



**FARKLI PLASTİKLERİN LAZER KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE PARAMETRE
OPTİMİZASYONU**

Ayça KÜÇÜKOĞLU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI PLASTİKLERİN LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE
PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

Ayça KÜÇÜKOĞLU
(0000-0002-1053-6138)

Prof. Dr. Fatih KARPAT
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI PLASTİKLERİN LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE PARAMETRE OPTİMİZASYONU

Ayça KÜÇÜKOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih KARPAT

Günümüzde artan rekabet koşulları ve müşteri gereksinimleri doğrultusunda termoplastik malzemelerin otomotiv parçalarında kullanımı artmaktadır. Sağladığı hafiflik, dayanıklılık ve esneklik sayesinde birçok otomotiv firması termoplastik malzemelerin araca entegrasyonu konusunda çalışma yapmaktadır. Özellikle, termoplastik malzemeler ile farklı malzemelerin bir araya getirilerek oluşturulduğu hibrid yapılarda birleştirilme yöntemi firmalar için önemli bir üretim süreci olmaktadır. Bu kapsamda lazer iletim kaynağı; hızlı, tutarlı ve temassız bir birleştirme sağlaması nedeniyle en çok kullanılan teknolojilerden birisidir. Fakat lazer iletim kaynağı ile yüksek kalitede bir kaynak elde edilebilmesi büyük ölçüde cihaz parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle yüksek kalitede parça üretimi için optimize edilmiş bir parametre setine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapılan tez çalışmasında, aydınlatma sistemleri üreten bir otomotiv firmasında ABS ve PMMA malzemelerden oluşan parçaların lazer iletim kaynağı ile birleştirilme süreci dikkate alınmıştır. Parçalara ait kaynak mukavemeti, kopma uzamasını ve kaynak genişliğini en iyi hale getirmek amacıyla lazer kaynak cihazına ait çok amaçlı parametre optimizasyonu çalışılmıştır. Cihazın kontrol edilebilir parametreleri olan kaynak gücü, baskı kuvveti ve kaynak hızının en iyi değerini elde edebilmek için çok aşamalı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Çözüm yaklaşımında, deney ortamı hazırlıklarından sonra parametrelerin çıktılar üzerindeki ana etkileri ilk olarak Taguchi yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ardından çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisi olan TOPSIS yöntemi kullanılarak Taguchi çıktıları değerlendirilmiştir. Bir sonraki aşamada tam faktöriyel deneysel tasarım ile parametrelerin çıktılar üzerindeki etkileri daha detaylı analiz edilmiştir. Çözüm yaklaşımının son aşamasında ise elde edilen regresyon denklemleri çok amaçlı optimizasyon problemi olarak çözümlenerek lazer iletim kaynağı için en iyi parametre seti belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer iletim kaynağı, termoplastik malzemeler, Taguchi yöntemi, tam faktöriyel deneysel tasarım, çok amaçlı optimizasyon

2024, vii + 77 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

PARAMETER OPTIMIZATION FOR DIFFERENT PLASTICS IN LASER WELDING JOINING

Ayça KÜÇÜKOĞLU

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

Supervisor: Prof. Dr. Ayça KÜÇÜKOĞLU

Recently, the use of thermoplastic materials in automotive parts has been rising in line with increasing competitive environments and customer needs. Thanks to the lightness, durability, and flexibility it provides, many automotive companies are working on the integration of thermoplastic materials into vehicles. In particular, the joining technique of hybrid structures, in which thermoplastic materials are combined with different material structures, is an important manufacturing process for the companies. In this context, laser transmission welding is one of the most used technologies since it provides fast, consistent, and non-contact joining. However, obtaining a high weld quality with laser transmission welding mostly depends on the device parameters. Therefore, an optimized parameter set is required for high-quality part production.

In the thesis study, the process of joining parts made of ABS and PMMA materials with laser transmission welding in an automotive company producing lighting systems is taken into account. In order to optimize the weld strength, breaking strain, and weld width of the parts, a multi-objective parameter optimization is studied for the laser welding device. A multi-stage solution approach has been developed to obtain the best value of the controllable parameters of the device: welding power, pressure force, and welding speed. After the experimental environment is prepared, the main effects of the parameters on the responses are first analyzed in the solution approach by using the Taguchi method. Then, Taguchi outputs were evaluated using the TOPSIS method, one of the multi-criteria decision-making methods. In the next stage, the effects of the parameters on the responses are analyzed in more detail with a full factorial experimental design. In the last stage of the solution approach, the obtained regression equations are solved as a multi-objective optimization problem, and the best parameter set for the laser transmission welding is determined.

Key words: Laser transmission welding, thermoplastic materials, Taguchi method, full factorial experimental design, multi-objective optimization

2024, vii + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve her zaman destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fatih Karpat'a ve çalışmanın her aşamasında görüş ve yönlendirmelerinden faydalandığım değerli hocam Doç. Dr. Celalettin Yüce'ye teşekkürlerimi sunarım.

Lazer kaynak numunelerinin hazırlanmasındaki desteklerinden dolayı Lazermark San. Ve Tic. Ltd. Şti. firmasına ve Mert Baran'a, lazer kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesindeki desteklerinden dolayı Odelo Otomotiv Aydınlatma A.Ş. firmasına ve Dr. Emrah Sözer'e, lazer numune testlerindeki desteklerinden dolayı Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. personeli Halil İbrahim Okar'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirerek bugünlere gelmemi sağlayan, yol gösteren, maddi ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan, tüm engellere göğüs geren babam Aydın Yurttaş, annem Nurhayat Yurttaş ve sevgili ablam Dr. Öğr. Üyesi Aysun Yurttaş Güneş'e teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteği ile hiçbir zaman beni yalnız bırakmayan, çalışmalarımın her aşamasında anlayışı, sabrı ve güler yüzüyle bana güç veren sevgili eşim, hayat arkadaşım Doç. Dr. İlker Küçüköğlü'na ve oğlum Bulut Küçüköğlü'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında yardımcı olan ve ismini yazamadığım herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayça KÜÇÜKOĞLU
19/01/2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Otomotiv Teknolojisi ve Birleştirme Yöntemlerinin Önemi.....	4
2.2. Birleştirme Teknikleri.....	5
2.2.1. Mekanik birleştirme yöntemleri.....	6
2.2.2. Kimyasal birleştirme yöntemleri.....	9
2.2.3. Termal birleştirme yöntemleri.....	10
2.3. Lazer Kaynak Teknolojisi.....	10
2.3.1. Lazer kaynak tarihçesi.....	10
2.3.2. Lazer kaynak çeşitleri.....	11
2.3.3. Lazer kaynak yöntemi.....	13
2.4.1. Lazer kaynak parametreleri.....	14
2.4.2. Lazer kaynağın avantajları ve dezavantajları.....	14
2.4. Lazer Kaynak Optimizasyonu Alanında Yapılan Çalışmalar.....	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	21
3.1. Materyal.....	22
3.1.1. Malzeme seçimi.....	22
3.1.2. LTW fikstür imalatı.....	24
3.1.3. Kullanılan lazer kaynak makinesi.....	25
3.1.4. LTW çıktıları için yapılan testler.....	26
3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. LTW parametrelerinin ve çıktılarının belirlenmesi.....	28
3.2.2. Taguchi metodu.....	29
3.2.3. TOPSIS yöntemi.....	31
3.2.4. Deneysel tasarım yöntemi.....	33
3.2.5. Çıktılara ait regresyon denklemleri ile en iyi parametre setinin belirlenmesi.....	34
4. BULGULAR.....	36
4.1. Taguchi Yönteminin Sonuçları.....	36
4.2. TOPSIS Yönteminin Sonuçları.....	41
4.3. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım Yönteminin Sonuçları.....	44
4.4. LTW Kaynak Kalitesi İçin En İyi Parametre Setinin Belirlenmesi.....	53
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	58
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	70
EK 1 Taguchi Metodu Sonucunda Elde Edilen Tepki Yüzeyi Grafikleri.....	71
EK 2 Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım ve Elde Edilen Sonuçlar.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A_1, \dots, A_7	TOPSIS metodunda dikkate alınan parametre seti alternatifleri
C_1, C_2, C_3	Lazer kaynak çıktılarının değerlendirilmesinde dikkate alınan kriterler
c_i^+	Alternatif i 'nin ideal çözüme göreceli yakınlığı
L_{16}	Taguchi metodunun ortogonal dizisi
p_1, p_2, p_3	Kaynak dikişi alanında rastgele noktalar
r_{ij}	j kriteri için i alternatifinin normalleştirilmiş puanları
S/N	Sinyal gürültü oranı
s_i^+	Alternatif i için pozitif ideal çözümden ayırma ölçüsü
s_i^-	Alternatif i için negatif ideal çözümden ayırma ölçüsü
v_{ij}	j kriteri için i alternatifinin ağırlıklı normalleştirilmiş puanları
v_j^+	j kriteri için pozitif ideal çözüm
v_j^-	j kriteri için negatif ideal çözüm
w_j	j kriterinin ağırlığı
X_{ij}	j kriteri için i alternatifinin karar matrisi değeri

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
DOE	DeneySEL Tasarım
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
HAZ	Isıdan Etkilenen Bölge
LASER	Uyarılmış Işınım Yayımıyla Işığın Yükseltilmesi
LTW	Lazer İletim Kaynağı
PA	Polipropilen
PE	Polietilen
PC	Polikarbonat
PET	Polietilen tereftalat
PEEK	Polietereterketon
PP	Polipropilen
PS	Polistren
PVC	Polivinil Klörür
PMMA	Polimetil Metakrilat
RSM	Yanıt Yüzey Metodolojisi
TOPSIS	İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sırası Tekniği

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Perçinleme yöntemine ait örnek gösterim.....7
Şekil 2.2.	Mekanik bağlantı elemanlarından örnekler.....7
Şekil 2.3.	Kendinden delmeli perçinleme tekniği örnekleme.....8
Şekil 2.4.	Sıkıştırma (Clinching) yönteminin prensibi.....8
Şekil 2.5.	Kimyasal birleştirme yöntemine ait örnek gösterim.....9
Şekil 2.6.	Plastiklerin lazer kaynak işlemi.....13
Şekil 3.1.	Çözüm metodolojisi adımları.....21
Şekil 3.2.	Olası polimer kombinasyonları için lazer kaynaklanabilirlik tablosu.....23
Şekil 3.3.	Tasarlanan ve imal ettirilen bindirme kaynak formatındaki numunelerin fikstür yerleşim görüntüsü.....24
Şekil 3.4.	PMMA ve ABS numunelerin şematik gösterimi.....24
Şekil 3.5.	Lazer kaynak makinesi ile entegre fikstür görüntüsü.....25
Şekil 3.6.	LTW makinesinin çalışma prensibi.....26
Şekil 3.7.	Numunelerin kaynak anı ve kaynak parçaların gösterimi.....26
Şekil 3.8.	Zwick/Roell Z010 makinesinde numune çekme testi gösterimi.....27
Şekil 3.9.	Kaynak genişliğinin belirlenmesi.....28
Şekil 4.1.	LTW parametrelerinin kaynak mukavemetine etkisi.....39
Şekil 4.2.	LTW parametrelerinin kopma uzamasına etkisi.....39
Şekil 4.3.	LTW parametrelerinin kaynak genişliğine etkisi.....39
Şekil 4.4.	Kaynak mukavemetine ait deneysel tasarım yöntemi ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri.....47
Şekil 4.5.	Deneysel tasarım sonucunda kaynak mukavemeti için elde edilen Pareto grafiği47
Şekil 4.6.	Kopma uzamasına ait deneysel tasarım yöntemi ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri.....49
Şekil 4.7.	Deneysel tasarım sonucunda kopma uzaması için elde edilen Pareto grafiği.....50
Şekil 4.8.	Kaynak genişliğine ait deneysel tasarım yöntemi ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri.....52
Şekil 4.9.	Deneysel tasarım sonucunda kaynak genişliği için elde edilen Pareto grafiği.....52

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Endüstride kullanılan lazer cihazı çeşitleri ve özellikleri	12
Çizelge 3.1. Taguchi uygulaması için kullanılan L_{16} ortogonal dizisi	30
Çizelge 4.1. Taguchi yönteminde kullanılan LTW parametreleri ve seviyeleri	36
Çizelge 4.2. Taguchi tasarım matrisi ve elde edilen sonuçlar	37
Çizelge 4.3. S/N oranları için yanıt tablosu	37
Çizelge 4.4. TOPSIS yönteminde analiz edilen alternatif parametre setleri	42
Çizelge 4.5. TOPSIS yönteminde kriter ağırlıklarına ilişkin senaryolar	42
Çizelge 4.6. Normalize edilmiş karar matrisi.....	43
Çizelge 4.7. Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi.....	43
Çizelge 4.8. Pozitif ve negatif ideal çözümler.....	43
Çizelge 4.9. Pozitif ve negatif ideal çözümlerden ayırma ölçüleri ve her alternatifin göreceli yakınlığı.....	44
Çizelge 4.10. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan LTW parametreleri ve seviyeleri.....	45
Çizelge 4.11. Kaynak mukavemeti için elde edilen ANOVA tablosu.....	46
Çizelge 4.12. Kopma uzaması için elde edilen ANOVA tablosu.....	48
Çizelge 4.13. Kaynak genişliği için elde edilen ANOVA tablosu.....	51
Çizelge 4.14. Dört farklı senaryo için optimize edilmiş parametre değerleri.....	54
Çizelge 4.15. Gerçek deney ortamında en iyi parametre setleri ile elde edilen çıktı sonuçları.....	55

1. GİRİŞ

Yüksek performanslı polimerlerin geliştirilmesiyle birlikte, üretim maliyetinde önemli bir azalma sağladığı için otomotiv endüstrisinde termoplastik malzemelerin kullanımı son yıllarda giderek artmaktadır (Li ve ark., 2022; Wu ve ark., 2021). Termoplastik malzemeler düşük maliyetlerinin yanı sıra düşük ağırlıkları, yüksek mukavemetleri ve üstün korozyon dirençleri nedeniyle birçok araç parçasında kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2014). Hafif yapıları ve üretim süreçlerindeki ekonomiklikleri nedeniyle termoplastikler araç parçalarındaki metalik bileşenlerin yerini daha fazla almaktadır (Amanat ve ark., 2010).

Termoplastik malzemelerin araç imalatında yapısal bir eleman olarak kullanılabilmesi için bu malzemelerin başka mekanik özellikte bir termoplastik veya metal bir malzeme ile birleştirilerek hibrid bir yapının oluşturulmasına gerek duyulmaktadır. Bu kapsamda mekanik, kimyasal veya termal birçok birleştirme tekniği bulunmakta olup tercih edilecek yöntemin yüksek mukavemet, yalıtım, düşük vibrasyon, maliyet, korozyon vb. birçok gereksinimi karşılamaı gerekmektedir. Rekabetin çok yüksek olduğu otomotiv endüstrisinde maliyetleri düşürebilmek ve belirli kalite gereksinimlerini karşılayabilmek için hibrid yapıların oluşturulmasında kullanılan yöntemin geliştirilmesi sektörün öncelikli hedeflerinden birisi haline gelmiştir.

Otomotiv endüstrisindeki araç aydınlatma sistemlerinde kullanılan termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde lazer iletim kaynağı (LTW) üstün özellikleri nedeni ile öne çıkmaktadır. LTW teknolojisi sayesinde farklı yapıda bulunan plastik malzemeler etkin bir şekilde bir araya getirilebilmektedir. Lazer kaynak teknolojisi diğer kaynak teknolojilerine göre üstün performans sağlasa da LTW'nin kaynak kalitesi işleme parametrelerine bağlıdır. Proses parametreleri kaynak kalitesini doğrudan etkilediği için etkilerinin tespit edilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle optimize edilmiş parametre ayarlarıyla iyi bir kaynak kalitesi gözlemlenebilir. Öte yandan gerçek hayat uygulamalarında firmalar için müşteri gözündeki kaynak kalitesi; kaynak mukavemeti, kopma uzaması, kaynak genişliği gibi birden fazla kritere göre belirlenmektedir. Belirli bir LTW parametresinin değişikliğinin bu kalite ölçümleri üzerinde farklı bir etkisi

olduğundan, parametrelerin tek bir yanıt için optimize edilmesi, diğer yanıtlar için en iyi parametre değerini sağlamayabilir. Bu nedenle, tüm yanıtların ortaklaşa iyileştirilmesi için çok yanıtlı bir optimizasyon yaklaşımı gerekmektedir.

Tez kapsamında bir otomotiv firmasında üretilmekte olan aydınlatma parçasının 2,7 mm kalınlığındaki Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve şeffaf Polimetil metakrilat (PMMA) malzemelerin LPKF Twinweld 3D 6000® lazer cihazı ile birleştirilmesi dikkate alınmıştır. Lazer iletim kaynağındaki önemli parametreler olan lazer gücü, baskı kuvveti ve lazer hızının etkileri incelenmiştir. LTW parametre optimizasyon problemini çözmek için deneysel tasarım tabanlı çok aşamalı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde LTW parametrelerinin çıktılar üzerindeki ana etkilerini belirleyebilmek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yöntemi ile elde edilen çıktı değerleri çok kriterli bir karar verme yöntemi olan TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sırası Tekniği) metodu ile analiz edilerek parametrelerin etkin olabileceği seviyeler tespit edilmiştir. Daha sonra Taguchi sonuçları aracılığıyla bir dizi alternatif parametre seti belirlenmiştir. Parametrelerin etkin olduğu seviyelerin ve çıktılar üzerindeki ana etkileri belirlendikten sonra tam faktöriyel bir deneysel tasarım yöntemi uygulanmıştır. Deneysel tasarım çalışması ardından her bir çıktı için LTW parametrelerine bağlı regresyon denklemleri elde edilmiştir. Regresyon denklemleri çok amaçlı optimizasyon problemi olarak çözülerek LTW için en iyi parametre seti elde edilmiştir. Elde edilen en iyi parametre setinin geçerliliği gerçekleştirilen deneyler ile analiz edilmiştir.

Yapılan tez çalışmasına ilişkin, Bölüm 2’de kaynak araştırmasına yer verilmiştir. Bu kapsamda ilk birleştirme tekniklerinin otomotiv teknolojisindeki önemine değinilmiştir. Ardından temel birleştirme teknikleri sınıflandırılarak açıklanmıştır. Sonraki alt başlıkta tez çalışması kapsamında dikkate alınan lazer kaynak teknolojisine ait detaylara yer verilmiştir. Son olarak lazer kaynak parametrelerinin optimizasyonu üzerine literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3’te LTW parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonuna yönelik materyal, kullanılan cihazlar, test ortamları ve geliştirilmiş olan çok aşamalı yöntemin detaylarına yer verilmiştir. Bölüm 4’te geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının adımlarına ilişkin olarak deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen

bulgular sunulmaktadır. Son olarak tez çalışmasına ait sonuç ve tartişmalar Bölüm 5'te verilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Otomotiv Teknolojisi ve Birleştirme Yöntemlerinin Önemi

Modern otomotiv üretiminde ilk çizimden başlayarak üretim bandından araç çıkana kadar olan geliştirme sürecinde farklı zorluklarla karşılaşmaktadır. Temel zorluk, tasarım dilini ve hafif malzeme tasarımını farklı birleştirme teknolojileri aracılığıyla birleştirmek ve yeni uygulamaları üretime uygulamaktır (Graudenz ve Baur, 2013).

Otomotiv sektörü artan talepler nedeniyle yeni teknolojilerin hızla uygulandığı sektörlerden birisidir. Otomotiv sanayisinde ürün tasarım, geliştirme ve üretimde kullanılan yeni teknolojiler sayesinde verimlilik ve kaliteyi artırırken sektörde rekabete ve büyümeye olanak tanımaktadır. Lazer teknolojilerinin geleneksel birleştirme yöntemlerinin yerine yeni nesil birleştirme tekniklerinde kullanımı son yıllarda otomotiv sektöründe de artış göstermektedir. Lazer kaynağın; kusursuz kaynak dikişi, istenilen oranda nüfuziyet, yüksek yapısal dayanım, yüksek işlem hızı ve otomasyona uyumluluk avantajları sayesinde otomotiv sektöründeki kullanımı yaygınlaşmıştır (Wang ve ark., 2016b).

Araç donanımlarının önemli bir parçası olan dış aydınlatma sistemleri, aracın estetik görüntüsünü tamamlaması yanında sürüş konfor ve güvenliğinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Aydınlatma sistemlerinin yüksek kalitede estetik bir tasarıma sahip olması istenirken aynı zamanda kusursuz bir optik özelliğe sahip olması da gerekmektedir. Araçların ön, arka ve yanlarında olmak üzere ön far, arka stop, sinyal ve sis lambalarından oluşan dış aydınlatma sistemlerinde her bir parça, uluslararası standartlara uygun olarak üretilmesi ve testlerden geçmesi gerekmektedir (Küçüköğlü ve ark., 2021).

Tarihsel gelişim açısından önceden cam ve plastiklerin bir arada kullanıldığı aydınlatma sistemlerinde günümüzde araç ağırlığının hafifletilmesi, daha esnek tasarımlara imkân sağlaması ve çevre duyarlılığı nedeniyle termoplastik malzeme kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Artan müşteri istekleri ve rekabet koşullarından dolayı aydınlatma sistemlerinin tasarımları oldukça karmaşık bir hal almıştır. Bu nedenle dış

aydınlatma sistemlerinin üretim aşamasında yeni tekniklerin kullanılmasının ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır.

Bir binek aracın genellikle 10.000-30.000 parçadan oluştuğu göz önünde bulundurulduğunda otomotiv sektöründeki en önemli üretim proseslerinden birisinin birleştirme yöntemi olduğu görülmektedir. Bu kapsamda montaj hattında parçaların birleştirilmesinde farklı teknikler kullanılabilir (Mori ve ark., 2013).

2.2. Birleştirme Teknikleri

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde yüksek performanslı mühendislik uygulamalarında termoplastiklerin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Tamamen metalik yapılardan kompozit yapılara geçmenin ana nedenlerinden biri ürün performansını yapısal gereksinimlere göre uyarlama olanağıdır. Termoplastiklerin yapılarda kullanılması yüksek kırılma dayanıklılığı, daha iyi çevresel direnç ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlar sağlamasıdır (Altmeyer ve ark., 2015).

Fiber takviyeli termoplastikler; dış ve iç gövde panelleri, kapı panelleri, tavan, bagaj kapağı vb. gibi otomotiv gövde yapısal uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiber takviyeli plastiklerin yapısal bir eleman olarak kullanılabilmesi için bu malzemelerin sertlik, güç ve dayanıklılık gibi güvenlik ihtiyaçlarıyla yüzey kalitesi açısından estetik ihtiyaçları karşılaması gerekmektedir. Termoplastik kompozitlerin birleştirilmesi, özellikle yapısal uygulamada bileşenlerin üretiminde önemli bir adımdır. Bu yapı, özelliklerin zayıflamasına neden olabilecek çeşitli düzensizlikler gösterebilmektedir (Gutowski, 1997). Karmaşıklık ve yüksek maliyet nedeniyle parça entegrasyonunun imkânsız olduğu, aynı bileşende farklı malzemelerin kullanıldığı, demontajın gerekli olduğu ve hasarın onarılmasının gerekli olduğu durumlarda birleştirmeler her zaman gereklidir (Serçer ve Raos, 2010).

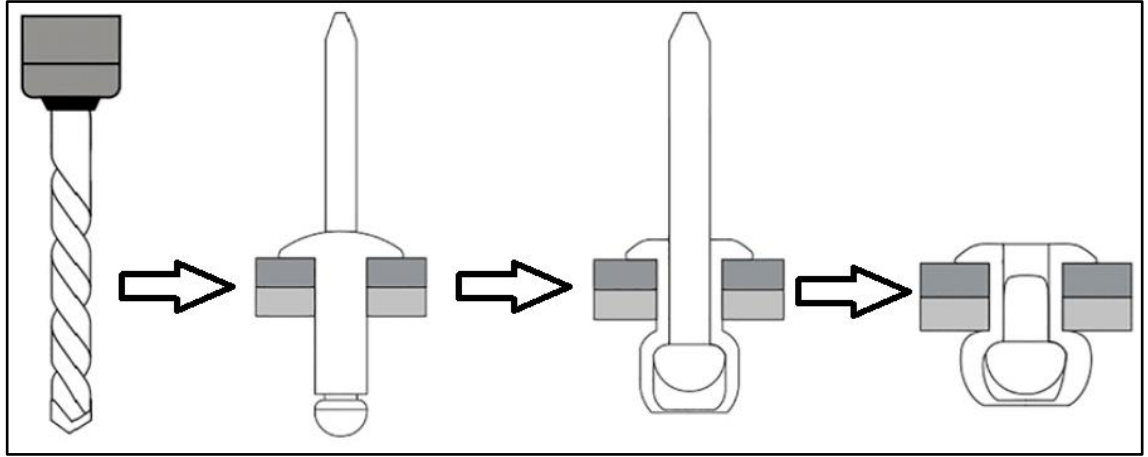
Termoplastik malzemeler, çeşitli malzeme türlerine göre mükemmel mekanik özellikler sağlasa da bir yapının performansı temel olarak bağlantıların davranışına bağlı olduğundan, en kritik konulardan biri bu parçaların benzer veya başka malzemelerle

birleştirilmesidir. Bu nedenle termoplastik kompozit bileşenler için çeşitli birleştirme yöntemleri araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Termoplastik birleştirme yöntemleri; mekanik birleştirme teknikleri, kimyasal birleştirme teknikleri ve termal birleştirme teknikleri olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Küçüköğlü ve Karpat, 2017).

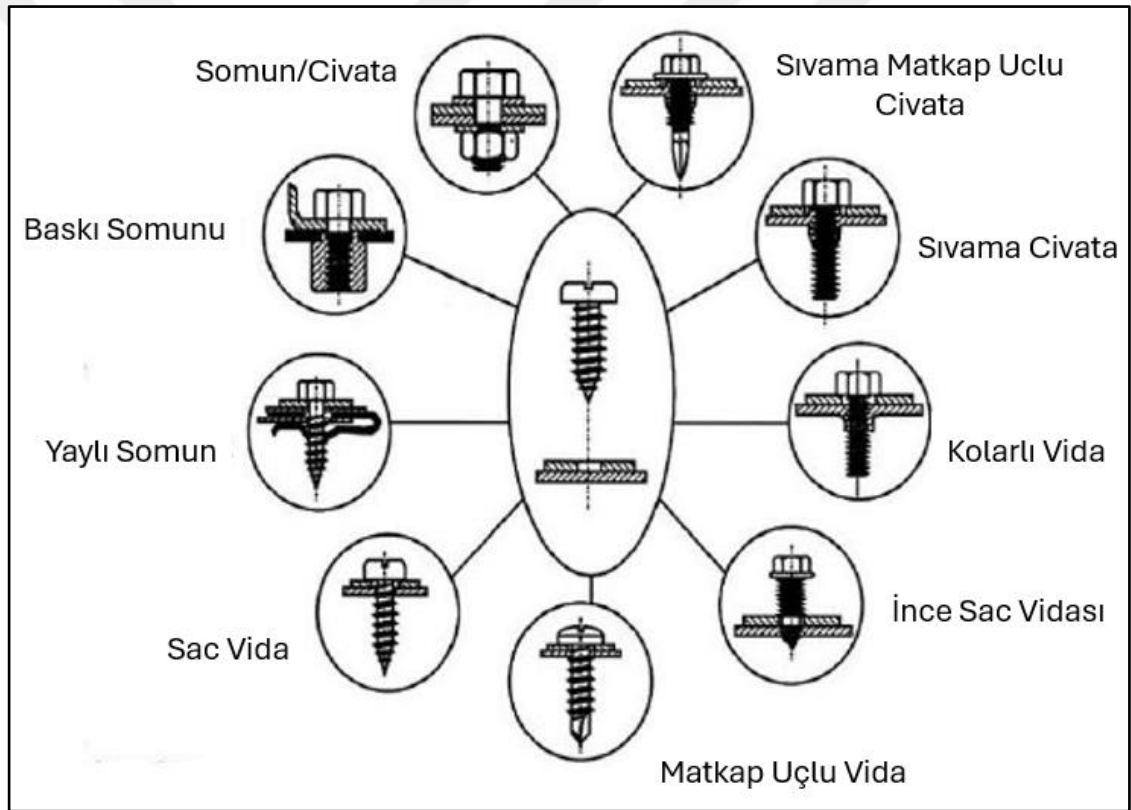
2.2.1. Mekanik birleştirme yöntemleri

Mekanik birleştirme tekniklerinde malzemeler, fiziksel yöntemler kullanılarak birleştirilir. İmalatçıya, herhangi bir yüzey işlemi gerektirmediğinden demontaj olma kolaylığı ile avantaj sağlayabilmektedir. Literatürde çeşitli mekanik birleştirme teknikleri bulunmaktadır ve bu teknikler aşağıdaki şekilde üç sınıfta gruplandırılmaktadır:

Mekanik Bağlantı Elemanları: Vida, cıvata, perçin gibi iki veya daha fazla malzemeyi mekanik olarak birleştirmek için kullanılan bağlantı elemanlarıdır. Bu birleştirme tekniği, sınırlı sayıda sökülmesi gereken montajlar için en ucuz, en güvenilir ve en yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden biridir (Martinsen ve ark., 2015). Özellikle perçin ile birleştirme yöntemi en eski ve en yaygın kullanılan mekanik birleştirme yöntemlerinden birisidir. Uçak gövdesi ve benzeri hava araçlarının üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Metal, plastik, kompozit, seramik vb. birçok malzeme üzerinde kolay bir şekilde uygulanabilmektedir. Uygulama açısından perçinleme yapılacak noktanın öncelikle delinmesi ve ardından perçinleme işleminin yapılması gerekmektedir. Şekil 2.1’de perçin uygulamasına ait örnek bir gösterim yer almaktadır. Bu yöntemin uygulamasında perçinlenecek bölgenin delinmesinden dolayı malzeme üzerinde deformasyon meydana gelebilmektedir. Fakat uygun takım ucu seçimi ile bu deformasyonun azaltılması mümkün olabilmektedir. Perçinleme yöntemine ek olarak somun ve cıvatalar da mekanik birleştirme yöntemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de mekanik bağlantı elemanı olarak kullanılan bazı somun ve cıvata olarak örnekleri gösterilmektedir. Perçin, somun ve cıvatalar basit uygulanabilirlikleri ile avantaj sağlarken birleştirilecek bölgede fazla kullanılması durumunda malzeme ağırlığında ciddi artışlara neden olabilmektedir. Bu nedenle otomotiv uygulamalarında çok fazla tercih edilmemektedir (Siddique ve ark., 2022).



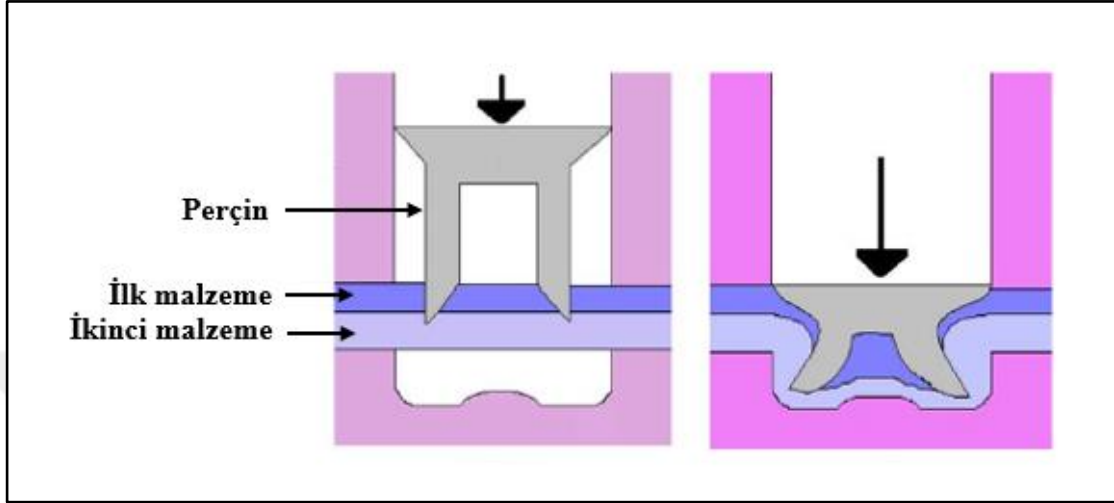
Şekil 2.1. Perçinleme yöntemine ait örnek gösterim (Siddique ve ark., 2022)



Şekil 2.2. Mekanik bağlantı elemanlarından örnekler (Martinsen ve ark., 2015)

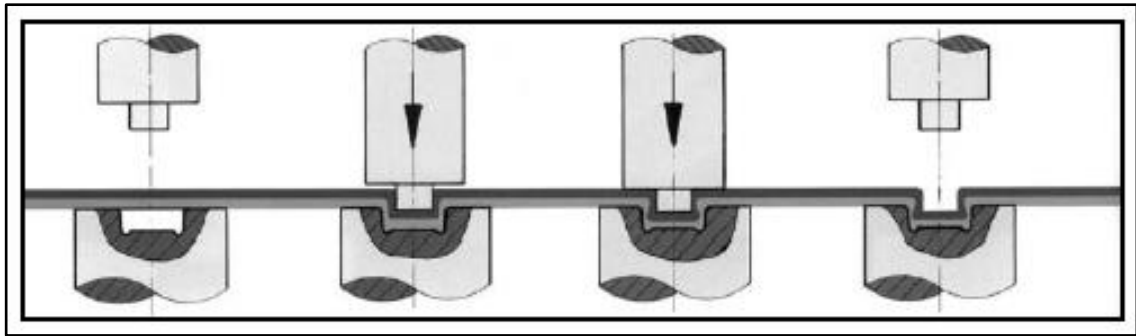
Kendinden Delmeli Perçinleme (Self-Pierce Riveting): Hem benzer hem de farklı malzemelerin birleştirilmesi için geliştirilen tekniklerden biri de kendiliğinden delmeli perçinleme tekniğidir (He ve ark., 2008). Bu yöntemde de birleştirilecek malzemelerin kalınlıkları kullanılan perçinin boyuna uygun olmak zorundadır. Kendiliğinden delmeli

perçinleme yöntemi, perçinin iki veya daha fazla malzemeye herhangi bir hazırlık deliği olmadan yerleştirilmesine dayanan bir işlemdir (Mori ve ark., 2006). Şekil 2.3'te kendinden delmeli perçinleme yöntemi için örnekleme gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kendinden delmeli perçinleme tekniği örnekleme (Mori ve ark., 2006)

Sıkıştırma (Clinching): Kendi kendini delen perçinleme yöntemine benzer bir perçinleme tekniğidir. Levhalar perçinsiz bir zımba ve kalıpla lokal kıvrıma yoluyla birleştirilmektedir. Perçinleme teknikleri sürecinde, malzeme üzerinde yuvarlak bir düğme oluşturan farklı miktarlarda malzeme deformasyonu ile levhalar arasında bir kenetlenme oluşturulmaktadır (Mori ve diğerleri, 2013). Sıkıştırma yönteminin prensibi Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



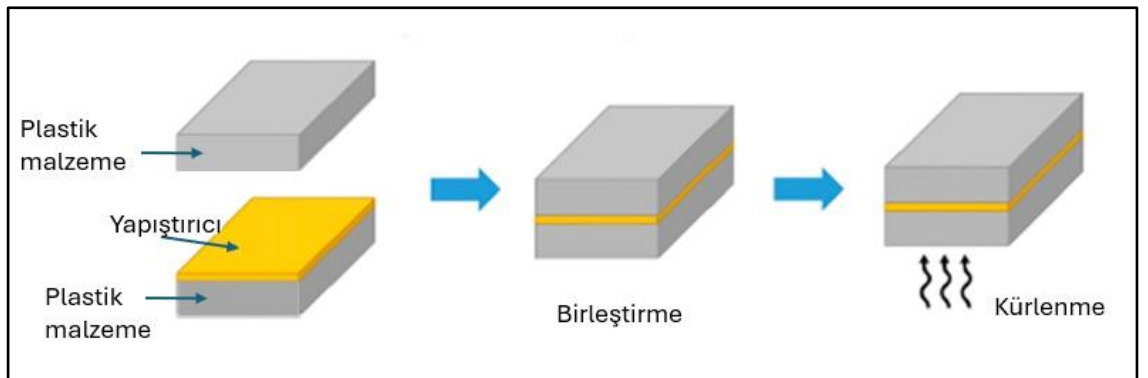
Şekil 2.4. Sıkıştırma (Clinching) yönteminin prensibi (Mori ve ark., 2013)

2.2.2. Kimyasal birleştirme yöntemleri

Kimyasal birleştirme yöntemleri, bir plastik malzemenin kimyasal yapıştırıcı ile başka bir tip plastiğe birleştirildiği yöntemdir. Kimyasal yapıştırıcı sayesinde bağlantı bölgesinin sürekli olması, su ve hava girişi istenmeyen bölgeler için tercih sebebidir. Genellikle kimyasal birleştirme, mukavemet ve dayanıklılık gerektiren birleştirmelerde diğer birleştirme yöntemlerine göre daha tutarlı ve öngörülebilir sonuçlar üretmektedir (Reitz ve Oman, 2000; Tavokoli ve ark. 2005).

Kimyasal birleştirme yöntemleri çarpışmaya dayanıklılık, gürültü, titreşim ve dayanıklılık performansını iyileştirmek için plastik malzemelerin birleştirilmesinde yaygınlaşmıştır (Kang ve ark., 2015). Kimyasal birleştiriciler korozyon dayanımının yüksek olması, bağlantı yöntemi nedeniyle titreşimleri azaltması ve sürekli bağlantıya sahip olma gibi avantajları sağlamaktadır. Özellikle paketlenme, elektronik, havacılık vb. sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Malzemelerin kimyasal birleştirme teknikleri kullanılarak birleştirilmesi için, malzemelerin yüzeylerinin yabancı maddelerden temizlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle uygulanacak yapıştırma prosedürü için yüzey hazırlığı gerektiren bir yöntemdir (Banea ve ark., 2009; Da Silva ve ark., 2009; Jin ve ark., 2014). Dolayısı ile yüzey temizliği yapılması, polimerizasyon için süre ihtiyacı ve düşük ısıl dayanımları gibi dezavantajları bulunmaktadır (Baldan, 2004; Martinsen ve ark., 2015). Şekil 2.5'te kimyasal birleştirme yöntemine ait örnek gösterim yer almaktadır.



Şekil 2.5. Kimyasal birleştirme yöntemine ait örnek gösterim (Siddique ve ark., 2022)

2.2.3. Termal birleştirme yöntemleri

Termal birleştirme yöntemlerinde iki malzemenin ara yüzeyde yapıştırıcı veya başka kimyasal ürün kullanılmadan kalıcı olarak birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Termal birleştirme tekniklerinde, birleştirilecek polimer yüzeyleri ısıtılır ve baē oluşana kadar basın uygulanır. Her ne kadar termal birleştirme teknikleri malzeme üzerinde artık gerilime neden olma potansiyeline sahip olsa da mekanik birleştirme tekniklerinin dezavantajı olan, malzeme üzerindeki deliklerin oluřturduēu diēer gerilme kaynaklarının önlenmesini saēlamaktadır (Ageorges ve ark., 2001).

Termoplastiklerin doērudan baēlanması veya kaynaklanması için bir dizi teknik mevcuttur ve bunlar genellikle baēlantı yüzeyindeki ısı üretim yöntemine göre sınıflandırılmaktadır. Termal birleştirme yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi lazer birleştirme yöntemidir (Amanat ve ark., 2010). LTW; temassız ve tek taraftan erişim kaynaēı gibi geleneksel kaynak tekniklerine göre çok fazla üstünlüēü, düşük işlem maliyeti ve otomasyona uygunluēu nedeniyle otomotiv endüstrisinde cazip ve ekonomik açıdan avantajlı bir birleştirme tekniēi haline gelmektedir (Li ve ark., 2022; Parimanik ve ark., 2023a; Tien ve ark., 2023; Yuce ve ark., 2019). Özellikle ince parçalar için termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde LTW en kullanışlı yöntemlerden birisidir (Siddique ve diēerleri, 2023; Der ve ark. 2019; Der ve ark., 2020).

2.3. Lazer Kaynak Teknolojisi

LTW, endüstride ve imalatta giderek artan uygulamalar bulan, hızla gelişen ve çok yönlü bir teknolojidir. Küçük ve ulaşılması zor alanların hassas şekilde kaynaklanmasına olanak tanır ve özellikle bilgisayar veya robot kontrolü altında çalışmaya uygundur (Katayama, 2013).

2.3.1. Lazer kaynak tarihçesi

“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” cümlesindeki sözcüklerin baş harflerinden oluşan “LASER”, “Uyarılmış Işınım Yayımıyla Işığın Yükseltilmesi”

anlamına gelmektedir. İlk olarak 1917 yılında Albert Einstein'ın ışık yayılım teorisinde ortaya konmuştur. 1951 yılında Charles Townes tarafından "Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation – LASER" icat edilmiştir. Günümüzde kullanılan ilk lazer kaynak 1958 yılında Townes ve Schawlow tarafından "Optik Laser" olarak icat edilmiştir (Mazumder, 1993; Steen ve Mazumder, 2010).

Silvers ve Wachtell (1970) ilk kez 1970'lerin başında film malzemelerinin CO₂ lazeri kullanılarak plastiklerin kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu, lazerin bağlantının üst kısmından iletilmeden filmleri doğrudan ısıttığı bir lazer kaynak işlemidir. 1985 yılında, Japonya'da Toyota firmasında ilk kez Nd:YAG lazer alt plastiğin emme özelliklerini değiştirmek için karbon siyahı katkı maddesi kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir ve patenti alınmıştır. Plastiklerin lazer kaynağı artık diyot ve fiber lazerler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Jones, 2013).

2.3.2. Lazer kaynak çeşitleri

Lazerler ışının üretildiği ortamın katı, sıvı, gaz ve yarı iletken olmasına göre isimlendirilerek dört gruba ayrılır. Aktif ortam olarak; katı haldeki lazer materyalleri kullanan lazerler katı lazerler, saydam bir bölgeye konmuş sıvı kullanılan lazerler sıvı lazerler, gaz karışımı kullanan lazerler gaz lazerler ve iki yarı iletken maddenin yan yana getirilerek elektrik akımı geçirilerek üretimi sağlanan lazerler yarı iletken lazerler olarak adlandırılır.

Endüstride lazer ışının üretildiği ortama göre malzeme işlemede farklı lazer cihazları kullanılmaktadır. Kullanılan lazer cihazları: CO₂ lazerler, Nd:YAG lazerler, diyot lazerler ve fiber lazerlerdir. Endüstride kullanılan lazer cihazı çeşitleri ve özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

CO₂ Lazer Cihazları: CO₂ lazerler 10600 nm dalga boyunda birçok plastik uygulama için uygun değildir. Bu nedenle plastik uygulamalarda lazer kaynağı içinde en az kullanılan kaynak çeşididir. CO₂ lazerleri kalın parçalar için çok verimli değildir ancak plastik filmleri birleştirmek için kullanılmaktadır. Watt başına maliyet açısından diyot lazerlerle

hemen hemen aynı olmakla birlikte, diyot lazerlerden çok daha büyüktürler ve çok daha fazla yer kaplamaktadır. CO₂ lazerlerin verimliliği %5-10 aralığındadır. Maksimum çıkış gücü 50kW'ın üstünde olduğundan diyot lazerlerden çok daha yüksek çıkış gücüne sahiptirler (Rotheiser, 2009).

Çizelge 2.1. Endüstride kullanılan lazer cihazı çeşitleri ve özellikleri (Jones, 2013; Rotheiser, 2009)

	CO ₂	Nd:YAG	Diyot	Fiber
Dalga Boyu (nm)	10600	1064	~800-900	~1000& ↑
Verimlilik (%)	5-10	3-8	30-50	20
Maksimum Çıkış Gücü (kW)	↑50	↑50	↑ 0,006 > 1	30
Işın Kalitesi	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek

Nd:YAG Lazer Cihazları: Nd:YAG lazer cihazları endüstride malzeme işlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif ortam maddesi “neodimiyum:itriyum alüminyum garnet” kristal çubuğu olan Nd:YAG lazerler katı lazer sınıfında yer almaktadır. Plastik uygulamalarda en sık kullanılan lazer olan Nd:YAG’ın verimi %3-5, dalga boyu 1064 nm, maksimum çıkış gücü 5kW’ın altındadır. Nd:YAG lazerler, diyot lazerlere göre daha verimli, daha kompakt, daha az maliyetli ve farklı geometrilere daha kolay uygulandığından disk lazerlerin yerini almaktadır (Jones, 2013; Troughton, 2008).

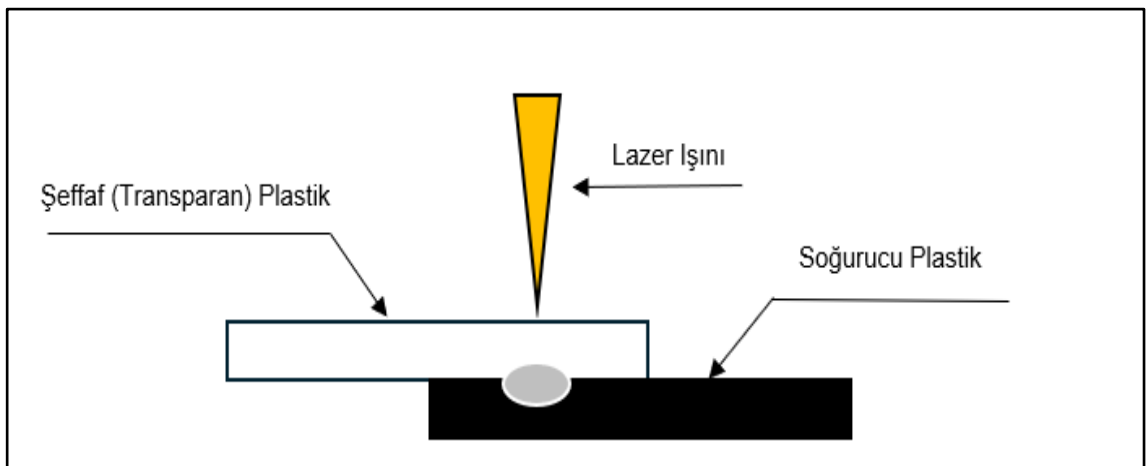
Diyot Lazer Cihazları: Diyot lazer cihazları 808 nm (InGaAlAs) veya 940 nm (InGaAs) dalga boyunda radyasyon üretmektedir. Düşük ışın kalitesi nedeniyle Nd:YAG veya fiber lazerler kadar küçük nokta boyutu üretmezler. Ancak bu, nispeten düşük satın alma ve işletme maliyetlerinin büyük ilgi çektiği plastik lazer kaynağı için nadiren sorun teşkil eder ve çoğu plastik uygulamasında tercih edilir. Işın bir fiber optik tarafından iletilebilir, ancak diyot lazeri yeterince küçük ve hafif olduğundan, diyotun tek bir üniteye bir mercek sistemi ile dahil edildiği doğrudan bir sistemin kullanılması genellikle mümkün olur (Bryden, 2000; Reinl, 2014; Rodríguez-Vidal ve ark.; Rotheiser, 2009).

Fiber Lazer Cihazları: Fiber lazer cihazları tipik olarak 1.000-2.100 nm aralığında tek bir dalga boyu sağlamaktadır. 1.100 nm civarındaki dalga boylarında malzeme işleme alanında, eşdeğer ışın kalitesiyle daha yüksek verimliliğe sahip olduğundan Nd:YAG lazerlerin doğrudan yerine kullanılabilir. Sistemleri nispeten kompakttır ve

havayla soğutulabilmektedir. Plastik kaynak alanında fiber lazerlerin hassas kaynaklama, filmler, tekstiller ve daha büyük kalıplanmış parçalar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanıldığı görülmektedir (Jones, 2013).

2.3.3. Lazer kaynak yöntemi

Lazer kaynağında farklı optik özelliklere sahip iki malzemenin yüzeylerini bağlamak için bir lazer ışını kullanılır. Lazer ışınının sağladığı termal enerji, ara yüzdeki malzemeleri eritir ve ısı yayılımı nedeniyle birbirleriyle birleşir (Haque ve ark., 2022). Şekil 2.6’da şematik olarak gösterildiği üzere lazer iletim kaynağında, üst polimer kısım lazer dalga boyuna karşı şeffaf kısım, alt kısım ise emici kısımdır. Lazer ışın, emici olmayan bir katmandan emilimin ara yüzde meydana geldiği emici bir alt katmana geçer. Enerjinin emilmesi, polimerin bağ ara yüzünde erimesine neden olmaktadır. Alt kısım lazer ışını emer ve radyasyonu kaynak bölgesinde anında ısıya dönüştürür. Isı enerjisi polimerin alt kısmını eritir ve aynı zamanda kaynak ara yüzünde ısı iletimi yoluyla üst tabakayı yumuşatır (Boglea ve ark., 2007; Hopmann ve Weber, 2012). Her iki malzemenin uygun şekilde kaynamasını sağlamak için birleşen iki parça arasına da yeterli basınç uygulanır. Her ikisinin de kaynak ara yüzünde birleştirilmesiyle oluşan polimerin eritilmesi veya yumuşatılmasından sonra, kaynak havuzu oluşur ve malzemenin birbirine karışması meydana gelir (Jones, 2013).



Şekil 2.6. Plastiklerin lazer kaynak işlemi (Haque, 2022)

2.4.1. Lazer kaynak parametreleri

Lazer kaynak kalitesini etkileyen anahtar parametreler lazer gücü, lazer hızı, lazer ışınının düzgünlüğü, ara yüzeydeki malzemenin soğurma özellikleri ve baskı kuvvetidir (Jones, 2013). Bu işlem parametreleri doğru seçilmediği takdirde birçok olumsuzluk ve kaynak hatasının görülmesine sebep olmaktadır. Lazer kaynak işleminde farklı malzeme türlerinde ve farklı çalışma şartlarında aynı sonuçları elde etmek mümkün olmayabilir. Optimum işlem parametreleri ön denemelerin gerçekleştirildikten sonra lazer kaynak makinesi özellikleri göz önüne alınarak belirlenmelidir.

2.4.2. Lazer kaynağın avantajları ve dezavantajları

Lazer iletim kaynağı, polimerlerin geleneksel ve ileri kaynak işlemleriyle karşılaştırıldığında çok sayıda işlem avantajı sağlamaktadır. Esneklik özelliği sayesinde diğer kaynak yöntemleri ile ulaşılması zor olan yerlerde kaynak yapılabilir. Aynı zamanda parça tasarımlarında kısıtlamaları azaltarak estetik sunmaktadır. Temassız yapısı sayesinde birleştirilecek parçalar ile temas etmeden kaynak yapılabilir ve temiz bir enerji kaynağıdır. Kaynak bölgesi çevresinde ısıdan minimum düzeyde etkilenen bölge üretmesi nedeniyle yüksek kaliteli birleşim sağlamaktadır (Acherjee ve ark., 2010; Kagan ve Bray, 2001; Kagan ve ark., 2002; Olowinsky ve Rösner, 2012; Puetz ve ark., 1997). Lazer kaynağı yalnızca termoplastik polimerlerin kaynağı ile sınırlı değildir. Benzer veya farklı malzeme kombinasyonunda elastomerlerin ve yarı kristalli polimerlerin kaynağında kullanılabilir (Amanat ve ark., 2010; Baylis ve ark., 2002; Wang ve ark., 2009).

Lazer kaynak işleminin yaygın kullanımını sınırlayan bazı olumsuz yönler de mevcuttur. Seri üretim için etkili bir yöntem geliştirmiş olmasına rağmen ilk yatırım bedelinin yüksek olması yani ekipman için daha yüksek sermaye harcanması gerektirmektedir. Yatırım maliyetlerine ek olarak bakım maliyetleri de diğer kaynak teknolojilerine göre daha fazla olabilmektedir. Ayrıca kullanımı deneyimli bir personelin çalıştırılması gerekmektedir (Klein ve Kraus, 2004).

2.4. Lazer Kaynak Optimizasyonu Alanında Yapılan Çalışmalar

Optimizasyon, belirli bir çıktıyı en iyi hale getirmek için çıktıya bağlı bağımsız değişken değerlerinin belirlenen kısıtlamalar göz önüne alınarak belirlenmesi işlemidir. Birçok mühendislik uygulamasında olduğu gibi LTW için de belirli bir proses parametresi aralığından uygun değer kombinasyonunu bulmak ve mümkün olan en iyi kaynak kalitesini elde etmek amacıyla optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Literatürde LTW kaynak kalitesi; kopma yükü, bağlantı mukavemeti veya kesme mukavemeti gibi faktörlerin yanı sıra, birleştirme parçalarındaki kaynak genişliği ve nüfuz derinliği gibi morfolojik faktörlere göre değerlendirilebilmektedir. Kaynak kalitesini etkileyen lazer gücü, lazer hızı, baskı kuvveti gibi çeşitli kaynak parametreleri vardır. Kaynak prosesine uygulanan optimizasyon teknikleri, kaynak prosesinin sürekli iyileştirilmesi için gereklidir (Kumar ve ark., 2021b).

LTW, lazer teknolojisinin yardımıyla termoplastiklerin hızlı ve verimli bir şekilde birleştirilmesini sağlar. Ancak LTW'nin performansı, kaynak hızı, lazer gücü, mesafe vb. kontrol edilebilir parametrelere güçlü bir şekilde bağlıdır (Hubeatir, 2020; Singare ve ark., 2014). Bu nedenle, LTW için önemli parametrelerin ve bunların optimal değerlerinin belirlenmesi, bir dizi kalite ölçütü için iyi bir sonuç elde etmek açısından çok önemli bir faaliyettir. Bu amaç doğrultusunda literatürde sonlu elemanlara, deneysel tasarıma, yapay zekaya dayalı yöntemler veya bu yöntemlerin kombinasyonu ile hibrid şekilde çalışan yaklaşımlar dikkate alınmıştır (Chen ve ark., 2020; Yuguang ve ark., 2013; Der ve ark., 2020; Cao ve ark., 2022).

Deney tasarımı (DOE) tabanlı yaklaşımlar, bir dizi girdi parametresinin istenen yanıt üzerindeki etkileri verimli bir şekilde analiz edilebilmesine imkân sağladığından literatürde LTW parametrelerini optimize etmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. Birçok çalışmada LTW parametrelerini optimize etmek için yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılmıştır (Acherjee ve ark., 2012; Zhao ve ark., 2012). RSM, girdi parametreleri ile yanıt arasındaki ilişkinin belirlenmesine olanak tanıyan ampirik bir model sağlayan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir koleksiyonudur. Elde edilen ampirik model kullanılarak, fonksiyonun kısmi türevi aracılığıyla bir girdi parametresine

göre yanıtın duyarlılık analizi yapılabilmektedir. Ek olarak, en iyi parametre setini bulmak için birçok çalışmada meta-sezgisel yöntemler uygulanmaktadır. Acherjee ve ark. (2017), termoplastik malzemeleri temel alarak kaynak genişliği ve kaynak mukavemeti için iki farklı yanıt için en iyi parametre setini belirlemek üzere çiçek tozlaşma algoritmasını kullanmıştır. Bu çıktılar için lazer gücü, kaynak hızı, emniyet mesafesi ve sıkıştırma basıncını optimize edilecek girdi parametreleri olarak değerlendirmişlerdir. Çiçek tozlaşması algoritması ile optimize edilen ampirik model, dört faktörlü ve beş seviyeli merkezi kompozit dönebilen deney tasarımına sahip RSM ile elde edilmiştir. Aynı yanıtlar için Kumar ve ark. (2020), LTW'de ışın yalpalama stratejisini değerlendirmişlerdir. Lazer gücü, kaynak frekansı, kaynak hızı, yalpalama genişliği ve yalpalama frekansını yani kontrol edilebilir beş parametrenin en iyi değerini belirlemek için parçacık sürüsü optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. RSM modellerinin optimizasyonu için öğretim öğrenimine dayalı optimizasyon algoritmasının kullanıldığı Kumar ve ark. (2022) tarafından aynı yanıtlar ve giriş parametreleri dikkate alınmıştır. Acherjee ve ark., (2009), PMMA malzemelerin bir diyot lazer sistemi kullanarak lazer gücü, kaynak hızı, lazer ışınının boyutu ve baskı kuvveti gibi proses parametrelerinin kaynak mukavemeti ve kaynak genişliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Tasarım matrisini oluşturmak için Design-Expert V7® kullanılmıştır. Kaynak işlemi parametreleri ile kaynak bağlantısının çıktı değişkenleri arasındaki matematiksel ilişkileri geliştirmek ve aynı zamanda istenen kaynak kalitesine yol açan kaynak girdi parametrelerini belirlemek için RSM'yi kullanmışlardır. Bideskan ve ark. (2020), lazer kaynağı kullanarak PMMA ve alüminyum 6061-T6'dan yapılmış polimerik laminat yapı üzerinde benzer bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Wang ve ark. (2013), polietilen tereftalat (PET) ve titanyum malzemelerinin lazer kaynağı için minimum sayıda denemeyle model tahmininin doğruluğunu artırmak için sonlu elemanlar yöntemi (FEM), RSM ve genetik algoritmanın (GA) birleşimine dayalı bir termal model geliştirmiştir. Başka bir çalışmada Wang ve ark. (2012), polikarbonat (PC) malzemelerin LTW sürecine yönelik deneyleri planlamak için merkezi kompozit dönebilir deneysel tasarımı kullanmışlardır. Dikkate alınan giriş parametreleri; lazer gücü, birleştirme hızı, baskı kuvveti ve tarama sayısı olmuştur. İncelenen yanıtlar ise kaynak mukavemeti, genişlik ve maliyeti olarak kabul edilmiştir. Çalışmalarında tüm

proses parametreleri arasında hem hız hem de tarama sayısının bağlantı maliyeti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, RSM modellerinin süreç parametreleri ile yanıtlar arasındaki ilişkiyi temsil etmede daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Kumar ve ark. (2018), RSM'yi kullanarak farklı plastiklerin lazer kaynağının çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Giriş parametreleri olarak gücü (7,60–11,60 W), tarama hızını (0,66–2,34 mm/s) ve frekansı (198,86–451,13 kHz) olarak dikkate almışlardır. Kopma yükü ve kaynak genişliği tepki olarak ölçülmüştür. Kopma yükünün maksimuma çıkarılması ve kaynak genişliğinin minimuma indirilmesi için optimum parametrik kombinasyonu; 7,60 W lazer gücü, 1,26 mm/s kaynak hızı ve 372,09 kHz frekans ile çıktılarının beklenen değerlerine ait fonksiyonu analizi kullanılarak elde etmişlerdir. Ayrıca güç ve tarama hızının sırasıyla kopma yükü ve kaynak genişliği için en önemli faktörler olduğu bulmuşlardır.

Shin ve Choi (2014), ABS ve PC malzemelerin birleştirme işlemi için enerji optimizasyonunun tasarımını incelemişler. Kaynakların birleştirme enerjisi eşliğini ve mekanik özelliklerini bulmak için ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ve erime bölgesi ölçümlerini yapmışlardır.

Bhattacharya ve ark. (2018), güç, frekans ve tarama hızının PC ile akrilik arasında yapılan lazer kaynağının kaynağın geometrisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Lazer gücü, tarama hızı ve frekansı gibi proses parametrelerinin kaynak genişliği ve kaynak dikliği geometrisinin HAZ üzerindeki etkisi, yanıt yüzeyi metodolojisi tarafından geliştirilen ampirik bir model kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca süreçteki önemli parametre/parametreleri bulmak için varyans analizi yapılmıştır. Kaynak genişliğinin kontrolünde güç ve tarama hızının önemli etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

Jiao ve ark. (2018), proses parametreleri olarak lazer gücünü, tarama hızını ve kenetleme basıncını kullanarak, karbon fiberle güçlendirilmiş termoplastik ile paslanmaz çelik lazer kaynağının bağlantı kalitesini optimize etmiştir. Paslanmaz çelik yüzeyindeki termal kusurun metalin mekanik özelliklerini değiştireceğini ve servis ömrü performansını azaltacağını belirtmişlerdir. Karbon fiberle güçlendirilmiş termoplastik ile paslanmaz

çelik arasında fiziksel bağ ve mekanik bağın yanı sıra kimyasal bağ da bulunmuştur. En yüksek kesme gerilimi lazer gücü, birleştirme hızı ve kelepçeleme basıncı sırasıyla 280 W, 4 mm/s ve 0,15 MPa olduğundan elde edilmiştir.

Katsiropoulos ve ark. (2009), termoplastik kompozit malzemelerden üretilen parçanın hem kalitesi hem de maliyeti için termal işlem döngüsü ve lazer kaynak ünitesi parametreleri için LSTM-OPT yazılım aracını kullanarak genel bir optimizasyon konsepti geliştirmişler.

Rodríguez-Vidal ve ark. (2012), 0,7 mm ile 1,4 mm arasında kaynak genişliklerine sahip yüksek kaliteli kaynak dikişleri elde etmek için özel bir lazer sistemi tasarlamışlardır. Yaptıkları çalışmada termoplastik kompozitlerin lazer destekli işlenmesi sırasında, çok sayıda deney yapılmadıkça girdi parametrelerinin tepkiler üzerindeki bireysel etkileri kolayca ayıramadığını belirtmişlerdir.

Dwivedi ve Sharma (2014) PET ve 316L paslanmaz çeliğin lazer kaynağını optimize etmek için lazer gücü, kaynak hızı ve vuruş mesafesi üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Süreç parametreleri, iyi bir bağlantı elde etmek için yanıt metodolojisi kullanılarak optimize edilmiş ve deneyleri ve yanıt yüzeyi metodolojisini planlamak için merkezi kompozit tasarım kullanılmıştır. Varyans analizi ile lazer gücünün daha fazla katkı sağladığı ve bunu birleştirme hızının takip ettiği sonucuna varılmıştır.

Literatürde LTW parametrelerini optimize etmek için RSM'ye ek olarak alternatif olarak Taguchi yöntemi de kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, parametrelerin istenen yanıt üzerindeki ana etkilerini analiz etmek için yöntemde daha az deneye ihtiyaç duyulmaktadır. Anawa ve ark. (2008), beş seviyeli üç parametre için Taguchi L₂₅ ortogonal dizisini kullanarak kaynak mukavemetini optimize etmiştir. Benzer şekilde Acherjee ve ark. (2010), Taguchi yöntemini kullanarak akriliklerin kaynak mukavemetini optimize etmiştir. Taguchi yöntemini temel alan bir başka çalışma ise Huang ve ark. (2021), tarafından PMMA'nın çelik bağlantıya kaynak kalitesini artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mazumdar ve Hoa (1995), tekil proses parametrelerinin etkilerini araştırmak için daha az deneye ihtiyaç duyulan Taguchi yöntemini kullanmışlar.

Deneysel tasarım için L_9 ortogonal dizilerini seçmişler ve her faktörün bağlanma kalitesine yüzde katkısını ANOVA tekniğiyle tahmin etmişlerdir. Nakhaei ve ark. (2013a,b), polipropilen (PP) kil nanokompozit kaynakları için CO_2 lazer kaynak parametrelerinin optimizasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yöntem olarak Taguchi metodunu ve yanıt yüzeyi metodolojisi kullanmışlardır. Acharjee ve ark. (2010), akriliklerin lazer kaynağının deneysel tasarımını ve lazer gücü, kaynak hızı ve odak mesafesi gibi proses parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi ortogonal dizisini seçmişlerdir. Maksimum kaynak mukavemeti için en iyi parametrik kombinasyonun 28 W lazer gücü, 5 mm/s kaynak hızı ve 9 mm odak mesafesi olduğunu belirlemişlerdir. Kaynak mukavemetine ilişkin varyans analizi sonuçlarına göre lazer gücünün en önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir. Bunu odak uzaklığı ve kaynak hızı takip etmiştir.

Yukarıda verilen çalışmalara benzer şekilde, tek bir yanıtı optimize etmek için Taguchi yöntemini kullanan birçok çalışma bulunmaktadır. Buna ek olarak literatürde yer alan bazı çalışmalar Taguchi yöntemini kullanarak kaynak kalitesini artırmak için birden fazla yanıtı dikkate almaktadır. Bu bağlamda birden fazla kalite karakteristiğini tek bir performans ölçüsüne dönüştürmek amacıyla gri ilişkisel analiz Taguchi yöntemine entegre edilmiştir. Kaynak mukavemeti ve kaynak genişliğinin çoklu tepkisi, farklı çalışmalarda mevcut yalpalama mesafesi-baskı kuvveti (Kumar ve ark., 2014), güç-kaynak hızı-odak dışı konum (Acherjee ve ark., 2011) ve lazer gücü-kaynak hızı-yalpalama mesafesi ve baskı kuvveti (Acherjee, 2020) gibi farklı parametre setleriyle incelenmiştir. Kaynak mukavemeti ve kaynak genişliğinin çoklu tepkisinden farklı olarak Hubeatir (2020), parça kalınlığı ve kaynak hızının kaynağın çoklu tepkisi ve kaynak derinliği üzerindeki etkilerini gri ilişkisel analiz tabanlı Taguchi yöntemiyle analiz etmiştir. Daha büyük kaynak genişlikleri daha güçlü kaynaklarla sonuçlanırken, daha derin nüfuziyetin kabarcıkların ve gözenekliliğin oluşması nedeniyle daha zayıf bir kaynakla sonuçlandığını belirtmiştir. Benzer metodoloji, Parimanik ve ark. (2023b), tarafından mikro sertlik ve çekme mukavemetinin çoklu tepkisine ilişkin Nitinol tellerinin LTW işlemine yönelik parametre setini optimize etmek için kullanılmıştır.

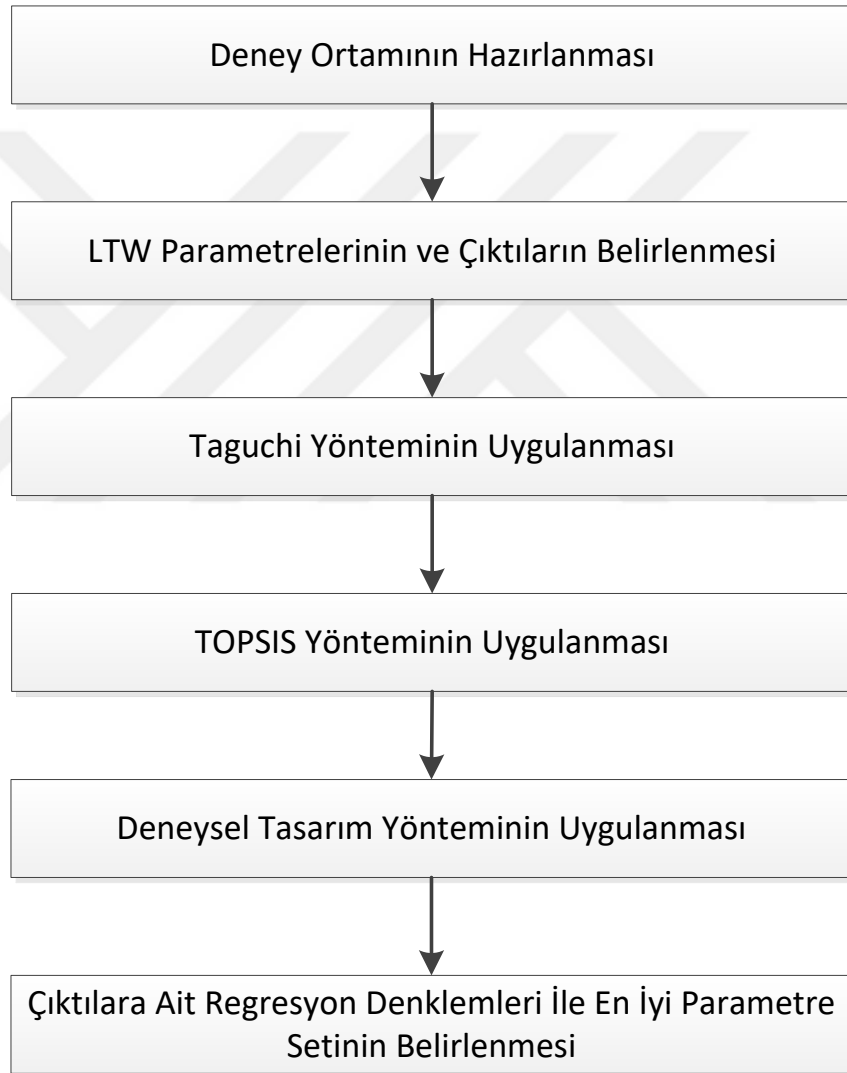
Yukarıda belirtilmiş olan kaynaklar dikkate alındığında LTW parametre optimizasyonu konusunda birçok farklı yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerden deneysel tasarım tabanlı yaklaşımların daha etkin sonuçlar ürettiği görülmektedir. Diğer yandan

birçok çalışma LTW kaynak kalitesi için tek bir çıktıyı dikkate aldığı, birden fazla çıktıyı dikkate alan az sayıda çalışmanın bulunduğu görülmüştür. Çok yanıtlı parametre optimizasyonunu dikkate alan çalışmalarda ise genel olarak Taguchi yaklaşımının kullanıldığı ve Taguchi sonuçlarının gri ilişkisel teorisi ile analiz edildiği görülmüştür. Bu kapsamda, çok yanıtlı bir optimizasyon için daha etkin sonuçlar üretebilecek yaklaşımların geliştirilebileceği tespit edilmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan materyal ve yöntemler açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında otomotiv aydınlatma sistemleri imalatçısı olan Odelo Otomotiv Aydınlatma A.Ş. firması ile çalışılmıştır. Birlikte çalışılan otomotiv firmasının lazer iletim kaynağı parametre optimizasyon problemi için önerilen çözüm metodolojisi, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi altı ana adımdan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Çözüm metodolojisi adımları

Geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımının ilk adımında, kaynak ve test süreci için deneysel ortam tanımlanmıştır. İkinci adımda LTW parametreleri ve optimize edilecek çıktılar

belirtilmiştir. Üçüncü adımda LTW parametrelerinin çıktılar üzerindeki ana etkilerini tespit edebilmek ve parametrelerin etkin olduğu seviyeleri analiz edebilmek için L_{16} ortogonal dizisi üzerinden Taguchi yöntemi gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki adımda, Taguchi yöntemi sonuçlarına göre oluşturulmuş farklı parametre alternatif setlerinin lazer kalitesi üzerindeki olası ortak etkisi TOPSIS yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Parametrelerin etkin olduğu seviyelerin ve çıktılar üzerindeki ana etkileri belirlendikten sonra beşinci adımda tam faktöriyel bir deneysel tasarım yöntemi uygulanmıştır. Deneysel tasarım çalışması ardından altıncı adımda her bir çıktı için LTW parametrelerine bağlı regresyon denklemleri elde edilmiştir. Regresyon denklemleri çok amaçlı optimizasyon problemi olarak çözülerek LTW için en iyi parametre seti elde edilmiştir. Yukarıda temel adımları açıklanmış olan çözüm metodolojisinin detayları aşağıda alt bölümlerde verilmektedir.

3.1. Materyal

Tez kapsamında LTW parametre optimizasyonu için kullanılmış olan malzeme ve deney ortamı aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak verilmiştir.

3.1.1. Malzeme seçimi

Polimerik malzeme kısıtlaması, lazer iletim kaynağı için bariyer olmaya devam etmektedir. Termoplastik malzemelerin çoğu; PMMA (Acherjee ve ark., 2009; Wang ve ark., 2023), PC (Kumar ve ark., 2021; Ghasemi ve ark., 2018), ABS (Rodríguez-Vidal ve ark., 2014), PA (Kagan ve ark., 2003), PVC (Van de Ven ve Erdman, 2007), PP (Baylis ve ark., 2002; Ghorbel ve ark., 2009), PE (Torrise ve ark., 2011), PS (Grewell ve Benatar, 2003), PET (Gisario ve ark., 2017; Wang ve ark., 2016a), PEEK (Amanat ve ark., 2011; Villar ve ark., 2018) lazer iletim kaynağı kullanılarak birleştirilebilmektedir.

Termoplastik polimer malzemeler veya elastomer malzemeler birbirleriyle uyumlu olmaları durumunda kaynak yapılabilirler. Bu kapsamda çeşitli polimerlerin kaynak edilebilirlik durumları analiz edilmiş ve bunların kombinasyonu Şekil 3.2'de listelenmiştir (Leister, 2024). Karmaşık plastik parçalar için, çeşitli gereksinimleri

karşılmak üzere farklı tipte termoplastik malzemelerin birleştirilmesi gerçek hayat uygulamaları için önemlidir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında LTW işlemleri için destek alınan otomotiv firmasının araç aydınlatma sistemlerinde kullanmış olduğu PMMA ve ABS malzemeleri seçilmiştir.

		Transparan (Şeffaf) Kaynak Partneri																																					
		EVA	PE-LLD	PE-LD	PE-HD	PP	COC	COP	ABS	ASA	SAN	PMMA*	PC	PC/ABS	PS	SB	PET	PBT	PVC	PUR	POM	PA 6	PA 66	PA 11	PA 12	PPS	LCP	PES	PEI	PI	PSU	MABS	TPE	PEEK					
Soğurucu Kaynak Partneri	EVA	●																																					
	PE-LLD		●																																				
	PE-LD			●																																			
	PE-HD				●																																		
	PP					●																																	
	COC						●																																
	COP							●																															
	ABS								●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	ASA									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	SAN									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	PMMA*			●	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	PC									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	PC/ABS									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PS			●						●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	SB															●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	PET			●						●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PBT									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PVC									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PUR																				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	POM			●	●					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PA 6			●	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	PA 66																																						
	PA 11																																						
	PA 12																																						
	PPS																																						
	LCP																																						
	PES																																						
	PEI																																						
PI																																							
PSU																																							
MABS																																							
TPE																																							
PEEK																																							

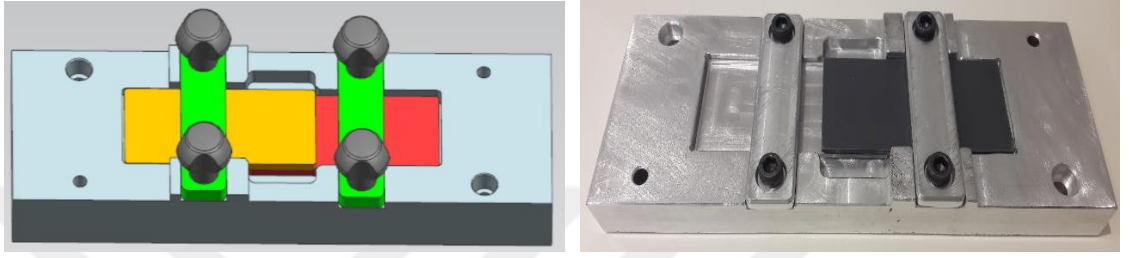
● Mükemmel kaynaklanabilirlik
● İyi kaynaklanabilirlik
● Olası kaynaklanabilirlik, denemelerle kontrol edilmeli

Şekil 3.2. Olası polimer kombinasyonları için lazer kaynaklanabilirlik tablosu (Leister, 2024)

LTW parametrelerini optimize etmek amacıyla deneyleri gerçekleştirmek için 40 mm genişliğinde, 85 mm uzunluğunda ve 2,7 mm kalınlığında PMMA ve ABS numuneleri kullanılmıştır. Numuneler ABS/PMMA ham madde levhasından alınmış ve lazer kesim tezgâhında belirlenen boyutlarda kesilmiştir. Deneylerde tutarlılığı sağlamak amacıyla, yüzeyler arasındaki boşlukları önlemek için numune kenarlarındaki çapaklar temizlenmiştir. Ayrıca birleştirilecek parçaların yüzeyleri alkol bazlı kimyasallar ile temizlenerek olası kalıntılardan arındırılmıştır.

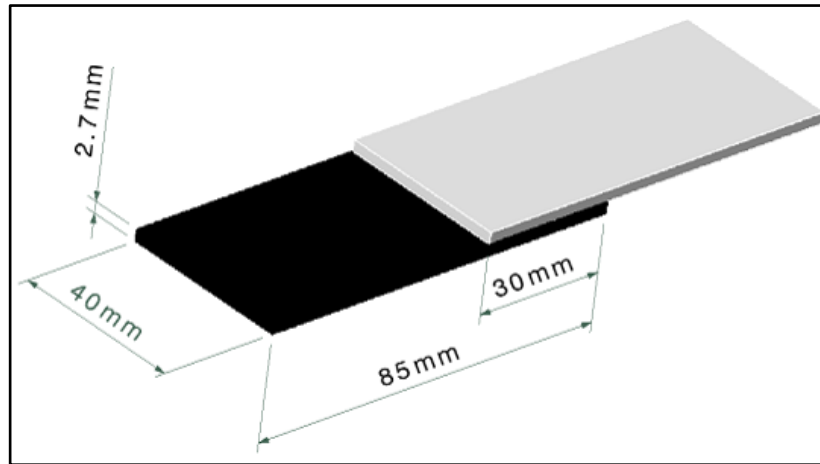
3.1.2. LTW fikstür imalatı

Kaynak öncesinde numunelerin yüzeyleri arasında herhangi bir boşluk olmaması kaynak işlemi için önemlidir. Bu amaçla numune boyutlarına uygun olarak tasarlanmış özel bir kaynak fikstürü imal edilmiş ve kaynak işlemi bu fikstür aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aparat yerleşim görüntüleri Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Tasarlanan ve imal ettirilen bindirme kaynak formatındaki numunelerin fikstür yerleşim görüntüsü

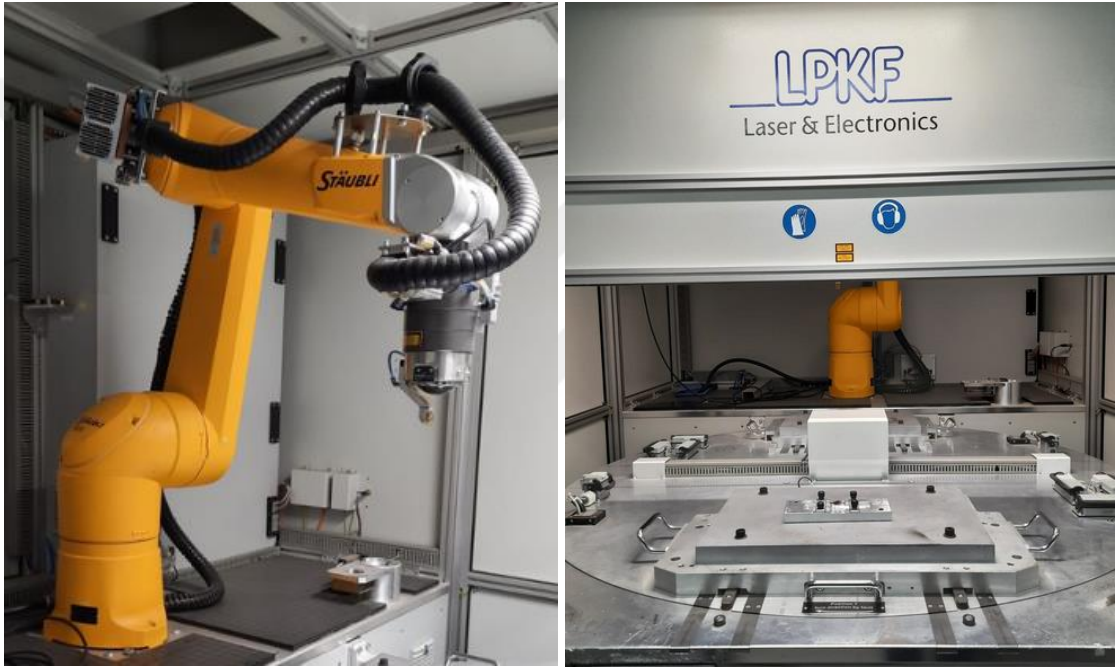
Üretilmiş olan fikstür, bindirme kaynak formatında birleştirilecek numuneler için aksel yönde hareketine izin vermemektedir. Bu sayede LTW denemelerinin değişik deney grupları için aynı koşullarda uygulanması sağlanmıştır. ABS ve PMMA malzemenin üst üste binme yüzeyi 30 mm olacak şekilde fikstüre yerleştirilmiştir. Lazer ışınının odak noktası üst kısımda olan şeffaf PMMA malzemenin üst üste binen alanın merkezinden geçirilmiştir. Şekil 3.4'te deneylerde kullanılan PMMA ve ABS numunelerinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.4. PMMA ve ABS numunelerinin şematik gösterimi

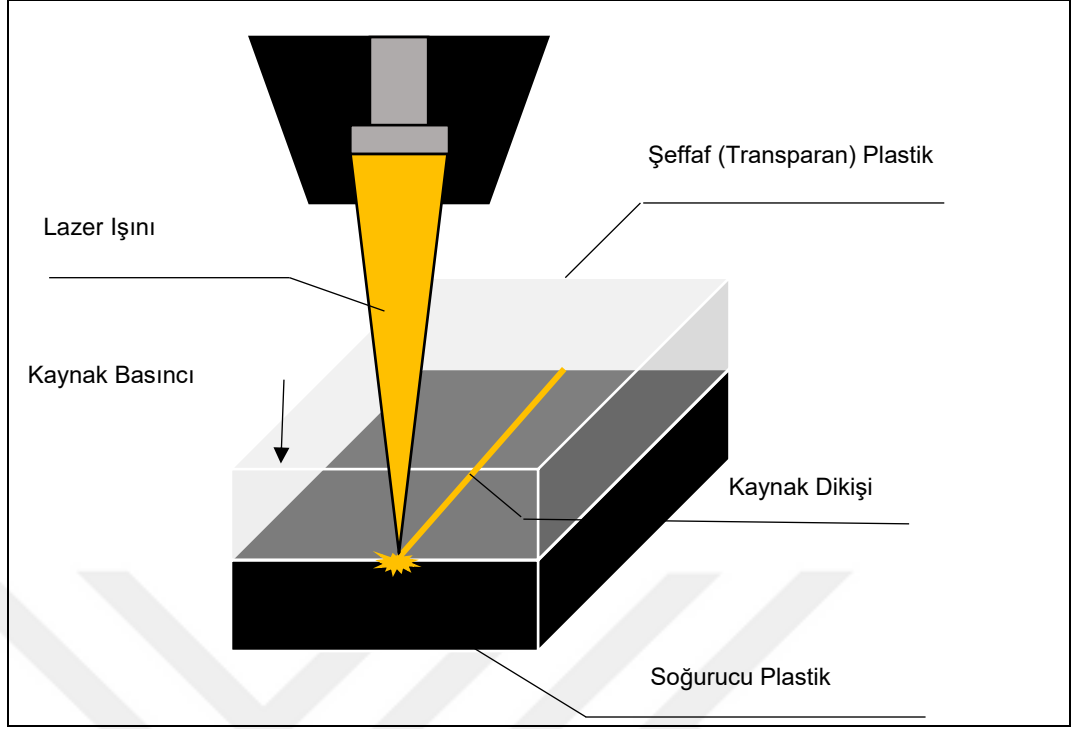
3.1.3. Kullanılan lazer kaynak makinesi

Tez kapsamında lazer kaynak işlemleri Odelo firmasının Ar-Ge merkezinde, lazer ışınının maksimum gücü 100 W ve lazerin dalga boyu 980 μm olduğu LPKF Twinweld 3D 6000® lazer kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerin uygulanması için tasarlanan kaynak fikstürü, lazer makinesine entegre olarak çalışan döner tablaya monte edilmiştir. Şekil 3.5'te lazer kaynak makinesi ile entegre fikstür görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Lazer kaynak makinesi ile entegre fikstür görüntüsü

Şekil 3.6'da LTW makinesinin çalışma prensibi gösterilmektedir. LTW makinesinde plastik kaynak işlemi robot kola bağlanan hibrit kaynak kafası ile yapılmaktadır. Koldaki gergi silindiri, güçlü ve güvenilir bir bağlantı oluşturmak için sabit bir dikey sıkıştırma basıncı sağlamaktadır; burada baskı kuvveti, makine kontrol ünitesi tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir.



Şekil 3.6. LTW makinesinin çalışma prensibi

3.1.4. LTW çıktıları için yapılan testler

Kaynak kalitesini belirlemek için kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği dikkate alınmıştır. Kaynakların analizi için her kaynaklı parça, hangi parametre seviyelerinde elde edildiğini gösterecek şekilde numaralandırılmıştır. Şekil 3.7’de numaralandırılmış parçaların bir resmi gösterilmektedir.



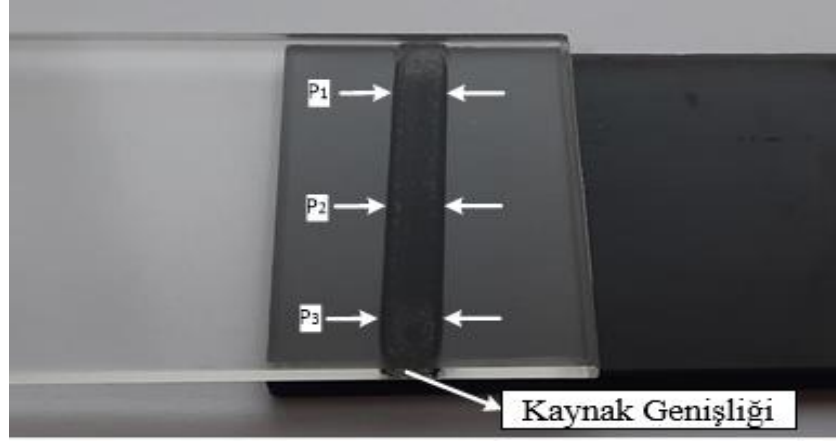
Şekil 3.7. Numunelerin kaynak anı ve kaynak parçaların gösterimi

Tez çalışmasına ait deneysel çalışmalarda belirlenen parametre seviyeleri için tanımlanan tekrar sayısı ile elde edilen kaynak numunelerinin çıktıları optik mikroskop ölçümü ve çekme testleri ile belirlenmiştir. Çekme testlerinde numuneler Zwick/Roell Z010® makinesinde 10 kN yük ve 5 mm/dk hız ile analiz edilmiştir. Şekil 3.8’de çekme testlerinin yapıldığı Zwick/Roell Z010® makine görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.8. Zwick/Roell Z010 makinesinde numune çekme testi gösterimi

Çekme testine ek olarak kaynak genişliği, 50X büyütme objektif lensli Stemi 508® optik mikroskop kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm için kaynak dikişi alanı üzerinde Şekil 3.9’da gösterildiği gibi rastgele üç nokta p_1, p_2, p_3 belirlenerek, parçanın kaynak genişliği, bu üç noktanın kaynak genişliğinin ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Kaynak genişliğinin belirlenmesi

3.2. Yöntem

Yukarıda tanımlanmış deney ortamı kapsamında LTW parametre optimizasyonu için geliştirilmiş olan metodoloji aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.2.1. LTW parametrelerinin ve çıktılarının belirlenmesi

Literatürde lazer iletim kaynağında parçaların birleştirme kalitesini optimize etmek için lazer gücü, kaynak hızı, baskı kuvveti, uzaklık mesafesi, lazer dalga boyu, lazer ışını çapı vb. çeşitli kontrol parametrelerinin incelendiği tespit edilmiştir. Bu parametrelerden lazer gücü, kaynak hızı, uzaklık mesafesi ve baskı kuvveti çıktıyı önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir (Acherjee, 2021; Gonçaves ve ark., 2021; Kumar ve ark., 2021a). Bu çalışmada, LTW kalitesini optimize etmek için LPKF Twinweld 3D 6000® lazer kaynak makinesinin kontrol edilebilir üç parametresi dikkate alınmıştır. Bu parametreler lazer gücü (W), kaynak hızı (mm/s) ve lazer ışınının baskı kuvvetidir (N).

Giriş parametrelerinde olduğu gibi, kaynak kalitesini analiz etmek için bir takım çıktı ölçümleri mevcuttur. Ancak bir parametre setini tek bir çıktı için optimize etmek her zaman diğer çıktıları iyileştirmeyebilir. Bu kapsamda parametre optimizasyonu için çoklu yanıtın dikkate alınmasının LTW sürecini iyileştirmede daha etkili bir yaklaşım olacağı ifade edilmektedir. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında deneylerin çıktısı olarak kaynak

mukavemeti N , kopma uzaması (%) ve kaynak genişliği mm olmak üzere üç farklı ölçü belirlenmiştir.

3.2.2. Taguchi metodu

Literatürde LTW parametre optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda lazer kaynak parametrelerinin seviyelerinin çıktılar üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmalarda LTW optimizasyonu için kullanılan malzeme türü ve/veya kaynak makinesinin farklılık göstermesi nedeniyle lazer gücü, kaynak hızı ve baskı kuvveti için değişik seviyeler dikkate alınmıştır. Bu nedenle tez çalışması kapsamında etkin olabilecek parametre seviyelerinin ve çıktılar üzerinde olası etkilerinin belirlenebilmesi için Taguchi metodu kullanılarak ön bir analiz yapılmıştır. Taguchi yöntemi, farklı süreç parametrelerinin süreç performansı metriklerinin ortalamasını ve varyansını nasıl etkilediğini analiz etmeye ve performansa önemli ölçüde katkıda bulunan parametreleri belirlemeye olanak tanımaktadır (El-Shekeil ve ark., 2013; Roy, 2001; Yuce ve ark., 2016). Taguchi yöntemi, faktöriyel tasarım ve yanıt yüzey yönteminden farklı olarak ortogonal diziler kullanarak deneyler için yalnızca sınırlı sayıda parametre değeri koleksiyonunu dikkate almaktadır ve bu ana etkileri analiz etmek için daha az zaman ve kaynak kullanımı sağlamaktadır. Ortogonal diziler farklı kademe sayılarında belirlenebilmektedir. Taguchi yöntemi, parametrelerin ana etkilerini ve bunların performans ölçütlerine katkısını ölçmek için belirli bir amaç fonksiyonuna dayalı sinyalin (S) gürültü faktörüne (N) oranını S/N kullanmaktadır. S/N değeri amaç fonksiyonunda belirli bir performans ölçütünü maksimize etmek için en büyük olan değer en iyi (larger-the-better), minimize etmek için en küçük olan değer en iyi (smaller-the-better) ve belirli bir değere yakınsayabilmek için hedef değer en iyi (nominal-the-best) olacak şekilde hesaplanmaktadır (Freddi ve Salmon, 2019).

Bu çalışmada, üç farklı işlem parametresinin dört farklı seviyesi için Taguchi yönteminin rastgele sıralı L_{16} ortogonal dizisi dikkate alınmıştır. LTW proses parametre optimizasyonu konusunda mevcut çalışmalar, kullanılan LTW makine teknik özellikleri ve LTW makinesinde yapılan ön deneylerden (Kucukoglu ve ark., 2023) elde edilen deneyimlere göre lazer gücü, kaynak hızı ve baskı kuvveti için dört farklı seviye

tanımlanmıştır. Bu kapsamda kullanılmış olan L_{16} ortogonal dizisi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Taguchi uygulaması için kullanılan L_{16} ortogonal dizisi

Deney No.	LTW Parametre Seviyeleri		
	Güç (W)	Hız (mm/s)	Baskı Kuvveti (N)
1	1	4	4
2	3	4	2
3	4	3	2
4	3	3	1
5	4	1	4
6	2	2	1
7	4	2	3
8	1	2	2
9	2	1	2
10	3	2	4
11	1	3	3
12	2	3	4
13	4	4	1
14	3	1	3
15	1	1	1
16	2	4	3

Kaynak mukavemeti ve kopma uzaması çıktılarında daha büyük olan değer daha iyi (larger-the-better) varsayımı ile S/N değeri Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 3.1’de n parametre sayısını ve y_i deneyin çıktı değerini göstermektedir. Öte yandan, kaynak genişliği için S/N değeri, daha küçük olan değer daha iyi (the smaller-the-better) kabulü ile Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Belirlenmiş olan deney koşulları ve elde edilen çıktı değerleri kapsamında Taguchi metodu TIBCO® Statistica yazılımı kullanılarak uygulanmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3.2)$$

3.2.3. TOPSIS yöntemi

Taguchi yöntemi sonuçları, parametrelerin belirli bir çıktı üzerindeki ana etkilerinin 16 farklı parametre seti üzerinden analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Her parametrenin S/N oranına göre çıktıyı en olumlu etkileyecek parametre düzeyi en iyi değer olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu metodoloji parametrelerin birbirleri olan etkileşimlerini ve farklı çıktıları bir arada analiz etmek için yetersiz kalmaktadır. Belirli bir çıktıyı en iyi hale getirebilecek parametre seti ile başka bir çıktıyı en iyi hale getirecek parametre setinin farklı olması olası bir durumdur. Bu duruma ek olarak Taguchi yönteminin uygulanması aşamasında belirlenmiş olan seviyelerin dışında belirli bir çıktıyı daha iyi hale getirebilecek parametre değerinin var olma olasılığı da bulunmaktadır. Bu kapsamda çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisi olan TOPSIS yöntemi, Taguchi yöntemi ile üç farklı çıktı için elde edilen parametre setleri ve bu setler üzerinden elde edilebilecek ara seviyelerini bütünlük olarak değerlendirebilmek amacıyla kullanılmıştır.

Hwang ve Yoon (1981), tarafından ortaya atılan TOPSIS yöntemi, bir dizi kritere göre alternatiflerin sıralanmasında en çok kullanılan çok kriterli karar verme yaklaşımlarından biridir. TOPSIS yöntemi, her alternatifin pozitif ideal çözüme ve negatif ideal çözüme olan mesafesini belirleyerek alternatifleri sıralamaktadır. Kolay uygulanması ve sezgisel yapısı nedeniyle TOPSIS yöntemi çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Behzadian ve ark., 2012; Yadav ve ark., 2018).

TOPSIS yöntemi başlangıçta bir karar matrisi X_{ij} ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) ile başlar. Karar matrisinde m alternatiflerin sayısı ve n kriterlerin sayısını ifade etmektedir. Her bir kriter için alternatiflerin puanları belirlendikten sonra karar matrisi Denklem 3.3 kullanılarak normalleştirilmiş karar matrisi r_{ij} hesaplanmaktadır.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Normalleştirilmiş karar matrisi hesaplandıktan sonra kriterlerin ağılıkları w_j ($j = 1, \dots, n$) dikkate alınarak Denklem 3.4 ile ağırlıklı normalleştirilmiş puanlar v_{ij} ($i =$

$1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) belirlenir. Burada ağırlıkların toplamının bir ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$) olması gerekir.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

Yöntemin bir sonraki adımında her bir kriter için pozitif ve negatif ideal çözümler (v_j^+ , v_j^-) belirlenmektedir. Kriterin bir fayda ile ilişkili olması durumunda pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri sırasıyla Denklem 3.5 ve 3.6 ile elde edilmektedir. Aksi halde kriterin bir olumsuzluk ile ilişkili olması durumunda pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri sırasıyla Denklem 3.7 ve 3.8 ile hesaplanmaktadır. Bu kapsamda kopma mukavemetinin ve kopma uzamasının mümkün olduğunca yüksek olması beklendiğinden bu çıktılar bir fayda kriteri ve kaynak genişliğinin mümkün olduğunca az olması beklendiğinden bu çıktı bir olumsuzluk kriteri olarak dikkate alınmıştır.

$$v_j^+ = \max\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (3.5)$$

$$v_j^- = \min\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

$$v_j^+ = \min\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (3.7)$$

$$v_j^- = \max\{\vartheta_{ij} | 1 \leq i \leq m\} \quad j = 1, \dots, n \quad (3.8)$$

Yöntemin bir sonraki adımında her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları (s_i^+ , s_i^-) Denklem 3.9 ve 3.10 kullanılarak hesaplanarak alternatifler için ayırım ölçümleri belirlenmektedir.

$$s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^+ - v_{ij})^2} \quad i = 1, \dots, m \quad (3.9)$$

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^- - v_{ij})^2} \quad i = 1, \dots, m \quad (3.10)$$

TOPSIS yönteminin son adımında Denklem 3.11 kullanılarak her bir alternatifin ideal çözüme olan c_i^+ göreceli yakınlığı belirlenmektedir (Haque, 2022). Yöntem, alternatiflerin seçime yönelik yakınlık değerinin azalan sırasına göre sıralanmasıyla sona erer. Elde edilen sonuçlar üzerinden çözüm yönteminin bir sonraki adımı olan deneysel tasarım çalışmasında dikkate alınacak parametre seviyeleri belirlenmiştir.

$$c_i^+ = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^+} \quad i = 1, \dots, m \quad (11)$$

3.2.4. Deneysel tasarım yöntemi

Deneysel tasarım, birden fazla faktörden oluşan bir deneyin tüm olasılıklarını belirleme ve inceleme tekniğidir (Mäkelä, 2017; Mousavi ve ark., 2018; Narendran ve ark., 2019). İlk olarak, deneysel tasarım 1930'lu yıllarda tarım ve biyoloji araştırmalarında faktöriyel dizayn ve varyans analizi olarak Ronald Fisher (1935; 1990) tarafından geliştirilmiştir ve halen kullanılmaktadır. Gün geçtikçe müşteri talebi doğrultusunda artan kalite gereksinimleri, düşük maliyet hedefleri, geliştirme ve doğrulama işlemlerini etkileyen sayısız değişkenin olması birçok üretim/hizmet sisteminde süreçlerin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu süreçlerin performansının iyileştirilmesi ve en iyi cevabın elde edileceği şartların belirlenmesinde deneysel tasarım daha az sayıda deney ile daha az zaman harcayarak bir ya da birden fazla değişken etkisini inceleyerek en doğru sonuca ulaşmayı amaçlamaktadır (Candioti ve ark., 2014).

Deneysel tasarım yöntemleri; faktöriyel (factorial) tasarımlar ve yanıt yüzey tasarımları (response surface method) olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Faktöriyel tasarımlar içerisinde tam faktöriyel tasarım, kısmi faktöriyel tasarım, Plackett-Burman tasarımı ve Taguchi Ortogonal dizi tasarımları bulunmaktadır. Cevap yüzey tasarımları ise merkezi kompozit tasarımlar, Box-Behnken tasarımı, D-optimal tasarım vb. yöntemler bulunmaktadır (Narendran ve ark., 2019). Bu tasarımlar içerisinde tam faktöriyel tasarımlarda belirlenen parametre sayısı (k) ve seviye sayısı (n) için n^k deney yapılarak

tüm değişkenlerin ana etkilerinin ve birbirleriyle olan etkileşimlerini analiz etmek mümkündür. Ancak parametre sayısının ve belirlenen seviye sayısının fazla olması durumunda tam faktöriyel tasarım zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen diğer yöntemler daha az deney sayısına sahip tasarımlar ile parametrelerin etkilerini ve etkileşimlerini analiz etmek amacıyla oluşturulmuşlardır. Fakat bu yaklaşımlarda deney sayısının azaltılması ile bazı değişkenlerin etkisi veya diğer değişkenlerle olan etkileşimi incelenememektedir. Bu nedenle tam faktöriyel tasarımlar, girdi parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkilerini ve etkileşimlerini analiz edebilmek ve aralarındaki ilişkiyi tanımlayabilmek açısından daha etkin sonuçlar üretebilmektedir.

Deneysel tasarım yöntemleri girdilerin çıktı üzerindeki ana etkisine ek olarak girdiler arasındaki etkileşimin çıktı üzerine olan etkisini de göstermesi nedeniyle literatürde LTW parametrelerini belirli bir çıktı için optimize etmek amacıyla en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. Bu bağlamda tez çalışmasında LTW prosesindeki kontrol edilebilir işlem parametrelerinin kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği üzerindeki ana etkilerini ve parametrelerin etkileşiminden kaynaklı etkilerini tanımlayabilmek amacıyla tam faktöriyel bir deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Girdi parametre değerlerinin çıktı üzerindeki doğrusal olmayan etkisinin de analiz edilebilmesi için üç seviyeli tam faktöriyel (3^3) deney tasarımı dikkate alınmıştır. Merkez noktanın da dikkate alındığı tasarımda her seviye için üç tekrar yapılmıştır. Belirlenmiş olan deneysel tasarımda toplam 90 adet deney rassal bir sıra ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.5. Çıktılara ait regresyon denklemleri ile en iyi parametre setinin belirlenmesi

Tam faktöriyel deneysel tasarımın gerçekleştirilmesinin ardından en iyi parametre setinin belirlenebilmesi için her bir çıktıya ait çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Regresyon modellerinde LTW parametreleri bağımsız değişken ve dikkate alınan çıktı bağımlı değişken olarak dikkate alınmıştır. Minitab® yazılımı kullanılarak kopma mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği için polinom bir regresyon denklemi elde edilmiştir. Denklemler, gerçekleştirilmiş olan deneylere ait deneysel çıktı değerleri ile tahmin değerleri arasındaki hata farklarının karesini en küçükleyecek şekilde oluşturulmuştur. Yanıt yüzeyi yönteminde ikinci dereceden ve en fazla ikili etkileşimleri

dikkate alan denklemler oluşturulabilirken Minitab® yazılımında çoklu regresyon yöntemi ile üçüncü dereceden ve üçlü etkileşimleri dikkate alabilen denklemler oluşturulabilmektedir. Bu sayede istatistiksel olarak R^2 değeri daha yüksek fonksiyonlar elde edilebilmiştir.

Elde edilen regresyon denklemleri her bir çıktıyı ayrı ayrı temsil etmekle birlikte Minitab® yazılımı kullanılarak bütün çıktıları bir arada dikkate alacak şekilde çok amaçlı olarak en iyi parametre seti tespit edilmiştir. Bu kapsamda kopma mukavemeti ve kopma uzaması için elde edilecek en yüksek değer ve kaynak genişliği için en yüksek değer elde edilmesi hedeflenmiştir. Tespit edilmiş olan parametre değerleri ile üç tekrardan oluşan kaynak denemesi gerçekleştirilmiş ve elde edilen çıktı değerleri üzerinden geliştirilmiş olan çözüm yönteminin etkinliğini analiz edilmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde ABS-PMMA malzemelerin birleştirilmesinde lazer iletim kaynağı parametre optimizasyonu için önerilen çözüm yöntemine ait sonuçlar ve elde edilen sonuçlara ilişkin tartışmalar sunulmaktadır. Birinci alt bölümde Taguchi yönteminin sonuçlarına yer verilmiştir. Bir sonraki alt bölümde TOPSIS yönteminin uygulanması ve alternatif parametre setlerinin farklı kriter ağırlıklarına göre sıralanması sunulmaktadır. Üçüncü alt bölümde deneysel tasarım yönteminin sonuçları verilmiştir. Son alt bölümde PMMA'nın ABS'e birleştirilmesinde en iyi kaynak kalitesini elde etmek için en iyi parametre seti belirlenmiştir.

4.1. Taguchi Yönteminin Sonuçları

Bölüm 3.2.2'de belirtilmiş olan L_{16} ortogonal dizisine göre LTW parametreleri için dört seviye belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de kullanılan parametreler ve seviyeleri verilmiştir. L_{16} ortogonal dizisine belirlenmiş olan her bir deney koşulu için dört bağımsız deney yapılmıştır. Her parametre seviyesinde numuneler için yapılan çekme testleri ve kaynak genişliği ölçümleri ardından elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Çizelge 4.2'de L_{16} ortogonal dizisi için elde edilen çıktı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Taguchi yönteminde kullanılan LTW parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Gücü	W	30	50	70	90
Kaynak Hızı	mm/s	80	100	120	140
Baskı Kuvveti	N	150	200	250	300

Yapılan deneyler sonucunda Taguchi yöntemi ile elde edilen S/N değerleri ve parametrelerin çıktılar üzerindeki etkilerinin sıralaması Çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu sıralama, her bir parametre için dört seviyede elde edilen maksimum ve minimum S/N değeri farkına göre yapılmıştır. Gözlenen S/N oranlarına göre;

- i. Baskı kuvveti, kaynak mukavemeti için en önemli parametredir.
- ii. Güç, kopma uzaması için en önemli parametredir.
- iii. Güç, kaynak genişliği için en önemli parametredir.

Çizelge 4.2. Taguchi tasarım matrisi ve elde edilen sonuçlar

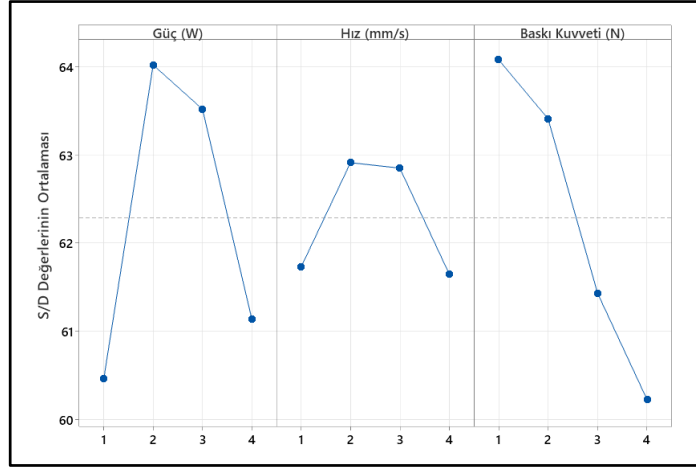
#	LTW Parametre Seviyeleri			Yanıtlar		
	Güç (<i>W</i>)	Hız (<i>mm/s</i>)	Baskı Kuvveti (<i>N</i>)	Kaynak Mukavemeti (<i>N</i>)	Kopma Uzaması (%)	Kaynak Genişliği (<i>mm</i>)
1	1	4	4	614,0	0,58	3,89
2	3	4	2	1542,7	1,46	4,69
3	4	3	2	1495,6	1,31	4,73
4	3	3	1	1610,2	1,54	4,65
5	4	1	4	708,0	0,77	4,58
6	2	2	1	1703,9	1,48	4,65
7	4	2	3	1055,0	1,27	4,96
8	1	2	2	1369,0	1,22	4,01
9	2	1	2	1519,0	1,42	4,72
10	3	2	4	1551,0	1,46	4,93
11	1	3	3	937,0	0,86	3,97
12	2	3	4	1644,5	1,51	4,31
13	4	4	1	1512,0	1,27	4,82
14	3	1	3	1309,2	1,51	5,05
15	1	1	1	1574,0	1,46	4,49
16	2	4	3	1492,6	1,41	4,58

Çizelge 4.3. *S/N* oranları için yanıt tablosu

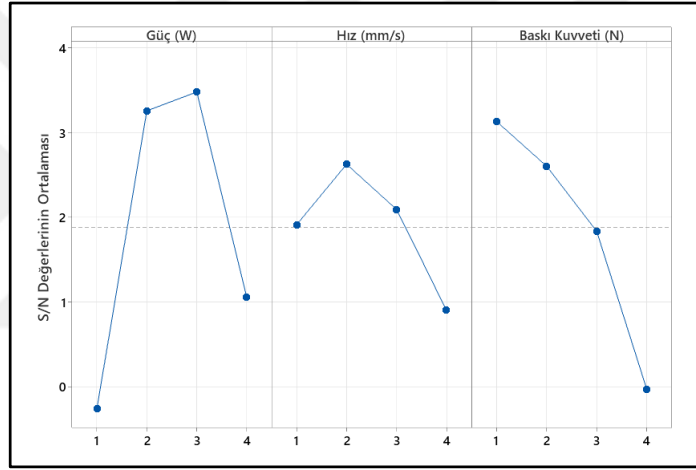
Yanıtlar	Seviye	Güç (<i>W</i>)	Hız (<i>mm/s</i>)	Baskı Kuvveti (<i>N</i>)
Kaynak Mukavemeti	1	60,47	61,73	64,07
	2	64,01	62,91	63,41
	3	63,51	62,85	61,43
	4	61,14	61,65	60,22
	Delta	3,55	1,26	3,85
	Sıralama	2	3	1
Kopma Uzaması	1	-0,26	1,91	3,13
	2	3,25	2,62	2,60
	3	3,48	2,09	1,83
	4	1,06	0,90	-0,03
	Delta	3,73	1,72	3,16
	Sıralama	1	3	2
Kaynak Genişliği	1	-12,22	-13,45	-13,35
	2	-13,18	-13,29	-13,12
	3	-13,67	-12,88	-13,29
	4	-13,57	-13,03	-12,89
	Delta	1,45	0,57	0,46
	Sıralama	1	2	3

Elde edilen S/N oranlarına göre LTW parametrelerinin kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği üzerine olan ana etkileri sırasıyla Şekil 4.1-4.3'te ana etki grafiklerinde gösterilmiştir. Ana etki grafikleri incelendiğinde her çıktının parametre değişimlerine göre farklı bir eğilim sergilediği görülmektedir. Güç için orta seviye, kaynak mukavemeti ve kopma uzaması için uygun iken düşük seviye, kaynak genişliği için daha uygun görünmektedir. Diğer giriş parametreleri için de benzer bir sonuç gözlenmektedir. Lazer gücünün artırılması kaynak mukavemeti 50 W ve kopma uzaması 70 W'a ulaşıncaya kadar hem kaynak mukavemetini hem de kopma uzamasını arttırmaktadır. Eşik değerinden sonra kritik sıcaklığına ulaşıldığı için kaynak mukavemeti ve kopma uzaması azalmaktadır. Ayrıca, kaynaklı bölge lazer gücüyle doğru orantılı olduğundan daha yüksek lazer gücüyle (yani 70 W ve 90 W) daha yüksek kaynak genişliği ölçümleri gözlemlenmiştir. Ayrıca ana etki grafiklerinden, kaynak hızının artırılmasının hem kaynak mukavemetini hem de kopma uzamasını düşürdüğü, birim uzunluk başına uygulanan enerji miktarının yüksek hız seviyelerinde azaldığı görülmüştür. Ancak her birim uzunluğa uygulanan yüksek enerji malzemede bozulmaya neden olabileceğinden düşük hız seviyelerinde daha az kaynak mukavemeti ve kopma uzaması elde edilmiştir. Bu nedenle kaynak hızı için eşik değer olarak 100 mm/s veya 120 mm/s gözlenmekte ve tüm tepkiler için ideal seviye görünmektedir. Kaynak genişliği için yüksek hız seviyeleri daha az kaynaklı bölge sağlamıştır. Güç ve hız parametrelerinin yanı sıra, yüksek baskı kuvveti iki malzemenin temas noktasında bozulmaya neden olabileceğinden, ilgili parametre düşük seviyede olduğunda baskı kuvveti, kaynak mukavemeti ve kopma uzaması için daha iyi bir kaynak kalitesi sağlamıştır. Öte yandan baskı kuvveti ile kaynak genişliği arasında anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir. Ana etki grafikleri üzerinde yapılan analizler sonucunda çıktı kalitesinin girdi parametre düzeyine bağlı olduğu ve her çıktı için optimal parametre setinin diğerlerinden farklı olduğu görülmüştür. Taguchi metodu ile elde edilen sonuçlara göre her parametre için ideal parametre seti aşağıda verilmiştir:

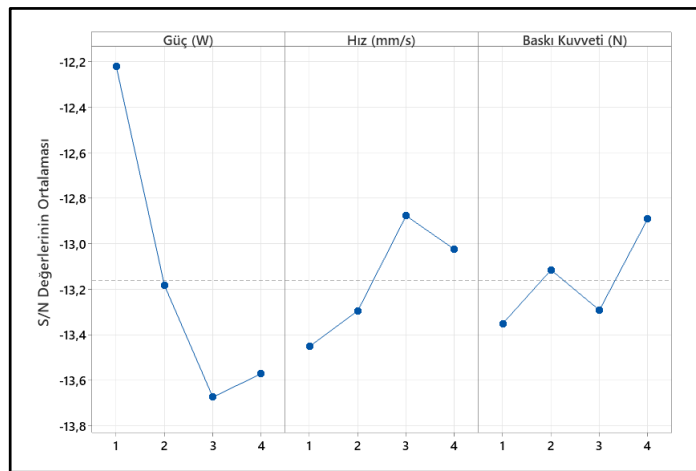
- i. Kaynak mukavemeti için 50 W güç, 100 mm/s hız ve 150 N
- ii. Kopma uzaması için 70 W güç, 100 mm/s hız ve 150 N
- iii. Kaynak genişliği için 30 W güç, 120 mm/s hız ve 300 N



Şekil 4.1. LTW parametrelerinin kaynak mukavemetine etkisi



Şekil 4.2. LTW parametrelerinin kopma uzamasına etkisi



Şekil 4.3. LTW parametrelerinin kaynak genişliğine etkisi

Taguchi sonuçları üzerinden yapılan son analiz ise parametre çiftlerinin yanıtlar üzerindeki etkileşimlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda her bir parametre çifti için yanıt yüzeyi grafikleri çizdirilmiştir. Ek Şekil 1.1-1.3'te sırasıyla kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği için bu grafikler verilmiştir. Grafikler analiz edildiğinde yanıtlar üzerindeki her giriş parametresi çifti için ayırt edici bir eğilime sahip bir etkileşim gözlemlenmiştir.

Kaynak mukavemeti ve kopma uzaması için lazer gücü ve hızı arasındaki etkileşim benzer davranış göstermektedir. Daha düşük güç ve daha yüksek hızda veya daha yüksek güç ve daha düşük hızda ilgili çıktıkların kalitesi düşük düzeydedir. 30 *W* güç ve 80 *mm/s* hızda, 90 *W* güçte ve 140 *mm/s* hızda, 60 *W* güçte ve 110 *mm/s* hızda, yani parametrelerin farklı seviyelerinde yüksek kalite elde edilebilmektedir. Kaynak genişliği için diğer iki tepkiye göre farklı bir etkileşim elde edilmektedir. En düşük kaynak genişliği 30 *W* güçte ve 140 *mm/s* hızda ölçülürken, yüksek kaynak gücü kaynak genişliğini uzatmaktadır.

Güç ve kuvvet arasındaki etkileşim açısından, kuvvetin düşük düzeyde olduğu durumlarda güç değişimlerine göre kaynak mukavemeti ve kopma uzaması ölçümleri sabittir. Ancak daha yüksek kuvvet değerleri (300 *N*, 320 *N*) için en yüksek kaynak mukavemeti ve kopma uzaması değerleri güç parametresinin orta noktalarında (50 *W*, 60 *W*) gözlenmektedir.

Hız ve baskı kuvveti arasındaki etkileşimler incelendiğinde düşük baskı kuvvetinde hızın çıktıklar üzerinde çok fazla etkisi olmamaktadır. Öte yandan baskı kuvveti arttırıldığında farklı hız değerlerinde maksimum veya minimum kalite düzeyi elde edilmektedir. Özellikle 80 *mm/s* hız ve 200 *N* kuvvet, 140 *mm/s* hız ve 200 *N* kuvvet ve 110 *mm/s* hız ve 300 *N* kuvvet olmak üzere üç noktada yüksek kaynak mukavemeti ve kopma uzaması değerleri görülmektedir. Kaynak genişliği için minimum nokta sayısı iki olup, ilk nokta 100 *mm/s* hız ve 200 *N* kuvvet, ikinci nokta ise 120 *mm/s* hız ve 300 *N* kuvvettir. LTW'deki mevcut literatüre bakıldığında benzer girdi-çıkı parametreleri için eşdeğer bulgular rapor edilmektedir (Acherjee ve ark., 2009; Acherjee ve ark., 2012; Kumar ve ark., 2022). Bu analizler sonucunda parametrelerin etkileşimlerinden kaynaklı

önemli etkilerinin olduğu görülmüştür. Özellikle hız ve baskı kuvveti çifti için bu değişimler daha iyi gözlemlenebilmektedir. Örneğin baskı kuvvetinin en düşük seviyesi kaynak mukavemeti açısından en önemli seviye olarak görünmektedir. Ancak baskı kuvveti en yüksek, hız ise orta seviyelerde olduğunda benzer veya daha iyi dayanım değerleri gözlemlenebilir. Burada yüzey grafiklerindeki çoklu tepeler, parametre çiftlerinin etkileşiminde doğrusal olmayan yapıyı sergilemektedir. Bu nedenle, önceden tanımlanmış iki seviye arasında daha iyi bir parametre değerinin olabileceği görülmüştür.

4.2. TOPSIS Yönteminin Sonuçları

Taguchi sonuçlarına ilişkin olarak, üç farklı yanıtı dayalı olarak üç alternatif parametre seti (A1-A3) gözlemlenmiştir. Fakat bu parametre setleri sadece bir çıktıyı dikkate alarak parametrelerin etkilerini göstermektedir. Taguchi metodu kaynak kalitesini üç çıktıyı birlikte dikkate alacak şekilde analiz yapma konusunda yetersiz kalmaktadır. Çözüm yönteminin bir sonraki aşaması olan deneysel tasarım yöntemi için girdi parametre seviyelerinin iyi bir şekilde belirlenebilmesi için çok kriterli karar verme yöntemi olan TOPSIS metodu kullanılmıştır.

TOPSIS metodunda Taguchi yöntemi ile belirlenmiş üç farklı parametre seti değerlendirilmek üzere alternatifler olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca temel parametre setlerinde belirlenen parametre değerlerinin ortalaması alınarak dört farklı parametre seti (A4-A7) oluşturulmuştur. Yeni parametre setleri için Taguchi uygulamasında olduğu gibi dört tekrarlı kaynak denemesi gerçekleştirilmiş ve çıktı değerleri hesaplanmıştır. Toplamda yedi farklı alternatif parametre seti kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği çıktıları üzerinden TOPSIS yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çizelge 4.4'te alternatifler ve elde edilen çıktı değerleri verilmiştir. Bu alternatifleri değerlendirmek için kriterlerin ağırlıkları dört senaryoya göre belirlenmiştir. İlk senaryoda tüm kriterler eşit ağırlıktadır. Geriye kalan senaryolarda ise bir kriterin ağırlığı %50, diğer iki kriterin ağırlığı %25 olacak şekilde hesaplama yapılmıştır. Çizelge 4.5'te her senaryo için dikkate alınan ağırlıklar verilmiştir.

Çizelge 4.4. TOPSIS yönteminde analiz edilen alternatif parametre setleri

Alternatif	Açıklama	Parametre Değerleri			Yanıtlar		
		Güç (<i>W</i>)	Hız (<i>mm/s</i>)	Baskı Kuvveti (<i>N</i>)	Kaynak Mukavemeti (<i>N</i>)	Kopma Uzaması (%)	Kaynak Genişliği (<i>mm</i>)
A1	Kaynak Mukavemeti İçin Belirlenmiş Parametre Seti	50	100	150	1703,9	1,48	4,65
A2	Kopma Uzaması İçin Belirlenmiş Parametre Seti	70	100	150	1641,0	1,86	5,11
A3	Kaynak Genişliği En İçin Belirlenmiş Parametre Seti	30	120	300	519,3	0,61	3,82
A4	A1-A2 Ortalaması	60	100	150	1795,7	2,33	4,71
A5	A1-A3 Ortalaması	40	110	225	1531,2	1,86	4,38
A6	A2-A3 Ortalaması	50	110	225	1594,9	1,86	4,54
A7	A1-A2-A3 Ortalaması	50	~107	200	1682,2	2,01	4,83

Çizelge 4.5. TOPSIS yönteminde kriter ağırlıklarına ilişkin senaryolar

Senaryo	w_j		
	Kaynak Mukavemeti (<i>N</i>)	Kopma Uzaması(%)	Kaynak Genişliği (<i>mm</i>)
Senaryo 1	$1/3$	$1/3$	$1/3$
Senaryo 2	$1/2$	$1/4$	$1/4$
Senaryo 3	$1/4$	$1/2$	$1/4$
Senaryo 4	$1/4$	$1/4$	$1/2$

Yedi parametre alternatif seti (A1,...,A7) ve bunların LTW çıktılarına verdiği yanıtlara dayanarak Çizelge 4.6'da verilmiş olan normalize edilmiş karar matrisi Denklem 3.3 kullanılarak oluşturulmuştur. TOPSIS hesaplamaları için kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliğinin sırasıyla Kriter 1 (K1), Kriter 2 (K2) ve Kriter 3 (K3) olarak kısaltılmıştır.

Karar matrisinin normalleştirilmesinin ardından Denklem 3.4 kullanılarak ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi hesaplanmıştır. Çizelge 4.7'de Çizelge 4.5'te verilen kriter ağırlıklarına göre dört farklı senaryo için ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi verilmiştir.

Çizelge 4.6. Normalize edilmiş karar matrisi

Alternatifler	Kaynak Mukavemeti (<i>N</i>)	Kopma Uzaması (%)	Kaynak Genişliği (<i>mm</i>)
	Kriter 1 (K1)	Kriter (K2)	Kriter (K3)
A1	0,4115	0,3126	0,3827
A2	0,4204	0,3929	0,4206
A3	0,1254	0,1289	0,3144
A4	0,4337	0,4922	0,3876
A5	0,3698	0,3929	0,3605
A6	0,3852	0,3929	0,3736
A7	0,4062	0,4246	0,3975

Çizelge 4.7. Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi

	Senaryo 1			Senaryo 2			Senaryo 3			Senaryo 4		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3
A1	0,1372	0,1042	0,1276	0,2057	0,0782	0,0957	0,1029	0,1563	0,0957	0,1029	0,0782	0,1913
A2	0,1401	0,1310	0,1402	0,2102	0,0982	0,1051	0,1051	0,1965	0,1051	0,1051	0,0982	0,2103
A3	0,0418	0,0430	0,1048	0,0627	0,0322	0,0786	0,0314	0,0644	0,0786	0,0314	0,0322	0,1572
A4	0,1446	0,1641	0,1292	0,2168	0,1230	0,0969	0,1084	0,2461	0,0969	0,1084	0,1230	0,1938
A5	0,1233	0,1310	0,1202	0,1849	0,0982	0,0901	0,0924	0,1965	0,0901	0,0924	0,0982	0,1802
A6	0,1284	0,1310	0,1245	0,1926	0,0982	0,0934	0,0963	0,1965	0,0934	0,0963	0,0982	0,1868
A7	0,1354	0,1415	0,1325	0,2031	0,1061	0,0994	0,1016	0,2123	0,0994	0,1016	0,1061	0,1988

TOPSIS yönteminin bir sonraki adımı (Denklem 3.5-3.8), kriterlerin pozitif ve negatif ideal çözümlerini belirlemek için gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Çizelge 4.8’de verilmiştir. K1 ve K2 için maksimum ağırlıklı normalleştirilmiş değer, pozitif ideal çözüm olarak belirlenmiştir. Minimum ağırlıklı normalleştirilmiş değer ise negatif ideal çözüm olarak tanımlanmıştır. Daha küçük bir değer kaynak genişliği için daha iyi bir sonucu ifade ettiğinden K3 için zıt durum dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.8. Pozitif ve negatif ideal çözümler

	Senaryo 1			Senaryo 2			Senaryo 3			Senaryo 4		
	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3	K1	K2	K3
v_j^+	0,1446	0,1641	0,1048	0,2168	0,1230	0,0786	0,1084	0,2461	0,0786	0,1084	0,1230	0,1572
v_j^-	0,0418	0,0430	0,1402	0,0627	0,0322	0,1051	0,0314	0,0644	0,1051	0,0314	0,0322	0,2103

TOPSIS yönteminin son adımı, pozitif ve negatif ideal çözümlerden ayırım ölçüsü hesaplanarak her alternatifin ideal çözüme göreceli yakınlığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.9 da her bir alternatif için verilmiş olan pozitif ve negatif ideal çözümlerden ayırım ölçüsü

ve ideal çözüme olan göreceli yakınlık değerleri Denklem 3.9-3.11 kullanılarak elde edilmiştir. Burada en yüksek c_j^+ puanına sahip alternatif, TOPSIS yöntemi için en iyi alternatifi ifade etmektedir.

Çizelge 4.9. Pozitif ve negatif ideal çözümlerden ayırma ölçüleri ve her alternatifin göreceli yakınlığı

	Senaryo 1			Senaryo 2			Senaryo 3			Senaryo 4		
	s_j^+	s_j^-	c_j^+	s_j^+	s_j^-	c_j^+	s_j^+	s_j^-	c_j^+	s_j^+	s_j^-	c_j^+
A1	0,0645	0,1140	0,6389	0,0493	0,1505	0,7533	0,0916	0,1168	0,5606	0,0567	0,0871	0,6058
A2	0,0487	0,1320	0,7307	0,0369	0,1616	0,8140	0,0564	0,1512	0,7284	0,0587	0,0990	0,6278
A3	0,1588	0,0354	0,1822	0,1789	0,0265	0,1292	0,1973	0,0265	0,1186	0,1191	0,0531	0,3083
A4	0,0244	0,1592	0,8670	0,0183	0,1791	0,9072	0,0183	0,1975	0,9152	0,0366	0,1203	0,7665
A5	0,0422	0,1216	0,7421	0,0421	0,1397	0,7686	0,0534	0,1462	0,7325	0,0374	0,0948	0,7169
A6	0,0418	0,1245	0,7486	0,0377	0,1462	0,7948	0,0532	0,1476	0,7350	0,0405	0,0955	0,7022
A7	0,0369	0,1362	0,7869	0,0301	0,1588	0,8407	0,0403	0,1638	0,8027	0,0454	0,1026	0,6933

Taguchi metodu ile elde edilen sonuçlar LTW işlemi için en iyi parametre setinin dikkate alınan kalite ölçüsüne göre değişebileceğini göstermiştir. Fakat Çizelge 4.9’da verilmiş olan c_j^+ değerleri incelendiğinde A4 için elde edilmiş olan ideal çözüme yakınlık değeri bütün senaryolarda diğer alternatiflere göre daha üstün çıkmıştır. Dolayısı ile lazer kalitesini tek bir ölçüt üzerinden değil birden fazla ölçütü bir arada dikkate alarak değerlendirmenin gerçek hayat uygulamaları açısından daha etkin bir yaklaşım olacağı söylenebilir. Diğer yandan Taguchi metodu için belirlenmiş seviyeler arasında parametre değerleri için ara seviyelerde daha etkin çıktı değerleri elde edilebileceği tespit edilmiştir. A4 ile elde edilen kaynak mukavemeti ve kopma uzaması değerleri diğer alternatif setlerine göre daha yüksektir. Bu nedenle girdi parametrelerine bağlı çıktı değerlerini yakınsamaya çalışacak bir denklem sisteminin optimize edilmesi ile LTW için daha iyi bir parametre setinin bulunabileceği öngörülmüştür.

4.3. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım Yönteminin Sonuçları

Taguchi ve TOPSIS yöntemleri ile elde edilen sonuçlar dikkate alınarak tam faktöriyel deneysel tasarım yönteminin uygulamasında daha hassas parametre seviyeleri belirlenmiştir. Özellikle LTW baskı kuvvetinin 300 N gibi çok yüksek olduğu seviyelerde kaynak mukavemeti ve kopma uzamasında kaynak kalitesi oldukça düşük çıkmıştır.

Diğer yandan Şekil 4.1-4.3'te görüleceği üzere baskı kuvveti için belirlenmiş alt sınır değerden daha düşük bir değer bu iki çıktıyı iyileştirebileceği bir durum olasıdır. Benzer durum lazer gücü ve kaynak hızı için de söz konusudur. Bu analizler sonucunda deneysel tasarım yöntemi için belirlenmiş olan parametre seviyeleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan LTW parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Seviyelerinin Etiketleri		-1	0	1
Lazer Gücü	<i>W</i>	60	80	100
Kaynak Hızı	<i>mm/s</i>	70	90	110
Baskı Kuvveti	<i>N</i>	100	150	200

Çizelge 4.10'da verilen parametreler ve seviyelerine göre oluşturulan 3^3 tam faktöriyel deneysel tasarım matrisi ve deneylerden ölçülen yanıtlar Ek Çizelge 2.1'de sunulmaktadır. Tabloda verilmiş olan deney sonuçlarına göre deneysel tasarıma ait ANOVA tabloları, yanıt yüzey grafikleri ve Pareto diyagramları TIBCO® Statistica programı kullanılarak elde edilmiştir.

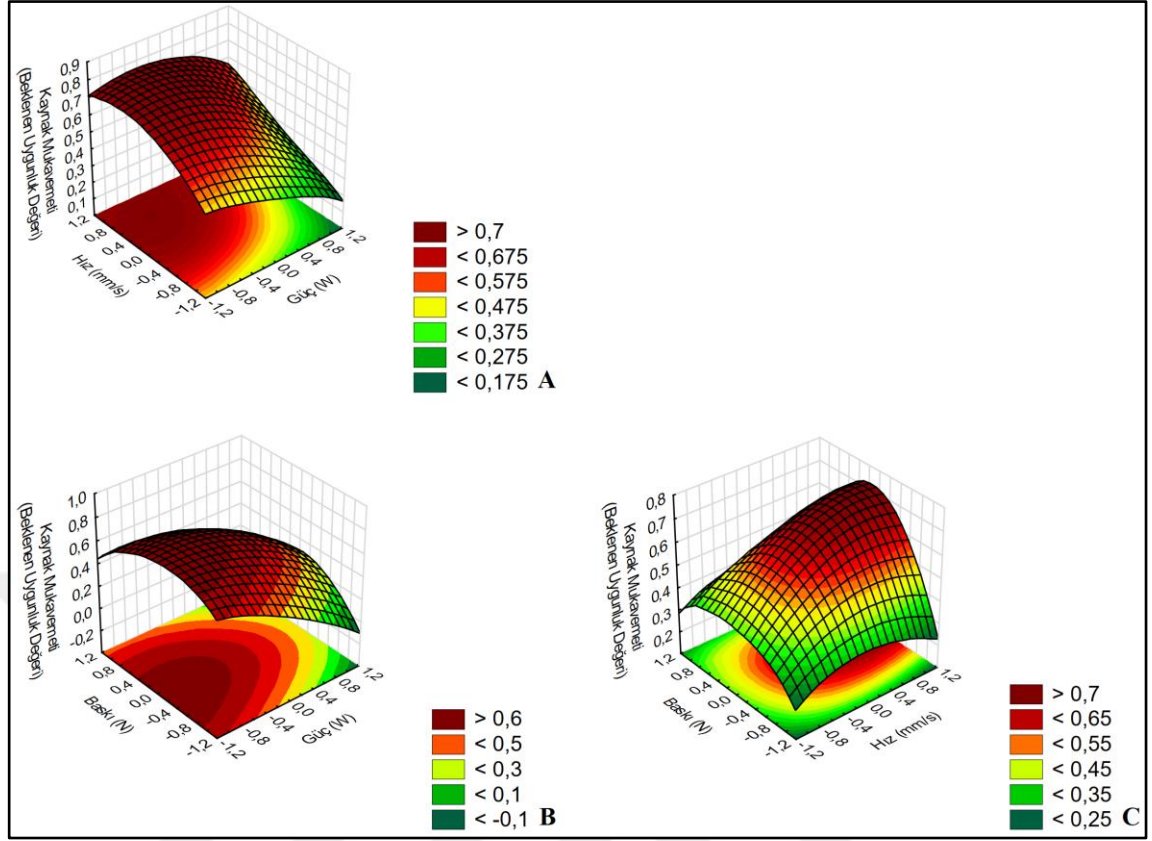
Çizelge 4.11'de kaynak mukavemeti için elde edilmiş olan ANOVA tablosu verilmiştir. ANOVA tablosunda LTW parametrelerinin çıktı üzerine olan doğrusal (D) yapıdaki etkisine ek olarak karesel (K) yapıdaki etkisi de gösterilmektedir. Ana etkilerine ilave olarak parametrelerin ikili etkileşimlerinin çıktı üzerine olan doğrusal ve karesel etkileri de tabloda gösterilmiştir. Tabloda kırmızı ile gösterilmiş olan parametre etki ve etkileşimleri $\alpha = 0,05$ anlamlılık derecesinde çıktı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.11'de kaynak mukavemeti için verilmiş olan ANOVA tablosu incelendiğinde kaynak gücünün ve kaynak hızının çıktı üzerinde doğrusal olarak önemli etkisi olduğu görülmüştür. Baskı kuvvetinin ise kaynak mukavemeti ile doğrusal olmayan bir ilişkisi vardır. Ek olarak baskı kuvvetinin hem kaynak gücü hem de kaynak hızı ile etkileşiminden kaynaklı önemli bir etkisi bulunmaktadır.

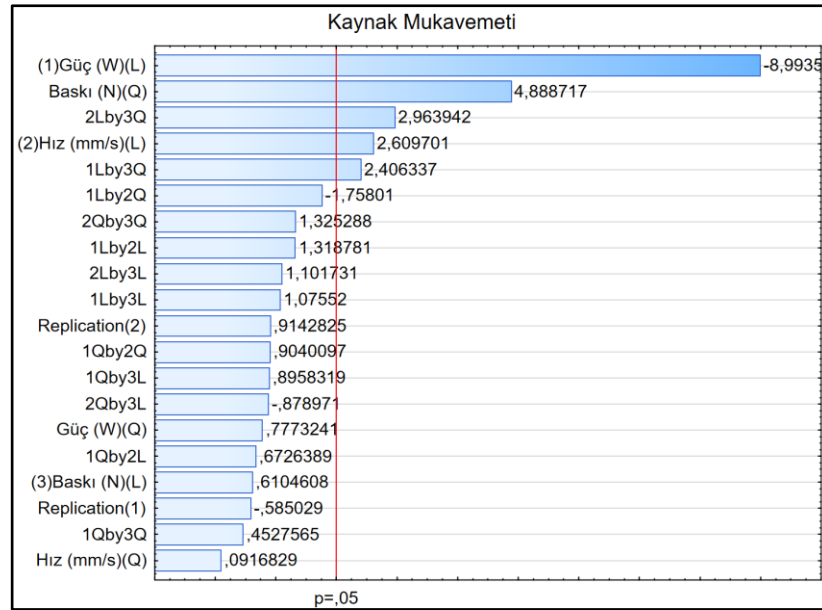
Çizelge 4.11. Kaynak mukavemeti için elde edilen ANOVA tablosu

Faktör	Kareler	Serbestlik	Kareler	F Değeri	p Değeri
	Toplamı	Derecesi	Ortalaması		
Bloklar	28355	2	14177	0,42886	0,652975
Güç(D)	2673919	1	2673919	80,88434	0,000000
Güç(K)	19975	1	19975	0,60423	0,439625
Hız(D)	225147	1	225147	6,81054	0,011105
Hız(K)	278	1	278	0,00841	0,927216
Baskı Kuvveti(D)	12320	1	12320	0,37266	0,543562
Baskı Kuvveti(K)	790085	1	790085	23,89955	0,000006
Güç(D)-Hız(D)	57495	1	57495	1,73918	0,191603
Güç(D)-Hız(K)	102171	1	102171	3,09060	0,083180
Güç(K)-Hız(D)	14957	1	14957	0,45244	0,503424
Güç(K)-Hız(K)	27017	1	27017	0,81723	0,369136
Güç(D)-Baskı Kuvveti(D)	38240	1	38240	1,15674	0,285888
Güç(D)-Baskı Kuvveti(K)	191424	1	191424	5,79046	0,018796
Güç(K)-Baskı Kuvveti(D)	26530	1	26530	0,80251	0,373457
Güç(K)-Baskı Kuvveti(K)	6777	1	6777	0,20499	0,652144
Hız(D)-Baskı Kuvveti(D)	40127	1	40127	1,21381	0,274407
Hız(D)-Baskı Kuvveti(K)	290418	1	290418	8,78495	0,004166
Hız(K)-Baskı Kuvveti(D)	25541	1	25541	0,77259	0,382468
Hız(K)-Baskı Kuvveti(K)	58064	1	58064	1,75639	0,189447
Hata	2281040	69	33059		
Toplam Kareler Toplamı	7381577	89			

Şekil 4.4’te deneysel tasarım yöntemi sonucunda her bir ikili parametre çifti için elde edilmiş olan tepki yüzey grafikleri dikkate alındığında özellikle baskı kuvveti ve kaynak hızının kaynak mukavemeti ile doğrusal olmayan ilişkisi açık bir şekilde görülebilmektedir. Baskı kuvveti ve güç parametreleri arasında ise kısmen bir doğrusal olmayan ilişki vardır. Bu etki ve etkileşimlerin önem sırası Şekil 4.5’te bir Pareto grafiği üzerinde gösterilmiş olup kaynak mukavemeti için güç parametresinin doğrusal ilişkisinin en önemli girdi olduğu tespit edilmiştir. Bunu takiben baskı kuvvetinin doğrusal olmayan ilişkisi, kaynak hızının doğrusal ve baskı kuvvetinin doğrusal olmayan etkileşimi, kaynak hızının doğrusal ilişkisi ve gücün doğrusal ilişkisi ile baskı kuvvetinin doğrusal olmayan ilişkisinin çıktı üzerinde önemli etkileri vardır.



Şekil 4.4. Kaynak mukavemetine ait deneysel tasarım yöntemi ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri. **A)** Güç ve hızın kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **B)** Güç ve baskı kuvvetinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **C)** Hız ve baskı kuvvetinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği



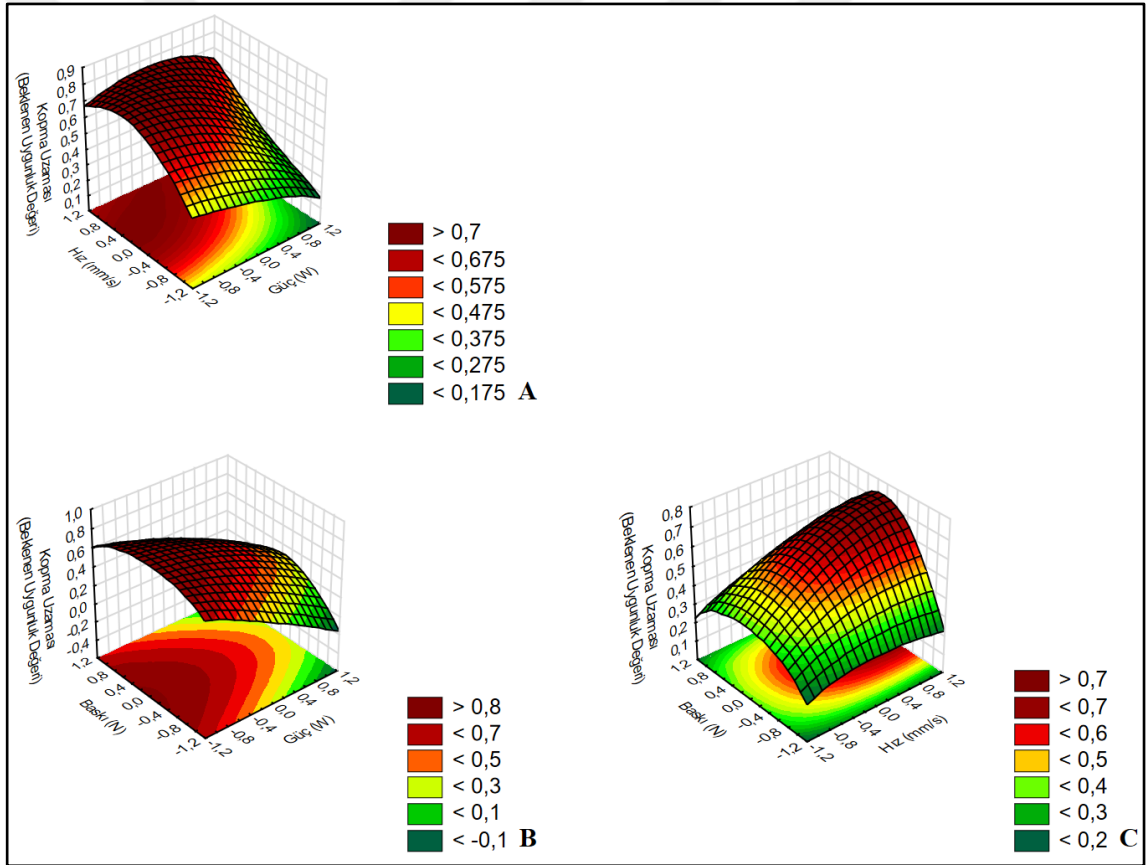
Şekil 4.5. Deneysel tasarım sonucunda kaynak mukavemeti için elde edilen Pareto grafiği

Kopma uzaması için elde edilmiş ANOVA tablosu Çizelge 4.12’de verilmiştir. Kaynak mukavemeti için elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında benzer sonuçlar kopma uzaması için de elde edilmiştir. Kaynak gücünün doğrusal ilişkisi, kaynak hızının doğrusal ilişkisi, baskı kuvvetinin doğrusal olmayan ilişkisi, baskı kuvvetinin doğrusal olmayan ilişkisinin kaynak gücü ve kaynak hızı olan etkileşimi kopma uzaması için de etkin görünmektedir. Ek olarak kopma uzaması için kaynak gücünün doğrusal ilişkisi ile kaynak hızının doğrusal olmayan ilişkisi arasındaki etkileşimin de çıktı üzerinde etkin olduğu tespit edilmiştir. Kaynak gücünün kopma uzaması üzerindeki doğrusal ilişkisi ve baskı kuvvetinin kopma uzaması üzerindeki karesel ilişkisi diğer etki ve etkileşimlere göre daha belirgin görülmektedir.

Çizelge 4.12. Kopma uzaması için elde edilen ANOVA tablosu

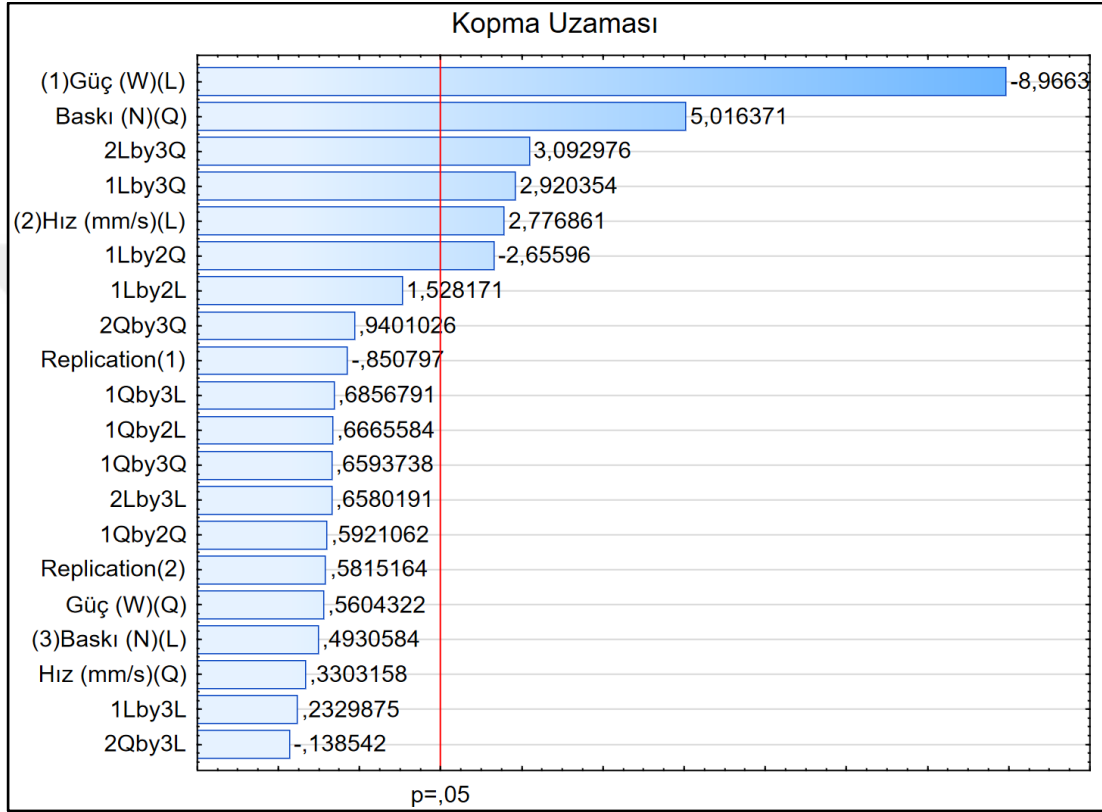
Faktör	Kareler	Serbestlik	Kareler	F Değeri	p Değeri
	Toplamı	Derecesi	Ortalaması		
Bloklar	0,03422	2	0,017109	0,37818	0,686521
Güç(D)	3,63723	1	3,637235	80,39569	0,000000
Güç(K)	0,01421	1	0,014210	0,31408	0,577000
Hız(D)	0,34886	1	0,348856	7,71096	0,007061
Hız(K)	0,00494	1	0,004936	0,10911	0,742162
Baskı Kuvveti(D)	0,01100	1	0,010999	0,24311	0,623537
Baskı Kuvveti(K)	1,13846	1	1,138460	25,16398	0,000004
Güç(D)-Hız(D)	0,10565	1	0,105653	2,33531	0,131042
Güç(D)-Hız(K)	0,31914	1	0,319141	7,05414	0,009814
Güç(K)-Hız(D)	0,02010	1	0,020101	0,44430	0,507277
Güç(K)-Hız(K)	0,01586	1	0,015861	0,35059	0,555715
Güç(D)-Baskı Kuvveti(D)	0,00246	1	0,002456	0,05428	0,816461
Güç(D)-Baskı Kuvveti(K)	0,38584	1	0,385842	8,52847	0,004720
Güç(K)-Baskı Kuvveti(D)	0,02127	1	0,021271	0,47016	0,495213
Güç(K)-Baskı Kuvveti(K)	0,01967	1	0,019670	0,43477	0,511850
Hız(D)-Baskı Kuvveti(D)	0,01959	1	0,019589	0,43299	0,512715
Hız(D)-Baskı Kuvveti(K)	0,43280	1	0,432804	9,56650	0,002860
Hız(K)-Baskı Kuvveti(D)	0,00087	1	0,000868	0,01919	0,890216
Hız(K)-Baskı Kuvveti(K)	0,03998	1	0,039984	0,88379	0,350444
Hata	3,12167	69	0,045242		
Toplam Kareler Toplamı	10,26362	89			

Şekil 4.6’da kopma uzaması için elde edilen tepki yüzeyi grafikleri incelendiğinde kaynak mukavemeti için elde edilen eğilimler ile benzer ikili ilişkilerin olduğu görülmüştür. Bu da kaynak mukavemeti ile kopma uzaması arasında kuvvetli bir pozitif korelasyonun olduğunu göstermektedir. Diğer yandan parametrelerin çıktı üzerindeki etkileri analiz edildiğinde, özellikle Şekil 4.6.C’de baskı kuvvetinin kopma uzaması ile arasındaki doğrusal olmayan ilişki açık bir şekilde görülebilmektedir. Diğer iki parametrede ise parametre seviye değişimleri ile çıktılar arasında doğrusallığa yakın bir ilişki görülebilmektedir. Özellikle Şekil 4.6.C’de LTW hız parametresinin değişiminin baskı kuvveti değişse bile kopma uzaması üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı görülebilmektedir.



Şekil 4.6. Kopma uzamasına ait deneysel tasarım yöntemi ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri. **A)** Güç ve hızın kopma uzaması üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **B)** Güç ve baskı kuvvetinin kopma uzaması üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **C)** Hız ve baskı kuvvetinin kopma uzaması üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği

LTW parametrelerinin kopma uzaması üzerindeki ana etki ve ikili etkileşimlerinin sıralaması Şekil 4.7’de verilmiştir. Burada kaynak mukavemetinden farklı olarak kaynak hızının kopma uzaması ile olan doğrusal ilişkisinin, gücün doğrusal ilişkisi ile baskı kuvvetinin doğrusal olmayan ilişki etkileşiminden daha zayıf bir katkısının olduğu görülmüştür.



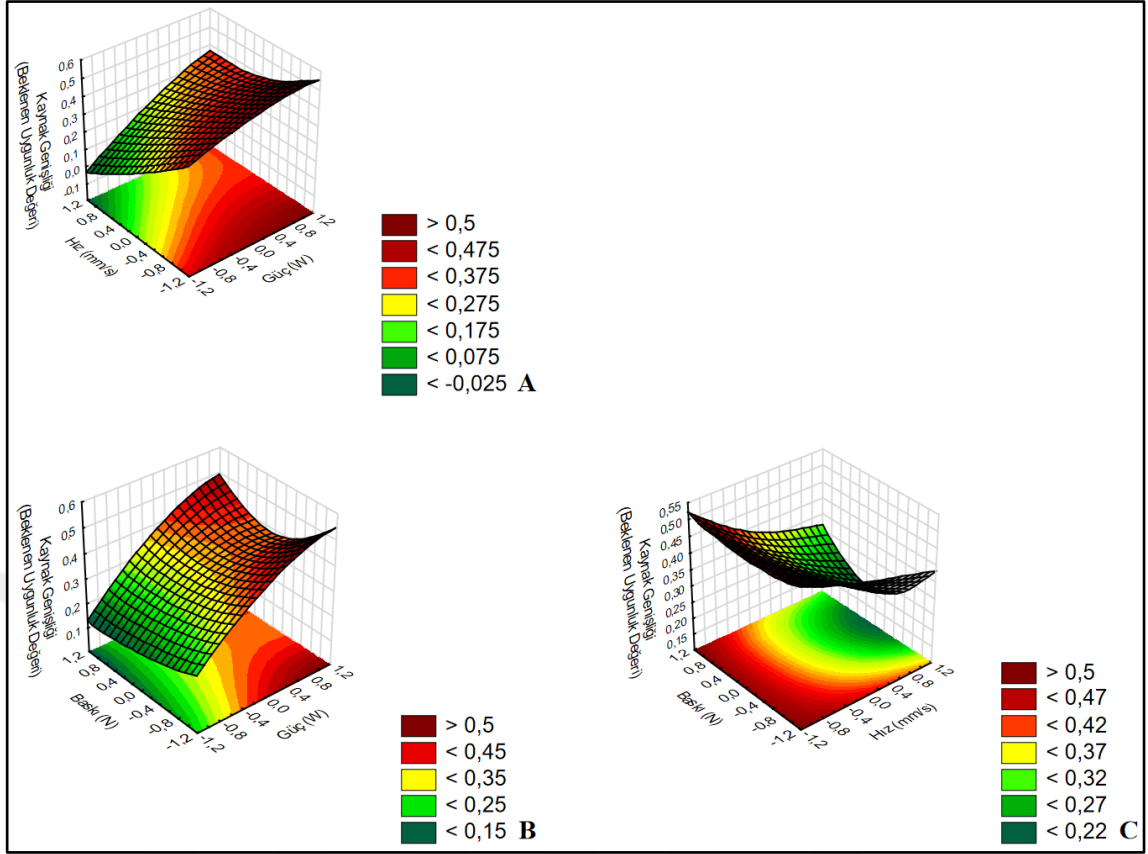
Şekil 4.7. Deneysel tasarım sonucunda kopma uzaması için elde edilen Pareto grafiği

Deneysel tasarım yöntemi ile son olarak kaynak parametrelerinin kaynak genişliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda Çizelge 4.13, deneysel tasarım sonucunda elde edilen ANOVA tablosunu göstermektedir. Parametrelerin ana etkileri dikkate alındığında ilk iki çıktıya benzer şekilde kaynak gücü ve kaynak hızının çıktı ile doğrusal kuvvetli bir ilişkisi ve kaynak mukavemetinin çıktı ile doğrusal olmayan kuvvetli bir ilişkisi bulunmaktadır. Parametrelerin ikili etkileşimleri dikkate alındığında ise sadece kaynak gücü ve kaynak hızının doğrusal etkileşimi kaynak genişliği üzerinde önemli bir etkisi vardır.

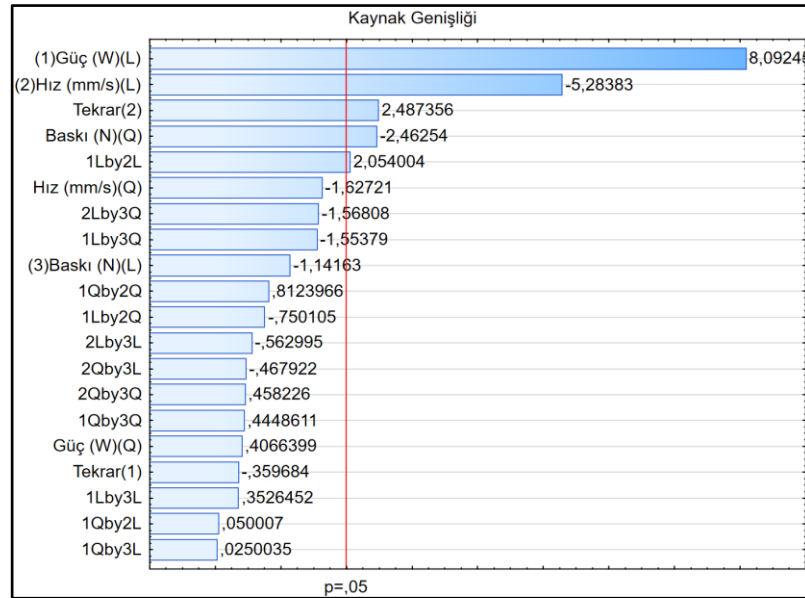
Şekil 4.8’de kaynak genişliği için elde edilmiş olan tepki yüzey grafiklerinde özellikle kaynak gücündeki değişimin çıktı üzerinde önemli değişimlere sebep olduğu görülebilmektedir. Buna ek olarak kaynak hızının değişiminde de çıktı üzerinde belirgin değişimlere neden olduğu gözlemlenmiştir. Baskı kuvvetinde ise doğrusal olmayan değişimin kısmen olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin kaynak genişliği üzerine olan ana etkisinin sıralaması Şekil 4.9’da verilmiş olan Pareto diyagramında da belirgin bir şekilde görünmektedir.

Çizelge 4.13. Kaynak genişliği için elde edilen ANOVA tablosu

Faktör	Kareler		Serbestlik Derecesi	Kareler		
	Toplamı			Ortalaması	F Değeri	p Değeri
Bloklar	0,52462	2	0,262308	3,61443	0,032149	
Güç(D)	4,75260	1	4,752600	65,48776	0,000000	
Güç(K)	0,01200	1	0,012000	0,16536	0,685531	
Hız(D)	2,02614	1	2,026141	27,91891	0,000001	
Hız(K)	0,19216	1	0,192158	2,64781	0,108251	
Baskı Kuvveti(D)	0,09459	1	0,094585	1,30332	0,257554	
Baskı Kuvveti(K)	0,44009	1	0,440086	6,06410	0,016296	
Güç(D)-Hız(D)	0,30618	1	0,306178	4,21893	0,043766	
Güç(D)-Hız(K)	0,04083	1	0,040833	0,56266	0,455742	
Güç(K)-Hız(D)	0,00018	1	0,000181	0,00250	0,960261	
Güç(K)-Hız(K)	0,04790	1	0,047897	0,65999	0,419358	
Güç(D)-Baskı Kuvveti(D)	0,00903	1	0,009025	0,12436	0,725429	
Güç(D)-Baskı Kuvveti(K)	0,17521	1	0,175208	2,41426	0,124810	
Güç(K)-Baskı Kuvveti(D)	0,00005	1	0,000045	0,00063	0,980124	
Güç(K)-Baskı Kuvveti(K)	0,01436	1	0,014362	0,19790	0,657813	
Hız(D)-Baskı Kuvveti(D)	0,02300	1	0,023003	0,31696	0,575263	
Hız(D)-Baskı Kuvveti(K)	0,17845	1	0,178445	2,45886	0,121438	
Hız(K)-Baskı Kuvveti(D)	0,01589	1	0,015890	0,21895	0,641315	
Hız(K)-Baskı Kuvveti(K)	0,01524	1	0,015238	0,20997	0,648230	
Hata	5,00749	69	0,072572			
Toplam Kareler Toplamı	13,84354	89				



şekil 4.8. Kaynak genişliğine ait deneysel tasarım yöntemi ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri. **A)** Güç ve hızın kaynak genişliği üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **B)** Güç ve baskı kuvvetinin kaynak genişliği üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **C)** Hız ve baskı kuvvetinin kaynak genişliği üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği



şekil 4.9. Deneysel tasarım sonucunda kaynak genişliği için elde edilen Pareto grafiği

4.4. LTW Kaynak Kalitesi İçin En İyi Parametre Setinin Belirlenmesi

Deneysel tasarım yönteminin ardından LTW kaynak kalitesi için en iyi parametre setini belirleyebilmek için her bir çıktıya ait regresyon denklemleri oluşturulmuştur. LTW girdi parametreleri ile çıktılar arasında doğrusal olmayan ilişkinin temsil edilebilmesi için Minitab® yazılımı kullanılarak çoklu regresyon denklemleri elde edilmiştir. Denklem 4.1-4.3'te sırasıyla kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliği için elde edilen regresyon denklemlerini göstermektedir. Burada y_1 , y_2 ve y_3 sırasıyla bağımlı değişken olan kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliğini temsil etmektedir. Bağımsız değişkenler olan x_1 , x_2 ve x_3 ise LTW girdi parametreleri olan kaynak gücü, kaynak hızı ve baskı kuvvetini temsil etmektedir. Bağımsız değişkenler için deneysel tasarım çalışmasında olduğu gibi $\{-1,0,1\}$ kodlanmış değerler dikkate alınmıştır. Elde edilen regresyon denklemlerine ait R^2 değerleri sırasıyla %71,68, %72,01 ve %68,80 olarak tespit edilmiştir. İstatistiksel olarak R^2 değerinin %50'den fazla çıkması elde edilen regresyon denkleminin anlamlı bir şekilde çıktıyı temsil ettiği, %70'den fazla olması durumunda ise elde edilen regresyon denkleminin çıktıyı kuvvetli bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Bu nedenle özellikle kaynak mukavemeti ve kopma uzaması için bulunan regresyon denklemleri ile elde edilen teorik verilerin gerçek değerleri kuvvetli bir şekilde temsil ettiği görülmüştür. Benzer şekilde kaynak genişliği için R^2 değerinin %70'e yakın çıkması regresyon denklemi sonucu ile deneysel çıktı arasındaki ilişkinin kuvvetli bir ilişkiye yakın olduğunu göstermektedir.

$$\begin{aligned} y_1 = & 1476,9 - 199,8x_1 + 191,8x_2 + 15,7x_3 - 108,2x_1^2 - 128,9x_2^2 - 301,7x_3^2 + \\ & 138,4x_1x_2 + 16,4x_1x_3 + 55,9x_2x_3 - 35,3x_1^2x_2 - 47,0x_1^2x_3 + 92,3x_1x_2^2 - \\ & 35,9x_1x_2x_3 - 126,3x_1x_3^2 + 46,1x_2^2x_3 - 155,6x_2x_3^2 + 76,1x_1^2x_2^2 - 33,8x_1^2x_2x_3 + \\ & 38,1x_1^2x_3^2 + 24,3x_1x_2^2x_3 - 147,7x_1x_2x_3^2 + 111,5x_2^2x_3^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} y_2 = & 1,6651 - 0,2487x_1 + 0,2343x_2 + 0,0367x_3 - 0,1092x_1^2 - 0,1165x_2^2 - \\ & 0,3473x_3^2 + 0,1639x_1x_2 + 0,026x_1x_3 + 0,0706x_2x_3 - 0,0409x_1^2x_2 - 0,0421x_1^2x_3 + \\ & 0,1631x_1x_2^2 - 0,0292x_1x_2x_3 - 0,1793x_1x_3^2 + 0,0085x_2^2x_3 - 0,1899x_2x_3^2 + \\ & 0,0583x_1^2x_2^2 - 0,0709x_1^2x_2x_3 + 0,0649x_1^2x_3^2 - 0,0267x_1x_2^2x_3 - 0,1646x_1x_2x_3^2 + \\ & 0,0926x_2^2x_3^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
y_3 = & 5,0829 + 0,2161x_1 - 0,2631x_2 - 0,0667x_3 - 0,1187x_1^2 + 0,0046x_2^2 + \\
& 0,0863x_3^2 + 0,0717x_1x_2 + 0,0025x_1x_3 - 0,1758x_2x_3 - 0,0178x_1^2x_2 - \\
& 0,0242x_1^2x_3 - 0,1050x_1x_2x_3 + 0,0875x_1x_3^2 + 0,0392x_2^2x_3 + 0,1081x_2x_3^2 + \\
& 0,08x_1^2x_2^2 + 0,1633x_1^2x_2x_3 + 0,009x_1^2x_3^2 + 0,0117x_1x_2^2x_3 + 0,01x_1x_2x_3^2 + \\
& 0,036x_2^2x_3^2
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Elde edilen denklemler Minitab® yazılımı ile ilk olarak ayrı ayrı optimize edilmiş sonrasında üç çıktıyı bir arada ve eşit ağırlıkta dikkate alacak şekilde (çoklu yanıt - multi response) optimize edilmiştir. Optimizasyon işleminde kaynak mukavemeti ve kopma uzaması için hedef maksimizasyon olarak, kaynak genişliği için ise hedef minimizasyon olarak seçilmiştir. Dört farklı senaryo için optimize edilmiş teorik parametre değerleri $(-1,1)$ aralığında ve parametre değerlerinin sınırları dikkate alınarak interpolasyon yöntemiyle dönüştürülmüş değerleri Çizelge 4.14’te verilmiştir.

Çizelge 4.14. Dört farklı senaryo için optimize edilmiş parametre değerleri

Senaryo	Hedef	Dönüştürülmüş Değerler					
		(-1, 1) Aralığında			Dönüştürülmüş Değerler		
		Güç	Hız	Baskı Kuvveti	Güç	Hız	Baskı Kuvveti
1	Maksimum Kaynak Mukavemeti	-0,7373	0,2323	-0,1010	65,26	74,65	149,51
2	Maksimum Kopma Uzaması	-1,0000	0,0516	-0,1515	60,00	91,03	142,42
3	Minimum Kaynak Genişliği	-1,0000	1,0000	-0,0909	60,00	110,00	145,50
4	Maksimum Kaynak Kalitesi (Çoklu Yanıt)	-1,0000	0,3535	-0,0101	60,00	97,07	149,50

İlk üç senaryoda çıktılar için optimize edilmiş parametre değerleri regresyon denklemlerinde yerine konulduğunda teorik olarak elde edilen çıktı değerleri; maksimum kaynak mukavemeti 1573,41 N, maksimum kopma uzaması %1,81 ve minimum kaynak genişliği 4,48 mm olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan üç çıktının bir arada değerlendirildiği son senaryoya göre optimize edilmiş parametre değerlerine göre kaynak mukavemeti 1566,98 N, kopma uzaması %1,79 ve kaynak genişliği 4,63 mm olarak tespit

edilmiştir. Çok yanıtli optimizasyon ile elde edilen kaynak çıktıları ilk üç senaryo ile kıyaslandığında; kaynak mukavemetinde 6,43 *N* düşüş, kopma uzamasında %0,02 azalış ve kaynak genişliğinde 0,15 *mm* artış ortaya çıkmıştır.

Elde edilen teorik çıktı değerlerinin kıyaslanabilmesi ve önerilmiş olan çözüm yönteminin geçerliliğinin tespit edilebilmesi için Çizelge 4.14'te belirlenmiş olan parametre setleri ile gerçek deneyler yapılmıştır. Tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemlerinde olduğu gibi deney sonuçlarındaki olası değişkenlik dikkate alınarak her parametre seti için üç tekrar yapılmıştır. Çizelge 4.15'te elde edilen sonuçların ortalama değerleri gösterilmiş ve teorik olarak elde edilen çıktı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.15. Gerçek deney ortamında en iyi parametre setleri ile elde edilen çıktı sonuçları

Hedef	Teorik Çıktı Değerleri			Deneysel Çıktı Değerleri		
	Kaynak Mukavemeti (<i>N</i>)	Kopma Uzaması (%)	Kaynak Genişliği (<i>mm</i>)	Kaynak Mukavemeti (<i>N</i>)	Kopma Uzaması (%)	Kaynak Genişliği (<i>mm</i>)
Maksimum Kaynak Mukavemeti	1573,41			1895,26	2,08	5,19
Maksimum Kopma Uzaması		1,81		1729,73	2,46	4,52
Minimum Kaynak Genişliği			4,48	1167,01	1,16	4,12
Maksimum Kaynak Kalitesi (Çoklu Yanıt)	1566,98	1,79	4,63	1837,02	2,40	4,64

Teorik olarak elde edilmiş çıktı değerleri ile deneysel çıktı değerleri karşılaştırıldığında deneysel çıktı değerlerinin teorik çıktı değerlerinden farklı olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi regresyon denklemlerinin deneysel çıktılar ile olan arasındaki hata terimlerinden kaynaklanmaktadır. $R^2 \cong \%70$ regresyon denkleminin deneysel çıktıları yansıtma ilişkisini gösterirken $1 - R^2$ değeri çıktı değerlerinin regresyon denklemleri ile temsil edilemediği düzeyi göstermektedir. Bu kapsamda R^2 değeri üç çıktı için de yüksek çıkmış olup girdi ve çıktı değerleri arasında yüksek bir korelasyonun elde edildiğini göstermiştir. Diğer yandan teorik ve gerçek değerler arasındaki değişimlerin birbirleri

arasında orantılı olduğu görülmektedir. Örneğin ilk senaryo için kaynak mukavemetinde teorik çıktı değeri ile deneysel çıktı değeri arasındaki %20,45 iken çoklu yanıt yönteminde bu değer %17,23'tür. Yani yaklaşık %3 değişimle sonuçlar paralellik göstermiştir. Benzer şekilde kopma uzaması ve kaynak genişliği için elde edilen farklar sırasıyla %1,91 ve %7,82 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle elde edilmiş regresyon denklemlerinin gerçek deney koşullarını yüksek oranda temsil ettiği söylenebilir.

Çizelge 4.15'te verilmiş olan gerçek deney sonuçları incelendiğinde ilk üç senaryo için hedef aldıkları çıktı değerine göre daha iyi bir kalite edilmesinin doğal bir sonuç olacağı görülmektedir. Kaynak mukavemeti için en yüksek değer ilk senaryoda, kopma uzaması için en iyi değer ikinci senaryoda ve kaynak genişliği için en iyi değer üçüncü senaryoda elde edilmiştir. Fakat bu senaryolar için elde edilen diğer çıktılar (hedef dışında olan çıktılar) incelendiğinde kalite düzeylerinin dikkate değer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Örneğin ilk senaryo kaynak mukavemetini hedef alırken kopma uzaması ve kaynak genişliği için ikinci ve üçüncü senaryodan daha kötü sonuçlar bulunmuştur. Benzer şekilde ikinci senaryoda elde edilen kaynak mukavemetinden ve kaynak genişliğinden daha iyi sonuçlar ilk ve üçüncü senaryoda elde edilebilmektedir. Üçüncü senaryoda da ilk senaryoya benzer şekilde kaynak genişliği dışında diğer iki çıktı değeri ilk iki senaryoda elde edilen değerlerden daha kötüdür.

Çoklu yanıt ile elde edilen çıktılar dikkate alındığında ilk üç senaryoda elde edilen en iyi çıktı değerlerinden az bir sapma ile bir kaynak kalitesi elde edildiği görülmektedir. En iyi ortalama kaynak mukavemeti değeri ilk senaryoda 1895,26 *N* iken çoklu yanıt ile elde edilen ortalama kaynak mukavemeti 1837,02 *N* olarak bulunmuştur. En iyi kopma uzaması değeri ikinci senaryoda %2,46 iken çoklu yanıt yöntemiyle %0,06 düşüş ile %2,40 olarak elde edilmiştir. Kaynak genişliği açısından sonuçlar değerlendirildiğinde çoklu yanıt yöntemi ile elde edilen kaynak genişliği ilk senaryoda elde edilen kaynak genişliğinden daha az iken ikinci ve üçüncü senaryoda elde edilen kaynak genişliklerinden daha fazla bir genişlik elde edilmiştir. Nihai olarak elde edilen bu değerler, yöntemin ara değerlendirme sürecinde TOPSIS ile elde edilen ve en iyi alternatif parametre seti olarak belirlenen A4 sonuçları ile kıyaslandığında kaynak mukavemetinin

1795,70 *N*'den 1837,02 *N*'a çıktığı, kopma uzamasının %2,33'ten %2,40'a çıktığı ve kaynak genişliğinin 4,71 *mm*'den 4,64 *mm*'ye düştüğü tespit edilmiştir.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yüksek performanslı polimer malzemelerin elde edilmesi ile termoplastik parçaların otomotiv endüstrisinde kullanım miktarı yıllar geçtikçe artmıştır. Bu malzemelerin metal parçalara göre daha hafif olması araç ağırlığını azaltma konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda yüksek mukavemetleri ve esnek yapıları sayesinde araç içerisinde birçok farklı noktada kolay bir şekilde kullanılabilir. Diğer yandan bu malzemelerin kullanımı ile daha düşük maliyetler ile üretim elde edilebilmektedir. Bu nedenle, rekabetin oldukça yüksek olduğu otomotiv sektöründe firmalar, rekabet gücünü koruyabilmek ve müşteri istekleri doğrultusunda beklenen kalitede ürün elde edebilmek için termoplastik malzemelerden oluşan parçaları araç içerisinde yoğun bir şekilde kullanmaya başlamışlardır. Fakat bu parçaların, araç montajı aşamasında benzer veya farklı tipinde birçok malzeme ile birleştirilmesi gerekmektedir. Birleştirme noktasındaki mukavemet, korozyon, titreşim, yalıtım, birleştirme maliyeti vb. unsurlar dikkate alındığında daha etkin çözümler üretebilecek birleştirme tekniklerine ve süreç yönetimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda lazer kaynak teknolojisi; sağladığı esneklik, temassız birleştirme yöntemi ve sağladığı yüksek kaynak kalitesi ile birçok uygulama için tercih edilen birleştirme yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte farklı yapıda malzemeler, kaynak cihazları ve değişen ortam koşullarına göre belirli bir kaynak kalitesini elde edebilmek için kaynak cihazlarına ait kontrol edilebilir parametrelerin en iyi değerlerinin tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Yapılan tez çalışmasında otomotiv aydınlatma sistemlerinde kullanılan ABS malzeme ile şeffaf PMMA malzemesinin lazer iletim kaynağı ile birleştirilme sürecinde kaynak proses parametrelerinin optimizasyonunu ele alınmıştır. LPKF Twinweld 3D 6000® lazer kaynak cihazının kullanıldığı firmada PMMA-ABS malzemelerin kaynak edilmesi sonunda kaynak kalitesi için kaynak mukavemeti, kopma uzaması ve kaynak genişliğinin en iyi hale getirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda cihazın kontrol edilebilir parametreleri olan lazer gücü, lazer hızı ve baskı kuvveti geliştirilmiş olan çok aşamalı yöntem ile optimize edilmiştir.

Geliştirilen yöntemde ilk adım olarak parametrelerin, çıktılar üzerindeki ana etkisini belirleyebilmek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bir ön analiz olarak gerçekleştirilen bu aşamada Taguchi yönteminin L_{16} ortogonal dizisi ile her parametre için dört seviye belirlenerek çıktılar analiz edilmiştir. Taguchi yöntemiyle gözlemlenen S/N oranlarına göre en önemli kaynak parametresi hem kopma uzaması hem de kaynak genişliği için lazer gücü olduğu tespit edilmiştir. S/N oranları kopma uzaması için 3,73 kaynak genişliği için 1,45 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan basınç kuvveti S/N oranı en yüksek değere sahip olduğundan kaynak mukavemet kalitesini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Taguchi metodu ile elde edilen sonuçlar parametrelerin çıktılar üzerine olan ilişkisini göstermekle birlikte parametrelerin ikili etkileşiminden kaynaklı etkiler analiz edilememektedir. Diğer yandan Taguchi metodu ile elde edilen parametre setleri sadece bir çıktıya göre hesaplanmıştır. 50 W güç, 100 mm/s hız ve 150 N baskı kuvvetinde en iyi kaynak mukavemeti elde edilirken 70 W güç, 100 mm/s hız ve 150 N baskı kuvvetinde en iyi kopma uzaması elde edilmiştir. 30 W güç, 120 mm/s hız ve 300 N baskı kuvvetinde en iyi kaynak genişliği elde edilmiştir. Dolayısıyla tek bir yanıt için elde edilen en iyi parametre seti, diğer yanıtlar için en iyi parametre seti olmamıştır. Bu nedenle, bir dizi yanıtı optimize etmek amacıyla en iyi parametre ayarlarını elde etmek için çok yanıtlı bir yaklaşım gerektiği görülmüştür. Bu kapsamda bir tam faktöriyel bir deneysel tasarım çalışması öncesinde parametre seviyelerini daha etkin belirleyebilmek için Taguchi yöntemi ile elde edilen çıktı değerleri çok kriterli bir karar verme yöntemi olan TOPSIS metodu ile analiz edilmiştir. TOPSIS yönteminde yedi alternatif parametre seti, üç temel LTW kalite ölçümü aracılığıyla değerlendirilmiştir. TOPSIS ile elde edilen sıralamaya göre Taguchi metodu ile elde edilen parametre değerlerinin arasında değerlerden oluşan bir alternatif parametre setinin daha iyi kalitede kaynak çıktısı elde edebileceği görülmüştür.

TOPSIS metodu ile elde edilen ölçümlere göre parametre seviyeleri güncellenerek 3^3 tam faktöriyel deneysel tasarım gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ANOVA tablosu, yanıt yüzey grafikler ve Pareto diyagramları üzerinden analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda lazer kaynak gücünün ve baskı kuvvetinin kaynak mukavemeti ve kopma uzaması

üzerinde önemli etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Kaynak gücünün düşük olduğu seviyelerde her iki çıktı için daha yüksek sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Baskı kuvvetinin ise çıktılar üzerinde doğrusal olmayan bir ilişki ile etkisinin olduğu ve orta seviyelerde çıktılar için daha yüksek sonuçlar elde edilebileceği belirlenmiştir. Kaynak genişliğinde ise baskı kuvveti yerine kaynak hızının daha belirleyici bir parametre olduğu görülmüştür. Lazer gücünde olduğu gibi kaynak hızının da çıktı üzerinde doğrusal bir ilişkisi bulunmakta olup yüksek hızlarda daha az kaynak genişliği elde edilebileceği analizler sonunda elde edilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, deneysel tasarım yöntemi sonunda elde edilen ve polinom yapıda olan regresyon denklemleri çok amaçlı optimizasyon problemi olarak dikkate alınmış ve LTW için en iyi parametre seti belirlenmiştir. Teorik olarak elde edilen parametre değerleri ile kaynak denemeleri yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çoklu yanıt ile elde edilen çıktılar dikkate alındığında tek çıktının dikkate alındığı üç farklı senaryoda elde edilen en iyi çıktı değerlerinden az bir sapma ile bir kaynak kalitesi elde edildiği görülmüştür. En iyi ortalama kaynak mukavemeti değeri ilk senaryoda 1895,26 *N* iken çoklu yanıt ile elde edilen ortalama kaynak mukavemeti 1837,02 *N* olarak bulunmuştur. En iyi kopma uzaması değeri ikinci senaryoda %2,46 iken çoklu yanıt yöntemiyle %0,06 düşüş ile %2,40 olarak elde edilmiştir. Kaynak genişliği açısından sonuçlar değerlendirildiğinde çoklu yanıt yöntemi ile elde edilen kaynak genişliği ilk senaryoda elde edilen kaynak genişliğinden daha az iken ikinci ve üçüncü senaryoda elde edilen kaynak genişliklerinden daha fazla bir genişlik elde edilmiştir. Nihai olarak belirlenmiş olan parametre seti ile otomotiv sektöründe aydınlatma sistemlerine ait parçaların lazer kaynak prosesi için en iyi parça kalitesi elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Acherjee, B. (2020). Laser transmission welding of dissimilar plastics: analyses of parametric effects and process optimization using grey-based Taguchi method. *Modern Manufacturing Processes*, 131-144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819496-6.00006-3>
- Acherjee, B. (2021). Laser transmission welding of polymers—a review on welding parameters, quality attributes, process monitoring, and applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 421-443. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.022>
- Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra S., & Misra, D. (2010). Selection of process parameters for optimizing the weld strength in laser transmission welding of acrylics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224, 1529-1536. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1854>
- Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra, S., & Mitra, D. (2011). Application of grey-based Taguchi method for simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser transmission welding process of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 56, 995-1006. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3224-7>
- Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra, S., Misra, D., & Acharyya, S. (2012). Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling. *Optics & Laser Technology*, 44, 1372-1383. doi:10.1016/j.optlastec.2011.12.029
- Acherjee, B., Maity, D., & Kuar, A. S. (2017). Parameters optimisation of transmission laser welding of dissimilar plastics using RSM and flower pollination algorithm integrated approach. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 8(1), 1-22. <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2017.083656>
- Acherjee, B., Misra, D., Bose, D., & Venkadeshwaran, K. (2009). Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology. *Optics and Laser Technology*, 41, 956-967. doi:10.1016/j.optlastec.2009.04.007
- Ageorges, C., Ye, L., & Hou, M. (2001). Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(6), 839-857. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00166-4)
- Altmeyer, J., Suhuddin, U. F. H., Dos Santos, J. F., & Amancio-Filho, S. T. (2015). Microstructure and mechanical performance of metal-composite hybrid joints produced by FricRiveting. *Composites Part B: Engineering*, 81, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.015>
- Amanat, N., Chaminade, C., Grace, J., James, N. L., & McKenzie, D. R. (2011). Optimal process parameters for thermoplastic polyetheretherketone joints fabricated using transmission laser welding and Lumogen® IR absorptive pigment. *Journal of Laser Applications*, 23(1), 012003. <https://doi.org/10.2351/1.3552972>
- Amanat, N., James, N. L., & McKenzie, D. R. (2010). Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. *Medical*

- Engineering & Physics*, 32, 690-699.
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.04.011>
- Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Optimization of tensile strength of ferritic/austenitic laser-welded components. *Optics and Laser in Engineering*; 46, 571-577. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.04.014>
- Baldan, A. (2004). Adhesively- bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials: Mechanical and environmental durability performance. *Journal of Materials Science*, 39, 4729–97. <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000035317.87118.ab>
- Banea, M. D., & Da Silva, L. F. M. (2009). Adhesively bonded joints in composites materials: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Material Design and Applications*, 223(1), 1-18. <https://doi.org/10.1243/14644207JMMDA219>
- Baylis, B., Huang, Y. P., & Watt, D., (2002). Welding thermoplastic elastomers to polypropylene with a diode laser. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Laser Institute of America*, 171828. <https://doi.org/10.2351/1.5066211>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39, 13051-13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Bhattacharya, R., Kumar, N., Kumar, N., & Bandyopadhyay, A. (2018). A study on the effect of process parameters on weld width and heat affected zone of pulsed laser welding of dissimilar transparent thermoplastics without filler materials in lap joint configuration. *Materials Today Proceedings*, 5(2), 3674–3681. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.618>
- Bideskan, A. S., Ebrahimzadeh, P., & Teimouri, R. (2020). Fabrication of bi-layer PMMA and aluminum 6061-T6 laminates by laser transmission welding: Performance prediction and optimization. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(2), 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.09.008>
- Boglea, A., Olowinsky, A., & Gillner, A., (2007). Fibre laser welding for packaging of disposable polymeric micro fluidic-biochips. *Applied Surface Science*, 254 (4),1174–1178. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.013>
- Bryden, B. (2000). High power diode laser transmission welding of plastics. *Assembly Automation*, 20(2), 136–139. DOI:10.1108/01445150010321760
- Candioti, L. V., De Zan, M. M., Camara, M. S., & Goicoechea, H. C. (2014). Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. *Talanta*, 124, 123-138. <https://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>
- Cao, H., Li, Y., Li, H., Zhang, C., Ge, W., & Xing, B. (2022). Multi-objective response evaluation for carbon emission and welding performance of laser welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(5-6), 3005-3023. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09405-8>
- Chen, H., Zhang, B., & Fuhlbrgge, T. (2020). Welding process optimization methods: A review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 3(1), 3-21. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8192-8>
- Da Silva, L. F. M., Das Neves, P. J. C., Adams, R. D. & Spelt, J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joint-Part I: Literature survey. *International Journal*

- of *Adhesion & Adhesives*, 29(3), 319-330.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005>
- Der, O., Edwardson, S., & Bertola, V. (2020). Manufacturing low-cost fluidic and heat transfer devices by selective transmission laser welding. 11th CIRP Conference on Photonic Technologies.
- Der, O., Marengo, M., & Bertola, V. (2019). Thermal performance of pulsating heat stripes built with plastics materials. *Journal of Heat Transfer*, 141(9), 091808. <https://doi.org/10.1115/1.4041952>
- Dwivedi, S. P., & Sharma, S. (2014). Optimization on laser transmission joining process parameters on joint strength of PET and 316L stainless steel joint using response surface methodology. *Journal of Engineering*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/197060>
- El-Shekeil, Y. A., Sapuan, S. M., Azaman, M. D., & Jawaid, M. (2013). Optimization of blending parameters and fiber size of kenaf-bast-fiber-reinforced the thermoplastic polyurethane composites by Taguchi method. *Advances in Materials Science Engineering*, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/686452>
- Fisher R. A. (1935). *The design of experiments (1st ed.)*. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Fisher R. A. (1990). *Statistical methods, experimental design and scientific interference*. Oxford: Oxford University Press.
- Freddi, A., & Salmon, M. (2019). Introduction to the Taguchi method. *Design Principles and Methodologies*, 159-180. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95342-7>
- Ghasemi, H., Zhang, Y., Bates, P. J., Zak, G., & DuQuesnay, D. L. (2018). Effect of processing parameters on meltdown in quasi-simultaneous laser transmission welding. *Optics & Laser Technology*, 107, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.047>
- Ghorbel, E., Casalino, G., & Abed, S., (2009). Laser diode transmission welding of polypropylene: Geometrical and microstructure characterization of weld. *Materials & Design*, 30 (7), 2745–2751. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.027>
- Gisario, A., Veniali, F., Barletta, M., Tagliaferri, V., & Vesco, S. (2017). Laser transmission welding of poly (ethyleneterephthalate) and biodegradable poly (ethylene terephthalate)–based blends. *Optics and Lasers in Engineering*, 90, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.010>
- Gonçalves, L. F., Duarte, F. M., Martins, C. I., & Paiva, M. C. (2021). Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality. *Infrared Physics and Technology*, 119, 103931. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103931>
- Graudenz, M., & Baur, M. (2013). Applications of laser welding in the automotive industry. *Handbook of Laser Welding Technologies*, 555-574. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.4.555>
- Grewell, D., & Benatar, A., (2003). Laser microwelding of polystyrene and polycarbonate. *ICALEO- 22nd International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*, 537. <https://doi.org/10.2351/1.5060171>
- Gutowski, T. G. (1997). *Advanced Composite Manufacturing*. New York: Wiley Inter Science. ISBN: 978-0-471-15301-6
- Haque, M. S., Moeed, K., & Zaka, M. Z. (2022). Laser welding of thermoplastics – A review. *Materials Today: Proceedings*, 64(3), 1479-1485. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.900>

- He, X., Pearson, I. & Young, K. (2008). Self-Pierce riveting for sheet materials: State of the art. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1-3), 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.071>
- Hopmann, C., & Weber, M., (2012). New concepts for laser transmission welding of dissimilar thermoplastics. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 28(4), 157–172. <https://doi.org/10.1177/147776061202800402>
- Huang, Y., Gao, X., Ma, B., & Zhang, Y. (2021). Interface formation and bonding mechanisms of laser welding of PMMA plastic and 304 austenitic stainless steel. *Metals*, 11(9), 1495. <https://doi.org/10.3390/met11091495>
- Hubeatir, K. A. (2020). Laser transmission welding of PMMA using IR semiconductor laser complemented by the Taguchi method and grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*, 20, 466-473. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.167>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple Attribute Decision Making*, 58-191. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Jones, I. (2013). Laser welding of plastics. *Handbook of laser welding technologies*, 280-301. <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.280>
- Jiao, J., Xu, Z., Wang, Q., Sheng, L., & Zhang, W. (2018). CFRTP and stainless steel laser joining: Thermal defects analysis and joining parameters optimization. *Optics & Laser Technology*, 103, 170–176. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.023>
- Jin, X., Heepe, L., Strueben, J., Adelung, R., Gorb, S. N., & Staubitz, A. (2014). Challenges and solutions for joining polymer materials. *Macromolecular Rapid Communications*, 35(18), 1551-1570. <https://doi.org/10.1002/marc.201400200>
- Kagan, V., & Bray, R. G. (2001). Advantages and limitations of laser welding technology for semi-crystalline reinforced plastics *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 1218. <https://doi.org/10.2351/1.5059784>
- Kagan, V., Bray, R., Chambers, A., (2003). Forward to better understanding of optical characterization and development of colored polyamides for the infra-red/laser welding: Part I-efficiency of polyamides for infra- red welding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(6), 533–547. <https://doi.org/10.1106/0731684030232>
- Kagan, V. A., Bray, R. G., & Kuhn, W. P. (2002). Laser transmission welding of semi-crystalline thermoplastics - Part I: Optical characterization of nylon based plastics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21(12), 1101–1122. <https://doi.org/10.1177/073168402128987>
- Kang, H., Li, Z., Khosrovaneh, A. K., Kang, B. & Li, Z. (2015). Fatigue life predictions of adhesive joint of sheet steels. *Procedia Engineering*, 133, 518-527. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.623>
- Katayama, S. (2013). *Handbook of Laser Welding Technologies*. Woodhead Publishing.
- Katsiropoulos, C. V., Moraitis, G. A., Labeas, G. N., & Pantelakis, S. G. (2009). Optimization of laser welding process for thermoplastic composite materials with regard to component quality and cost. *Plastics, Rubber and Composites*, 38, 153–161. <https://doi.org/10.1179/174328909x387847>
- Klein, J., & Kraus, A. (2004). Is laser welding economical?. *Kunststoffe - Plast Europe*, 94(7), 49–51.

- Kucukoglu, A., Yuce, C., Sozer, İ. E., & Karpat, F. (2023). Multi-response optimization for laser transmission welding of PMMA to ABS using Taguchi-based TOPSIS method. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(8), 1-16. <https://doi.org/10.1177/16878132231193260>
- Kumar, N., & Bandyopadhyay, A. (2021a). A state-of-the-art review of laser welding of polymers - Part I: Welding parameters. *Welding Journal*, 100, 221-228. <https://doi.org/10.29391/2021.100.019>
- Kumar, N., & Bandyopadhyay, A. (2021b). A state-of-the-art review of laser welding of polymers - Part II: Weld-Quality studies. *Welding Journal*, 100, 249-258. <https://doi.org/10.29391/2021.100.022>
- Kumar, D., Ghosh, S., Kuar, A. S., & Paitandi, S. (2020). Laser transmission welding of thermoplastic with beam wobbling technique using particle swarm optimization. *Materials Today: Proceedings*, 26, 808-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.422>
- Kumar, N., Kumar, N., & Bandyopadhyay, A. (2018). Optimization of pulsed Nd:YVO4 through transmission laser welding of transparent acrylic and polycarbonate. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5235-5243. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.106>
- Kumar, D., Paitandi, S., Kuar, A. S., & Bose, D. (2021). Experimental investigation on laser transmission welding of polycarbonate and acrylic. *Machine Learning Applications in Non-Conventional Machining Processes*, 160-180. 10.4018/978-1-7998-3624-7.ch010
- Kumar, N., Rudrapati, R., & Pal, P. K., (2014). Multi-objective optimization in through laser transmission welding of thermoplastics using grey-based Taguchi method. *Procedia Materials Science*, 5, 2178-2187. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.423>
- Kumar, D., Sarkar, N. S., Acherjee, B., & Kuar, A. S. (2022). Beam wobbling effects on laser transmission welding of dissimilar polymers: Experiments, modeling, and process optimization. *Optics and Laser Technology*, 146, 107603. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107603>
- Küçüköğlü, A., & Karpat, F. (2017). The Joining Techniques for Thermoplastics Materials in Automotive Industries: A Comprehensive Literature. *IMECE2016*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-66185>
- Küçüköğlü, A., Yuce, C., Karpat, F., Okar, H. İ., Sözer, İ. E., & Kurt, N. (2021). PMMA ve ABS malzemelerin lazer iletim kaynağı ile birleştirilmesinde proses parametre etkilerinin incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26, 481-491. <https://doi.org/10.17482/uumfd.810204>
- Leister (19.01.2024). Laser weldable materials. <https://www.leister.com>
- Li, Y., Xiong, M., He, Y., Xiong, J., Tian, X., & Mativenga, P. (2022). Multi-objective optimization of laser welding process parameters: The trade-offs between energy consumption and welding quality. *Optics and Laser Technology*, 149, 107861. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107861>
- Liu, F. C, Liao, J., & Nakata, K. (2014). Joining of metal to plastic using friction lap welding. *Materials and Design*, 54, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.056>
- Martinsen, K., Hu, S. J., & Carlson, B. E. (2015). Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64(2), 679-699. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.006>

- Mazumder, J. (1993). Welding, brazing, and soldering: Laser-Beam welding, *ASM Handbook*, 262-269. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001370>
- Mazumdar, S. K., & Hoa, S. V. (1995). Application of Taguchi method for process enhancement of on-line consolidation technique. *Composites*, 26(9), 669–673. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(95\)98916-9](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)98916-9)
- Mäkelä, M. (2017). Experimental design and response surface methodology in energy applications: a tutorial review. *Energy Conversion and Management*, 151, 630–640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.021>
- Mori, K., Bay, N., Fratini, L., Micari, F., & Tekkaya, A. E. (2013). Joining by plastic deformation. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62(2), 673-694. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.004>
- Mori, K., Kato, T., Abe, Y., & Ravshanbek, Y. (2006). Plastic joining of ultra-high strength steel and aluminum alloy sheet by self-piercing rivet. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 283-286. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60417-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60417-X)
- Mousavi, L., Tamiji, Z., & Khoshayand, M. R. (2018). Applications and opportunities of experimental design for the dispersive liquid–liquid microextraction method – A review. *Talanta*, 190, 335-356. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.08.002>
- Nakhaei, M. R., Mostafa Arab, N. B., & Naderi, G. (2013a). Application of response surface methodology for weld strength prediction laser welding of polypropylene/clay nanocomposite. *Iranian Polymer Journal*, 22, 351–360. <https://doi.org/10.1007/s13726-013-0134-6>
- Nakhaei, M. R., Mostafa Arab, N. B., Naderi, G., & Hoseinpour Gollo, M. (2013b). Experimental study on optimization of CO₂ laser welding parameters for polypropylene-clay nanocomposite welds. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, 843–848. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0109-8>
- Narenderan, S. T., Meyyanathan, S. N., & Reddy Karri, V. V. S. (2019). Experimental design in pesticide extraction methods: A review. *Food Chemistry*, 289, 384-395. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.045>
- Olowinsky, A., & Rösner, A. (2012). Laser welding of polymers: established process but still not at its best. *Laser Technik Journal*, 9(2), 52–56. <https://doi.org/10.1002/latj.201290023>
- Parimanik, S. R., Mahapatra, T. R., & Mishra, D. (2023b). A systematic literature review on laser welding of NiTi SMA. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 10, 77-117. <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00200-7>
- Parimanik, S. R., Mahapatra, T. R., Mishra, D., & Rout, A. K. (2023a). Optimisation of performance characteristics in laser welding of Nitinol wires using Taguchi and grey relation analysis. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 9(1), 186–195. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2088653>
- Puetz, H., Haensch, D., Treusch, H. G., & Pflueger, S. (1997). Laser welding offers array of assembly- advantages. *Modern Plastics International*, 27(9), 127–130. ISSN:0026-8283
- Reinl, S. (2014). A flexible tool for joining technologies - The diode laser optimized performance and beam quality for industrial applications and machine integration. *Laser Technik Journal*, 11(1), 40-43. <https://doi.org/10.1002/latj.201400019>
- Reitz, W. E., & Oman, R. M. (2000). How to join plastics. *Advanced Materials & Processes*, 158(3), 49–52.

- Rodríguez-Vidal, E., Quintana, I., Etxarri, J., Azkorbebeitia, U., Otaduy, D., González, F., & Moreno, F. (2012). Optical design and development of a fiber coupled high-power diode laser system for laser transmission welding of plastics. *Optical Engineering*, 51(12), 124301. <https://doi.org/10.1117/1.oe.51.12.124301>
- Rodríguez-Vidal, E., Quintana, I., & Gadea, C. (2014). Laser transmission welding of ABS: Effect of CNTs concentration and process parameters on material integrity and weld formation. *Optics & Laser Technology*, 57, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.10.02bay0>
- Rotheiser, J. (2009). *Joining of plastics. Handbook for designers and engineers (3th Ed.)*. Hanser Publication. 538-560. <https://doi.org/10.3139/9783446445956.fm>
- Roy, R. K. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. Wiley, New York. ISBN: 978-0-471s-36101-5
- Sercer, M., & Raos, P. (2010). *Joining of plastics and composites. Welding Engineering and Technology*, Eolss Publishers.
- Shin, H. M., & Choi, H. W. (2014). Design of energy optimization for laser polymer joining process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 1569–1576. DOI: 10.1007/s00170-014-6241-5
- Siddique, A., Iqbal, Z., Nawab, Y., & Shaker, K. (2023). A review of joining techniques for thermoplastic composite materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(8), 3417–3454. <https://doi.org/10.1177/08927057221096662>
- Silvers, H. J., & Wachtell, S. (1970). *Perforating, welding and cutting plastics films with a continuous CO₂ laser*. PA State University.
- Singare, S. K., Chen, S. G., Zou, J. J., & Lin, Y. Z. (2014). Laser transmission welding of thermoplastic: effect of process parameters on weld strength. *Advanced Materials Research*, 852, 463–466. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.852.463>
- Steen, W., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing (4th Ed.)*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
- Tavakoli, S. M., Pullen, D. A., & Dunkerton, S. B. (2005). A review of adhesive bonding techniques for joining medical materials. *Assembly Automation*, 25(2), 100–5. <https://doi.org/10.1108/01445150510700070>
- Tien, N. T., Lo, Y-L., Raza, M. M., Chen, C- Y., & Chiu, C- P. (2023). Optimization of processing parameters for pulsed laser welding of dissimilar metal interconnects. *Optics and Laser Technology*, 159, 109022. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.109022>
- Torrise, L., Caridi, F., Visco, A. M., & Campo, N., (2011). Polyethylene welding by pulsed visible laser irradiation. *Applied Surface Science*, 257(7), 2567–2575. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.023>
- Troughton, M. J. (2008). *Handbook of plastics joining: A practical guide (2th Ed.)*. Laser Welding. ISBN: 9780815515814
- Umbrecht, F., Muller, D., Gattiker, F., Boutry, C. M., Neuenschwander, J., Sennhauser, U., & Hierold, C. (2009). Solvent assisted bonding of polymethylmethacrylate: Characterization using the response surface methodology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 156, 121–8. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.03.028>
- Van de Ven, J. D., & Erdman, A. G., (2007). Bridging gaps in laser transmission welding of thermoplastics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(6),1011–1018. <https://doi.org/10.1115/1.2769731>

- Villar, M., Garnier, C., Chabert, F., Nassiet, V., Samélor, D., Diez, J. C., Sotelo, A., & Madre, M. A. (2018). In-situ infrared thermography measurements to master transmission laser welding process parameters of PEKK. *Optics and Lasers in Engineering*, 106, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.02.016>
- Yadav, S. K., Joseph, D., & Jigeesh, N. (2018). A review on industrial applications of TOPSIS approach. *International Journal of Services and Operations Management*, 30(1), 23-28. <https://doi.org/10.1504/IJSOM.2018.091438>
- Yuce, C., Karpat, F., & Yavuz, N. (2019). Investigations on the microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar galvanized steel–aluminum joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 2693-2704. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04154-7>
- Yuce, 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 joins. *Metals*, 6(10), 245. <https://doi.org/10.3390/met6100245>
- Yuguang, Z., Kai, X., & Dongyan, S. (2013). An improved artificial neural network for laser welding parameter selection and prediction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 755-762. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4796-1>
- Wang, X., Chen, H., Liu, H., Li, P., Yan, Z., Huang, C., Zhao, Z., & Gu, Y. (2013). Simulation and optimization of continuous laser transmission welding between PET and titanium through FEM, RSM, GA and experiments. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(11), 1245–1254. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.04.021>
- Wang, X., Liu, B., Liu, W. Zhong, X., Jiang, Y., & Liu, H. (2017). Investigation on the mechanism and failure mode of laser transmission spot welding using PMMA material for the automotive industry. *Materials*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.3390/ma10010022>
- Wang, J., & Wan, W. (2009). Experimental design methods for fermentative hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.008>
- Wang, Y. Y., Wang, A. H., Weng, Z. K., & Xia, H. B. (2016a). Laser transmission welding of Clearweld-coated polyethylene glycol terephthalate by in cremental scanning technique. *Optics & Laser Technology*, 80, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.01.008>
- Wang, X., Zhang, X., Liu, W., Liu, B. ve Liu, H. (2016b) Investigation on enhancement of weld strength between PMMA and PBT in laser transmission welding-using intermediate material, *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 44. <https://doi.org/10.1002/app.44167>
- Wang, X., Zhang, C., Wang, K., Li, P., Hu, Y., Wang, K., & Liu, H. (2012). Multi-objective optimisation of laser transmission joining of thermoplastics. *Optics & Laser Technology*, 44(8), 2393–2402. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.04.009>
- Wu, J., Lu, S., Wang, H-J., Wang, Y., Wang, Y., Xia, F-B., & Wang, J. (2021). A review on laser transmission welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 2093-2109. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07519-z>

Zhao, Y., Zhang, Y., Hu, W., & Lai, X. (2012). Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology. *Optics and Laser in Engineering*, 50, 1267-1273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.03.010>



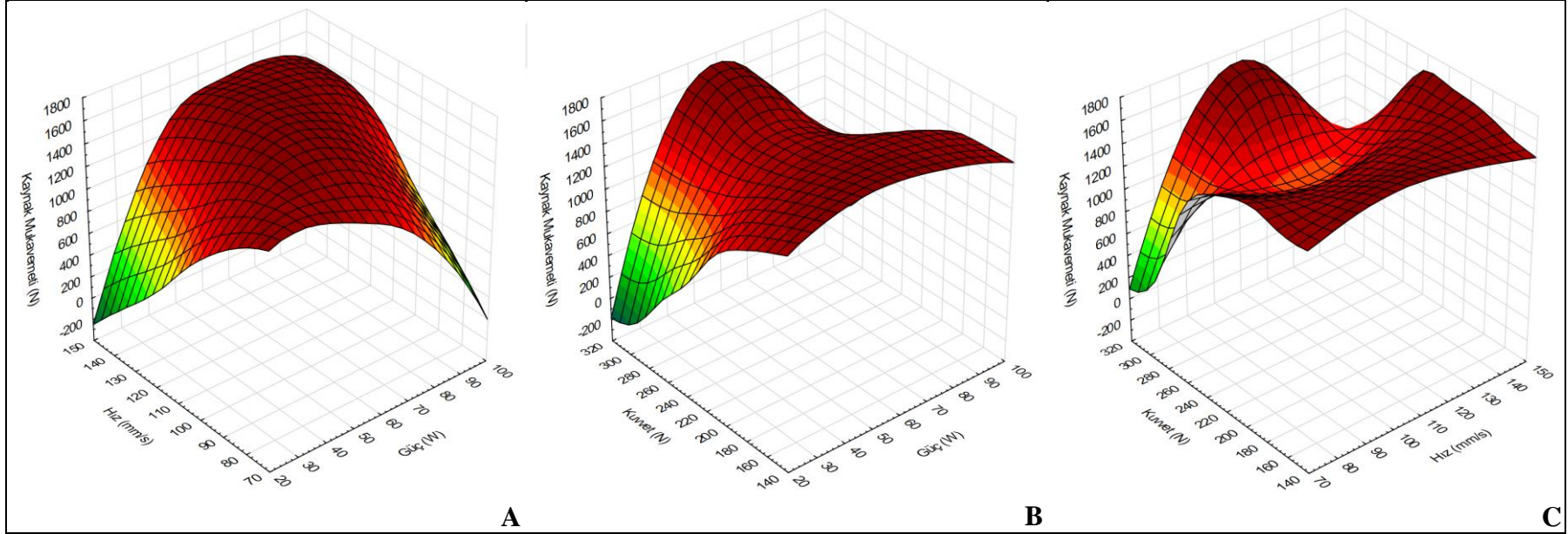
EKLER

EK 1 Taguchi Metodu Sonucunda Elde Edilen Tepki Yüzeyi Grafikleri

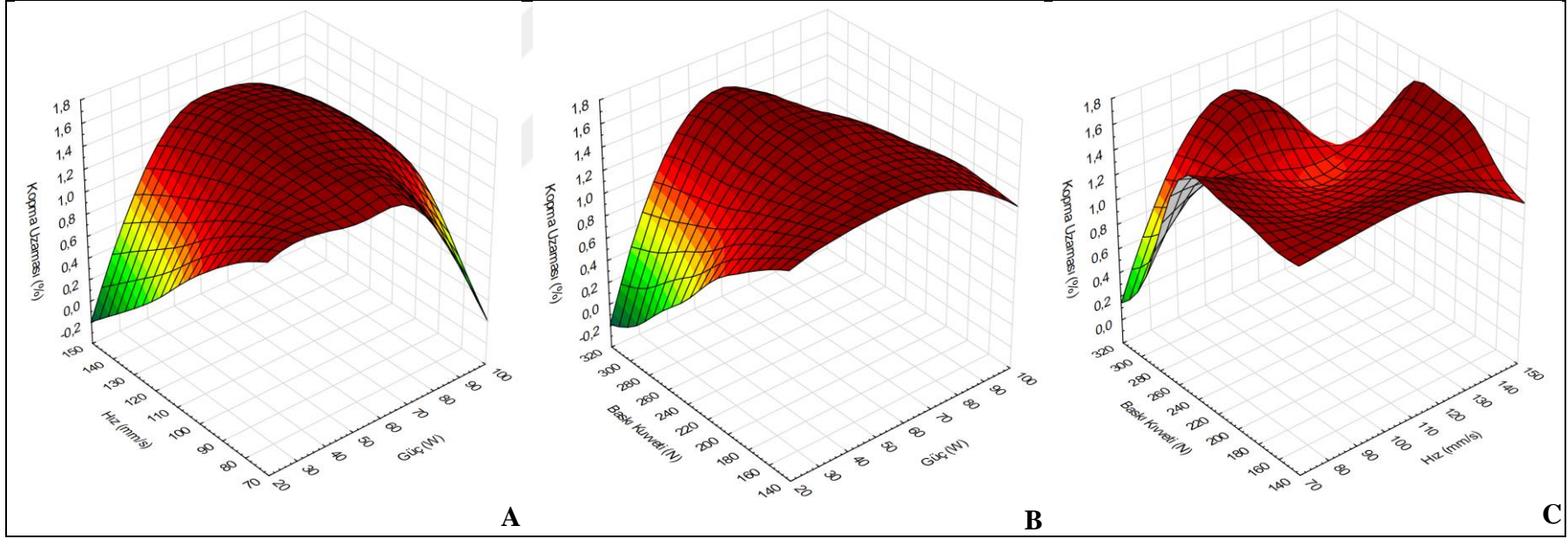
EK 2 Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım ve Elde Edilen Sonuçlar



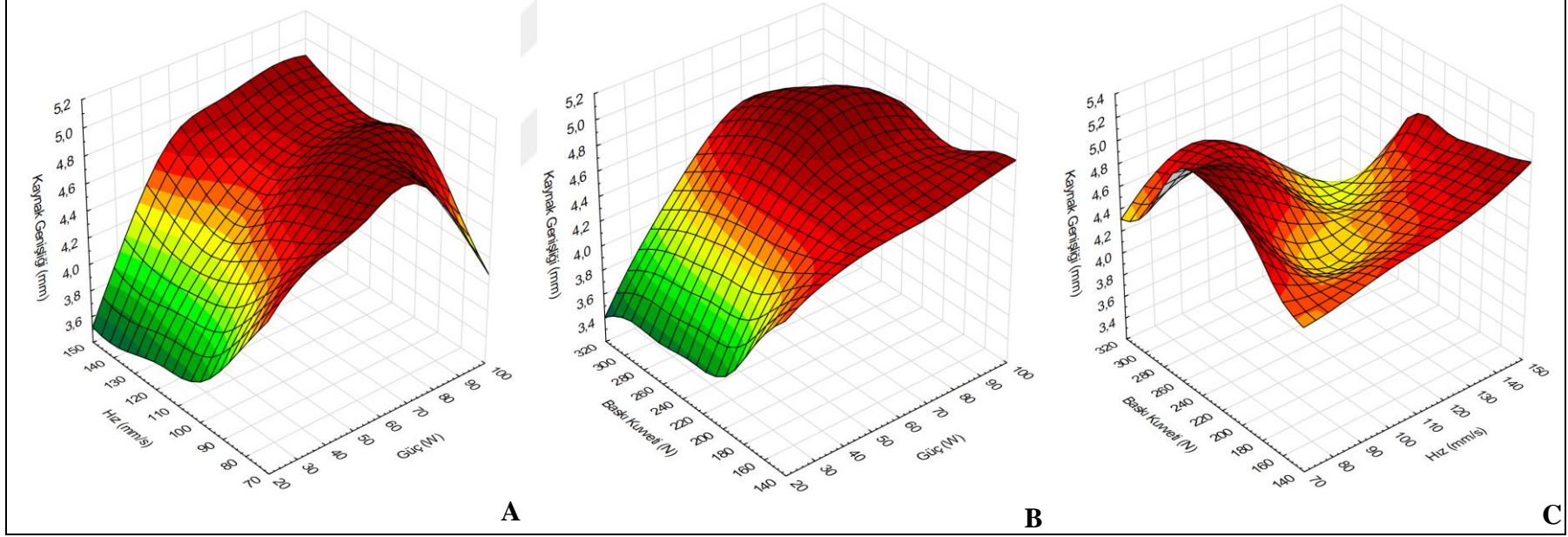
EK 1 Taguchi Metodu Sonucunda Elde Edilen Tepki Yüzeyi Grafikleri



Ek Şekil 1.1. Kaynak mukavemetine ait Taguchi metodu ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri. **A)** Güç ve hızın kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **B)** Güç ve baskı kuvvetinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **C)** Hız ve baskı kuvvetinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği.



Ek Şekil 1.2. Kopma uzamasına ait Taguchi metodu ile elde edilen tepki yüzeyi grafikleri. **A)** Güç ve hızın kopma uzaması üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **B)** Güç ve baskı kuvvetinin kopma uzaması üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği **C)** Hız ve baskı kuvvetinin kopma uzaması üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeyi grafiği.



Ek Şekil 1.3. Kaynak genişliğine ait Taguchi metodu ile elde edilen tepki yüzeği grafikleri. **A)** Güç ve hızın kaynak genişliği üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeği grafiği **B)** Güç ve baskı kuvvetinin kaynak genişliği üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeği grafiği **C)** Hız ve baskı kuvvetinin kaynak genişliği üzerindeki etkilerini gösteren tepki yüzeği grafiği.

EK 2 Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım ve Elde Edilen Sonuçlar

Ek Çizelge 2.1. Deneysel tasarım matrisi ve ölçülen sonuçlar

Deneme	LTW Parametre Seviyeleri				Yanıtlar		
	Koşum Sırası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Kaynak	Kopma Uzunluğu (%)	Kaynak
					Mukavemeti N		Genişliği (mm/s)
1	3	-1	0	0	1760,02	2,12	4,48
2	3	0	0	0	1538,66	1,63	5,17
3	1	-1	1	0	1581,70	1,79	4,27
4	2	0	-1	0	1245,17	1,33	5,65
5	2	1	1	0	1597,79	1,84	5,21
6	2	-1	1	1	1474,99	1,63	4,48
7	1	0	-1	-1	1380,96	1,58	4,88
8	1	-1	1	-1	1362,62	1,42	4,39
9	3	1	-1	-1	968,90	0,97	5,86
10	3	0	0	1	1279,97	1,48	5,13
11	3	1	-1	0	905,30	1,04	5,36
12	2	0	1	1	1429,76	1,60	4,76
13	3	1	1	-1	635,62	1,00	5,86
14	3	0	1	0	1286,77	1,46	4,88
15	2	-1	-1	1	1255,25	1,41	4,88
16	1	0	0	-1	1025,01	1,12	5,45
17	3	0	-1	1	1320,14	1,43	5,98
18	1	0	0	0	1319,03	1,43	5,45
19	2	-1	1	-1	1281,41	1,50	4,72
20	2	1	0	1	704,09	0,80	5,29
21	1	1	-1	0	894,16	1,04	5,37
22	3	-1	0	1	1443,28	1,66	4,49
23	1	0	-1	0	1053,39	1,31	5,41
24	3	1	0	1	878,43	0,96	5,37
25	3	1	1	1	830,50	0,85	5,23
26	1	-1	-1	1	1170,40	1,46	5,05
27	2	1	1	1	929,56	0,89	5,09
28	3	1	0	-1	854,23	0,96	5,74
29	2	0	0	1	1006,19	1,15	5,33
30	2	-1	0	0	1413,47	1,56	4,88
31	1	1	0	1	895,50	1,07	5,11
32	3	-1	1	0	1681,94	1,91	4,92
33	1	1	0	-1	799,32	0,90	5,41
34	2	0	1	0	1416,41	1,64	4,92
35	2	0	0	0	1201,86	1,32	4,79
36	1	0	0	0	1372,41	1,66	5,17
37	1	0	1	0	1385,95	1,62	4,62

Ek Çizelge 2.1. Deney tasarım matrisi ve ölçülen sonuçlar (devam)

Deneme	LTW Parametre Seviyeleri				Yanıtlar		
	Koşum Sırası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Kaynak	Kopma Uzaması (%)	Kaynak
					Mukavemeti N		Genişliği (mm/s)
38	1	0	-1	1	945,85	1,01	5,33
39	2	1	0	-1	1008,86	0,93	5,01
40	3	-1	1	1	1316,98	1,45	4,84
41	2	0	0	-1	1057,87	1,20	5,46
42	2	-1	-1	-1	1304,15	1,41	5,21
43	1	0	0	0	1648,36	1,90	4,76
44	1	-1	0	1	1275,89	1,58	4,87
45	2	1	-1	1	1080,85	0,94	5,62
46	3	0	1	1	1549,97	1,73	5,09
47	2	0	-1	1	1158,25	1,28	5,25
48	3	0	0	0	1480,29	1,69	5,17
49	2	-1	1	0	1269,72	1,39	4,39
50	3	0	1	-1	1094,66	1,24	5,33
51	3	1	1	0	1793,02	2,07	5,2
52	3	-1	-1	1	1492,55	1,77	4,92
53	1	-1	0	-1	1772,97	2,02	4,76
54	2	-1	0	-1	1374,84	1,62	4,78
55	1	0	1	-1	1215,93	1,40	5,05
56	1	-1	-1	0	1442,03	1,67	5,13
57	2	0	-1	-1	1168,49	1,45	5,45
58	2	0	0	0	1648,95	1,87	5,45
59	1	1	1	-1	1079,14	1,16	5,37
60	1	0	0	1	1027,17	1,11	4,73
61	2	0	0	0	1594,83	1,82	4,92
62	2	1	1	-1	740,53	0,84	5,49
63	1	-1	1	1	1447,40	1,64	4,52
64	3	0	-1	-1	933,92	0,93	5,2
65	2	1	-1	-1	681,96	0,97	5,57
66	1	-1	0	0	1290,54	1,45	4,68
67	3	-1	-1	-1	1466,34	1,56	5,45
68	2	0	0	0	1403,12	1,64	4,8
69	3	-1	0	-1	1457,01	1,74	5,04
70	1	1	1	1	993,12	1,15	5,4
71	3	0	0	0	1736,08	1,97	4,85
72	3	-1	1	-1	1355,29	1,56	4,64
73	2	-1	-1	0	1606,79	1,73	5,28
74	2	1	0	0	964,53	1,15	5,29
75	2	-1	0	1	1504,76	1,87	4,8
76	1	-1	-1	-1	1603,76	1,78	5,21
77	3	0	0	-1	946,90	1,02	4,96

Ek Çizelge 2.1. Deney tasarım matrisi ve ölçülen sonuçlar (devam)

Deneme	LTW Parametre Seviyeleri				Yanıtlar		
	Koşum Sırası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Kaynak	Kopma Uzaması (%)	Kaynak
					Mukavemeti N		Genişliği (mm/s)
78	3	-1	-1	0	1199,68	1,29	5,21
79	1	0	0	0	1735,31	1,95	5,25
80	1	0	1	1	1173,66	1,31	4,8
81	1	1	-1	1	906,00	1,16	5,53
82	2	1	-1	0	1085,86	1,25	5,53
83	2	0	1	-1	1231,11	1,38	5,35
84	3	1	-1	1	986,85	1,05	5,86
85	1	1	0	0	951,58	1,05	5,41
86	1	1	1	0	1440,30	1,78	4,67
87	3	1	0	0	1123,52	1,17	5,09
88	3	0	0	0	1751,60	1,93	5,17
89	3	0	-1	0	992,11	1,11	5,09
90	1	1	-1	-1	859,93	0,97	5,17