

Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmesi

Serkan ÖZŞAHİN^{1*}, Kadir ÇAVDAR²

¹Şefine Tersanesi, Hersek Mah. İpek Yolu Cad. No: 7, Altınova, 77700 Yalova

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059 Bursa

Geliş Tarihi (Received Date): 20.07.2022.

Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.11.2022

Öz

Lazer kaynağı endüstriyel uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Modern birleştirme yöntemlerinden biri olan lazer kaynağı geliştirmeye devam etmektedir ve mevcut kaynak yöntemlerine karşı hassasiyet, hız ve esneklik gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada; lazer kaynağı yöntemiyle paslanmaz çeliklerin birleştirilmesi hakkında literatürde mevcut çalışmalar detaylı şekilde araştırılmıştır. Değerlendirilen çalışmalar sistematik şekilde analiz edilmiş ve gruplandırılarak araştırmacıların dikkatine sunulmuştur. Araştırmalar özellikle lazer kaynakta derinlemesine nüfuziyet yöntemiyle elde edilen anahtar deliğinin incelenmesi, lazer kaynak parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri, malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sıcaklık dağılımına etkilerinin incelenmesi ve lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği konulara yoğunlaşmıştır.

Anahtar kelimeler: Paslanmaz çelik, lazer kaynağı, derleme.

Joining stainless steel by using laser welding

Abstract

Laser welding is used in industrial application areas. Laser welding, one of the modern joining methods, continues to be developed and offers important advantages such as precision, speed and flexibility over existing welding methods. In this paper; the existing studies in the literature on the joining stainless steel by using laser welding method has been investigated in detail. Evaluated studies were systematically analyzed and grouped and presented to the attention of the researchers. The researchers are mainly focused on the examination of the keyhole obtained by the deep penetration method in laser welding,

*Serkan ÖZŞAHİN, serkanozsahin85@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9263-8148>

Kadir ÇAVDAR, cavdar@uludag.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-9126-0315>

the examination of the effect of laser welding parameters on the mechanical properties of the welds, the tensile strength, fatigue strength and temperature distribution of the material and the examination of the effect of laser welding parameters on the microstructural properties of the welded joint concentrated.

Keywords: *Stainless steel, laser welding, review.*

1. Giriş

Paslanmaz çelikler, korozyon önleyici özellikleri, yüksek sıcaklık direnci ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle demiryolu taşımacılığında, enerji, ağır kimyasallar, denizcilik, otomotiv ve havacılık dahil olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Mevcut durumda, direnç nokta kaynağı, tam otomatik veya yarı otomatik tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, metal inert gaz (MIG) kaynağı ve metal aktif gaz ark (MAG) kaynağı, paslanmaz çelik bileşenlerin kaynaklı birleştirmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Ancak bu kaynak teknolojilerinin düşük kaynak verimliliği ve yüksek ısıl deformasyon gibi birçok eksiklikleri vardır. Buna karşılık lazer kaynağı; hızlı kaynak işleme, yüksek kaliteli kaynak birleştirme ve iyi şekillendirilmiş kaynakların üretimi gibi birçok avantaja sahiptir ve bu nedenle uygulamada paslanmaz çeliklerin kaynağında giderek daha fazla kullanılmaktadır [3].

Lazer kaynak işlemi sırasında, metal buharlaşması esnasında üretilen plazma ya da gaz, kaynak stabilitesi ve enerji bağlantısı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Bu nedenle, plazmayı/gazı kontrol etmek ve erimiş kaynak havuzunu korumak için sıklıkla yandan Helyum ya da Argon gazı üfleme kullanılır [4]. Helyum, yüksek iyonizasyon enerjisi ve uygun termal iletkenlik ile ayırt edilir ve optimum koruma performanslarına sahiptir. Maliyeti daha düşük olmasına rağmen, endüstriyel uygulamalarda Argonun yoğun kullanımı hala ciddi harcamalara yol açmaktadır. Paslanmaz çelikler giderek artan kullanım oranı ile vazgeçilmez ve endüstriyel açıdan önemli malzemelerdir. Paslanmaz çeliklerin içerisinde ostenitik paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çeliklerin içerisinde ise özellikle AISI 304 kalite çok yoğun olarak kullanılmaktadır [5]. Bu tip çelikler kolayca şekillendirilebilir olmaları ve uygun kaynak şartları oluşturulduğunda kaliteli kaynak edilebilirler. Ancak geleneksel kaynak yöntemleri ile paslanmaz çeliklerin kaynağında dikkatli olunması gerekmektedir. Çünkü yüksek ısı girdilerinde kaynak dikişinin ve ısı tesiri altındaki bölgenin genişlemesi ve korozyon direncinin düşmesi, artık gerilmelerin oluşması, kaynak dikişinde çatlak oluşumu veya kaynak sonrası parçaların çarpılması gibi olumsuz durumlar oluşmaktadır [6]. Ferritik paslanmaz çelik, %12'den fazla krom içeren bir paslanmaz çelik alaşımıdır. Diğer paslanmaz çelik formlarından moleküler tane yapısı ve kimyasal bileşimi açısından farklıdır. Ferritik paslanmaz çelik, aslında %10,5 ile %30 arasında değişen krom içeriğine ve %0,20'den daha az bir karbon içeriğine sahip olan düz krom sertleştirilemeyen paslanmaz alaşım sınıfı olarak tanımlanır. Şekillendirme ve kaynak yapılabilme kolaylığı ile çeşitli uygulamalar için uygundur. Ayrıca daha yüksek miktarda molibden içerir ve bu da korozyon direncini daha da artırır [7].

Lazer kaynağı, yüksek güç yoğunluklu kaynak işlemleri, küçük şekil bozulmaları, ısıdan etkilenen bölgenin boyutunun küçültülmesi ve yüksek nüfuziyet ile ilişkili daha hızlı kaynak gibi muazzam avantajları nedeniyle günümüzde mikroelektronikten gemi yapımına kadar endüstriyel imalatta giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır [8]. Yüksek lazer gücü ile mükemmel ışın kalitesinin optimize edilmiş kombinasyonu, tüm

güç aralığında sabit tutulur. Sürekli dalga ile lazer ışını kaynağı, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük ısı girdisi işlemi sonucu, çok az bozulma ile çok hızlı soğuyan küçük bir ısıdan etkilenen bölge ve füzyon bölgesi için yüksek bir derinlik-genişlik oranı elde edilir. Normal olarak, lazer ışını kaynağı birçok değişkeni içerir: lazer gücü, kaynak havuzundaki ısı akışları ve sıvı akışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek kaynak hızı, odak dışı bırakma mesafesi ve koruyucu gaz türü. Bu da kaynak füzyon bölgesinin nüfuziyet derinliğini, şeklini ve mikro yapısını etkileyecektir. Füzyon bölgesinin hem şekli hem de mikro yapısı, bağlantıların özellikleri ve dış yüzeyin kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır [9]. Sonuç olarak, paslanmaz çeliğin lazer kaynağına yönelik daha ekonomik koruma yöntemlerinin araştırılması, büyük teknik ve ekonomik öneme ve endüstriyel uygulama değerlerine sahiptir [10].

Bu çalışmanın amacı paslanmaz çeliklerin lazer kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğini araştırarak, kaynak için uygun yöntem ve parametreleri tespit ederek bu parametrelerin optimizasyonunu yapmaktır. Araştırmada öncelikle lazer kaynağa derinlemesine nüfuziyet yöntemiyle elde edilen anahtar deliği ilgili çalışmalar incelenmiştir. İkinci olarak, lazer kaynak parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri, malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sıcaklık dağılımına etkilerinin incelendiği çalışmalar analiz edilmiştir. Son olarak da lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. Literatür araştırılması

Lazer kaynak, kaynak yapılan malzemeyi eritmek veya buharlaştırmak için iş parçası yüzeyindeki küçük bir noktaya büyük miktarda enerji aktarmak için yüksek güçlü bir ışık huzmesinin kullanıldığı bir işlemdir. Lazer kaynağında önemli bir mekanizma, lazer ışınının malzeme ile etkileşimidir. Bu etkileşim mekanizması, lazer gücü, bu gücün yüzeydeki yoğunluk dağılımı, kaynak hızı, malzeme özellikleri, koruyucu gaz kaynağı ve lazer radyasyonunun dalga boyu gibi birçok parametreden etkilenir [11]. Metallerde lazer kaynağının oluşabileceği iletim kaynağı ve anahtar deliği kaynağı olmak üzere iki temel mekanizma vardır. Her mod, farklı lazer malzeme etkileşimi ile karakterize edilir [12]. İş parçası üzerinde meydana gelen lazer ışını güç yoğunluğu ve kaynak birim uzunluğuna biriken enerjiyi temsil eden güç: hız oranı, işlemin özelliklerini belirler. Çelikte bir anahtar deliği başlatmak için minimum güç yoğunluğu yaklaşık 10 kW/mm²'dir [13]. Bu güç yoğunluğu eşliğinin altında bir iletim kaynak mekanizması oluşacaktır. Lazer ışını malzemeyi ısıtıp eşik sıcaklığa ulaşıldığında malzemedeki atomlar arasındaki bağlar kopar ve malzeme buharlaşır. Buhar sıcaklığı daha da artırılırsa, buharlaşmış metal atomlarının elektronları ve etkileşim bölgesindeki gazlar atomlardan uzaklaştırılabilir, bu da iyonize gaz, yani plazma ile sonuçlanır [14].

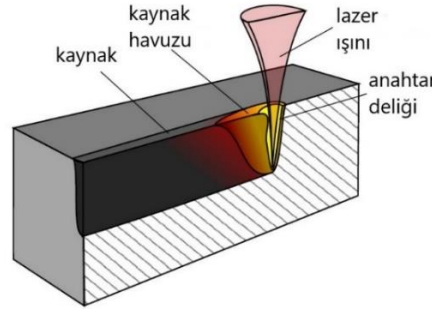
Çalışmanın bu bölümünde literatürdeki mevcut çalışmalar alt gruplara ayrılarak analiz edilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Oluşturulan alt gruplar şunlardır:

1. Lazer kaynağa derinlemesine nüfuziyet yöntemiyle elde edilen anahtar deliğinin incelendiği çalışmalar
2. Lazer kaynak parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri, malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sıcaklık dağılımına etkilerinin incelendiği çalışmalar

3. Lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalar

1.1. Lazer kaynakta derinlemesine nüfuziyet yöntemiyle elde edilen anahtar deliğinin incelenmesi

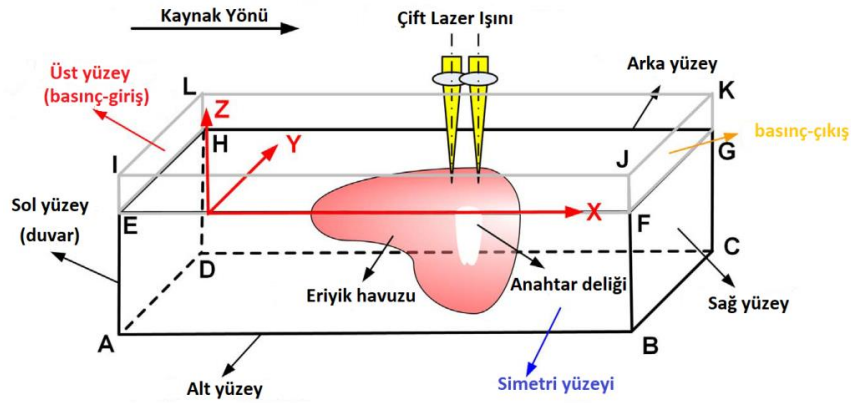
Lazer kaynağında, lazer ışınının yoğunluğu arttıkça ($I \geq 10^{10} \text{ W/m}^2$) lazer ışınının odağındaki erimiş metal buharlaşmaya başlar. Buharın geri tepme basıncı, eriyiği bir kenara iterek, sıcak metal gazı veya plazma ile dolu bir kılcal boru oluşturur. Bu kılcal, anahtar deliği olarak bilinir ve iş parçasının tüm derinliği boyunca uzanabilir (Şekil 1). Anahtar deliğinden kaçan sıcak gaz, iş parçası üzerinde plazma veya duman oluşturur. Lazer ışını enerjisi anahtar deliği duvarlarında emilir. Lazer ışını anahtar deliğinden aşağı yansımalar nedeniyle tekrar tekrar anahtar deliği duvarına maruz bırakılır. Her yansımada lazer enerjisinin bir kısmı emilir. Bu çoklu yansıma mekanizmasından dolayı, anahtar deliği modu kaynağı %80'nin üzerinde yüksek bir toplam emilime sahiptir. Ayrıca, anahtar deliğinin içindeki ve üstündeki gaz, lazer ışınımını emer. Lazer ışını iş parçası üzerinde hareket ettiğinde, anahtar deliğinin ön kenarı boyunca uzanan metal, tüm kalınlığı boyunca erir. Sıvı metal, anahtar deliğinin etrafından akar ve arka kenarda yeniden katılaşır. Anahtar deliğini çevreleyen kaynak havuzu, karakteristik olarak bir gözyaşı şekline sahiptir ve sıcaklık, geleneksel bir ark kaynağından önemli ölçüde daha yüksektir. Kaynak geometrisi karakteristik olarak derin ve dardır [15]. Nd: YAG lazer ışınımı için bu emilim mekanizması anahtar deliği duvarlarında Fresnel emilimiyle karşılaştırıldığında çok zayıftır [16]. Anahtar deliğinden dolayı enerji iş parçasının tüm derinliği boyunca emilir. Bu, anahtar deliği veya derin penetrasyon kaynağında yüksek kaynak hızlarına izin verir ve yüksek derinlik-genişlik oranına ve ısıdan etkilenen küçük bir bölgeye sahip kaynaklarla sonuçlanır. Bu bölümde lazer kaynağında oluşan anahtar deliğinin incelendiği çalışmalara yer verilmiştir.



Şekil 1. Lazer kaynağında anahtar deliği oluşumu [17].

İki bileşen arasında boşluk olması lazer kaynak işlemleri sırasında kusurlara neden olabilir. Bu çalışmada süreç, çoklu fizik CFD modellemesi aracılığıyla üst üste binme konfigürasyonunda iki paslanmaz çelik plaka için incelenmiştir. Sonuçlara göre, optimize edilmiş bir enerji dağılımına ve dolayısıyla iyileştirilmiş bir kaynak kalitesine izin veren uyarlanmış ışın demeti şekilleri önerilmiştir. Dolgu eksikliğinin ana kusuru, ışın şekillendirme yoluyla tam olarak dengelenmesi zordur ve ek bir kaynak malzemesi gerektirir. Nüfuziyet ve dikiş orta genişliğini etkilemek için daha küçük nokta ve iki eş merkezli ışın olmak üzere iki farklı teknik denenmiştir. Nüfuziyet azalmasına rağmen, dikiş orta genişliği ve üst genişliğinde bir azalma fark edilmiştir. Eliptik bir noktanın kullanılması, 0,4 mm'lik bir boşluk konfigürasyonunda patlamaya neden olan bir

kararsızlığın kontrolüne izin vermiştir [18]. Paslanmaz çeliğin Nd: YAG lazer kaynağında kaynak havuzu ve anahtar deliğinin görsel algılamaya dayalı görüntü işleme araştırılmıştır. İyi bir kaynak kalitesi elde etmek için kalite kontrol uygulamak gereklidir ve lazer kaynak işleminde birçok etkili faktör vardır. Kaynak kalite kontrolünü gerçekleştirmenin en iyi yolu kalite bilgisini elde etmektir. Kaynak havuzunda ve anahtar deliğinde bol miktarda kaynak kalite bilgisi bulunur. Paslanmaz çeliğin Nd: YAG lazer kaynağını hedefleyen bir koaksiyel görsel algılama sistemi inşa edilmiştir. Kaynak havuzu ve anahtar deliği görüntüleri elde edilmiştir. Görüntülerdeki kaynak havuzu ve anahtar deliğinin gri karakterine dayalı olarak bir görüntü işleme algoritması tasarlanmıştır. Araştırmanın başlangıç noktası ve arama kriteri kaynak havuzu ve anahtar deliği kenarı sırasıyla belirlenmiştir. Koaksiyel bir görsel algılama sistemi oluşturulmuştur ve kaynak havuzu ve anahtar deliğinin net görüntüsü alınmıştır. Kaynak havuzu ve anahtar deliğinin görüntü karakterinin analizine dayalı olarak Gauss filtre algoritması, kenar iyileştirme algoritması ve kenar izleme algoritması tasarlanmıştır. Kaynak havuzu ve anahtar deliği kenarlarının başlangıç noktası ve arama kriterleri belirlenmiştir ve kaynak havuzu ve anahtar deliği kenarları çok iyi çıkarılmıştır [19]. 321 paslanmaz çeliğin tek ve çift nokta lazer kaynağı sırasında ortak anahtar deliğinin akış dinamiği incelenmiştir. Şekil 2’de, hesaplama bölgesinin geometrisi ve sınır koşulları gösterilmiştir. Sonuçlar, anahtar deliği ve kaynak havuzunun daha yüksek stabilitesi nedeniyle çift nokta lazer kaynağının daha pürüzsüz, daha düzenli kaynak dikişleri ürettiğini göstermiştir. Çift nokta lazer kaynağı, yukarı doğru hareket ve eriyik akışında girdapların olmaması nedeniyle daha az gözenekli ve daha homojen bir nikel dağılımına sahip bir kaynak dikişi üretmiştir. Çift nokta lazer kaynağı, kaynak havuzunun genişliği boyunca daha yüksek eriyik akış hızı nedeniyle daha geniş bir kaynak havuzu üretmiştir [20].



Şekil 2. Çift nokta lazer kaynağı sayısal modelinin geometrisi ve sınır koşulları [20].

Paslanmaz çeliğin lazer kaynağı sırasında geçici anahtar deliğindeki buhar bulutunun dinamiği incelenmiştir. Sonuçlar, dinamik lokal buharlaşma nedeniyle, anahtar deliği açıklığından çıkan buhar bulutunun yüksek frekanslı salınımda olduğunu göstermiştir. Bu tutarlılık, püskürtülen buhar bulutunun salınımlarının, lazer kaynağı sırasında anahtar deliği kararsızlığı ile yakından ilişkili olduğunu açıkça göstermiştir. Ayrıca, anahtar deliği açıklığı etrafındaki buhar akışı bölgesinde negatif basıncın atmosfer basıncından birkaç yüz paskal daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu basınç, özellikle anahtar deliği açıklığından çıkan metalik buharın hızı yüksek olduğunda, özellikle arka anahtar deliği duvarının yakınında güçlü bir girdap akışına neden olmuştur. Bu akışın etkisi altında, anahtar deliğinin içindeki karmaşık akıştan dolayı ortam gazı anahtar deliğine dahil olmuş

ve çok kısa bir süre içinde 0,2 ms'den daha düşük kabarcıklara hapsolmuştur [21]. Diğer bir çalışmada paslanmaz çeliklerin ayarlanabilir halka modu lazer kaynağı incelenmiştir. Halka şeklindeki lazer ışını ve gauss lazer ışınının bir kombinasyonu olarak, ayarlanabilir halka modu (ARM) lazer, lazer bazlı kaynak işlemini stabilize etmek için gerekli bir teknolojidir. 304L paslanmaz çeliğin ARM lazer kaynağı, 5-100 mm/s arasında değişen kaynak hızlarında lazer modlarının halka lazer modu, tek başına merkez lazer noktası ve halka/merkez ikili noktalar gibi farklı şekilleri altında deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, anahtar deliği girişinin proses varyasyonunun, farklı kaynak enerjisi modları ile farklılık gösterdiğini ve ana farkın, anahtar deliği uzunluğundaki varyasyondan geldiğini göstermiştir. Plazma yoğunluğu, farklı lazer ışını kaynağı biçiminde anahtar deliği girişi ile pozitif bir ilişkiye sahip olmuştur. Kesitin füzyon verimliliği, farklı lazer ışınlarıyla oldukça farklı olmuştur [22]. Paslanmaz çeliğin yüksek güç lazer kaynağında dinamik anahtar deliği davranışı ve anahtar deliği değişkenliği incelenmiştir. Bu çalışmada, paslanmaz çeliğin fiber lazer kaynağındaki dinamik anahtar deliği davranışını ve anahtar deliği değişkenliğini incelemek için bir lazer ışınının gerçek zamanlı çoklu yansımalarını, adyabatik kabarcık modelini ve kayma gerilimini dikkate alan üç boyutlu bir sayısal model geliştirilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar, anahtar deliği genişliğinin, paslanmaz çeliğin fiber lazer kaynağı sırasında anahtar deliği derinliğinden daha önce yarı kararlı duruma geçtiğini göstermiştir. Lazer gücü arttırıldığında, anahtar deliği derinliği/genişlik oranı artmıştır, bu nedenle anahtar deliği daha fazla kararsızlaşmış, ön anahtar deliği duvarının ortalama eğim açısı azaltılmıştır [23]. 10 kW fiber lazer ışını ile 304 östenitik paslanmaz çelik levhaların dikiş kaynağında penetrasyon oluşumu incelenmiştir. 3 m/dak veya daha düşük kaynak hızlarında, herhangi bir fiber lazer nokta çapında gözeneklilik oluşmuştur. Yetersiz dolgu ile ilgili olarak, sıçrama oluşumu, esas olarak lazer kaynaklı bir duman bulutu güçlü bir kesme kuvvetinden etkilenmiştir ve bir anahtar deliği girişinden dışarı üfleyen duman bulutu yönünün kontrol edilmesiyle büyük ölçüde azaltılmıştır. Anahtar deliği davranışı, gözenekliliğin önlenmesine yol açan nitrojen koruyucu gaz kullanılarak stabilize edilmiştir. Sonuç olarak, 10 kW lazer gücü 18 mm derinlikte sağlam kaynaklar üretilmiştir [24]. Ayarlanabilir halka modlu lazer ışını ile paslanmaz çeliğin kaynağı sırasında anahtar deliği dinamik durumu ve sıçrama davranışının incelendiği çalışmada; halka lazer ışını, lazer kaynaklı anahtar deliği açıklığını genişleterek önemli ölçüde kaynak sıçramasını azalttığı gözlemlenmiştir [25].

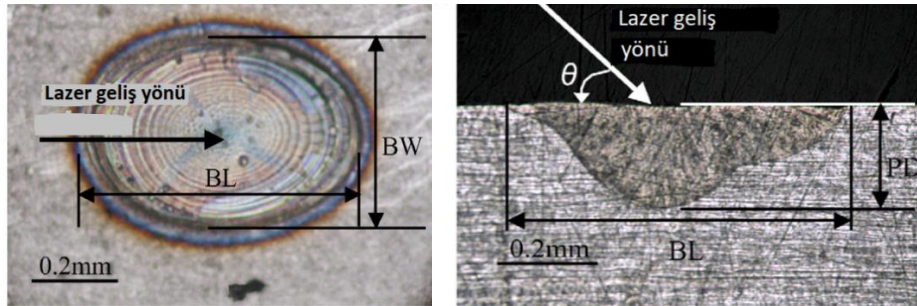
Bu bölümde incelenen mevcut çalışmalara göre anahtar deliği oluşumunda birleştirilen iki parça arasında boşluk olması nüfuziyetin azalmasına neden olmaktadır. Darbeli Nd: YAG lazer kaynağı anahtar deliği modunda değişken sürelerde istenmeyen uçucu element kaybı kaynak metali bileşimini ve alaşım özelliklerini etkiler. Yüksek güçlü fiber lazer kaynağında kaynak hız aralığının değişimi lazer ışını emilimini azaltmakta ve bu da anahtar deliğinin oluşumunu etkilemektedir. Lazer kaynağında daha düzgün kaynak dikişi elde etmek için anahtar deliği ve kaynak havuzunun daha stabil olması gerekmektedir. Anahtar deliği duvarlarında tümseklerin varlığı anahtar deliğinin kararsız hale gelmesine neden olur. Bu kararsızlık kaynak dikişinin yapısını bozar. Fiber lazer kaynağı sırasında oluşan metalik buhar bulutu ve gözenek kusurları içerisindeki hava gaz sıkışması anahtar deliği kararsızlığı ile yakından ilişkilidir. Anahtar deliği içindeki buharlaşma hızı, besleme hızı ve lazer ışını gücü gibi proses parametrelerine bağlılık gösterir. Farklı kaynak enerjisi modları ile anahtar deliği uzunluğu değişir. Plazma yoğunluğu, anahtar deliği girişi ile pozitif bir ilişkiye sahiptir. Fiber lazer kaynağında lazer gücü arttırıldığında anahtar deliği derinliği/genişlik oranı artmıştır, bundan dolayı anahtar deliği daha kararsız hale gelmiştir.

1.2. Lazer kaynak parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri, malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sıcaklık dağılımına etkilerinin incelenmesi

Lazer kaynağı ile üretilen kaynakların kalitesi ve şekli kaynak parametrelerine bağlıdır. Bu temel kaynak parametreleri; lazer gücü, lazer ışını çapı, kaynak hızı, iş parçasının yüzeyine odaklanan ışının doğruluğu, sağlanan koruyucu gazın türü, miktarı ve yönü, kaynaklı malzemenin özellikleridir. Lazer güç yoğunluğuna bağlı olarak mikro kaynak, iletim kaynağı, derin kaynak ve plazma kaynağı olmak üzere birkaç lazer ışını kaynağı yöntemi vardır [26]. Gözeneklilik, kaynaklı paslanmaz çelik alaşımının çekme mukavemetini etkileyen kusurlardan biri olarak bilinir, ayrıca ısı işlem sonrası mikro yapının α 'dan β 'ya geçişi, çekme mukavemetinde azalmaya neden olur. İş parçasının odak noktası ile üst yüzeyi arasındaki mesafe olan odak uzaklığı, kaynaklı levhanın çekme özellikleri üzerinde etkilidir. Odak noktasındaki değişiklik, penetrasyon derinliğinde ve kaynak genişliğinde bir değişikliğe yol açar. Defokus mesafesi pozitif veya negatif olabilir, negatif odak mesafesinin tane büyüme oranını düşürme avantajı vardır, böylece kaynaklı kısmın gerilme mukavemetini artırır [27]. Bu bölümde lazer kaynak parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri, malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sıcaklık dağılımına etkilerinin incelendiği çalışmalara yer verilmiştir.

Demiryolu endüstrisinde lazer kaynağı uygulamaları ile ilgili çalışma yapılmıştır. Hafif, pas önleyici, düşük maliyetli bakım ve basit üretim süreci gibi pek çok avantajla yüksek seviye paslanmaz çelik demiryolu araçlarının üretimi, Avrupa, Amerika ve diğer gelişmiş ülkelerin kalkınma stratejisi haline gelmiştir. Yan panel yapısı, kısmi nüfuziyetli lazer kaynağı ile kaliteli yüzey ve yüksek yapı mukavemeti elde edilebilir. Bu çalışmada lazer kaynağının, demiryolu araçlarının imalatı için yeni teknoloji olacağı belirtilmiştir. Kaynak hızının artmasıyla füzyon bölgesi alanı keskin bir şekilde düşmüştür. Bu, lazer kaynağının diğer kaynak işlemleriyle karşılaştırıldığında en dikkat çekici özelliklerinden biri olan düşük ısı girdisini yansıtır. Lazer kaynağında, lazer gücü çok yüksekse, odak lensine sıçrama artacak ve lens patlaması riskini artıracaktır. Bu yüzden daha düşük lazer gücü seçilmelidir. Defokus mesafesi, numune yüzeyi ile optik odak noktası arasındaki mesafedir. Hem nüfuziyet derinliği hem de yüzey kalitesi üzerindeki etkisini incelemek için, odak dışı bırakma mesafesi değiştirilerek bir bindirme bağlantısı yapılmıştır. Odaklanma mesafesi değiştirilerek nüfuziyet derinliği önemli ölçüde azaltılmıştır [28]. 304L paslanmaz çeliğin diyot lazer kaynağı çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, 15 kW laserline diyot lazer kullanılarak paslanmaz çeliğin kaynağında derin nüfuziyete ulaşmanın fizibilitesi incelenmiştir. Eriyik çalışmasına göre lazer gücünü 9–15 kW arasında artırarak ya da kaynak hızını 3 m/dak–1 m/dak arasında düşürerek ısı girdisi ile nüfuziyet ve kaynak genişliğinde bir artış olduğu görülmüştür. 12 mm'ye kadar eriyik nüfuziyetleri elde edilmiştir. Artan kaynak hızının katılma taneciklerini ve alt tanecik boyutunu azalttığı gösterilmiştir. Daha yüksek ısı girdilerinde kaynak merkez çizgisi boyunca çatlaklar gözlenmiştir. 9-13 kW lazer güçlerinde ve 1,5 m/dak kaynak hızında iyi eriyik kaynakları elde edilmiştir. 10 mm kalınlığındaki plakaların alın kaynağında, 12 kW lazer gücünde ve 1,5 m/dak kaynak hızında kaynak uzunluğu boyunca tam nüfuziyet başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Yalnızca ihmal edilebilir miktarda gözeneklilik vardır ve hiçbir zararlı yüzey altı kusuru kaydedilmemiştir. Kapağın yüzeyinde oksitlenme gözlemlenmiştir. Yüksek güçlü diyot lazerlerin derin nüfuziyet kaynağı yapabildiği kanıtlanmıştır. Anahtar deliği modu kaynağı sağlanmıştır. 10 mm kalınlık aralığındaki plakaların kaynağı için, sonuçlar, daha ekonomik yüksek güçlü diyot lazerlerin hem tedarik hem de işletim açısından daha pahalı olabilecek farklı lazer ışını sistemlerine rakip olabileceğini ortaya koymuştur [29]. Paslanmaz çeliğin sürekli Nd: YAG lazer kaynağında yakın kızılötesi pirometri uygulaması denemesi yapılmıştır. Bu çalışmada,

iki boyutlu monokromatik ($0,860 \mu\text{m}$ dalga boyu, $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ görüş alanı, 40 ms edinim süresi) ve tek noktali çoklu dalga boyları ($1,3-1,573 \mu\text{m}$ spektral aralıkta, $800 \mu\text{m}$ dalga boyu, 6 ms edinim süresi) pirometreler, Nd: YAG sürekli lazer kaynağında yüzey sıcaklığı izleme için uygulanmıştır. Paslanmaz çelik plakalar için lazer gücü (600-2700 W), kaynak hızı (3-10 m/dak), koruyucu gaz akış hızı, yüzey kirliliğinin varlığı, benzer ve farklı plakalar arasında sabit veya değişken boşluk ve yanlış hizalama gibi varyasyonlarla deneyler gerçekleştirilmiştir. Tek noktali pirometre, güç ve hız değişimleri, kusurların varlığı gibi optimum değerlerden sıcaklık sapmasını tespit etmek için uygundur [30]. Lazer ışını enerjisinin ve geliş açısının paslanmaz çelik ince sacın darbeli lazer kaynağı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Paslanmaz çelik numune $0,6-1,2 \text{ J}$ lazer enerjisi aralığında ve $30-75^\circ$ geliş açısında lazer ışını geliş yönünün levha yüzeyine olan açısını kaynaklamak için darbeli bir Nd: YAG lazer kullanılmıştır. Kaynak yapılan noktanın enine kesit boyutu ve şeklini ölçmek için metalografi uygulanmıştır. Işının geliş açısının yüzeye dik olmaması durumunda, yüzeydeki ışınım alanı genel olarak eliptik olacaktır. Kaynaklı noktanın boyutu, Şekil 3'de gösterildiği gibi nüfuziyet derinliği (PD), dikiş uzunluğu (BL) ve dikiş genişliği (BW) ile karakterize edilir; burada sırasıyla, kaynaklı yüzeydeki eliptik nokta dikiş uzunluğu ve dikiş genişliği, uzun eksenin ve kısa eksenin uzunluğudur. Deneysel sonuçlardan, lazer enerjisi arttıkça, kaynak yapılan noktanın nüfuziyet derinliği, kaynak dikiş uzunluğu ve genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Lazer geliş açısı arttıkça, kaynak dikiş uzunluğu azalırken nüfuziyet derinliği ve kaynak dikiş genişliği artmıştır. Sonuçlar, kaynaklanmış noktanın şekli ve boyutunun sadece lazer enerjisine değil, aynı zamanda lazer ışınının geliş açısına da bağlı olduğunu göstermiştir [31].



Şekil 3. Lazer kaynaklı numune kesitinin metalografisi. Lazer kaynak parametresi: lazer geliş açısı= 45° ve lazer gücü= $0,9 \text{ J}$ [31].

Fotonik cihaz paketleme için 304 paslanmaz çeliğin Nd: YAG lazer kaynağı incelenmiştir. Bu araştırmada, 304 paslanmaz çeliğin üzerinde punta kaynağı oluşturmak için $1,064 \mu\text{m}$ dalga boyuna sahip ultra kompakt darbeli Nd: YAG lazer kullanılmıştır. Kaynak kalitesini belirlemek için nüfuziyet derinliğinin tane genişliğine oranı en kritik parametrelerden biri olarak kabul edilmiştir. Lazer ışını tepe gücü, darbe süresi ve vuruş sayısı arttıkça nüfuziyet derinliği ve tane genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Aksine, lazer ışını defokus konumu ve geliş açısı arttığında nüfuziyet derinliği azalmıştır. Bunun nedeni, lazer spot boyutunun genişlemesinden kaynaklanan lazer ışını yoğunluğunun azalmasıdır. Bu deneysel sonuçlar, güvenilir bir fotonik cihaz ambalajı için optimal bir lazer kaynak işlemine ilişkin bir referans sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar 304 paslanmaz çeliğin Nd: YAG lazer kaynak tekniğini kullanan fotonik cihaz ambalajı için bir temel malzeme olarak kullanılmaya uygun olduğunu göstermiştir [32]. Metal levhaların lazer mikro nokta kaynağı, tıp, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Bu çalışmada, $254 \mu\text{m}$ kalınlığında AISI 302 paslanmaz çelik için bir proses

parametre seçimi incelenmiştir. Deneysel testler lazer gücü, maruz kalma süresi ve odak uzaklığı parametrelerini dikkate almıştır. En iyi sonuçlar, 16 mm odak mesafesinde odaklanmamış bir ışınla elde edilmiştir. Bu araştırmanın deneysel koşulları altında, AISI 302 ince levhaların lazer mikro nokta kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilmesi, 175 W ortalama lazer gücü ve 0.25 s maruz kalma süresi kombinasyonu ile elde edilmiştir. Isıdan etkilenen bölgenin genişliği, punta kaynak genişliğinden ortalama olarak %8 daha büyük bulunmuştur [33]. Darbe enerjisinin kaynak dolgusunun özelliklerindeki etkisini incelemek için darbeli Neodimyum: Yttriyum Alüminyum Garnet lazer kaynağı kullanılarak deneysel araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma için kullanılan temel malzeme, 100 µm kalınlığında AISI 316L paslanmaz çelik folyodur. Darbe enerjisi kontrolünün, iyi mekanik özellikler üretebildiği ve kaynak bağlantılarındaki süreksizlikleri azaltabildiği için ince folyo kaynak kalitesi için oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Kaynaklı bağlantıların nihai çekme mukavemeti, darbe enerjisi arttıkça ilk önce artmış ve daha sonra azalmıştır [34].

SS317L alaşımının lazer ışını kaynağında sıcaklık dağılımının sayısal simülasyon ve deney çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, 400W Nd: YAG lazer ışını kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmesi için 317L kalite paslanmaz çelik seçilmiştir. Çekme mukavemeti ve sıcaklık dağılımı çıktıları olarak kabul edilirken; kaynak akımı, frekans, darbe genişliği proses parametreleri olarak alınmıştır. Her parametrenin etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. MINITAB yazılımı yardımıyla her bir girdi faktörünün çıktı yanıtına katkısını bulmak için varyans analizi yapılmıştır. Sonlu eleman simülasyonları kullanılarak termal profilleri ve ısıdan etkilenen bölgeyi elde etmek için proses parametrelerinin optimize edilmiş değerleri kullanılmıştır. İşlemin sonlu elemanlar hesabı, ANSYS sonlu elemanlar kodunda bulunan parametrik tasarım dili ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonu ve deneyler kullanılarak elde edilen sıcaklık değerleri, %12'lik bir hatayla oldukça iyi bir şekilde eşleşmiştir [35]. Lazer kaynaklı ultra yüksek mukavemetli paslanmaz yay çeliği bindirmeli bağlantıların çekme ve yorulma özellikleri ile ilgili çalışma yapılmıştır. Çalışma, lazer kaynaklı basit panel yapılarında 0,3 mm kalınlığında ultra yüksek mukavemetli paslanmaz yay çeliğinin kullanılabilirliğini araştırmak için yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinin sonuçları, kaynakların ısıdan etkilenen bölgesinde yumuşamış alan olduğunu göstermiştir. Kaynak uyuşmazlığı nedeniyle kaynak dikişlerinde önemli bir gerinim sertleşmesi meydana gelmiştir. Test edilen sürekli bindirmeli bağlantıların kesme dayanımı, temel malzemenin akma dayanımına kıyasla biraz daha düşmüştür. İncelenen bindirmeli bağlantıların yorulma mukavemeti, dinamik olarak yüklenen basit panel yapılar için kabul edilebilir seviyededir ve kaynak dikişlerinin yorulma mukavemeti, uygulamada kaynak tipinden ziyade kaynak alanına bağlı olduğu vurgulanmıştır [36]. Lazer kaynaklı östenitik paslanmaz çeliğin korozyon davranışı karşılaştırılmıştır. Östenitik paslanmaz çelik, olağanüstü özelliklerinden dolayı nükleer reaktörler, gemilerin iç kısımları ve valf gövdesi gibi çeşitli mühendislik uygulamaları için en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir. Özellikle lazer kaynak yardımı ile malzemenin etkili bir şekilde birleştirilmesine yardımcı olan kaynak, imalatta önemli bir işlemdir. Korozyon, çevresel tahribata büyük katkı sağlayan tüm metalik malzemeleri de etkileyen bir olgudur. Petrol, havacılık ve denizcilik gibi tüm imalat endüstrileri için ortak bir sorundur. Sıcaklıktaki artış, korozyon hızı üzerinde önemli kimyasal reaksiyonlara neden olmuştur. Seçilen malzemede bulunan bileşim, özellikle asidik ortamlarda korozyon hızının düşürülmesine katkı sağlamıştır [37]. Yüzey metodolojisi ile kaynak hatalarını azaltmak amacıyla 316L paslanmaz çelik parçanın bindirme bağlantısı üzerinde darbeli Nd: YAG lazer kaynak parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla maksimum güç, darbe süresi ve frekansın etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, artan güç ve

azalan frekans ile yetersiz dolumun arttığını, artan darbe süresi ile önce arttığını ve daha sonra azaldığını göstermiştir; bunu etkileyen en önemli parametre ise etkisi %65 olan güç olmuştur [38]. Farklı koruyucu gazlar kullanılarak AISI 304 levhanın lazer kaynağında gözeneklerin giderilmesi incelenmiştir. 304 paslanmaz çeliği kaynaklamak için 10 kw'lık bir lazer gücü ve Ar, N₂ ve gazsız olmak üzere farklı koruyucu gazlar kullanılmıştır. Tüm lazer kaynaklarında kabarcıklar üretilmiştir. Ar'da yapılan 304L paslanmaz çelik lazer kaynağında birçok gözenek tespit edilmiştir. N₂'de yapılan lazer kaynağında neredeyse hiç gözenek bulunmamıştır. Sıvı eriyik havuzunda N₂ kabarcıklarının çözünmesi, 304L lazer kaynaklarındaki gözeneklerin giderilmesine yol açmıştır [39]. Yüksek hızlı tarama sistemli tek modlu sürekli kaynak fiber lazer kullanılarak ince paslanmaz çelik sacların lazer mikro kaynağının özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Sabit enerji yoğunluğu koşulunda tarama hızının artmasıyla kaynak dikişi genişliği ve derinliği artmıştır. Koruyucu gaz kullanımı, pürüzsüz füzyon dikiş elde etmek için çok etkili olmuştur ve mikro ışın nokta ve yüksek hızlı lazer tarama kombinasyonu, ultra ince paslanmaz çelik levhaların uygun bir bindirme kaynağı elde edilmesini mümkün kılmıştır [40]. Üst üste bindirme bağlantılı SUS301L paslanmaz çeliğin füzyon bölgesi şekli ve nihai yüzey kalitesi, lazer kaynak parametrelerinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Üst üste kaynak bağlantıları, sürekli dalga modunda maksimum 4 kW çıkışlı bir Nd: YAG lazer kullanılarak yapılmıştır. Lazer gücü, kaynak hızı ve odak mesafesini içeren lazer kaynak parametre kombinasyonları, dış yüzeyde kaynak izi olmayan ve dirençli nokta kaynağından daha yüksek çekme mukavemeti olan bindirme bağlantıları üretilmiştir. Füzyon bölgesi, lazer ışınının eksenini etrafında simetriktir. Kaynakların hiçbirinde kaynak çatlağı veya gözeneklilik bulunmamıştır [41].

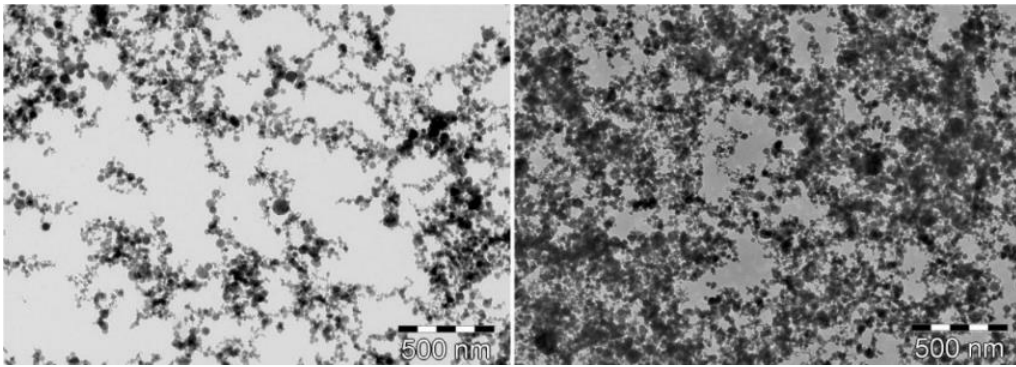
Bu bölümde yapılan çalışmalara göre lazer kaynağı ile üretilen kaynakların şekli ve kalitesi kaynak parametrelerine bağlıdır. Demir yolu endüstrisinde kullanılan lazer kaynağında hem kaynak hızı hem de odak uzaklığı sabit tutularak, lazer gücünün artmasıyla nüfuziyet derinliği keskin bir şekilde artmıştır. Kaynak hızının artmasıyla füzyon bölgesi alanı keskin bir şekilde düşmüştür. Lazer gücü çok yüksekse, sıçrama artacak ve lens patlaması riskini artıracaktır. Bu yüzden daha düşük lazer gücü seçilmelidir. Defokus mesafesi, numune yüzeyi ile optik odak noktası arasındaki mesafedir. Hem nüfuziyet derinliği hem de yüzey kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Odaklanma mesafesi değiştirilerek nüfuziyet derinliği önemli ölçüde azaltılmıştır. Paslanmaz çeliğin diyot lazer kaynağı çalışmasında, lazer gücünü artırarak ya da kaynak hızını düşürerek ısı girdisi ile nüfuziyet ve kaynak genişliğinde bir artış olduğu görülmüştür. 12 mm'ye kadar eriyik nüfuziyetleri elde edilmiştir. Artan kaynak hızının katılma taneciklerini ve alt tanecik boyutunu azalttığı gösterilmiştir. Daha yüksek ısı girdilerinde kaynak merkez çizgisi boyunca çatlaklar gözlenmiştir. Nd: YAG lazer kaynağında kaynak çalışma parametrelerini optimize etmek ve kaynak kalitesini kontrol etmek için pirometreler geliştirilip, renk parlaklık sıcaklığı kullanılarak gerçek sıcaklık, ısıtma/soğutma oranları ve katılma süresi bulunmuştur. Lazer kaynak proses parametreleri, kaynak dikişinin profili ve kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Lazer enerjisi arttıkça, kaynak yapılan noktanın nüfuziyet derinliği, kaynak dikiş uzunluğu ve genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Lazer geliş açısı arttıkça, kaynak dikiş uzunluğu azalırken nüfuziyet derinliği ve kaynak dikiş genişliği artmıştır. Kaynaklanmış noktanın şekli ve boyutunun sadece lazer enerjisine değil, aynı zamanda lazer ışınının geliş açısına da bağlı olduğu gözlenmiştir. Kaynak kalitesini belirlemek için nüfuziyet derinliğinin tane genişliğine oranı en kritik parametrelerden biri olarak kabul edilmiştir. Lazer ışını tepe gücü, darbe süresi ve vuruş sayısı arttıkça nüfuziyet derinliği ve tane genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Aksine, lazer ışını defokus konumu ve geliş açısı arttığında nüfuziyet

derinliği azalmıştır. Yüksek lazer güç yoğunluğu bağlantı ara yüzey sıcaklığında artışa neden olmaktadır. Odak uzaklığının düşürülmesi, sıcaklığı önemli ölçüde yükseltmiştir. Kaynak dikişlerinin yorulma mukavemeti, uygulamada kaynak tipinden ziyade kaynak alanına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Korozyon hızı, ağırlık kaybı yöntemiyle değerlendirilmiştir. Sıcaklıktaki artış, korozyon hızı üzerinde önemli kimyasal reaksiyonlara neden olmuştur. Seçilen malzemede bulunan bileşim, özellikle asidik ortamlarda korozyon hızının düşürülmesine katkı sağlamıştır.

1.3. Lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi

Paslanmaz çelikler üzerinde lazer kaynağı uygulaması, kaynaklı bağlantının orta bölgesinde malzemenin füzyonuna yol açar. Kaynak sırasında en yüksek sıcaklığın malzemenin ergime noktasını aştığı bu bölge füzyon bölgesini oluşturur. Bu bölge yoğun ısıtma ve soğutma termal döngüleri yaşadığından, mikro yapısı neredeyse tamamen martenzitiktir ve sertlik seviyeleri ana metalin sertliğinin 1,5-2 katı düzeyindedir. Genel olarak, füzyon bölgesi sertliği, çeliğin karbon eşdeğeri ile doğrudan doğrusal bir ilişki sunar [42]. Bu bölümde lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalara yer verilmiştir.

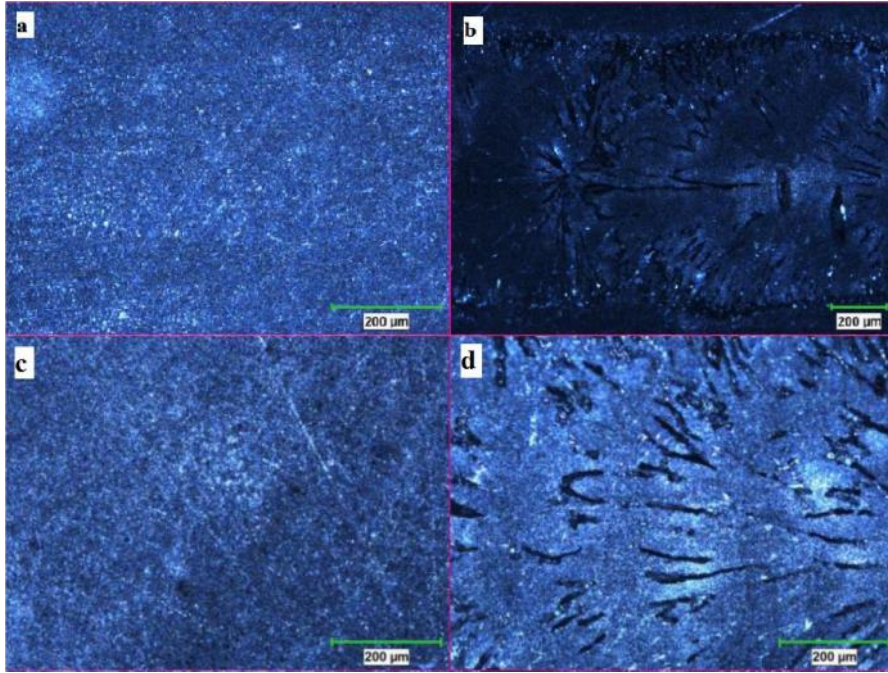
Lazerle uzaktan kaynaklama sırasında nanoparçacık oluşumu araştırılmıştır. Yüksek parlak lazer kaynaklarının yeni gelişmeleri ve özellikleri, lazer uzaktan işleme alanında yeni uygulamalara yol açmıştır. Şekil 4, paslanmaz çeliğin lazer kaynağı sırasında oluşan parçacıkların iki transmisyon elektron mikroskobu görüntüsünü göstermektedir. Parçacıkların transmisyon elektron mikroskobu görüntüleri, 1,6 kW çıkış gücüne sahip kaynak işlemi sırasında daha yüksek parçacık yoğunluğunun ortaya çıktığını göstermektedir. Sonuçlar, çok modlu bir fiber lazer kullanılarak paslanmaz çeliğin kaynak işlemi sırasında önemli bir nano parçacık oluşumunu göstermektedir. Bu parçacık oluşum süreci güçlü dalgalanmalar sunar. Bu nedenle, bu dalgalanmalar, gelen lazer radyasyonu ile buhar bulutu arasındaki etkileşimin kaynak işlemi üzerindeki ihmal edilemez bir dinamik etkisini doğrular [43].



Şekil 4. 1 m/dk'lık bir besleme hızı kullanılarak paslanmaz çeliğin ablasyon işlemi sırasında oluşturulan nano parçacıkların transmisyon elektron mikroskobu görüntüsü. a) 1 kW lazer çıkış gücü. b) 1,6 kW lazer çıkış gücü [43].

Lazer kaynaklı martenzitik paslanmaz çeliklerin dikiş geometrisi, mikro yapı gelişimi ve mikro sertlik profili üzerine deneysel araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, enerji yoğunluğunun kaynak dikişi geometrisi üzerindeki etkileri ve çeşitli kaynak bölgelerindeki mikro yapıların gelişimi araştırılmıştır Ara yüzdeki kaynak direnci enerjisi

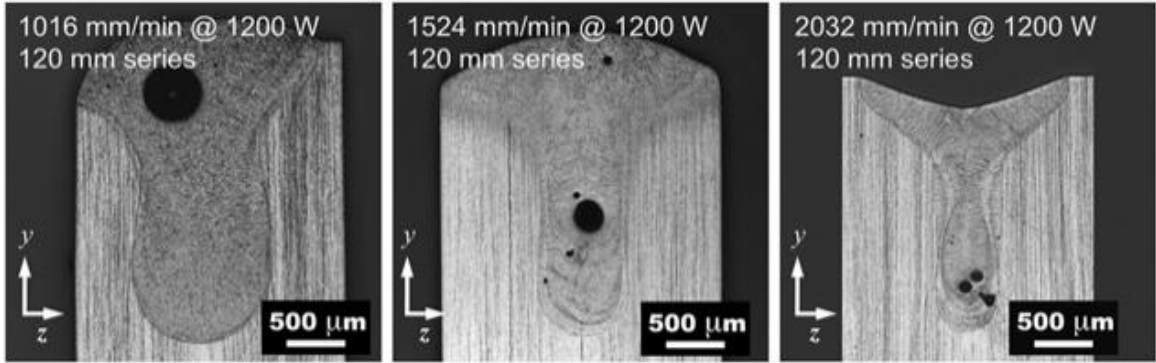
sınırlandırılmıştır ve dikiş profili yalnızca belirli bir enerji girişi sınırından sonra konikten silindirik şekle değişmiştir. Füzyon bölgesindeki mikro yapılar, artan enerji girişi ile hüreselden sütunlu dendritik ve eş eksenli dendritiğe değişim göstermiştir. Füzyon bölgesi boyunca mikro yapıların morfolojisindeki varyasyon, kaynakta belirginleşmiştir. Birincil ferritin tutulması nedeniyle füzyon ve ısıdan etkilenen bölgeler arasında ayrı bir bölge oluşmuştur. Yerel mikro sertlik, füzyon bölgesinde zirveye ulaşmıştır ve füzyon bölgesinden dış kabuğun ana metaline kadar kademeli olarak azalmıştır. İç kabukta, ısıdan etkilenen bölgede pik mikro sertlik oluşmuştur ve yerel füzyon bölgesine ve ısıdan etkilenen bölgeye göre yumuşama füzyon sınırında görülmüştür [44]. İnce paslanmaz çelik sacların fiber lazer ile kaynak edilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada, 0,6 mm ferritik paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Bu yapıda karıncalanma ve korozyon oluşumunun taneler arasında olduğu gözlenmiştir. Şekil 5’de hızlandırılmış korozyon sonucunda meydana gelen yüzeyin durumu görülmektedir. Şekil 5a ve 5b’de, yüzeyde aşırı oksitlenme meydana gelmiş ve bu oksit tabaka ile ana metal bölgesinin kaplandığı ve yüzeyin delikli ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesindeki tanelerarası korozyonun çatlak boyutuna ulaştığı tespit edilmiştir. Şekil 5c ve 5d’de, ana metalin aşırı delikli ve gözenekli bir yapıya ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesinde tanelerarası korozyonda aşırı bir artış olduğu ve dayanımın kaynak gücüyle birlikte arttığı gözlemlenmiştir [45].



Şekil 5. a-b) 20. saat ve c-d) 119. saat sonunda hızlandırılmış korozyon sonucunda meydana gelen mikroyapı görüntüleri [45].

Kaynak parametrelerinin lazer kaynaklı SUS301L paslanmaz çelik bindirme kaynağının kaynak oluşum kalitesi ve çekme-kayma özelliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, SUS301L östenitik paslanmaz çelik plakaların bindirme bağlantılarının lazer kaynağı dolgu teli ile yapılmıştır. Sonuçlar, kaynak bölgesinin kolumnar östenit ve az miktarda ferritten oluştuğunu göstermiştir. Yönlendirme yönü, 0,5 mm tel mesafesi, 0,5 mm lazer geliş konumu ve 0° lazer geliş açısı koşullarında daha iyi kaynak kalitesi elde edilmiştir. Çatlak her zaman kaynağın kalınlığının en küçük olduğu yerde bulunmuştur. Kaynak genişliği ile en küçük kaynak kalınlığı arasında doğrusal bir ilişki vardır.

Maksimum çekme-kesme kuvveti 24,46 kN olarak bulunmuştur [46]. Lazer modunun 316L paslanmaz çelik kaynak bağlantısının mikro yapı ve korozyon direncine etkisi incelenmiştir. Farklı kaynak yöntemleri, farklı mikro yapıya, mekanik özelliklere ve korozyon direncine sahip kaynak bağlantıları üretebilir. Bu çalışmanın amacı Nd: YAG ve lazerleri ile hazırlanan 316L paslanmaz çeliğin iki kaynak ek yerinin farklılıklarını araştırmaktır. Sonuçlar, lazerin kaynak bağlantısı, kaynak metal bölgesi ve ısıdan etkilenen bölgenin daha büyük boyutuna sahip Nd: YAG lazer ve dendrit kolu aralığı ve ikincil dendritik kol aralığı ile karşılaştırıldığında, kaynak metalinin her iki tarafında daha büyük ısı girdisi altında aynı olduğu gözlemlenmiştir. Nd: YAG lazerin ısıdan etkilenen bölgesinde daha fazla ferrit ve karbür çökeltisi, tüm kaynaklı bağlantının korozyon direncine katkıda bulunmuştur. Lazer kaynak metalinin merkezindeki tane boyutu daha kabadır ve kaynak metalinin korozyon direncinin Nd: YAG lazerden daha düşük olmasına neden olmuştur [47]. Sürekli dalga Nd: YAG lazer ile yapılan sabit kenarlı birleşimler, yüksek hızlı katılma olaylarında işleme ve mikro yapı arasındaki bağıntı için 304L paslanmaz çelik incelenmiştir. Geleneksel metalografi ile birleştirilen mikrobilgisayarlı tomografi, bu geniş kullanım ve uygulanabilirlik sistemindeki kaynakların kalitatif ve kantitatif karakterizasyonunu sağlamıştır. Şekil 6'daki metalografik kesitlerde, artan kaynak hızı ve odak mesafesi ile nüfuziyet derinliğinin kaynak genişliğine oranındaki tipik eğilimler ortaya koyulmaktadır. Burada ayrıntılı olarak açıklanan karakterizasyon, milimetre ölçekli lazer kaynaklı mikro yapıların niteliksel ve niceliksel olarak anlaşılmasında bir ilerleme sağlar. Boşluk hacimleri, frekans, şekil gibi hem makro hem de mikroyapısal özelliklerin ve hacim fraksiyonunun tümü, belgelenmiş işleme parametrelerindeki değişikliklerle belirgin şekilde değişir. Bu mikro yapılarda keşfedilen gözeneklilik şekillerinin küreler yerine elipsler olarak daha doğru bir şekilde tanımlandığı da gösterilmiştir [48].



Şekil 6. Anahtar deliği kaynak mikro yapılarını ve gömülü gözenekliliği gösteren 120 mm odak lens serisi için her kaynak hızında temsili kaynak kesitleri [48].

Dubleks paslanmaz çelik DSS 2205'in kaynağı, farklı ısı girişlerinde İterbiyum fiber lazer ile başarıyla gerçekleştirilmiştir. Azalan enerji girişi ile kaynak dikişinin genişliği daralmış ve bağlantının mekanik özellikleri iyileşmiştir. Kaynak metalinin mikro yapısında katılma çatlakları veya gözeneklilik gözlenmemiştir. Hüresel dendritik ve sütunlu dendritik taneler, kaynak metalinde gözlenen ana tane türleridir. 43 J/mm'lik ısı girişinde, kaynak metalinin dendritikler arası kolları, 21,5 J/mm'lik ısı girişinde kaynaklı numunelere kıyasla daha fazla Molibden ve Niyobyum ayrışmasına neden olmuştur. Çekme mukavemeti çalışması, sağlanan ısı düşük 21,5 J/mm olduğunda 890 MPa'lık maksimum mukavemeti ortaya koymaktadır. Bu mukavemet değeri ana metalinkinden fazla bulunmuştur [49]. AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çelik metallerin darbeli Nd:

YAG lazer kaynağıyla alın birleştirmeleri oluşturularak karşılaştırmalı çalışmalar yapılmıştır. Buna göre, düşük enerji girdi darbesi, temel malzeme bileşiminden bağımsız olarak, yüksek enerji girdi darbesine kıyasla ince tane yapısı ve gelişmiş mekanik özellikler ürettiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, temel malzemeler arasında 304 paslanmaz çelik, belirli bir parametrik koşul için 316 paslanmaz çelikten daha iyi mikroyapısal ve mekanik özellikler göstermiştir [50]. Farklı kalınlıklara sahip farklı östenitik paslanmaz çelik türlerinin füzyon bölgesi şekli ve nihai katılma yapısı, lazer parametrelerinin bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Hem plaka üzerindeki dikiş hem de otojen alın kaynağı bağlantıları, sürekli dalga modunda maksimum 5 kW çıkışlı bir karbon dioksit lazer kullanılarak yapılmıştır. Ana metal kalınlığına bağlı olarak, lazer gücü, kaynak hızı, odak dışı bırakma mesafesi ve koruyucu gaz kombinasyonlarının türü, tam nüfuziyete, minimum füzyon bölgesi boyutuna ve kabul edilebilir kaynak profiline sahip kaynak bağlantılarının üretilmesi için önemlidir. Hem lazer gücünün hem de kaynak hızının bir fonksiyonu olarak ısı girdisinin, kaynakların hem mikro yapı tipi hem de mekanik özellikleri üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Tüm lazer kaynaklarının mikro yapısı her zaman yaklaşık hacimce %2 veya 3 ferrit içeren ostenit olmuştur. Ancak lazer gücü ne kadar düşükse veya kaynak hızı ne kadar yüksekse, katılma yapısı o kadar iyi olur. Birincil ferrit veya karışık modlu katılma, çatlaksız kaynaklarla sonuçlanmıştır [51]. 12 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik plakaların derin penetrasyonlu lazer kaynağı, 10 kW yüksek güçlü fiber lazer kullanılarak yapılmıştır. İşlem parametrelerinin kaynak dikişi geometrisi üzerindeki etkisi incelenmiş ve optimal bağlantının mikro yapısı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, kalın plakaların yüksek güçlü fiber lazer kaynağında odak konumunun önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. İyi tam nüfuziyetli bağlantı elde etmek için kritik bir kaynak hızı aralığı vardır. Üst koruyucu gazın türü kaynak derinliğini etkilemiştir. Alt koruyucu gazın uygulanması, tüm kaynak işleminin stabilitesini artırmıştır ve hem üst hem de alt yüzeylerde iyi kaynak görünümleri sağlamıştır [52]. Dupleks paslanmaz çelik için lazer kaynağının mekanik ve korozyon davranışının incelendiği çalışmada; tüm malzeme içindeki kaynağın difüzyonunu karşılaştırmak için üst yüzey ve yan yüzey üzerinde işlenen mikro sertlik, ana metalden ITAB'a doğru kademeli olarak arttığı ve ardından kaynağın merkezindeki kaynak bölgesinde maksimum olduğu gözlemlenmiştir [53]. Lazer ışını kaynak parametrelerinin dupleks paslanmaz çeliğin yapısı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada; kalın levhaların yüksek güçlü fiber lazer kaynağı için numune yüzeyinin +3, +6 mm üzerinde odaklanma konumu tercih edilmiştir. Son derece hızlı ısı dağılımı yoluyla lazer kaynağı, kaynaklı bağlantıdaki ferrit içeriğini artırarak kaynağın korozyon direncini azalttığı gözlenmiştir [54]. Lazer ışını kaynağının dupleks paslanmaz çeliğin mikro yapısı, çekme dayanımı ve yorulma davranışı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada; Füzyon Bölgesi ve ITAB'daki malzeme, artan ferrit faz fraksiyonu ve Taylor faktörü nedeniyle ana malzemedekinden daha güçlü olduğundan, kaynaklı bağlantıların varlığı numunelerin çekme yükü koşulları altındaki mukavemetini azalttığı gözlenmiştir [55]. Lazer kaynaklı 304 paslanmaz çelik bağlantıların kaynaklanabilirliği, mikro yapısı ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada; kaynak tipi tip 1'den tip 3'e geçtikçe, bağlantıların dendrit kol aralığı merkez bölgede 3,6'dan 4,0 µm'ye, füzyon bölgesinde 4,6'dan 5,5 µm'ye ve epitaksiyel bölgede 2,3'ten 2,7 µm'ye hafifçe artmıştır, ayrıca birleştirmelerin çekme ve akma dayanımlarının da bir miktar azaldığı gözlenmiştir [56]. Dupleks paslanmaz çeliğin lazer kaynağının deneysel ve sayısal incelendiği çalışmada; metalürjik faz bileşenlerindeki değişiklikler ve eriyik havuzunda daha fazla miktarda intermetalik bileşik oluşumu nedeniyle mikrosertliğin kaynaklı bölgeden (350–380 HV) etkilenmeyen bölgeye (275–280 HV) sürekli olarak azalmasına neden olmuştur. Ayrıca soğuma hızının

daha yüksek olması nedeniyle füzyon bölgesinde yapıyı sertleştiren beynit yapısının olduğu gözlemlenmiştir [57].

Bu bölümde yapılan çalışmalara göre lazer ışını ve nano partiküller arasındaki etkileşimin proses üzerinde önemli bir etkisi vardır. Füzyon bölgesindeki mikro yapılar, artan enerji girişi ile hücrelerden sütunlu dendritik ve eş eksenli dendritiğe değişim göstermiştir. İnce paslanmaz çelik sacların fiber lazer ile kaynağında karıncalanma ve korozyon oluşumu taneler arasında oluşmuştur. Ayrıca, kaynak bölgesindeki tanelerarası korozyonun çatlak boyutuna ulaştığı tespit edilmiştir. Çatlak her zaman kaynağın kalınlığının en küçük olduğu yerde bulunmuştur. Nd: YAG lazerin ısıdan etkilenen bölgesinde daha fazla ferrit ve karbür çökeltisi, tüm kaynaklı bağlantının korozyon direncine katkıda bulunmuştur. Lazer kaynak metalinin merkezindeki tane boyutu daha kabadır ve kaynak metalinin korozyon direncinin Nd: YAG lazerden daha düşük olmasına neden olmuştur.

3. Sonuçlar

Bu yayında paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı incelenmiş ve literatürde mevcut bazı çalışmalardan derlenen sonuçlar analiz edilmiştir. Lazer ışını, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasından dolayı hızlı kaynak yapma yetkinliğine sahiptir. Bundan dolayı, lazer kaynaklı birleştirmelerde birim alanda daha düşük ısı girişine, yüksek nüfuziyet ve kaynaklı bölgede düşük çarpılma özelliklerine ulaşmak mümkündür. Ergimiş metalin oluşturduğu kaynak havuzunu oksitlenmeden korumak için koruyucu gaz kullanılır. Bu sayede kaynak sırasında işlem verimliliği artar ve kaynak kalitesi yükseltilmiş olur.

Lazer kaynakta derinlemesine nüfuziyet yöntemiyle elde edilen anahtar deliğinin incelendiği mevcut çalışmalar göstermektedir ki anahtar deliği oluşumunda birleştirilen iki parça arasında boşluk olması nüfuziyetin azalmasına neden olmaktadır. Yüksek güçlü fiber lazer kaynağında kaynak hız aralığının değişimi lazer ışını emilimini azaltmakta ve bu da anahtar deliğinin oluşumunu etkilemektedir. Anahtar deliği duvarlarında tümseklerin varlığı anahtar deliğinin kararsız hale gelmesine neden olur. Bu kararsızlık kaynak dikişinin yapısını bozar. Anahtar deliği içindeki buharlaşma hızı, besleme hızı ve lazer ışını gücü gibi proses parametrelerine bağlılık gösterir. Farklı kaynak enerjisi modları ile anahtar deliği uzunluğu değişir. Fiber lazer kaynağında lazer gücü arttırıldığında anahtar deliği derinliği/genişlik oranı artmıştır, bundan dolayı anahtar deliği daha kararsız hale gelmiştir.

Lazer kaynak parametrelerinin kaynakların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalara göre lazer kaynağı ile üretilen kaynakların şekli ve kalitesi kaynak parametrelerine bağlıdır. Demir yolu endüstrisinde kullanılan lazer kaynağında hem kaynak hızı hem de odak uzaklığı sabit tutularak, lazer gücünün artmasıyla nüfuziyet derinliği keskin bir şekilde artmıştır. Kaynak hızının artmasıyla füzyon bölgesi alanı keskin bir şekilde düşmüştür. Lazer gücü çok yüksekse, sıçrama artacak ve lens patlaması riskini artıracaktır. Odaklanma mesafesi değiştirilerek nüfuziyet derinliği önemli ölçüde azaltılmıştır. Paslanmaz çeliğin diyot lazer kaynağı çalışmasında, lazer gücünü artırarak ya da kaynak hızını düşürerek ısı girdisi ile nüfuziyet ve kaynak genişliğinde bir artış olduğu görülmüştür. 12 mm'ye kadar eriyik nüfuziyetleri elde edilmiştir. Artan kaynak hızının katılma taneciklerini ve alt tanecik boyutunu azalttığı gösterilmiştir. Daha yüksek ısı girdilerinde kaynak merkez çizgisi boyunca çatlaklar gözlenmiştir. Lazer enerjisi arttıkça, kaynak yapılan noktanın nüfuziyet derinliği, kaynak dikiş uzunluğu ve genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Lazer geliş açısı arttıkça, kaynak dikiş uzunluğu

azalırken nüfuziyet derinliği ve kaynak dikiş genişliği artmıştır. Kaynaklanmış noktanın şekli ve boyutunun sadece lazer enerjisine değil, aynı zamanda lazer ışınının geliş açısına da bağlı olduğu gözlenmiştir. Lazer ışını tepe gücü, darbe süresi ve vuruş sayısı arttıkça nüfuziyet derinliği ve tane genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Aksine, lazer ışını defokus konumu ve geliş açısı arttığında nüfuziyet derinliği azalmıştır.

Lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantının mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalara göre lazer ışını ve nano partiküller arasındaki etkileşimin proses üzerinde önemli bir etkisi vardır. Füzyon bölgesindeki mikro yapılar, artan enerji girişi ile hücrelerden sütunlu dendritik ve eş eksenli dendritiğe değişim göstermiştir. İnce paslanmaz çelik sacların fiber lazer ile kaynağında karıncalanma ve korozyon oluşumu taneler arasında oluşmuştur. Ayrıca, kaynak bölgesindeki tanelerarası korozyonun çatlak boyutuna ulaştığı tespit edilmiştir. Çatlak her zaman kaynağın kalınlığının en küçük olduğu yerde bulunmuştur. Nd: YAG lazerin ısıdan etkilenen bölgesinde daha fazla ferrit ve karbür çökeltisi, tüm kaynaklı bağlantının korozyon direncine katkıda bulunmuştur. Lazer kaynak metalinin merkezindeki tane boyutu daha kabadır ve kaynak metalinin korozyon direncinin Nd: YAG lazerden daha düşük olmasına neden olmuştur.

Lazer kaynak proses parametrelerinin malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve sıcaklık dağılımına etkilerinin incelendiği çalışmalara göre çekme mukavemeti ve sıcaklık dağılımı çıktılar olarak kabul edilirken; kaynak akımı, frekans, darbe genişliği proses parametreleri olarak alınmıştır. Yüksek lazer güç yoğunluğu bağlantı ara yüzey sıcaklığında artışa neden olmaktadır. Odak uzaklığının düşürülmesi, sıcaklığı önemli ölçüde yükseltmiştir. Kaynak dikişlerinin yorulma mukavemeti, uygulamada kaynak tipinden ziyade kaynak alanına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklıktaki artış, korozyon hızı üzerinde önemli kimyasal reaksiyonlara neden olmuştur. Seçilen malzemede bulunan bileşim, özellikle asidik ortamlarda korozyon hızının düşürülmesine katkı sağlamıştır.

Sonuç olarak konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre farklı avantajlar sunan lazer kaynak yöntemiyle, hassasiyeti yüksek bağlantılar ve derin nüfuziyet elde edilebilir. Lazer kaynağı yüksek kaynak hızı, dar bir ısıdan etkilenmiş bölge, çok küçük termal distorsiyonlar ve düşük ısı girdisine sahip olma gibi farklı özellikler sunmaktadır. Ancak, literatürde halen lazer kaynak yönteminin uygulama parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışma sayısı sınırlıdır. Gelecekte kaynak parametrelerinin optimizasyonu üzerine daha fazla çalışma yapılarak bu eksiklik giderilmelidir.

Kaynaklar

- [1] Tülbentçi, K., Paslanmaz çeliklerin kaynağı, 1. baskı, **Böhler Kaynak Dünyası**, 5-10 (1985).
- [2] Tülbentçi, K., MIG/MAG gazaltı kaynak yöntemi, 1. baskı, **Arctech**, İstanbul, 56-58 (1998).
- [3] Hafez, K. M. ve Katayama, S., Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates, **Quarterly Journal of The Japan Welding Society**, 27, 69-73, (2009).
- [4] Faerber, M. ve Berkmanns, J., Gases for increased laser welding productivity, **In: Proceedings of the ISATA Conference**, 791–798, (1996).
- [5] Kaluç, E., Paslanmaz çeliklerin kaynağı, 1. baskı, **Gedik Holding Kaynak Dünyası**, İstanbul, 1-22 (1996).

- [6] Yılmaz, R., Ostenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özellikleri, **El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi**, 4, 3, 598-605, (2017).
- [7] Davis, J.R., **Alloy Digest Sourcebook: Stainless steels**, ASM International, (2000).
- [8] Berkmanns, J. ve Faerber, M., Facts about laser technology: laser welding, (2005).
<https://www.laserdeal.com/>, (26.03.2022).
- [9] Aydın, K. ve Karaağaç, İ., Lazer kaynağı ve lazer kaynağının başlıca uygulamaları, **El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi**, 5, 2, 693-705, (2018).
- [10] Wu, S.K., Zheng, K. ve Zou, J. L., A study of the behavior and effects of nitrogen take-up from protective gas shielding in laser welding of stainless steel, **Journal of Manufacturing Processes**, 34, 477–485, (2018).
- [11] Merchant, V., **Laser beam welding**, In: Ahmed, N., editor, New developments in advanced welding, 1st Ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 83-84, (2005).
- [12] Kugler, T.R., **Fusion front penetration: Conduction Welding**, In: Ready, J.F., editor, LIA handbook of laser materials processing, 1st Ed., Magnolia Publishing Inc., FL, USA, 310-312, (2001).
- [13] Dumord, E., Jouvard, J.M. ve Grevey, D., Keyhole modeling during CW Nd: YAG laser welding, **In: Proceedings of SPIE**, 2789, 213–220, (1996).
- [14] Omoniyi, P. O., Mahamood, R. M. ve Akinlabi, E. T., Impact of process parameters of laser welding on the mechanical properties of Ti6Al4V, **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, 56, 5, 1074-1081, (2021).
- [15] Alhajhamoud, M.; Candan, L.; Ilgaz, M.A.; Cinar, I.; Ozbey, S.; Corovic, S.; Miljavec, D.; Kayahan, E., Laser welding of 316L austenitic stainless steel in an air and a water environment, **Materials**, 15, 2248, (2022).
- [16] Lacroix, D., Jeandel, G. ve Boudot, C., Spectroscopic studies of laser induced plume during welding with a Nd: YAG laser, **In: Proceedings of SPIE**, 2789, 221–227, (1996).
- [17] <https://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding>, (20.08.2022).
- [18] Drobnik, P., Otto, A. ve Vazquez, R. G., Simulation of keyhole laser welding of stainless steel plates with a gap, **Procedia CIRP**, 94, 731-736, (2020).
- [19] Gao, J., Qin, G. ve Yang, J., Image processing of weld pool and keyhole in Nd: YAG laser welding of stainless steel based on visual sensing, **The Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 21, 423-428, (2011).
- [20] Li, L., Xia, H. ve Ma, G., Flow dynamics during single- and dual-spot laser welding with one common keyhole of 321 stainless steel, **Journal of Materials Processing Technology**, 255, 841–852, (2018).
- [21] Pang, S., Chen, X. ve Shao, X., Dynamics of vapor plume in transient keyhole during laser welding of stainless steel: Local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity, **Optics and Lasers in Engineering**, 82, 28–40, (2016).
- [22] Wang, L., Mohammadpour, M. ve Gao, X., Adjustable Ring Mode (ARM) laser welding of stainless steels, **Optics and Lasers in Engineering**, 137, 106360, (2021).
- [23] Zhang, D., Wang, M. ve Shu, C., Dynamic keyhole behavior and keyhole instability in high power fiber laser welding of stainless steel, **Optics and Laser Technology**, 114, 1–9, (2019).

- [24] Kawahito, Y., Mizutani, M. ve Katayama, S., Defect formation mechanism and reduction procedure in 10 kw high power fiber laser welding of stainless steel, **Quarterly Journal of The Japan Welding Society**, 26, 3, 203–209, (2008).
- [25] Wang, L., Gao, X. ve Kong, F., Keyhole dynamic status and spatter behavior during welding of stainless steel with adjustable-ring mode laser beam, **Journal of Manufacturing Processes**, 74, 201–219, (2022).
- [26] Radek, N., Pietraszek, J. ve Goroshko, A., The impact of laser welding parameters on the mechanical properties of the weld, **AIP Conference Proceedings**, 2017, 020025, (2018).
- [27] Uzun, R.O., Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [28] Wang, H., Applications of laser welding in the railway industry, **Woodhead Publishing Limited**, (2013).
- [29] Alcock, J.A. ve Baufeld, B., Diode laser welding of stainless steel 304L, **Journal of Materials Processing Technology**, 240, 138–144, (2017).
- [30] Bertrand, P., Smurov, I. ve Grevey, D., Application of near infrared pyrometry for continuous Nd: YAG laser welding of stainless steel, **Applied Surface Science**, 168, 182-185, (2000).
- [31] Liao, Y.C. ve Yu, M. H., Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet, **Journal of Materials Processing Technology**, 190, 102–108, (2007).
- [32] Nawi, I.N., Saktioto ve Fadhalı, M., Nd: YAG laser welding of stainless steel 304 for photonics device packaging, **Procedia Engineering**, 8, 374–379, (2011).
- [33] Cedeno-Viveros L.D., Garcia-Lopez E. ve Vazquez E.V., Laser micro-spot welding of AISI 302 stainless steel sheets, **In Proceedings of SPIE**, Laser-based Micro and Nano processing XII. San Francisco, 1052018, (2018).
- [34] Ventrella, V.A., Berretta, J.R. ve de Rossi, W., Pulsed Nd: YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils, **Journal of Materials Processing Technology**, 210, 1838–1843, (2010).
- [35] Chandekar, V. ve Pradhan, S. K., Numerical simulation of temperature distribution and experimentation in laser beam welding of SS317L alloy, **Materials Today: Proceedings**, 27, 2758–2762, (2020).
- [36] Hietala, M., Jarvenpaa, A. ve Keskitalo, M., Tensile and fatigue properties of laser welded ultra high strength stainless spring steel lap joints, **Procedia Manufacturing**, 36, 131-137, (2019).
- [37] Gnanarathinam, A., Palanisamy, D. ve Manikandan, N., Comparison of corrosion behavior on laser welded austenitic stainless steel, **Materials Today: Proceedings**, 39, 649-653, (2020).
- [38] Pakmanesh, M.R. ve Shamanian, M., Optimization of pulsed laser welding process parameters in order to attain minimum under fill and undercut defects in thin 316L stainless steel foils, **Optics & Laser Technology**, 99, 30–38, (2018).
- [39] Sun, J., Nie, P., Feng, K., Li, Z., Guo, B. ve Jiang, E., The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases, **Journal of Materials Processing Technology**, 248,56–63, (2017).
- [40] Ismail, M.I.S., Okamoto, Y., Okada, A. ve Uno, Y., Experimental investigation on micro-welding of thin stainless steel sheet by fiber laser, **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, 4, 3, 314-320, (2011).
- [41] Hongxiao, W., Chunsheng, W., Chunyuan, S., Guangzhong, H., Ting, W. ve Jingfei, X., The study of laser welding parameters influence on fusion zone shape

- and surface quality of SUS301L stainless steel, **International Journal of Applied Engineering Research**, 4, 10, (2009).
- [42] Kurc-Lisiecka, A. ve Lisiecki, A., Laser welding of stainless steel, **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, 1, 98, 32-40, (2020).
- [43] Scholz, T., Dickmann, K. ve Ostendorf, A., Investigation of the formation of nanoparticles during laser remote welding, **Physics Procedia**, 41, 90 – 97, (2013).
- [44] Khan, M.M.A., Romoli, L. ve Ishak, R., Experimental investigation on seam geometry, microstructure evolution and microhardness profile of laser welded martensitic stainless steels, **Optics & Laser Technology**, 44, 1611–1619, (2012).
- [45] Kökey, C., Sezgin, S., Çavuşoğlu, N., Gençalp-İrizalp, S. ve Saklakoğlu, İ. E., İnce paslanmaz çelik sacların fiber lazer ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi, **Mühendis ve Makina**, 57, 674, 65-72, (2016).
- [46] Gu, X., Zhu, K. ve Wu, S., Effect of welding parameters on weld formation quality and tensile-shear property of laser welded SUS301L stainless steel lap file weld, **Journal of Materials Research and Technology**, 9, 3, 4840–4854, (2020).
- [47] Yan, S., Shi, Y. ve Liu, J., Effect of laser mode on microstructure and corrosion resistance of 316L stainless steel weld joint, **Optics and Laser Technology**, 113, 428–436, (2019).
- [48] Madison, J.D. ve Agesen, L. K., Quantitative characterization of porosity in laser welds of stainless steel, **Scripta Materialia**, 67, 783–786, (2012).
- [49] Ahmad, G.N., Raza, M.S. ve Singh, N.K., Kumar, H., Experimental investigation on Ytterbium fiber laser butt welding of Inconel 625 and Duplex stainless steel 2205 thin sheets, **Optics & Laser Technology**, 126, 106117, (2020).
- [50] Kumar, N., Mukherjee, M. ve Bandyopadhyay, A., Comparative study of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels, **Optics & Laser Technology**, 88, 24-39, (2017).
- [51] El-Batahy, A.M., Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels, **Materials Letters**, 32, 155-163, (1997).
- [52] Zhang, M., Chen, G., Zhou, Y. ve Liao, S., Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser, **Materials & Design**, 53, 568-576, (2014).
- [53] Khier, M.A., Aziz, A.M. ve Exner, H., Mechanical and corrosion behaviour of conventional and high-speed remote scanner laser welding for duplex stainless steel: A comparative study, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 610, 012021, (2019).
- [54] Landowski, M., Influence of parameters of laser beam welding on structure of 2205 duplex stainless steel, **Advances in Materials Science**, 19, 1, 59, (2019).
- [55] Odermatt, A.E., Ventzke, V., Dorn, F., Dinse, R., Merhof, P. ve Kashaev, N., Effect of laser beam welding on microstructure, tensile strength and fatigue behaviour of duplex stainless steel 2205, **Journal of Manufacturing Processes**, 72, 148–158, (2021).
- [56] Yang, J., Wang, Y., Li, F., Huang, W., Jing, G., Wang, Z. ve Zeng, X., Weldability, microstructure and mechanical properties of laser-welded selective laser melted 304 stainless steel joints, **Journal of Materials Science & Technology**, 35, 1817–1824, (2019).
- [57] Ghosh, A., Misra, D. ve Acharyya, S.K., Experimental and numerical investigation on laser welding of 2205 duplex stainless steel, **Lasers in Manufacturing and Materials Processing**, 6, 228–246, (2019).