAB genişlikleri elde edilmesini sağlamıştır. Düşük genliklerde, enerji daha dar bir alanda yoğunlaşmaktadır. Bu durum, derin penetrasyonu artırırken çevresel ısı yayılımını da artırmaktadır. Sonuç olarak, daha yüksek penetrasyon derinlikleri, daha dar EB genişlikleri ve daha geniş ITAB genişlikleri gözlemlenmiştir. Dairesel (Circular) osilasyon türü, düşük ilerleme hızlarında lazerin malzeme üzerinde kalış süresini uzatır ve ısının geniş bir alana yayılmasını sağlar. Bu durum, daha yüksek penetrasyon derinliklerinin yanı sıra, daha geniş bir EB ve ITAB elde edilmesine neden olmuştur.

Mikro sertlik incelemelerinde, lineer (zig-zag) osilasyon türü, yüksek ilerleme hızlarında daha yoğun enerji girişine ve hızlı soğumaya neden olmaktadır. Bu durum, malzemenin mikroyapısında daha sert fazların oluşumunu desteklemiş ve bu nedenle daha yüksek EB ve ITAB mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Düşük genliklerde, enerji daha yoğun bir şekilde EB'ye odaklanırken, ITAB bölgesinde enerji ve termal etki sınırlı kalmaktadır. Bu durum, daha yüksek EB mikro sertliklerinin ve daha düşük ITAB mikro sertliklerinin gözlemlenmesine neden olmuştur. Dairesel (circular) osilasyon türü, yüksek ilerleme hızlarında hızlı enerji girişi ve dairesel hareketin eşit enerji dağılımı sayesinde mikro yapının sertliğini artırmaktadır. Bu durum, daha yüksek EB ve ITAB mikro sertliklerinin elde edilmesine neden olmuştur. Yüksek genlikler, geniş bir enerji yayılımı ile ısıl etkiyi artırarak malzeme yapısında sertlik artışına yol açmaktadır. Bu durum, EB ve ITAB bölgelerinde daha yüksek mikro sertlik değerlerinin gözlemlenmesine neden olmuştur.

Mekanik dayanım incelemelerinde, lineer (zig-zag) osilasyon türünün yüksek ilerleme hızları ile dar ve derin bir kaynak bölgesi oluşturulması, hızlı soğuma süreciyle birlikte

kaynak bölgesindeki mukavemeti artırmaktadır. Bu durum, daha yüksek ortalama çekme dayanımlarının elde edilmesine neden olmuştur. Genliğin değişimi ortalama çekme dayanımına etkili olmadığı tespit edilmiştir. Dairesel (circular) osilasyon türü, yüksek ilerleme hızlarında mikro yapısal kusurların azalmasına ve daha sağlam bir kaynak bölgesi oluşmasına neden olmaktadır bu durum, daha yüksek ortalama çekme dayanımlarının elde edilmesini sağlamıştır. Düşük genlikler, enerji yoğunluğunu artırarak kaynak bölgesindeki bağlanma kalitesini iyileştirmektedir. Bu durum, daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmesine yol açmıştır.

Osilasyon türü kaynak geometrisi, mikro yapı ve mikro sertlik üzerindeki etkisi incelendiğinde elde edilen sonuçları şu şekilde özetlenmiştir;

Lazer gücü 1200 W, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 80 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametrelerinde, lineer osilasyon türünde daha derin penetrasyon, dar EB ve ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Ayrıca, lineer osilasyon türünde daha yüksek EB ve ITAB mikro sertlikleri gözlemlenmiştir. Dairesel osilasyon türünde ise daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

Lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 70 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametrelerinde, dairesel osilasyon türünde daha derin penetrasyon, lineer osilasyon türünde daha dar EB genişlikleri ve dairesel osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Ayrıca, dairesel osilasyon türünde daha yüksek EB ve ITAB mikro sertlikleri gözlemlenmiştir. Dairesel osilasyon türünde ise daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

Lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametrelerinde, lineer osilasyon türünde daha derin penetrasyon, dairesel osilasyon türünde daha dar EB ve ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Dairesel osilasyon türünde daha yüksek EB mikro sertlikleri ve lineer osilasyon türünde daha yüksek ITAB mikro sertlikleri gözlemlenmiştir. Dairesel osilasyon türünde ise daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

Lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1 mm proses parametrelerinde, dairesel osilasyon türünde daha derin penetrasyon, lineer osilasyon türünde daha dar EB ve ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Ayrıca, dairesel osilasyon

türünde daha yüksek EB ve ITAB mikro sertlikleri gözlemlenmiştir. Dairesel osilasyon türünde ise daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

Lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 60 mm/s ve genlik 1,5 mm proses parametrelerinde, dairesel osilasyon türünde daha derin penetrasyon, daha dar EB genişlikleri ve lineer osilasyon türünde daha dar ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Dairesel osilasyon türünde daha yüksek EB mikro sertlikleri ve lineer osilasyon türünde daha yüksek ITAB mikro sertlikleri gözlemlenmiştir. Lineer osilasyon türünde ise daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

Son olarak lazer gücü 1200 w, frekans 100 Hz, ilerleme hızı 50 mm/s ve genlik 0,5 mm proses parametrelerinde, lineer osilasyon türünde daha derin penetrasyon, dar EB ve ITAB genişlikleri elde edilmiştir. Lineer osilasyon türünde daha yüksek EB mikro sertlikleri ve dairesel osilasyon türünde daha yüksek ITAB mikro sertlikleri gözlemlenmiştir. Dairesel osilasyon türünde ise daha yüksek ortalama çekme dayanımları elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Ai, Y., Jiang, P., Shao, X., Li, P., Wang, C., Mi, G., Geng, S., Liu, Y., Liu, W. (2017). *The prediction of the whole weld in fiber laser keyhole welding based on numerical simulation. Applied Thermal Engineering,* 113, 980–993. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.050

Atmaca, E S .(2021). Fiber Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Dp600 ve Trıp800 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,41-45.

Bandyopadhyay, K., Panda, SK., Saha, P. (2016). Optimization of fiber laser welding of DP980 steels using RSM to improve weld properties for formability. *Journal of Materials Engineering and Performance*.25(6):2462-2477. http://dx.doi.org/10.1007/s11665-016-2071-y.

Berretta, J. R., De Rossi, W., Das, De D. M., De Almeida, I. A. (2007). Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. *Optics and Lasers in Engineering, vol. 45*. 960-966.

Cebeci,İ.(2021). AISI 304-310-316-430 Paslanmaz Sacların Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kerf Genişliği, Çapak Yüksekliği ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Karabük Üniversitesi.* 11-12.

Cebeci, R.(2021). St-37 VE St-52 Sac Malzemelerin Lazerle Kesilmesinde İşleme Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin İncelenmesi. *Karabük Üniversitesi.* 13-15.

Chen, H., Pinkerton, A. J., Li, L., Liu, Z., Mistry, A. T. (2011). Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications. *Materials and Design, 32(2):, 495–504.* https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.034

Chen, H., Pinkerton, A. J., Li, L., Liu, Z., Mistry, A. T. (2011). Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications. *Materials and Design,* 32(2), 495–504. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.034

Çavuşoğlu, O., Yüce, C., Aydın H. (2023). Mechanical characterization and microstructure of fiber laser welded TWIP980 steel depending on welding speed and focal distance. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics 274 ,170541*.
https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170541

Eksilmez, N. (2021). Hardox 500 Çeliğinin Lazerle Kesilmesinde Kesme Geometrisinin ve İşleme Parametrelerinin Kesim Kalitesi Üzerine Etkisinin Araştırılması. *Karabük Üniversitesi*

Erdoğan, Ş. (2007). Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin Deneysel Araştırılması. *Gazi Üniversitesi*.

Farrokhi, F., Siltanen, J., Salminen, A. (2015). Fiber Laser Welding of Direct- Quenched Ultrahigh Strength Steels: Evaluation of Hardness, Tensile Strength, and Toughness Properties at Subzero Temperatures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137, 1–10. https://doi.org/ 10.1115/1.4030177

Gerges, M. (2023). Gas Lasers. *United Arab Emirates University Department of Physics*. DOI:10.13140/RG.2.2.28369.92007

Giuseppe, M. (2014). Principles, typologies and applications of Fiber Lasers. *Università degli Studi di Napoli*. 1-18

Grünenwald, S., Unt, A., & Salminen, A. (2018). Investigation of the influence of welding parameters on the weld geometry when welding structural steel with oscillated high-power laser beam. *Procedia CIRP*, 74, 461–465. doi:10.1016/j.procir.2018.08.150

Hashemzadeh, M. (2014). Investigations into fibre laser cutting. *The University of Nottingham, Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering.* 14-18

Ion, J. C. (2005). Laser Processing of Engineering Materials Principles. *Procedure and Industrial Application.* 2-33.

Iordachescu, D., Blasco, M., Lopez, R., Cuesta, A., Iordachescu, M., Ocaña, J. L. (2011). Recent achievements and trends in laser welding of thin plates. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 13(8), 981–985.

Iordachescu, Danut, Blasco, M., Lopez, R., Cuesta, A., Iordachescu, M., Ocaña, J. L. (2011). Development of Robotized Laser Welding Applications for Joining Thin Sheets.*Optirob.* 26–28.

Jia, Q., Guoa, W., Weidong, L., Ying, Z., Penga, P., Zouc, G. (2016). Microstructure and tensile behavior of fiber laser-welded blanks of DP600 and DP980 steels. *Journal of Materials Processing Technology 236 ,73–83.*

Koleva, E., Academy, B., Mihaylov, G., Bulgarian, M., Mladenov, G. M. (2011). Experience on electron beam welding. *Practical Aspects and Application and Electron Beam Irradiation*. 95-133

Kuryntsev, S., Gilmutdinov, A.K. (2015). The effect of laser beam wobbling mode in welding process for structural steels. *Int J Adv Manuf Technol*. 81:1683–1691. DOI 10.1007/s00170-015-7312-y

MUNGAN, M.C, (2006). Lazer İle Kesme Ve Endüstriyel Uygulamaları. *Mustafa Kemal Üniversitesi*. 2-3.

Nayak, S. S., Biro, E., Zhou, Y. (2015). Laser welding of advanced high-strength steels (AHSS), *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*. https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00005-9

Ovalı, C. K. (2014). TRIP800 / DP800 / DP600 Çeliklerinin Lazer Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 3 – 37.

Parkes, D., Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S., Chen, D. L. (2013). Microstructure and fatigue properties of fiber laser welded dissimilar joints between high strength low alloy and dual-phase steels. *Materials and Design*, 51, 665–675. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.076

Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., Kong, C. J. (2007). Welding with high power fiber lasers – A preliminary study, *Materials and Design*, 28, 1231 –1237.

Razmpoosh, M.H., Macwan, A., Biro, E., Zhou, Y. (2020). Microstructure and dynamic tensile characteristics of dissimilar fiber laser welded advanced high strength steels. *Materials Science & Engineering A 773, 138729.* doi:10.1016/j.msea.2019.138729

Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Wlaz, C., Sepold, G. (2001). Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. J*ournal of Materials Processing Technology, vol. 115, pp. 2-8*.

Singla, U. (2017). Fiber Laser Welding Benefits and Industrial Applications. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 5(1):, 7–10.

Steen, W. M. (2003). Laser Material Processing, *3rd ed.: Springer*.

Taccheo, S. (2013). Fibre Laser. *Swansea University.UK* .1-20

Thomas V. Higgins. (1995). The three phases of lasers: solid-state, gas, and liquid. *Laser Focus World.* 73–85

Torkamany, M. J., Hamedi. M. J., Malek, F., Sabbaghzadeh, J. (2006). The effect of process parameters on keyhole welding with a 400 W Nd:YAG pulsed laser. *Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 39*. 4563-4567.

Ünlü, A., Akşen, T. A., Esener, E., Fırat, M. (2020). Predictive Modeling Based on Angular Variations of Yield Stress Ratios and Lankford Parameters for DP800 Steel. *Conference: 10th International Automotive Technologies Congress, Bursa, Turkey*

Verhaeghe, G., Hilton, P. (2005). Battle of the Sources - Using a High-Power Yb-Fibre Laser for Welding Steel and Aluminium. *Prague, Czech Republic*.

Wang, J., Yang, L., Sun, M., Liu, T., Li, H. (2016). Effect of energy input on the microstructure and properties of butt joints in DP1000 steel laser welding, *Materials and Design, 90, 642-649.*

Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Chen, D. L., Goodwin, F., Zhou, Y. (2013). Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints. *Materials and Design*, 43, 373–383. https://doi.org/ 10.1016/j. matdes.2012.07.017

Yang, J., Li, T., Ye, W., Chen, J., Qiao, J. (2023). Effect of Beam Oscillation Amplitude on Microstructure and Mechanical Properties of Small Laser Spot Welded QP980 Steel. *Metals*, 13, 1363. https://doi.org/ 10.3390/met13081363

Yılmaz, E. (2009). Çelik Malzemelerin Laser Kesim Parametrelerinin Optimizasyonu'' *Yıldız Teknik Üniversitesi.*13-18.

Yüce, C. (2018). Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*22-45

Yüce, C., Tutar, M., Karpat, F., Yavuz, N. (2016). The Optimization of Process Parameters and Microstructural Characterization of Fiber Laser Welded Dissimilar HSLA and MART Steel Joints. *Metals*, 6(10), 245. DOİ:10.3390/met6100245

Yüce, C. (2020). The Effect of Laser Beam Wobbling Mode on Weld Bead Geometry of Tailor Welded Blanks. *Academic Perspective Procedia*, 3 (1), 282-290. doi: 10.33793/acperpro.03.01.58

Zeng, X., Lu, C., Zhu, Q., Cui, X., Li, Z., Shi, W., Zhang, R., Liu, X., Tie, D. (2024). Effect of Oscillating Amplitude on Microstructure and Mechanical Property of Laser Welding of Dissimilar Stainless Steel. Coatings 2024, 14, 1617. https://doi.org/ 10.3390/coatings14121617

Zhao, Y. Y., Zhang, Y. S., & Hu, W. (2013). Effect of welding speed on microstructure, hardness and tensile properties in laser welding of advanced high strength steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(7), 581 590. doi:10.1179/1362171813y.0000000140