
FARKLI MALZEMELERİN LAZERLE KESİLMESİ

*Kadir ÇAVDAR**
*Tolga TANRISEVER**

Özet: Bu yayında; lazer ışını kullanarak imalat konularında literatürde mevcut yayınların geniş bir değerlendirilmesi yapılarak lazerle malzeme kesim alanındaki olası gelişmeler tartışılmıştır. Literatürde mevcut yayınlar aşağıda sunulacağı üzere beş ana başlık altında toplanmışlardır: Deneysel çalışmalar, derleme çalışmaları, kesme parametrelerinin optimizasyonu çalışmaları, lazerle kesmeye yönelik teorik modelleme çalışmaları ve lazerle kesme ile ilgili diğer akademik çalışmalar.

Anahtar Kelimeler: lazerle kesme, derleme, optimizasyon

Laser Cutting of Different Materials

Abstract: In this paper; in general potential developments and trends of a particular machining field by extensively evaluating present studies of laser beam machining have been discussed. As it is indicated below, technical literatures have been subsumed under five major headlines: Experimental studies, reviews, optimization researches of the cutting parameters, theoretical modelling studies of laser beam cutting and academic studies relating to laser cutting.

Keywords: laser cutting, review, optimisation

1. GİRİŞ

Lazer ışını bildiğimiz ışıktan farklılık gösterir; belirli bir frekans, dalga boyu ve faza sahip fotonları vardır. Bu nedenle lazer ışınları sıradan ışığın aksine, çok yönlü, yüksek güç yoğunluğunda ve daha iyi odaklanma özelliğine sahip olabilirler. Lazer ışını yüksek yoğunluklu bir ışık olup 0,1...0,2 mm gibi dar bir alana odaklanabilir. Böylece lazer ışınının enerjisi çok küçük bir alana indirgenerek malzeme işleme için gerekli olan güç yoğunluğuna ulaşılabilir. Çelik malzemelerin imalatında en iyi sonuçlar için $10^7...10^8$ W/cm² değerinde güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Bu kadar küçük bir noktaya bu değerde bir enerjiyi aktarmak için lazer kullanımı gerekir. Malzeme saniyeden kısa sürede eritilebilir. Kesme işlemi lazer ışınına paralel gönderilen bir gaz ile de desteklenir. Metallerin kesilmesinde destek gazı olarak; nitrojen, hava veya oksijen kullanılır. Basıncı gaz kesilen bölgeyi soğutarak aşırı ısınmış bölgenin sınırlandırılmasını da sağlar ve kesme işlemi sonrası ortaya çıkan cürufu da bölgeden uzaklaştırır. İstenilen kesme profili lazer ışını ile takip edilerek kesme işlemi yapılır. Lazer ışını ve tezgâhın birbirine uygun hareketleri CNC kontrollü bir sistem ile sağlanır.

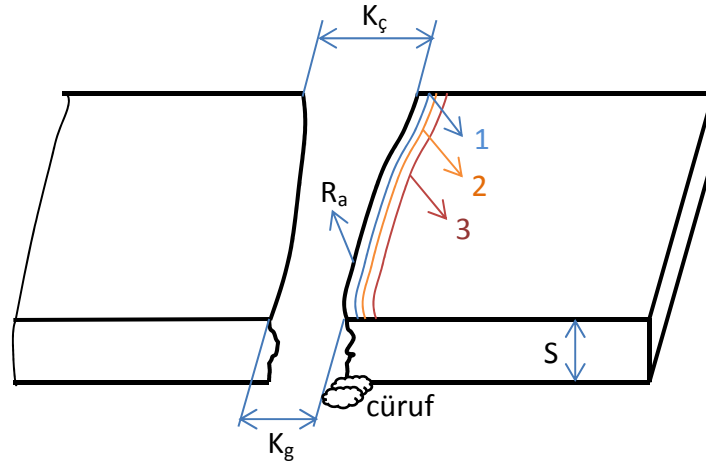
* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle 16059, Bursa.
İletişim Yazarı: K. Çavdar (cavdar@uludag.edu.tr)

Lazer ışını kullanılarak malzeme uzaklaştırma işlemi üç adımdan oluşur:

1. Eritme (melting).
2. Buharlaştırma (vaporization).
3. Kimyasal bozulma; malzemenin bozulması sonucu kimyasal bağlar kırılır (chemical degradation).

Farklı tipleri olmasına rağmen uygulamada en çok kullanılan lazer tipleri Nd:YAG ve CO₂ lazerlerdir. CO₂ lazer kızılötesi bölgede 10 µm dalga boyuna sahip olup, ışın gücü fazla, verimliliği iyi ve ışın kalitesi yüksektir. İnce saçların yüksek hızda kesilmesi işlemi için çok uygundur. Modern lazerle işleme tezgahları arasına günümüzde fiber lazerler de girmeye başlamıştır.

Lazerle işleme konusundaki deneysel çalışmalarda genellikle dikkate alınan süreç parametreleri; lazer gücü, yardımcı gazın tipi ve basıncı, kesilen malzemenin kalınlığı ve kompozisyonu, kesme hızı ve operasyon modu (sürekli veya darbeli) olup bunların süreç üzerine etkileri araştırılmaktadır. Sürecin performansı yani kalite karakteristiği olarak da malzeme uzaklaştırma oranı, işlenmiş yüzey geometrisi (kesme aralığının genişliği, delik çapı, koniklik), yüzey kalitesi (yüzey pürüzü, yüzey morfolojisi), metalürjik özellikler (yeniden biçimlenen tabaka, ısıdan etkilenmiş bölge, cüruf atık oluşumu) ve mekanik özellikler (sertlik, mukavemet) incelenmektedir. Tipik bir lazerle kesme çalışmasında incelenebilecek geometrik değişkenlerden bazıları Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1:

Lazerle kesme işleminde kalite için dikkate alınan parametreler

K_g: Kesme işlemi başlangıcındaki ve K_ç: Kesme işlemi sonundaki kesme aralığı genişliği, R_a: Yüzey pürüzü, S: Malzemenin kalınlığı, 1: Oksitlenen tabaka, 2: Tekrar döküm bölgesi ve 3: Isıdan etkilenen bölge (HAZ: Heat Affected Zone).

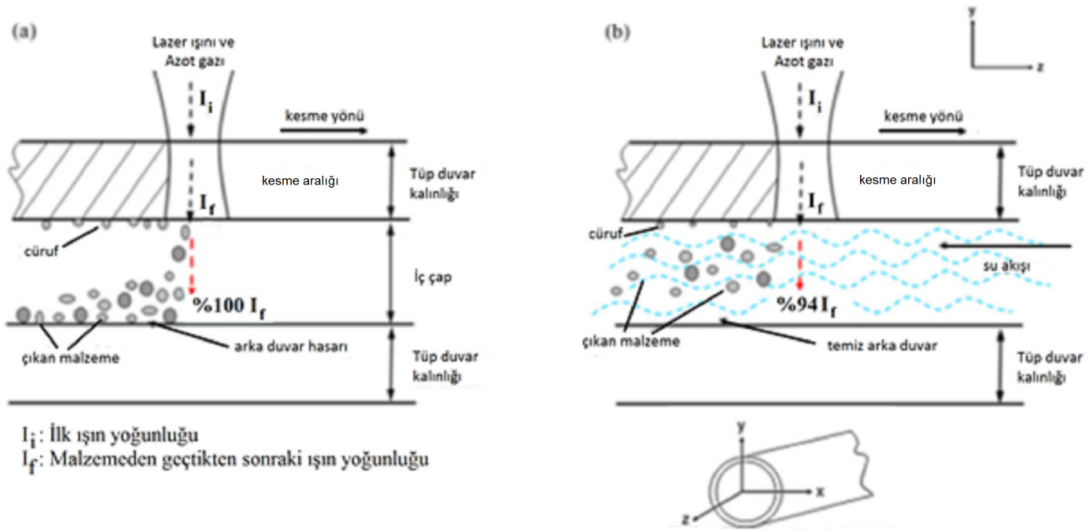
2. LAZERLE İŞLEME KONUSUNDAKİ MEVCUT ÇALIŞMALAR

2.1 Deneysel Çalışmalar

Konu ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma ile karşılaşmak mümkündür. Ancak çalışmaların çoğu sadece deneylerin yapılıp sonuçların sunulması şeklinde olduğundan genelleştirme yapmaya uygun değildir. Bu bölümde deneysel çalışmalar arasından seçilmiş yayınlar sunulacaktır.

Baumeister ve diğ. (2006), 100 W’lık fiber lazer yardımıyla paslanmaz çeliğin mikro kesim işlemi sonuçlarını vermişlerdir. Çalışmada, 100 µm’den 300 µm’ye farklı materyal

kalınlıkları incelenmiş olup deneylerde oksijen ve nitrojen yardımcı gaz olarak kullanılmıştır. Oksijen kullanılarak yapılan kesmede yüksek kesme hızının yanı sıra daha düşük bir kesme aralığı genişliği ve daha iyi bir kesme performansı elde edilmiştir. Bir diğer fiber lazerle kesme uygulaması da Muhammad ve diğ. (2010) tarafından verilmiştir. Stent imalatında kullanılan ince paslanmaz çelik silindirlere ($\text{çap} < 4 \text{ mm}$ ve duvar kalınlığı $< 200 \mu\text{m}$) lazerle kesme işleminde arka duvarda yüzey durumu kötüleşmekte olup çalışmada bunu iyileştirmek için 316L paslanmaz çeliğinin sulu ve kuru şekilde darbeli fiber lazerle kesme işlemi incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda; HAZ, kesme aralığı genişliği, yüzey sertliği ve cüruf birikmesinin sulu kesimle daha iyi hale getirildiği savunulmaktadır. Ayrıca bilimsel bir çalışmada ilk kez içten su akışının ince boru profilli paslanmaz çeliğin lazer kesimi işleminde kullanımı araştırılmıştır. Kuru ve sulu lazerli kesim için mantıksal şema Şekil 2’de görülmektedir.



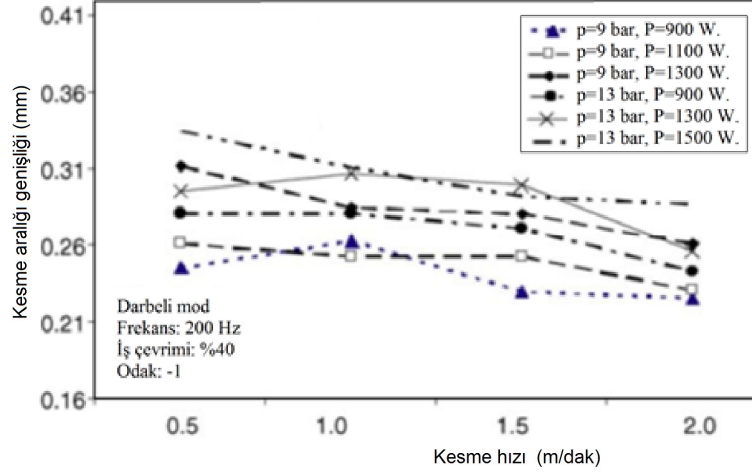
Şekil 2:

Kesme kanalından eriyik malzemenin çıkartılma mekanizması; a) kuru ve b) sulu kesim

Paslanmaz çelikler ile ilgili bir diğer çalışmada Ghany ve Newishy (2005) 1,2 mm kalınlığındaki ostenitik paslanmaz çelik plakaların darbeli Nd:YAG lazer ışını kullanılarak, uygulamada ayrı ayrı oksijen ve nitrojeni yardımcı gaz olarak seçip optimum lazer kesim parametrelerine ulaşmayı amaçlamışlardır. Çalışmada lazer kesim kalitesinin; lazer gücüne, darbe frekansına, kesme hızına ve odak noktası değerine bağlı olduğu gösterilmiştir. Optimum kesimin, darbeli mod kullanılırken uygulanan lazer gücünün 210W, frekansın 200-250 Hz, kesme hızının 1,0-1,5 m/dak, odak pozisyonunun -0,5 mm’den -1 mm’ye, nitrojen gazı basıncının 9-11 bar ve oksijen basıncının ise 2-4 bar olduğu şartlarda oluşacağı vurgulanmıştır. Nitrojen, oksijene oranla daha küçük çentikle daha parlak ve pürüzsüz kesme yüzeyi ortaya koymuştur, ancak ekonomik açıdan daha pahalıdır. Darbeli modun da ekonomik olmadığı, özellikle darbe bindirmesinin frekans ve hızla kontrol edilmesi gerektiği, limitli frekans lazer sistemlerinde görülmüştür. Sürekli dalga modunda (CW) hız maksimum sistem limitine kadar çıkarılabilir. Çalışmanın sonuçlarının lazer kesme işleminin otomatik olarak yaptırılabilmesi için PC programında kullanılabilirliği de vurgulanmaktadır. Deneyler sonucu kesme aralığı genişliğindeki değişimler Şekil 3’te görülmektedir.

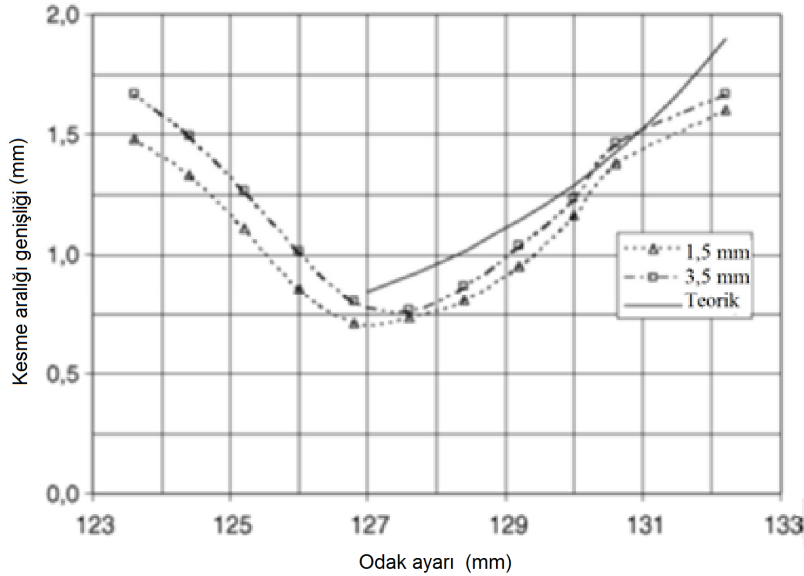
İnce saçların lazerle yardımıyla kesilmesini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Yılbaş (2008), kesme kalitesinin bir göstergesi olan çentik genişliğine kesme parametrelerinin etkisini deneysel olarak incelemiştir. Lazer kesim parametreleri; lazer çıkış gücü, kesme hızı ve yardımcı oksijen gazın basıncıdır. Deney sonuçları yardımıyla kesme verimi ve sıvı tabakanın kalınlığı hakkındaki bağıntılar elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada Karataş ve diğ. (2006) iş

parçası kalınlığı ve ışın bel pozisyonunun kesme aralığı boyutuna ve pürüz oluşumuna etkilerini deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Kesilen parçaların SEM görüntülerini de verdikleri çalışmaları ışın bel pozisyonunun kesme kanalı boyutunu önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir. Şekil 4'te farklı odak ayarlarında yarı kesme genişliğinin değişimini gösteren grafik teorik ve deneysel sonuçlar görülmektedir.



Şekil 3:

Kesme hızı, güç ve basınca bağlı olarak kesme yolu genişliğinin değişimi



Şekil 4:

Farklı iş parçası kalınlıkları için odak ayarları ile kesme aralığı değişiminin teorik ve deneysel sonuçları (Karataş ve diğ., 2006)

1,2 mm kalınlığında, çok düşük karbonlu ince paslanmaz çelik plakaların sürekli modda Nd:YAG lazeri kullanılarak kesilmesi işlemi Salem ve diğ. (2008) tarafından incelenmiştir. Kesme parametrelerinin kesme kalitesine etkisi, sertlikteki değişkenliği izleyerek araştırılmış, oksit tabaka genişliğinin ve mikro yapı değişimlerinin ısıdan etkilenmiş bölgeyle değiştiği tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre; lazer tarama hızının 1100-1500 m/dak ve minimum giriş

gücünün 337W, yardımcı gaz olarak O₂ gazının 5 bar basınçta kullanılması halinde en kaliteli kesme işlemi yapılabilmektedir.

Wang ve Wang (2010), kesme sonucu oluşan kesme aralığı yapısına lazer kesim koşullarının etkisini deneysel bir araştırmayla ortaya koymuşlardır. Lazer kesim kalitesini etkileyen kesme hızı, lazer gücü ve odak mesafesi gibi parametrelerin irdelendiği çalışmada kesme aralığı geometrisinin nasıl kontrol edilebileceği vurgulanmıştır. Çelik levhaların kesimi için yapılmış olan çalışmada kesme aralığı üç boyutlu olarak düşünülmüştür.

3 mm kalınlığındaki karbon çeliği plakanın darbeli rejimle CO₂ lazer operasyonu için kullanılan oksijen destekli lazerle kesme işlemi üzerine deneysel sonuçlar Glod (2011) tarafından sunulmuştur. Deneysel sonuçlarda, oksijen gazının basıncı ile lazer gücü ve kesim hızı arasında etkileşimler araştırılmıştır. Ayrıca oksijen basıncıyla kesim yüzeyinde meydana gelen değişimler de incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre kesme aralığının kontrolünde oksijen basıncının kesme hızından daha büyük bir etkisi vardır. Ayrıca oksijen basıncı kesme bölümünün alt kısmını da ciddi şekilde etkiler ve bu bölgenin kalitesini düşürür. Oksijen basıncı aslında lazer ışın parametrelerinden bağımsız olup eriyik haine getirilen malzemenin miktarını arttırmak için kullanılır. Sonuç olarak, kesme işleminde daha düşük oksijen basınçlarının tavsiye edilebileceği vurgulanmıştır.

Yüksek mukavemetli çeliklerinin lazer kesimi için optimum çalışma alanlarını ve kesme koşullarını tespit etmek için bir çalışma Lamikiz ve diğ. (2005) tarafından yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, malzeme kalınlığında 1 mm'lik değişimin dahi parametreleri çok değiştirdiği ve sacın üzerindeki kaplama malzemesinin (3 farklı kaplama denenmiştir: Çinko kaplama, çinko elektro galvaniz ve fosforlama) çok önemli olduğu bulunmuştur. Araştırmada kullanılan malzeme (ZStE260) günümüz otomotiv endüstrisinde çok kullanılan bir malzemedir.

Inconel 718 süper-alaşım plakaların CW Nd:YAG lazeri ile kesilmesi işleminde kesim parametrelerinin yüzey karakteristiğine etkisi Ahn ve Byun (2009) tarafından test edilmiştir. Deneysel sonuçlarda 6-eksenli robot ve odak uzaklığını otomatik takip edebilen bir sistemle yürütülmüştür. Literatürden bilinen deneylere ek olarak yüzey pürüzlülüğünün minimize edildiği hal için darbeli kesim uygulaması, mikro-çatlak, parça kalitesi ve kesme verimi değerlendirmeleri yapılmıştır. Hardox-400 malzemenin kesme kalitesine süreç parametrelerinin etkisini belirlemek için Patel ve Patel (2011) deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deney planlarında kesme güçleri 100 W ile 2000 W arasında kesme hızları da 200-600 mm/dak arasında değişmektedir. Sonuç grafikleri yayında sunulmakla birlikte herhangi bir modelleme çalışması yapılmamıştır.

Thawari ve diğ. (2005), 1 mm kalınlıktaki Hastelloy-x plakasının darbeli Nd:YAG lazer ile delme işlemini darbe süresi gibi önemli süreç parametrelerinin etkileri açısından araştırmıştır. Her bir darbeye bir deliğin açıldığı süreçte kesme kanalı bu deliklerden oluşturulmuştur.

Yılbaş ve diğ. (2008), eğik yüzeylerin lazer kesiminde kalite parametrelerini incelemiştir. Kesme yüzeyleri optik mikroskopla incelenmiş ve düzgünlük gibi kesim kenarlarının geometrik özellikleri ve cüruf yüksekliği mikro grafiklerden ölçülmüştür. Cüruf yüksekliğinin ve düzgünlüğün lazer çıkış gücünden büyük ölçüde etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Günümüzde oldukça sık kullanılmaya başlanan metal dışı malzemelerin Nd:YAG lazer ile kesimi işlemi Tahir ve ark. (2012) tarafından incelenmiştir. Çalışmanın ana amacı Nd:YAG lazer ışın gücünün çalışılan parçanın tarama hızına olan etkisidir. Deney sonuçları giriş enerjisi ile kesme derinliği arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermiştir. Hızın 30 mm/s'den daha yüksek olduğu yerlerde kesme derinliği hızdan etkilenmemektedir. Lazer gücünün yükseltilmesi ise kesme derinliğini arttırmaktadır. Deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla da uyumaktadır. Çalışmada verilen sonuçlar endüstride metal olmayan malzemelerin kesme, oyma, kırma, çizme işlemleri için uygun lazer seçiminde rehber olabilir. Zhou ve Mahdavian (2004) da çeşitli metal dışı malzemelerin düşük güçlü (60 W) lazerle kesilmesi işlemini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlarda plastik, ağaç, sunta ve kauçuk gibi malzemeler lazer gücünün çeşitli

seviyeleriyle ve farklı parça kesim hızlarıyla kesilmiştir. Malzeme özellikleri ve kesme hızını temel alan bir teorik model kurulmuş olup deney sonuçları bu model ile uyum göstermektedir.

Üç farklı polimerik malzeme (polimetil metakrilat, polipropilin ve polikarbonat), CO₂ lazer kullanılarak kesme kalitesine etki eden parametreler açısından incelenmiştir (Choudhury ve Shirley, 2010). Deney sonuçlarının yardımıyla matematiksel model de oluşturulmuştur. Sonuçlara göre polimetil metakrilatın, polikarbonat ve polipropilinden daha küçük bir sıcaktan etkilenen bölgesi vardır. Yüzey pürüzlülüğü açısından da polimetil metakrilat diğerlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Eltawahni ve diğ. (2010) ise dört farklı kalınlıktaki polimetil metakrilat (PMMA) adlı termoplastik malzemenin 1,5 kW'lık CO₂ lazer tezgâhı ile kesme sürecini deney tasarımı mantığı (DOE: Design of Experiment) ile araştırmıştır. Çalışmada, kesme aralığının üst ve alt değerlerinin birbirine oranı kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilmiş, bir optimizasyon programı yardımı ile de optimal kesme şartları tanımlanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre; lazer gücü ile birlikte arttırılan kesme hızı ve odak konum değerlerinde kesme aralığı değeri artmaktadır. Düşük değerli kesme aralığı genişliği de kesme hızı ile ters orantılıdır. Kesme aralığı oranı odak konumu ve lazer gücü ile birlikte yükselir, hava basıncı ve kesme hızı değeri ile de düşer. Yüksek kesme hızları maliyeti düşürür ancak tam köşe kesimleri gibi işlemlerde verimlilik kötüleşir. Kurt ve diğ. (2009), CO₂ lazer ile kesme işleminde parametrelerinin (gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücü) plastik malzemelerin (PTFE ve POM) boyutsal kesinliğine ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır.

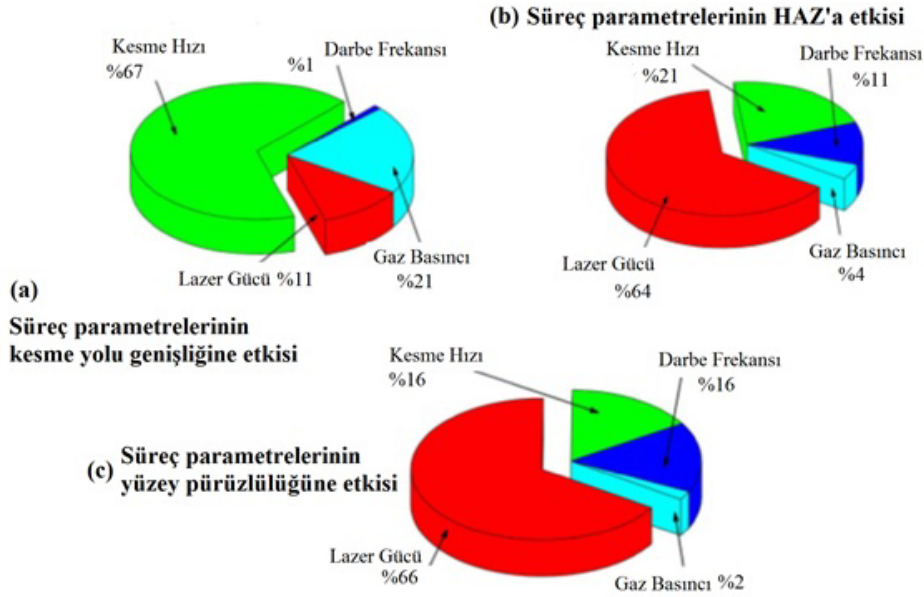
2 mm'den 10 mm'ye kadar farklı kalınlıklardaki üç termoplastik malzemenin (polietilen, polipropilin ve polikarbonat) CO₂ lazer ile kesme süreci Caiazza ve diğ. (2005) tarafından deneylerle araştırılmıştır. Araştırılan süreç parametreleri: Lazer gücü, kesme hızı aralığı, odak lensinin tipi, koruyucu gazın basınç ve akışı ve numune kalınlığıdır. Bunun dışında yüzey pürüzünün alt ve üst değerleri, ergimiş bölgenin enine kesiti ve kenarlardaki yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ölçülmüştür. Lazer ile işlemeye uygunluk açısından PC "uygun", PP "orta seviyede uygun" ve PE ise "uygun değil" şeklinde sıralanmıştır. Beş farklı polimerik malzemenin lazerle kesme kalitesine lazer gücü ve kesme hızının etkisi Davim ve diğ. (2008) tarafından deneylerle araştırılmıştır. Düşük güçlü diyod lazeri ve CO₂ lazerini kullanarak alçı taşı ve polimer malzemelerin kesilmesi süreci üzerine bir çalışma Baskoro ve diğ. (2011) tarafından sunulmuştur. Deneyler CNC freze tezgâhında yapılmış, kesme sürecinin simülasyonu için de bir program hazırlanmıştır. Kesme derinliğinin; kesme hızı, akım, voltaj, paso sayısı ve basınçlı havadan etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Alçı malzemenin işlenmesinde kesme hızının etkisinin az, kesme gücünün ise çok etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

3 mm kalınlığında karbon fiber kompozit malzemenin CO₂ lazer ile kesilme süreci Riveiro ve diğ. (2012) tarafından araştırılmıştır. Sonuç olarak, CFRP plakanın dayanımının geleneksel mekanik kesme işlemine göre daha az etkilendiği gözlenmiştir. Li ve diğ. (2010) ise diyod pompalı katı durum (DPSS) UV lazeri kullanarak karbon fiber takviyeli kompozitin işlenmesini araştırmışlardır. Sonuçlar CFRP kompozitin kısa darbeleri UV lazeriyle işlenmesinde en küçük HAZ değerlerine ulaşabileceğini ortaya koymuştur. Kesme sürecinde oluşan ısı parça üzerinde kolayca toplanabilmektedir, bu durum özellikle karbon fiberler küçük parçalara bölündüğü zaman ortaya çıkmaktadır. Çalışmada ısı toplamından nasıl yararlanabileceği ve olası ısı toplamının yaratabileceği hasarlardan nasıl kaçınılabileceği üzerinde de durulmuştur.

Kevlar, kompozit alanında gün geçtikçe kullanımı artan bir malzemedir. Kevların lazer ile kesilmesi alanındaki az sayıdaki çalışmadan birini Yılbaş ve Akhtar (2012) yayınlarında sunmaktadır. Çalışmada kevlar plakaların kesim alanında oluşan ısıl gerilmeler sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahminlerin sağlanması yapıldıktan sonra kesim bölgesindeki morfolojik değişimler optik ve tarayıcı elektron mikroskopları ile incelenmiştir. Kesilen kenarlar ve kevlar plakanın kalınlığının orta değerlerinde yüksek von-Mises gerilmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca lazer kesim bölgesinin kenarlarında lif artıkları oluşmamakla birlikte çizgisel oluşumlar kesilen kenarda gözlemlenmiştir. Kevlar-49 kompozitinin CO₂ lazerle kesimine ait parametreler de El-Taweel ve diğ. (2009) tarafından araştırılmıştır. Lazer gücü,

kesme hızı, malzeme kalınlığı, yardımcı gaz basıncı ve lazer modu gibi kontrol parametrelerinin çentik genişliği, cüruf yüksekliği ve kesme yolunun eğimi gibi kesme kalitesi faktörlerine etkisi Taguchi metodu kullanılarak ifade edilmiştir. Varyans analizlerinden ve sinyal-gürültü (S/N) oranı tepki tabloları, önemli parametreler ve kesim parametrelerinin optimal kombinasyon seviyeleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar CO₂ lazer kesim kalitesini ve davranışını daha iyi anlayabilmek için modellenmiş ve yorumlanmış olup lazer gücünün kesme kalitesini belirleyen en önemli parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Literatürde alüminyum temelli malzemelerin lazerle kesilmesi süreci için de yayınlar mevcuttur. Alüminyum alaşımı AA5083'ün 1,8 kW'lık CO₂ lazerin kesme gücü olan bir sistemle yapılan kesme kalitesi araştırmalarının sonuçları Stournaras ve diğ. (2009) tarafından yayınlanmıştır. Kesme kalitesi; kesme aralığının genişliği, kenar pürüzlülüğü ve HAZ gözlenmiştir. Bu çalışmanın bir diğer amacı da alüminyum alaşımın lazer kesimi için lazer gücü, tarama hızı, darbe frekansı ve gaz basıncı gibi süreç parametrelerini değerlendirmektir. Kesme kalitesinde her bir parametrenin etkisini belirlemek için yapılan istatistiksel bir analiz de çalışmada yer almıştır. Sonuçta süreç parametrelerini kullanan deneysel bir bağıntı ile lazer kesim kalitesi ifade edilmiştir. Yayında verilmiş olan kesme kalitesini etkileyen faktörler ve etki oranları Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5:

a) Kesme aralığının genişliği, b) HAZ ve c) Yüzey pürüzlülüğü (R_a) etkileyen parametreler ve etki oranları

Kalın Al₂O₃ seramik malzemelerin fiber lazer ile kesilmesi işleminde çatlak oluşum formunun ifade edilmesi amacıyla Yan ve diğ. (2011) tarafından hem deneysel hem de teorik araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada lazer kesimde geçici sıcaklık alanının simulasyonu için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak kesme işlemi esnasındaki ısıl gerilme dağılımı ortaya konmuştur. Çatlak formu karakteristiği modellerle tahmin edilmiş ve deneylerle onaylanmıştır. Deneysel ve sayısal araştırmaların sonuçlarından hareketle, işlem parametreleri optimize edilmiş olup 6 mm kalınlığında bir alüminyum alaşımı plakanın fiber lazer ile çatlak oluşmadan kesimi sağlanmıştır. Wang ve diğ. (2010) de %99,6 alümina (Al₂O₃) malzemenin femtosaniye lazerle delme işlemini incelemişlerdir. Odak pozisyonu, dönme hızı, suda

çözülebilir PVA kaplaması gibi çeşitli koşulların kesme aralığı genişliği ve konikliği, yüzey temizliği, çatlak oluşumu ve tabakalara ayrılma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Lazer kesimin kalitesi optik mikroskoplar, SEM/EDX ve x-ışını mikro-CT analizi ile değerlendirilmiş ve optimum lazer kesim koşulları tanımlanmıştır. Sonuçların özellikle elektronik alanında önemli etkilerinin olacağı vurgulanmaktadır. Alumina parçaların lazer kesimi işleminde ısı ve gerilme analizleri üzerine diğer bir çalışma da Yılbaş ve diğ. (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve gerilme alanları ABAQUS programı ile incelenmiştir. Kesme kenarı yüzeyi boyunca oluşan morfolojik değişimler, optik ve tarayıcı elektron mikroskopuyla gözlenmiştir. Modeller ile tahmin edilen artık gerilme değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve benzerlik tespit edilmiştir. Deneysel kesme aralığının dış bölümlerinde cüruf oluşumu gözlenmiş olup bunun parçanın yüksek ergime sıcaklığına bağlı olduğu tahmin edilmiştir. Yan ve diğ. (2012), 400W yüksek tekrarlı nano-saniye darbeleri DPSS Nd:YAG lazeri kullanılarak 1 mm kalınlıktaki alüminyum plakaların pürüzsüz kesimi çalışmalarını yapmışlardır. Kısa darbe süresinin, ısı değişimleri de minimize ettiği görülmüştür. Gaz tipinin, basıncının, enjektör vuruş mesafesinin, ortalama lazer gücünün, kesme hızının ve darbe tekrar oranının yüzey pürüzu oluşumuna etkisi araştırılmış ve nano-saniye darbeleri lazerle pürüzsüz kesim için özel işleme koşulları sunulmuştur. Çalışma, metal malzemelerin sürekli dalga modlu lazerli kesimi için mevcut teoriyi desteklemekte ve sınırlarını seramik malzemeler için genişletmektedir. Riveiro ve diğ. (2010) ise 2024-T3 AlCu alaşımının CO₂ lazerle kesme parametrelerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar üretilebilirlik (kesme hızı) ve kesme kalitesine esaslarına göre değerlendirilmiştir. En iyi kesme kalitesi CW modunda elde edilmiştir.

Camın lazerle kesilmesi işlemi kendine özgü zorluklar içerir. Bu alanda literatürde çok fazla çalışma mevcut değildir. Nisar ve diğ. (2010), cam gibi kırılabilir malzemelerin lazerle kesiminde cam kalınlığının, lazer gücünün ve kesim hızının kesme bölgesinde istenenden sapmalar üzerine etkilerini araştırmışlardır. Ancak kontrollü kırma tekniklerinin kullanımından sonra lazerle kesilebilir bir malzeme olan camda kesme köşelerinde problemler ile karşılaşmaktadır. Önceki çalışmalara göre bunun nedeni, köşelerde oluşan yüksek sıcaklık değerleridir. Bu bölgedeki ısı gerilmeleri ve bunların dağılımları üzerinde çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda bir diyot lazer tezgahı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarından hareketle bir sonlu elemanlar modeli de oluşturulmuştur. 10 mm kalınlığa kadar olan camların kesilmesi sonucu elde edilen grafikler çalışmada verilmektedir.

Cam ile benzer şekilde ağaç malzemelerin lazerle kesilmesi alanında da az sayıda çalışma mevcuttur. Castañeda ve diğ. (2011a) çalışmalarında Ytterbium fiber lazeriyle ıslak ve kuru çam kerestesinin çok pasolu lazer kesimi deneylerinden elde edilen istatistiksel bir analiz sunmaktadırlar. DOE ve istatistiksel modelleme teknikleri önemli süreç parametrelerini ve bunların etkileşimlerini araştırmak için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, lazer gücü, dönüş hızı, odak noktası pozisyonu, gaz basıncı, paso sayısı, kesim yönü ve nem içeriği dikkate alınmıştır. Lazer kesim sürecinin en çok ağacın nem içeriğinden ve kerestenin düz yarıklarına bağlı kesim yönünden etkilendiği, ardından sırasıyla dönüş hızından, lazer gücünden ve paso sayısının önemli olduğu bulunmuştur. Ayrıca kerestenin fiber lazerle ve CO₂ lazer kullanılarak yapılan kesme işlemleri de karşılaştırılmıştır. Quintero ve diğ. (2011), fenolik reçineden imal edilmiş panellerin CO₂ lazer kesim sürecini DOE metodu baz alınarak incelemişlerdir. Suntanın lazer kesimi de yayında araştırılmıştır. Fenolik reçine panel 3,5 m/dak kesme hızıyla, 3 kW lazer gücüne sahip CO₂ lazeriyle başarılı bir şekilde kesilebilmiştir. Deneysel kesme kenarlarında oluşan kimyasal değişimler ve duman oluşumu da incelenmiştir. 1,5 kW'lık CO₂ lazerin doğal taşın kesilmesine uygun olduğunu gösteren deneysel bir çalışma Boutinguiza ve diğ. (2002) tarafından yapılmıştır. Tek-çift yardımcı gaz jetinin kuru çam kerestesinin tek geçişli lazer kesimindeki etkileri Castañeda ve diğ. (2011b) tarafından araştırılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar modellemesi yardımıyla elde edilen akış dinamik modeli, tekli ve çiftli gaz jetlerinin lazerle kesme sürecindeki etkilerini ifade etmek için geliştirilmiştir. Simülasyondan elde edilen

sonuçlar, kuru çam malzemenin lazer kesim sürecini analiz eden çok faktörlü deneyinden elde edilen deneysel veriyle karşılaştırılmıştır.

Titanyum ve magnezyum alaşımları da günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlayan malzemelerdir. Bu malzemelerin lazerle kesimi alanında henüz az sayıda çalışma yapılmıştır. Titanyum alaşım plakanın darbeli lazerle kesiminin incelendiği bir çalışmayı Shanjin ve Yang (2006) hazırlamışlardır. Çalışmada; HAZ, yüzey morfolojisi ve korozyon dayanımı gibi lazer kesim parametrelerinin sonuçta oluşan kesimin kalite faktörleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı destek gazlarının yüzey morfolojisi ve korozyon direnci üzerinde oldukça etkili oldukları vurgulanmıştır. Yayında bunun dışında önemli sonuçlara da ulaşılmıştır: HAZ tabakası matris malzemesinin hemen üzerinde, %10 kadar daha sert olan ince taneli bir martenzitik yapıdır. İnce HAZ tabakası oluşumu için orta değerli darbe enerjisi, yüksek darbe oranı, yüksek kesme hızı ve yüksek basınçlı argon gazına ihtiyaç duyulur. Hava ve nitrojen destekli lazer kesimlerde mikro çatlak oluşumu görülür, kesilen yüzeylerde oksijen ve nitrojen nedeniyle gevreklik oluşur ve yüzey kalitesi düşer. Jet motoru kanatlarındaki yuvarlak parçaların imalatı gibi hassas yerlerde istenen yüzey kalitesine argon gazı kullanılarak ulaşılabilir.

Medikal uygulamalar (SMA-implantlar) için 1 mm kalınlıktaki NiTi biçim bellekli alaşımların darbeli Nd:YAG lazerle kesme parametreleri Pfeifer ve diğ. (2010) tarafından araştırılmıştır. Lokal enerji girdisi yüzünden yalnızca düşük ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) oluşumu görülmüş ve böylece malzemenin bellek özellikleri korunmuştur. Darbe enerjisi, genişliği ve nokta bindirmesi gibi önemli parametrelerin kesim geometrisi, pürüzlülüğü ve HAZ'daki etkisi deneysel çalışma sonuçlarında gösterilmiştir. Rashid ve diğ. (2012) yüksek ısı ve kırılma dayanımı için tasarlanmış titanyum alaşımını lazerle kesme işleminde incelemişlerdir. Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al malzemesinin lazerle kesme hızı aralığının 100 m/dak değerini aşabileceği görülmüştür. 1200 W'tan 1600 W'a artan lazer gücünün, kesme hızını 125 m/dak değerine yükseltebileceği gösterilmiştir.

Scintilla ve Tricarico (2012), çalışmalarının ilk bölümünde 1 mm'lik plakaların, sürekli modda ve argon gazının yardımcı olarak kullanıldığı fiber ve CO₂ lazer ile kesimlerini karşılaştırmışlardır. İkinci bölümde ise 3,3 mm kalınlığında plaka fiber lazer kullanılarak kesilmiştir. Odak pozisyonu ve kesme hızı, en iyi kenar kalitesini elde etmek için kullanılan işlem parametrelerinin optimal kombinasyonunu saptamak için değiştirilmiştir. Her iki plaka kalınlığı araştırılmış, yüzey pürüzlülüğü, cüruf yüksekliği ve kesme aralığının eğimi ölçülmüştür. Kesme kalitesi değerlendirilmesi ve sınıflandırılması UNI EN ISO 9013 standartları kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlara göre kesme işleminde verim, kalite ve üretilebilirlik açısından fiber lazerler CO₂ lazerlere göre daha üstündürler. Özellikle otomotiv sektöründe magnezyum alaşımı ile yapılan çalışmalarda bu üstünlükleri kullanılabilir.

Tungsten alaşımının CW CO₂ lazer ile kesilmesi süreci Kulenovic ve diğ. (2010) tarafından araştırılmıştır. İncelenen kesme parametreleri; lazer gücü, kesme hızı ve yardımcı gaz nitrojenin basıncıdır. Sonuçlara göre; 1000 mm/dak kesme hızı, 15 bar'lık nitrojen basıncı ve 2000 W'lık lazer gücünde ince tungsten alaşım plakada iyi bir kesme kalitesi sağlanabileceği anlaşılmıştır.

Bronz malzemenin lazerle delinmesi işlemi ise Yılbaş ve diğ. (2011) tarafından özellikle kesim bölgesinde oluşan ısı gerilmeler açısından incelenmiştir. Bronzun yüksek ısı geçirgenliğinin kesim bölgesindeki soğutma oranlarını arttırması ile kesme bölgesindeki ısı gerilme oluşum alanının etkilendiği görülmüştür. Çalışmada delik çevresinde 200 MPa değerinde artık gerilme oluştuğu hesaplanmıştır.

2.2 Derleme Çalışmaları

Lazerle kesim konusunda az sayıda derleme çalışması mevcuttur. Majumdar ve Manna (2003), lazer konusunun tarihçesinin ardından lazerlerin genel kullanım yerlerini vererek başladıkları çalışmalarında lazerle malzeme işleme süreçlerini detaylı şekilde incelemişlerdir. Lazerin bükme işlemlerinde, kaynaklarda, lehimlerde, sinterlemede ve hızlı prototip imalatında kullanımı da çalışmada yer bulmuştur.

Johan Meijer (2004) tarafından hazırlanan derleme yayında ise özellikle kısa ve ultra-kısa dalga boylu lazerler üzerinde durulmuştur. Mikro-işlemede, daha kısa darbe süresi materyalin ısı etkisi hasarını azaltır ve nanometre boyutunda çalışma için yeni imkanlar sunar. Daha kısa dalga boylarının ele alınmasının nedeni olarak bu ışınların malzeme tarafından daha iyi emilmesi ve daha küçük parçaların üretilmesine olanak sağlaması olarak gösterilmiştir.

Dubey ve Yadava (2008a), lazer ışını ile imalat alanında yaptıkları derleme çalışmasında birçok malzemenin lazer ışını ile kolaylıkla işlenebildiğini belirterek lazer ile imalat metodlarını, modelleme çalışmaları ile optimum lazer kesimi şartlarının belirlenmesi için optimizasyon tekniklerini incelemişlerdir. Dubey ve Yadava (2008b) diğer yayınlarda çeşitli süreç parametrelerinin ve faktörlerin Nd:YAG lazer ile kesme, delme ve mikro işleme operasyonlarına etkilerini inceleyen deneysel araştırmaları derlemişlerdir. Ayrıca deney tasarımı (DOE) konusunun araştırmalar için önemli olduğu da yayında vurgulanmış ve bu konu da incelenmiştir. Kesme işleminin kalitesine etki eden faktörler ve bunların genel olarak etkileri için Tablo 1. oluşturulmuştur.

2.3 Lazerle Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu Çalışmaları

Lazerle kesme sürecini ifade ederek optimize etmeyi amaçlayan pratik ve teorik çalışmalar mevcuttur. Su ve diğ. (2012), günümüzde oldukça sık kullanılan düz dokunmatik ekranların lazer ışını ile kesimi işleminde en yüksek lazerli kesim kalitesini elde etmek için bir parametre optimizasyonu prosedürü önermektedirler. Bu prosedür sayesinde kesimdeki hatalar %32,6'dan %0,3'e düşürülmüştür. Optimizasyon prosedürü üç ana adımdan oluşmaktadır: 1-Önemli parametre ve faktörlerin tanımlanması, 2-Deneysel dataların toplanması, 3-Modelin kurulması. Bir diğer çalışmada Powell ve diğ. (2011) ince yumuşak çeliğin fiber lazer/oksijen ile pürüzsüz şekilde kesimini teorik olarak incelemişler ve bazı deneyler yapmışlardır. Bu araştırmayla lazer-malzeme kombinasyonlarında giriş açılarını değiştirmenin kesim geometrisinin optimizasyonu için önemli olduğunu ortaya koymuştur. Düşük kesme hızlarında eriyik viskozitesi nedeni ile yüzey pürüzü değeri kötü olurken en iyi değerler ortalama kesme hızlarında elde edilmiştir. Fiber lazer dalga boyunda optimal lazer absorpsiyonu 8-14°lik eğimlerde olduğundan pürüzsüz kesim sağlanabilmektedir.

Li ve diğ. (2007) tarafından hazırlanan çalışmada mikroçip imalatında Taguchi matris metodu kullanılarak optimal lazer kesim parametreleri elde edilmiştir. Lazer gücü, lazer frekansı ve kesme hızı gibi çeşitli parametrelerin lazerle kesme kalitesine etkisi araştırılmıştır. Lazer kesim kalitesine etki eden parametreler şu sırada verilmiştir: Lazer frekansı, kesme hızı ve lazer gücü. Parry ve diğ. (2011) ise normalden daha kalın parçaların kesilmesine imkân tanıyan, Ytterbium lazer sistemi için yeni geliştirilen bir yaklaşımı tanıtmaktadırlar. Yayında, kesme süreci esnasında artan ısı ve gerilmelerin ABAQUS programı yardımıyla analizi yapılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Zirkonyum malzemesi için bilinen kesme hızı değerinin büyük ölçüde daha hızlı (1,8 mm/s) olabileceği sonucuna varılmıştır. Benzeri sonuçların diğer malzemelerde de olabileceği düşünülerek söz konusu teknik ile bilinen malzemeler dâhil diğer malzemelerin tekrar analizleri için uygun olduğu düşünülmektedir.

Tablo 1. Farklı kalite karakteristiklerini etkileyen faktörler ve etki dereceleri (Dubey ve Yadava, 2008b)

No	Kalite karakteristiği	Etki faktörü	Kalite karakteristiğini sağlayabilmeye etkisi
1	Isıdan etkilenen bölge (HAZ)	Işın enerjisi	Düşük
		Kesme hızı	Yüksek
		Darbe süresi	Yüksek
		Darbe frekansı	Orta
		Gaz basıncı	Daha fazla
		Malzeme kalınlığı	Düşük
2	Koniklik	Işın enerjisi	Düşük
		Kesme hızı	Yüksek
		Darbe frekansı	Düşük
		Darbe süresi	Yüksek
		Malzeme kalınlığı	Daha fazla
		Odak pozisyonu	Çalışma yüzeyinin üzerine
3	Yüzey pürüzü	Işın enerjisi	Orta
		Kesme hızı	Orta
		Darbe frekansı	Orta
		Gaz tipi	Etkisiz
		Gaz basıncı	Orta
4	Tekrar döküm tabakası	Işın enerjisi	Yüksek
		Darbe süresi	Düşük
		Gaz basıncı	Yüksek
		Malzeme kalınlığı	Düşük
		Odak pozisyonu	Çalışma yüzeyinin üzerine
5	Cüruf oluşumu	Gaz tipi	Etkisiz
		Gaz basıncı	Yüksek
		Işın enerjisi	Yüksek
		Kesme hızı	Yüksek
		Darbe frekansı	Düşük
6	Mikro çatlaklar	Işın enerjisi	Yüksek
		Darbe genişliği	Düşük
		Gaz basıncı	Yüksek
		Gaz tipi	Etkisiz

Yang ve diğ. (2012) çalışmalarında Taguchi metodu ile yapay sinir ağları yaklaşımını birleştirip CO₂ lazerle kesim işlemleri için tahmini bir model ortaya koymuşlardır. Önerilen yöntemde, CO₂ lazerle kesme işlemi süresince hareket eden lazerden enerji değerleri toplanır. Böylece lazer ışınının hareketi boyunca enerji yoğunluğu toplanarak elde edilir ve sonuçta kontrol eşitliğinin kayma faktörü bulunur. Çok az sayıda deneyin yapılmasının ardından uygulanan kademeli Taguchi yapay sinir ağları yöntemiyle yüksek kesinlikli bir model kurulabilir. Dubey ve Yadava (2008) ise çalışmalarında mevcut kaynaklarda daha iyi sonuçlara ulaşabilmek için, bir hibrit Taguchi metodu yardımıyla ve temel bileşen analizi yaparak darbeli Nd:YAG lazerin kullanıldığı bir nikel bazlı süperalaşım plakanın kesilmesi işleminde çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır. Giriş parametreleri; yardımcı gaz basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızıdır. Başlangıçta tek amaçlı optimizasyon Taguchi metoduyla uygulanmış ardından buradan alınan sonuçlar çok amaçlı optimizasyon için temel bileşen analizinde kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları da kurulan model ile uyum göstermiştir. Dubey ve Yadava (2008c) diğer çalışmalarında alüminyum alaşımından imal edilen ve lazer ışını yansıtan plakanın Nd:YAG lazer ışınıyla kesiminde optimal kesim parametrelerini bulmak için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Gözle görülür bir biçimde

kesme kalınlığının konikliğinde ve talaş kaldırma oranında artış sağlandığı savunulmaktadır. Çok amaçlı optimizasyonun sonuçları, tek amaçlı optimizasyonun sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve kesme aralığı konikliğinin %1,6 oranda çok amaçlı optimizasyonda arttığı görülmüştür. Yayında ortaya konulan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Kesme aralığının konikliğini en düşük değerde tutmak için oksijen basıncı 4 kg/cm², darbe genişliği 1,2 ms, darbe frekansı 28 Hz ve kesme hızı 7,5 mm/dak olmalıdır. Malzeme kaldırma oranının maksimize edilmesi için de oksijen basıncı 4 kg/cm², darbe genişliği 1,2 ms, darbe frekansı 28 Hz ve kesme hızı 17,5 mm/dak seçilmelidir.
- 2) Malzeme kaldırma oranı için en önemli faktör %91 ile kesme hızıdır. Kesme aralığının konikliği için de en önemli değişkenin de darbe genişliği olduğu bulunmuştur. Oksijen basıncının kalite faktörleri üzerine önemli bir etkisi yoktur.

Dubey ve Yadava (2008d) bir diğer çalışmalarında, lazerle kesme sürecinin çok parametrelili optimizasyonu için hibrid Taguchi ile RSM (Response Surface Methodology) metodunu birlikte kullanmışlardır. Taguchi kalite kayıpları fonksiyonu, kesme parametreleri girdileri (gaz basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızı) optimum seviyelerini bulmak için kullanılmıştır. Optimum parametre değerleri daha sonra RSM'deki ana değerleri ikinci-seviye cevap modelini optimize etmek ve geliştirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar tekli yöntemin sonuçlarına nazaran kalite karakteristiklerinin hibrid yöntemde kullanıldığında geliştirilebilir olduğunu göstermektedir. Rao ve Yadava (2009), ince bir nikel-bazlı süper alaşımın (SUPERNI 718) darbeleri Nd: YAG lazer kesiminde; kesme aralığı genişlik, koniklik ve sapmasını azaltan optimum değişkenlerin belirlenmesi için bir hibrid optimizasyon yöntemi sunmuştur. Taguchi metodolojisinin bir hibrid yöntemi ve entropi ölçümlü gri ilişki analizi yöntemleri varolan kaynaklarla daha iyi kesim kalitelerini ortaya koymak için uygulanmıştır.

Eltawahni ve diğ. (2011), orta fiber yoğunluklu levhaların lazerle kesimi için DOE yöntemi esasına dayanılarak süreç parametrelerinin seçimini ele almışlardır. Araştırılan süreç parametreleri: Lazer gücü, kesme hızı, gaz basıncı ve odak noktası pozisyonudur. Çalışmada, kesme kalitesi; üst bölgenin kesme yolu genişliği, kesilen parçanın pürüzlülüğü ve işlem masrafları açısından ele alınmıştır. Maliyetin dikkate alındığı ender çalışmalardan bir tanesi olan bu yayında optimal kesme parametreleri grafiksel olarak sunulmuştur. Sharma ve Yadava (2012) ise düz profilli ince alüminyum alaşımının darbeleri Nd:YAG lazer kesimi boyunca kesim kalitesinin optimizasyonunu ve modellemesini farklı yaklaşımları ile sunmuşlardır. Duralumin plakanın lazer kesimini geometrik doğruluğunu aynı anda kesme aralığı genişliğini, alt ve üst taraflardaki sapmaları küçülterek daha iyi bir hale getirmeyi amaçlayan çalışma Pandey ve Dubey (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dayanım ile bulanık mantık teorisini birleştirerek elde edilen hibrid yöntem belirsiz çok parametrelili optimizasyon ölçütünü hesaplamak için uygulanmıştır. Modelden elde edilen optimum sonuçlar doğrulama testleri ile doğrulanmıştır. Doğrulama testleri aynı zamanda kesme aralığının üst ve alt kısımlardaki sapmalarda gözle görülebilir azalmayı da göstermiştir.

Tsai ve diğ. (2008), diyod pompalı katı durum lazer sistemleri kullanarak yapılan Quad-Flat Non-Lead (QFN) çiplerinin kesimi için bir çoklu regresyon analizini ve bir yapay sinir ağları yöntemini önermişlerdir. Kurulan model üç akım girdisini; frekans ve kesme hızı ve kesme yolunun alt bölgesinin kalitesini, ısıdan etkilenmiş bölge ile epoksinin kesim hattını içerir. 27 aşamalı girdi ve girdinin çıkış kalitesini içeren veri araştırmasının ardından geriye yayılım sınır hattını Levenberg-Marquardt algoritmasıyla birlikte kullanarak ortalama araştırma hatası %0,822 elde edilmiş olup iyi bir sonuç olarak yorumlanmaktadır. Testin doğrulaması da deneysel olarak yapılmış, ortalama sapma %1,512 olmuştur. Yayında, ANN modelinin QFN çiplerinin lazer kesim kalitesini tahmin etmek için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada bunun ardından bir genetik algoritma optimal kesim parametrelerini bulmak için uygulanmış ve en düşük HAZ ile optimum kesme hızı bulunmuştur.

Pandey ve Dubey (2012b), titanyum alaşım plakasının lazer kesiminde yüzey pürüzlülüğü ve kesme aralığı konikliğini eş zamanlı olarak optimize etmişlerdir. Çizgi konikliği için

geliştirilen regresyon modelleri ve yüzey pürüzlülüğü, çoklu seçim optimizasyonu bazlı genetik algoritma için kabul edilen amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Optimal çözüm değerleri değişik kalite durumları için sunulmaktadır.

2.4 Lazerle Kesme Sürecinin Teorik Modellenmesi Çalışmaları

Lazerle kesme sürecinin teorik modellenmesi alanında da az sayıda çalışma göze çarpmaktadır. Vossen ve Schüttler (2012), lazer kesim işleminin ısı dağılımının matematiksel modelleme ve stabilize analizini gerçekleştirmişlerdir. Kesme süreci, iki hareketli sınırı olan bir nonlineer iki boyutlu kısmi diferansiyel denklemin serbest sınır problemi olarak modellenmiş olup kesme bölgesinde oluşan malzeme eriyiğinin dinamik akışını açıklamaktadır. Yayında sunulan teorik yaklaşım çeşitli kabuller ile basitleştirilmiş ve nümerik sonuçlar verilmiştir. Sharma ve Yadava (2008) ise uzay ve otomobil endüstrilerinde sık kullanılan alüminyum alaşımından yapılmış ince plakanın Nd:YAG darbeleri lazerli kesimi boyunca kesim kalitesinin teorik modellenmesi ve optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Araştırmada dört süreç girdisi; oksijen basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesim hızı, iki süreç çıktısı, ortalama kesme aralığı konikliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğüdür. Her bir kalite karakteristiğine göre ağırlığın hesaplanması için entropi ölçüm metodolojisi kullanılmıştır.

Jimin ve diğ. (2007), kafanın tam dikey olmadığı lazer kesim durumlarında kesme kalitesi ve kesme parametreleri arasındaki ilişkiyi nicel olarak açıklamak için yapay sinir ağlarını ve test sayısını azaltmak için deneysel bir yaklaşımı kullanmışlardır. Üç boyutlu düşünüldüğünde bilinen kesme parametrelerinin dışında kesme kafasının diklikten sapma miktarının da kaliteyi etkileyeceğinin vurgulandığı çalışmada yapay sinir ağları sonuçlarının gerçekte oldukça uyduğu savunulmaktadır. Lazerle hızlı ve pürüzsüz kesim için Adelman ve Hellman (2011) tarafından bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. FALCOA olarak adlandırılan bu algoritma, DOE deney tasarımı ve tek zamanda tek faktör (one factor at a time) metodlarını kapsamaktadır. Yayında sunulmuş olan algoritma, ilk kesimden optimum kesime kadar olan süreci açıklayabilmektedir. 1 mm kalınlığında alüminyum plaka için 500W tekil mod fiber lazerin optimizasyonu bu yaklaşımla ortaya konmuştur. Ayrıca karşılaştırma amacıyla 1 kW çoklu mod fiber lazerle de uygulama yapılmıştır. Yayında en çok 26-27 ön deney sonucunda optimal sonuçlara ulaşılabileceği savunulmaktadır.

Eltawahni ve diğ. (2012) tıbbi uygulamalarda kullanılan AISI316L paslanmaz çeliğin lazer kesimini incelemiştir. DOE, Box-Behnken yaklaşımları yardımıyla kullanılarak deneyler planlanmıştır. Genel bir optimizasyon rutini, kesim kalitesini arttıracak ya da operasyon maliyetini azaltacak optimal kesim ayarlarını bulmak için uygulanmıştır. Süreç parametreleri ve kesme kenar kalitesi arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Yüksek kalite veya minimum maliyet için optimal lazer kesim koşulları ortaya konmuştur. Jurkóv ve diğ. (2011) ise mikro işleme için çok uygun bir araç olan lazer kesimin çözünürlüğünü geliştirmek için şerit bileşiminin optimize edilip edilemeyeceğini araştırmışlardır. Siemens yıldız kesim modeli kullanılarak, lazer kesim çözünürlüğü farklı lazer ayarlarıyla farklı bağlayıcı bileşimli alüminyum yeşil şerit için ölçülmüştür. Bütün şerit tipleri için ne kadar yüksek lazer ışını hızı olursa o kadar yüksek çözünürlüğe ulaşılacağı sonucuna varılmıştır.

Madic ve Radovanovic (2012), AISI 304 paslanmaz çeliğinin CO₂ lazerle nitrojen kullanılarak kesiminde yapay sinir ağları yöntemiyle minimum çapak yüksekliği için öngörülen bir modelin geliştirilmesini ele almışlardır. Çapak yüksekliğinin yapay sinir ağlarında kullanılan matematiksel modelde; lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve odak noktası gibi lazer kesim parametreleri nonlineer fonksiyonlar şeklinde tanımlanmıştır. Yapay sinir ağları için veri elde etme amaçlı denemeler Taguchi'nin L27 ortogonal sırası gibi yapılmıştır. Bunun dışında, yapay sinir ağları modeli kullanılarak kesme parametrelerinin etkileşimli etkisini araştırmak için üç boyutlu yüzey çizimleri oluşturulmuştur. Analizler sonucunda odak pozisyonunun diğer

parametrelere göre en önemli etkiye sahip olduğu, yardımcı gaz basıncının ise en düşük etkiye sahip faktör olduğu bulunmuştur.

Kovalev ve diğ. (2009) tarafından üç boyutlu tam Navier-Stokes denklemleri çözülerek elde edilen viskoz sıkıştırılabilir bir gazın süpersonik akışının matematiksel modellenmesi lazerle kesme işlemi için kullanılmıştır. Ön taraftan gelen gaz akışının ayrılması sayısal olarak tahmin edilmiş ve bir düzencek üzerinde yapılan deneyler aracılığıyla doğruluğu onaylanmıştır. Lei ve diğ. (2009) tarafından silisyum çeliğinin lazerle kesme parametreleri araştırılmıştır. Gaz akışına yön vermek amacıyla bir yön verici deneylerde kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre daha az lazer gücü ile uygun kesme kalitesine ulaşmanın mümkün olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca kesme aralığının altındaki gaz akışı sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir.

Nisar ve diğ. (2010), sodalı kireç camını kesmek için kullanılan darbeli diyod lazerin etkilerini araştırmışlardır. Darbeli lazer parametrelerinin ve kesme hızının, kesme açısındaki sapma ve ürünün yüzeyi gibi çıkış kalite değerleri üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Sonlu eleman modellenmesi de hareket halindeki ışının gerilme oluşumu üzerindeki etkilerini simüle etmek ve süreç mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştırmak için kullanılmış, sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma optimum darbeli diyod lazer parametrelerini kullanarak kenarlardaki ısıl gerilmelerini azaltmanın kesme aralığındaki sapmaların azaltılabileceğini ve bunun kesme sürecine esneklik sağlayabileceğini göstermiştir.

Metal plakaların lazer kesiminde, kesim bölgesi civarında ısıl gerilmeler oluşur. Kesim koşullarına ve taban malzeme özelliklerine bağlı olarak, ısıl gerilmeler yüksek değerlere ulaşabilir. Yılbaş ve Arif (2011) tarafından lazer kesimin yapıldığı kenarlar yakınında oluşan ısıl gerilmeler modellenmiş ve gerilme alanları tahmin edilmiştir. Sıcaklık tahminlerin doğruluğu deneysel sonuçlarca da onaylanmıştır. y-ekseni boyunca oluşan maksimum sıcaklığın zamana göre değişimi lazer ısıl kaynağına bağlı olduğu görülmüştür. Fakat von Misses gerilmesinin zamana göre değişimi, kesim yönü boyunca olan ve zamanla değişen sıcaklıktan farklı bir eğilim göstermektedir. Tarama hızındaki artışın taban malzemesindeki yüksek sıcaklık geçişlerini ortaya çıkarması nedeniyle von-Misses gerilmelerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Benzer bir çalışmada Yılbaş ve diğ. (2010), kalın çelik levhalarda lazer kesim işleminde sonlu elemanlar yaklaşımı ile sıcaklık dağılımı ve gerilmeleri incelemişlerdir. Lazer kesim işleminden sonra oluşan artık gerilmeleri ölçmek için XRD tekniği kullanılırken, kesme hızının sıcaklık ve gerilme seviyelerindeki etkisi de incelenmiştir. Kesim bölgesindeki morfolojik ve metalürjik değişimleri incelemek için SEM ve XRD kullanılmıştır. Mikro sertlik değerleri de kesimin yapıldığı enine bölge boyunca ölçülmüştür. Kurulan model ile deney sonuçlarının çakıştığı da gözlenmiştir.

Arif ve diğ. (2009), kalın çelik plakalarda lazerle kesim bölgesindeki sıcaklık ve gerilme alanlarını sonlu eleman metodunu kullanarak modellemişlerdir. Kesim bölgesinde oluşan artık gerilmesi X ışını kırınım tekniği kullanılarak belirlenmiş ve model tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Kesim bölgesindeki yapısal ve morfolojik değişimler optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Kesim bölgesinde, özellikle kesim yönüne doğru sıcaklık ve von-Misses gerilmelerinin hızla arttığı görülmüştür.

2.5 Diğer Çalışmalar

Önceki gruplara dahil edilemeyen diğer çalışmalar bu kısımda verilecektir. Chen ve diğ. (2012), kesme kalitesini artırma amacıyla CO₂ lazer kesimiyle üretilmiş 1 mm kalınlıktaki Al₂O₃ seramik taban üzerindeki katılaşma davranışını ve mikroyapı karakteristiğini araştırmışlardır. SEM ve CLSM (eş odaklı tarayıcı lazer mikroskobu) kullanılarak yapılan gözlemler, sütun şeklindeki tanelerin orta bölgede çoğunlukta olduğu yerlerde, eş eksenli tanelerden oluşan yeniden döküm plakının üst ve alt bölgelerdeki kesim kalitesini düşürdüğünü göstermiştir. Sonlu elemanlar kurularak bu modelle katılaşma mekanizması anlaşılmaya ve kesme profili boyunca oluşan mikroyapı çeşitliliği açıklanmaya çalışılmıştır.

Lazerle kesim alanındaki kalitenin belirlenmesi çalışmaları da literatürde yer almaktadır. Örneğin Kek ve Grum (2009) tarafından lazerle kesme kalitesinin belirlenmesinde akustik ölçmeye dayanan yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemde lazer kesim yapılan hat boyunca, lazer kesimin elde edilen kalitesine bağlı sürekli sinyaller ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Ani sapsmalar şeklinde görülen ses şiddeti yükselmeleri (patlamalar) aynı zamanda kesme kalitesinin kötü olduğunun da bir göstergesidir. Lazerle kesme işleminin ardından oluşan yüzeylerin kalitesinin tayini için Kek ve Grum (2010) tarafından akustik emisyon ölçümü temeline dayanan bir yöntem önerilmektedir. Oksijen veya nitrojenin yardımcı gaz olarak kullanılabilirdiği farklı kalınlıklardaki çelik plakaların lazerle kesilmesinin ardından akustik ölçümler yapılmaktadır. Yöntem ostenitik paslanmaz çelik, yumuşak çelik ve inşa çelikleri için uygundur. Akustik sinyallerin işlenmesi sonucunda, cürufun boyutu ve kesim yüzeyindeki dalgalanmaya bağlı kesim kalitesi ortaya konmuştur.

Kesme işlemi esnasındaki gaz akışının teorik modellenmesi çalışmaları da yapılmıştır (Quintero ve diğ., 2006). Bu çalışma alana yeni kavramlar katılması ve görüntüleme tekniği açısından olumludur.

Danilov ve diğ. (2006) tarafından 8 kW kuantum jeneratör otomasyonlu lazer sistemi tek-modlu lazer ile karşılaştırılmıştır. Paslanmaz ve karbon çelik plakaların lazerle kesilmesi sürecinde bu sistemin kullanılabilirliği deneylerle kanıtlanmıştır. Chen ve O'Neil (1997), yüksek güçlü CO₂ lazer kesiminde oluşan periyodik çizgilerin doğal frekansını bozarak kesim kenarı kalitesini yükseltmişlerdir. Kesme kalitesinin lazer gücünü dalgalandırarak büyük ölçüde iyileştirebileceği öne sürülmektedir.

Chagnot ve diğ. (2010) çalışmalarında yüksek güçlü ve sürekli dalga üretebilen bir Nd:YAG lazerin performansı ile ilgilenmişlerdir. Kesme güçleri 8 kW'a kadar çıkabilmiştir. Bu gücün nakli için iki farklı kalınlıkta fiber kablo kullanılmaktadır. İlk kablo 0,4 mm ardından da 0,6 mm'lik kablo kullanılmıştır. Bu şekilde kullanım ile kablo boyu 100+20/50 m değerine kadar çıkartılabilmektedir. Özel tasarımların tanıtıldığı yayında kesme yeteneği için kW başına 10 mm değeri verilmiştir. 8 kW güç değerinde ostenitik çelik plakalarda 100 mm kalınlıkta kesim yapılabilmektedir. Bu performansa kesim işlemine plaka kenarından başladığında ulaşılmıştır. Eğer kesme işlemi plakanın ortasından başlarsa kesme performansı bu değerlere ulaşmamaktadır. Delik delme işleminde 8 kWlık güç değerinde 40 mm kalınlığa ulaşılmıştır.

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Lazer ışını yardımıyla malzemelerin işlenmesi konusu günümüzün imalat sektörünün güncel ve gelecek işlemleri açısından çok önemlidir. Lazerle kesme ve şekillendirme işlemleri, tezgâhların daha da gelişimi ile daha çok uygulama alanı bulacaktır.

Tezgahların optimal parametreler ile çalıştırılması verimlilikleri açısından çok önemlidir. Lazerle kesim konusundaki literatürü tarama amacı taşıyan bu çalışmada konu ile ilgili yeni çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalarda genel kesme parametreleri ortak olmakla birlikte farklı malzemeler için uygulamalarla karşılaşılmıştır. Bir malzeme için uygun olan kesme parametresi diğer bir malzemede farklı sonuçlara götürebilmektedir. Bu nedenle malzemeye bağlı çalışmalar açık noktalar da göz önüne alınarak çeşitlendirilmelidir. Örneğin alüminyum ve magnezyum alaşımları ile birlikte performans çelikleri alanında optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bunun dışında metal olmayan malzemeler; kompozit plakalar, çeşitli polimerler ve ağaç temelli malzemeler konusunda çalışmalar yapılmalıdır. Bu tür malzemelerin otomotiv ve mobilya sektörlerindeki önemi açıktır ve kullanımları giderek artacaktır.

Optimum kesme parametrelerin elde edilmesinde minimum deney sayısı da önemli bir araç olduğundan deney tasarımı konusu da ön planda tutulmalıdır. Bu nedenle yayında geçen optimizasyon çalışmaları ve değişik tasarım yöntemleri alanında da gelecekte çalışmalar yapılabilir. Taguchi yaklaşımı ve kurulan özel algoritmalar ile yapay sinir ağları yöntemi ön plana çıkacaktır.

Enerjinin daha verimli kullanımı ve fiber lazerlerin gelişimi de düşünüldüğünde daha düşük güçler ile daha hızlı ve yüzey kalitesi yüksek kesimler yapılabilmesi çalışmaların ana hedefi olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Adelman B. and Hellmann R. (2011). Fast laser cutting optimization algorithm, *Physics Procedia*, 12, 591-598.
2. Ahn D.G. and Byun K.W. (2009). Influence of cutting parameters on surface characteristics of cut section in cutting of Inconel 718 sheet using CW Nd:YAG laser, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 19, s32-39.
3. Arif A.F.M., Yilbas B.S. and Abdul Aleem B.J (2009). Laser cutting of thick sheet metals: Residual stress analysis, *Optics & Laser Technology*, 41, 224-232.
4. Baskoro A.S., Herwandi, Ismail KGS, Siswanta A., and Kiswanto G. (2011). Analysis of cutting process of materials using low power laser diode and CO₂, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 11 [6], 13-18.
5. Baumeister M., Dickmann K. and Hoult (2006). T. Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets, *Appl. Phys. A*, 85, 121–124.
6. Boutinguiza M., Pou J., Lusquiños F., Quintero F., Soto R., Amor M.P, Watkins K. and Steen W.M. (2002). CO₂ laser cutting of slate, *Optics and Lasers in Engineering*, 37, 15-25.
7. Caiazzo F., Curcio F., Daurelio G. and Minutolo F.M.C. (2005). Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam, *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 279-285.
8. Castañeda J. C. H., Sezer H.K. and Lin L. (2011a). Single and dual gas jet effect in Ytterbium-doped fibre laser cutting of dry pine wood, *Int J Adv Manuf Technol*, 56, 539-552.
9. Castañeda J. C. H., Sezer H.K. and Lin L. (2011b). The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood, *Optics and Lasers in Engineering*, 49, 1139-1152.
10. Chagnot C., Dinechin de G. and Canneau G. (2010). Cutting performances with new industrial continuous wave ND:YAG high power lasers-For dismantling of former nuclear workshops, the performances of recently introduced high power continuous wave ND:YAG lasers are assessed, *Nuclear Engineering and Design*, 240, 2604-2613.
11. Chen S.L. and O'Neil W. (1997). The effects of power rippling on CO₂ laser cutting, *Optic&Laser Technology*, 29[3], 125-134.
12. Chen X., Ji L., Bao Y. And Jiang Y. (2012). Improving cutting quality by analysis of microstructure characteristics and solidification behaviour of recast layer formation on laser cut ceramic, *Journal of the European Ceramic Society*, 32, 2203-2211.
13. Choudhury I.A. and Shirley S. (2010). Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation, *Optics & Laser Technology*, 42, 503-508.
14. Danilov V. I., Zuev L. B., Kuznetsova N. I., Malov A. N., Orishich A. M., Fomin V. M. and Shulyat'ev V. B. (2006). Specific features of laser cutting of steel sheets and monitoring of sample quality after laser influence, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 47[4] 608-615.

15. Davim J.P, Barricas N., Conceicao M. and Oliveira C. (2008). Some experimental studies on CO₂ laser cutting quality of polymeric materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 198, 99-104.
16. Dubey A.K. and Yadava V. (2008a). Laser beam machining—A review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 609-628.
17. Dubey A. K. and Yadava V. (2008b). Experimental study of Nd:YAG laser beam machining—An overview, *Journal of Materials Processing Technology*, 195, 15-26.
18. Dubey A. K. and Yadava V. (2008c). Multi-objective optimisation of laser beam cutting process, *Optics & Laser Technology*, 40, 562-570.
19. Dubey A.K. and Yadava V. (2008d). Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, 46, 124-132.
20. El-Taweel T. A., Abdel-Maaboud A. M., Azzam B. S., and Mohammad A. E. (2009). Parametric studies on the CO₂ laser cutting of Kevlar-49 composite, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 40, 907-917.
21. Eltawahni H. A., A. G. Olabi and K. Y. Benyounis (2010). Assessment and optimization of CO₂ laser cutting process of PMMA, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, American Institute of Physics, Paris, 1553-1558.
22. Eltawahni H. A., Olabi A. G. and Benyounis K. Y. (2011). Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material, *Optics & Laser Technology*, 43, 648-659.
23. Eltawahni H.A., Hagino M., Benyounis K.Y., Inoue T. and Olabi A.G (2012). Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L, *Optics & Laser Technology*, 44, 1068- 1082.
24. Ghany K.A. and Newishy M. (2005) Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 438-447.
25. Glod P.V. (2011). Effects of oxygen pressure in laser cutting, *Metalurgia International*, 16 [1], 18-25.
26. Jimin C., Jianhua Y., Shuai Z., Tiechuan Z. and Dixin G. (2007). Parameter optimization of non-vertical laser cutting, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 33, 469-473.
27. Jurkó w D., Malecha K., Stiernstedt J. and Golonka L. (2011). Influence of tapes' properties on the laser cutting process, *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 1589-1595.
28. Karataş C., Keles O., Uslan I. and Usta Y. (2006). Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation, *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 22-29.
29. Kek T. and Grum J. (2009). Monitoring laser cut quality using acoustic emission, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, 8-12.
30. Kek T. and Grum J. (2010). AE Signals during laser cutting of different steel sheet thickness, *J. Acoustic Emission*, 28, 179-187.
31. Kovalev O.B., Yudin P.V. and Zaitsev A.V. (2009). Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal, *Applied Mathematical Modelling*, 33, 3730-3745.

32. Kulenovic M., Begic D., Cekic A. and Bliedtner J. (2010). Laser cutting of tungsten alloy using nitrogen assist gas, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*, Vienna, 21[1], 54-546.
33. Kurt M, Kaynak Y., Bagci E., Demirer H., and Kurt M. (2009). Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics, *Int J Adv Manuf Technol*, 41, 259-267.
34. Lamikiz A., López L.N. de L., Sánchez J.A., Pozo del D., Etayo J.M., and López J.M. (2005). CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS), *Applied Surface Science*, 242, 362-368.
35. Lei H., Yi Z. and Chenglong M. (2009). Technological study of laser cutting silicon steel controlled by rotating gas flow, *Optics & Laser Technology*, 41, 328-333.
36. Li C.H., Tsai M.J. and Yang C.D. (2007). Study of optimal laser parameters for cutting QFN packages by Taguchi's matrix method, *Optics & Laser Technology*, 39, 786-795.
37. Li X.Z., Tai Y.P., Nie Z.G., Zhang L.P., (2012). Laser cutting profile characterization using dynamic speckle method, *Optik-Int. J. Light Electron Opt.*
38. Li Z.L., Zheng H.Y., Lim G.C., Chu P.L., and Li L. (2010). Study on UV laser machining quality of carbon fibre reinforced composites, *Composites: Part A*, 41, 1403-1408.
39. Liu J., Zhao C., Hu H. and Shuai C. (2012). Systemic optimization of linear cavity Yb-doped double-clad fiber laser, *Optik - Int. J. Light Electron Opt.*, 10.1016/j.ijleo.2012.02.007.
40. Madić M. and Radovanović M. (2012) Investigation into the effect of the cutting parameters on the burr height in CO₂ laser nitrogen cutting of AISI 304 stainless steel, *Metalurgia International*, XVII[7], 74-78.
41. Majumdar J. D. and Manna I. (2003). Laser processing of materials, *Sadhana*, 28 [3-4], 495-562.
42. Meijer J. (2004). Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities, *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 2-17.
43. Muhammad N., Whitehead D., Boor A. and Li L. (2010). Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 316L stainless steel tubes for medical device applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2261-2267.
44. Nisar S., Sheikh M.A., Li L. and Safdar S. (2010). The effect of material thickness, laser power and cutting speed on cut path deviation in high-power diode laser chip-free cutting of glass, *Optics & Laser Technology*, 42, 1022-1031.
45. Nisar S., Li L., Sheikh M.A. and Pinkerton A.J. (2010) The effect of continuous and pulsed beam modes on cut path deviation in diode laser cutting of glass, *Int J Adv Manuf Technol*, 49, 167-175.
46. Pandey A.K. and Dubey A.K. (2012a). Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 328-335.
47. Pandey A.K. and Dubey A.K. (2012b). Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics & Laser Technology*, 44, 1858-1865.

48. Patel J.M. and Patel D.M. (2011). Parametric investigation in CO₂ laser cutting-Quality of hardox-400 materials, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3[7], 5979-5984.
49. Parry J., Ahmed R., Dear F., Shephard J., Schmidt M., Li L. and Hand D. (2011). A fiber-laser process for cutting thick Yttria-stabilized Zirconia: Application and modeling, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8 [6], 1277-1288.
50. Pfeifer R., Herzog D., Hustedt M. and Barcikowski S. (2010). Pulsed Nd:YAG laser cutting of NiTi shape memory alloys—Influence of process parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1918-1925.
51. Powell J., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H. and Voisey K.T. (2011). Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the ‘striation free’ effect, *Optics and Lasers in Engineering*, 49, 1069-1075.
52. Quintero F., Pou J., Fernández J.L., Doval A.F., Lusquiños F., Boutinguiza M., Soto R., and Amor M.P. (2006). Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser fusion cutting, *Optics and Lasers in Engineering*, 44, 1158-1171.
53. Quintero F., Riveiro A., Lusquiños F., Comesaña R. and Pou J. (2011). CO₂ laser cutting of phenolic resin boards, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1710-1718.
54. Rashid R.A.R. , Sun S., Wang G. and Dargusch M.S. (2012). The effect of laser power on the machinability of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy during laser assisted machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 63, 41-43.
55. Rao R. and Yadava V. (2009). Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of thin superalloy sheet using grey relational analysis with entropy measurement, *Optics & Laser Technology*, 41, 922-930.
56. Riveiro A., Quintero F., Lusquiños F., Comesaña R. and Pou J (2010). Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1138-1152.
57. Riveiro A., Quintero F., Lusquiños F., Comesaña R., ve Pou J. (2011). Effects of processing parameters on laser cutting of aluminium–copper alloys using off-axial supersonic nozzles, *Applied Surface Science*, 257, 5393-5397.
58. Riveiro A., Quintero F., Lusquiños F., Val del J., Comesaña R., Boutinguiza M., and Pou J. (2012). Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite, *Composites: Part A*, 43, 1400-1409.
59. Salem H. G., Mansour M.S, Badr Y. and Abbas W.A. (2008). CW Nd:YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheets using O₂ assist gas, *Journal of Materials Processing Technology*, 196, 64-72.
60. Scintilla L.D. and Tricarico L. (2012). Experimental investigation on fiber and CO₂ inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets, *Optics and Laser Technology*.
61. Shanjin L. and Yang W. (2006). An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, 44, 1067-1077.
62. Sharma A. and Yadava V. (2008). Robust parameter design and multi-objective optimization of laser beam cutting for aluminium alloy sheet, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 38, 268-277.

63. Sharma A. and Yadava V. (2012). Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile, *Optics & Laser Technology*, 44, 159-168.
64. Stournaras A., Stavropoulos P., Salonitis K. and Chryssolouris G. (2009). An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2, 61-69.
65. Su C. T., Hsiao Y. H. and Chia-Chin Chang (2012). Parameter optimization design for touch panel laser cutting process, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9 [2], 320-329.
66. Tahir B.A, Ahmed R., Ashiq M. G. B., Ahmed A., and Saeed M.A. (2012). Cutting of nonmetallic materials using Nd:YAG laser beam, *Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd*, 21[4], 1-4.
67. Thawari G., Sundar J.K.S, Sundararajan G. and Joshi S.V. (2005). Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 229-239.
68. Tsai M.J., Li C.H. and Chen C.C. (2008). Optimal laser-cutting parameters for QFN packages by utilizing artificial neural networks and genetic algorithm, *Journal of Materials Processing Technology*, 208, 270-283.
69. Vossen G. and Schüttler J. (2012). Mathematical modelling and stability analysis for laser cutting, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical System*, 18[4], 439-463.
70. Wang X. and Wang J. (2010). Laser 3D machining with variable process parameters, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, American Institute of Physics, Paris, 1157-1162.
71. Wang X.C., H.Y. Zheng, Chu P.L., Tan J.L., Teh K.M., Liu T., Ang B.C.Y. and Tay G.H. (2010). High quality femtosecond laser cutting of alumina substrates, *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 657-663.
72. Yan Y., Li L., Sezer K., Whitehead D., Ji L., Bao Y. and Jiang Y. (2011). Experimental and theoretical investigation of fibre laser crack-free cutting of thick-section alumina, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 859-870.
73. Yan Y., Li L., Sezer K., Whitehead D., Ji L., Bao Y. and Jiang Y. (2012). Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser striation-free cutting of alumina sheets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 53, 15-26.
74. Yang C.B, Deng C.S. and Chiang H.L. (2012). Combining the Taguchi method with artificial neural network to construct a prediction model of a CO₂ laser cutting experiment, *Int. J Adv. Manuf. Technol.*, 59, 1103-1111.
75. Yilbas B.S. (2008). Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations, *Journal of Materials Processing Technology*, 201, 285-290.
76. Yilbas B.S., Karatas C., Uslan I., Keles O., Usta Y., Yilbas Z., and Ahsan M. (2008). Wedge cutting of mild steel by CO₂ laser and cut-quality assessment in relation to normal cutting, *Optics and Lasers in Engineering*, 46, 777-784.
77. Yilbas B.S., Arif A.F.M. and Abdul Aleem B.J. (2010). Laser Cutting of Rectangular Blanks in Thick Sheet Steel: Effect of Cutting Speed on Thermal Stresses, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19[2], 177-184.

78. Yilbas B.S., Akhtar S. and Chatwin C. (2011). Laser hole cutting into bronze: Thermal stress analysis, *Optics & Laser Technology*, 43, 1119-1127.
79. Yilbas B.S. and Arif A.F.M (2011). Laser cutting of steel and thermal stress development, *Optics & Laser Technology*, 43, 830-837.
80. Yilbas B.S. and Akhtar S.S. (2012). Laser cutting of Kevlar laminates and thermal stress formed at cutting sections, *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 204-209.
81. Yilbas B.S., Akhtar S.S. and Karatas C. (2012). Laser cutting of alumina tiles: Heating and stress analysis, *Journal of Manufacturing Processes*.
82. Zhou B. H. and Mahdavian S.M. (2004). Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 146, 188-192.

Makale 04.01.2013 tarihinde alınmış ve 08.07.2013 tarihinde kabul edilmiştir.

