



FAILURE ANALYSIS OF WELD JOINTS

Serdar Mercan¹

¹Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, Turkey

Review Paper

The weakest element in a welded structure or machine is the joint areas. For this reason, failure analysis of welded joints is very important in terms of system operation and preventing recurrence of similar failures. Failure analysis of welded joints; it is a method that identifies the causes of the connection to be damaged by detecting the failure and taking into account the negative factors that arise due to these failures. Failures occur depending on welding design, manufacturing process or working conditions. Damage is caused by excessive stress and the combination of one or more technological failures. The types of damage can be classified under the main headings as crash, fracture, corrosion and fatigue damages. In this study, it is aimed to investigate the mechanism of damage occurring in welded metal materials and to determine the causes of damage and to create a systematic approach to be used in failure analysis.

Keywords: Welding, Failure, Failure analysis, Welding defects, Types of failure

KAYNAK BAĞLANTILARINDA HASAR ANALİZİ

Derleme

Kaynaklı bir yapıda veya makinede en zayıf unsur birleşme bölgeleridir. Bu nedenle kaynaklı bağlantılarda hasar analizi sistemin çalışması ve benzer hataların tekrarını önlemek açısından çok önemlidir. Kaynaklı bağlantılarda hasar analizi; hataları tespit etmekte ve bu hatalar nedeni ile ortaya çıkan olumsuz faktörleri göz önünde bulundurarak, bağlantının hasara uğrama nedenlerini ortaya koyan yöntemdir. Hatalar kaynak tasarımı, imalat süreci veya çalışma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Aşırı zorlanma ve teknolojik hatalardan bir veya birkaçının biraraya gelmesi sonucunda hasar meydana gelmektedir. Oluşan hasar türleri ise çarpılma, kırılma, korozyon ve yorulma hasarları olarak ana başlıklar altında toplanabilir. Bu çalışmada, kaynak yöntemi ile birleştirilmiş metal malzemelerde oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi ile hasar nedenlerine karar vermek ve hasar analizlerinde kullanılmak üzere sistematik bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaynak, Hasar, Hasar analizi, Kaynak hataları, Hasar türleri

1 Giriş

Kaynak yöntemleri; mühendislik uygulamalarındaki gelişmeler, yeni malzeme türlerinin bulunması ve ihtiyaçların artması ile birlikte oldukça gelişmiştir. Bu gelişim ile birlikte aynı veya farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde kaynak yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum kaynak yönteminin endüstride önemini son derece arttırmıştır [1]. Kullandığımız hemen hemen her üründe karşımıza çıkan kaynaklı yapıda veya makinelerde en zayıf unsur birleşme bölgeleridir. Bu durum sistemin bütünlüğünü bozmamak amacıyla kaynaklı bağlantıların kullanılmaz hale gelme durumunun araştırılmasını ve hasar analizlerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır [2]. Hasar analizi, hasar kanıtlarının toplanıp, incelenerek bir parçanın veya sistemin hasara uğrama nedenini ve hasarın karakterizasyonunu belirlemede yapılan inceleme, yorumlama ve raporlama işlemlerini içermektedir. Bu işlemlerle, hasarın oluşum nedenleri anlaşılabilir ve gelecekte benzer hasarların önlenmesi için gerekli tedbirlerin alınması sağlanır [3]. Aynı zamanda hasar analizi ile sistemlerin ve ürünlerin kalitesindeki ilerleme takip edilebilir.

Hasar analizi konusunda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Hasar analizinin üretimde etkinliğini gösteren çalışmasında Toparlı (2019), bir üretim hattında düşük

çevrimde kırılan parçalardaki hasar sebeplerini incelemiş ve sistemin tasarımı revize ederek çalışma ömründe yaklaşık 20 kat iyileşme sağlamışlardır [4]. Hasar analiz süreçlerinin uygulandığı diğer çalışmalarda Öndürücü vd. (2017), hasar analiz süreçlerini uygulayarak bir greyderin dişli rotunun oluşan hasarın nedenlerini araştırmışlar ve malzeme türünü tespit ettikten sonra hasarlı parçadan standartlara uygun numuneler hazırlayarak sertlik, çentik darbe ve üç nokta eğme deneyleri ile metalografik incelemeler yapmışlardır [3]. Kumari vd. (2014), bir uçak motorunun türbin rotorlarındaki kanatçıkların uğradığı hasarın sebebini araştırmışlardır. Hasarın nedenini araştırırken bıçakların mikro ve makro açıdan yapısal incelemelerini, kimyasal analizini ve sertlik ölçümlerini yaparak hasar analiz süreçlerini başarılı bir şekilde tamamlamışlardır [5]. Kaynaklı bağlantılarda da hasara neden olan hatalar arasında yer alan geometrik dizayn, konusundaki inceleme Aktaş vd. (1999), tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında pim bağlantılı karbon/epoksi kompozit levhalarda geometrik parametrelerin hasar yükü üzerindeki etkilerini deneysel yöntemlerle incelemişler, hasar davranışları deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır [6]. Tariq vd. (2012), yüksek yoğunluklu basınçlı doğalgaz borularında meydana gelen hasar için ayrıntılı bir hasar analizi yapmışlardır. Gözle muayene sonucunda hasarın başlangıcının iki farklı malzemenin

* Corresponding author.

E-mail address: smsmercank@gmail.com (S. Mercan) | ORCID Number : 0000-0002-1225-8290

Received 24 November 2019; Received in revised form 16 December 2019; Accepted 23 December 2019

2587-1943 | © 2019 IJIEA. All rights reserved.

birleştirildiği kaynak bölgesinde olduğunu tespit etmişlerdir. Hasarın temel nedeninin birleştirilen malzemeler arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığını bildiren incelemelerini mekanik, termal ve metalürji muayenesi dahil üzere çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilmişlerdir. Hasarlı eklem yüzeyinin fraktografisinin, tipik yorulma hasarı olduğunu, mekanik test sonuçları ile ana malzemeler arasındaki çekme ve yorulma dayanımları arasında büyük uyumsuzluk olduğunu bildirmişlerdir. Ana malzemelerin erime noktalarını diferansiyel taramalı kalorimetre ile belirlemiş ve erime noktası indeksleri arasında büyük fark bulmuşlardır [7]. Malachowski vd. (2016), bir saldırı tüfeğindeki mekanik hasarın nedenlerini belirlemek için kullanılan bir araştırma metodolojisi sunmuşlardır [8]. Rakesh vd. (2007), kaynaklı bağlantılarda hasarın önlenmesi için digraph modelleme ve matris yaklaşımına dayalı bir prosedür kullanmışlardır. İşlem prosesleri ile hasar modunun en aza indirilmesi için çeşitli hasar nedenlerini belirlemeye çalışmışlardır. Uygun eylemlerin sonucunda bağlantıların güvenilirliğinin artırılmasının tasarımcı ve uygulayıcılar için faydalı olacağını, kaynaklı bağlantılarda güvenliğinin artırılmasında hata sebeplerini ve yayılımını anlamak gerektiğini belirtmişlerdir [2].

Bu çalışmada, kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiş metal malzemelerde oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi ve hasar nedenlerine karar vererek, hasar analizlerinde kullanılmak üzere sistematik bir yaklaşım oluşturulması amaçlanmıştır.

1.1 Kaynak İşlemi

Kaynak işlemi aynı ya da farklı malzeme çiftlerinin ısı, basınç ya da her ikisini birlikte kullanarak malzemelerin ergime sıcaklıkları altında katı halde veya ergime sıcaklıklarının üstünde ergiyik halde yapılan birleştirme yöntemidir. Kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen parçaların sürekliliği bozulmaz ve sökülemeyen bir birleştirme elde edilir.

Kaynak yöntemleri malzeme türüne, işleme yöntemine, uygulama şekline ve kaynağın amacına göre sınıflandırılabilir (Şekil 1). Kaynak yöntemlerinin çeşitliliği kullanılan teknik donanımın sayısını da artırmaktadır [9]. Bu ise kaynaklı bağlantıların hasar analizinde üretim/tesis hatalarının tespit edilmesinde ihtiyaç duyulan ve incelenmesi gereken donanım ve parametre sayısının fazla olmasına neden olmaktadır.

1.2 Metallerin Kaynak Edilebilirliği

Kaynak yöntemi ile birleştirilen bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler ısı ve basınçtır. Kaynak yöntemi ile birleştirilmiş metalsel bir malzemede meydana gelen mikro yapı değişiklikleri Şekil 2' de gösterilmiştir [12]. Mikroyapı değişimleri ile birlikte malzemenin mekanik ve kimyasal bazı özellikleri değişmektedir. Özellikle kaynak işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklığın yerel dağılımı ve değişimi karşısında metalin davranışı kaynak kalitesinin

belirlenmesinde ve oluşabilecek bir hasar üzerinde etkili olmaktadır [10, 11].

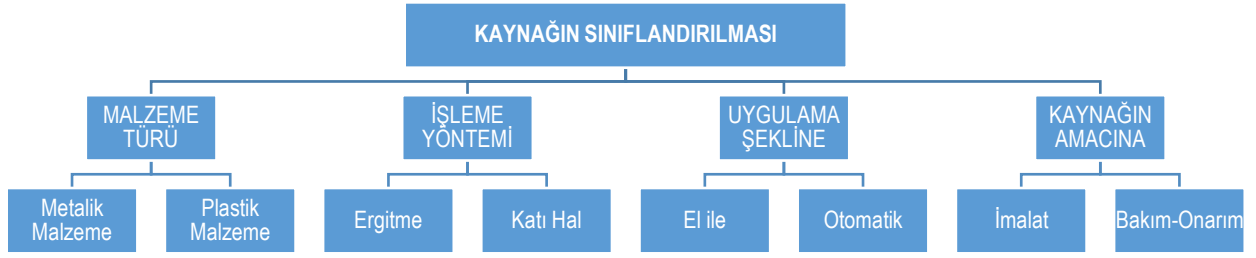
Kaynak için gerekli sıcaklığa kadar ısıtmayı izleyen soğumaya bağlı olarak kaynak bölgesinde, çeşitli ısı işlemler görmüş dolayısı ile mekanik özellikleri ve içyapısı gerek esas metal ve gerekse kaynak metalinden farklı bölgeler ortaya çıkmıştır. Farklı özelliklerdeki bu bölgelerde, tüm yapının zorlanması halinde, gerilme ve şekil değişiminde olduğu gibi korozyona dayanıklılıkta da esas metalden farklı davranışlar görülür. Kaynak yapılan bir parçada kaynak bölgesi, erime bölgesi ve ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) olmak üzere üç bölümde incelenir [13].

Kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini bu bölgelerde oluşan mikroyapılar doğrudan etkilemektedir. Bu mikroyapılar, kaynak edilen parçanın kalınlığına, kimyasal bileşimine ve enerji girişine bağlı olarak değişim göstermektedir [14]. Kaynak metali ile esas metalin birleştiği sınırdan başlayarak, kaynak sırasında uygulanmış olan ısının oluşturduğu çeşitli ısı çevrimlerinden etkilenmiş ve dolayısı ile içyapı değişimine uğramış, ITAB olarak adlandırılan alan kaynak bölgesinin ikinci kısmını oluşturur. Bu bölge çeliğin üretim sürecindeki ısı çevrimlerinden farklı olduğundan, ortaya içyapısı buna bağlı olarak mekanik özellikleri farklı bir bölge ortaya çıkar. Çeliklerin kaynağında, bu bölgede sıcaklık 700 - 1450 °C arasında değişmektedir. Erişilen maksimum sıcaklığa bağlı olarak içyapı ve özellikleri farklı bölgeler oluşur (Şekil 2). Kaynak sırasında ITAB hızlı bir şekilde ısınmakta ve sonrada parça kalınlığı, kaynağa uygulanan enerji ve ön tav sıcaklığının fonksiyonu olarak hızlı bir biçimde soğumaktadır. Çeliğin bileşimine göre bu soğuma hızı, kritik soğuma hızını aştığında, genellikle 900 °C' nin üstündeki bir sıcaklığa kadar ısınmış bölgelerde sert, dolayısı ile kırılgan bir yapı elde edilir. Genellikle, ısının tesiri altında kalan bölge diye adlandırılan bu bölge kaynak bağlantısının en kritik bölgesidir ve birçok çatlama ve kırılmalar bu bölgede oluşur [13]. ITAB' da oluşabilecek muhtemel bir hata, kaynak bölgesindeki sorunların temelini oluşturmaktadır [14]. Bununla birlikte, hasar analizleri yapılırken kaynak yöntemi, kaynak parametreleri, malzeme çiftlerinin seçimi, dolgu metali, ortam şartları, kaynak öncesi yapılan işlemler, kaynakçı gibi birçok etkenin kaynaklı bağlantının kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır.

2 Hasar Analizi

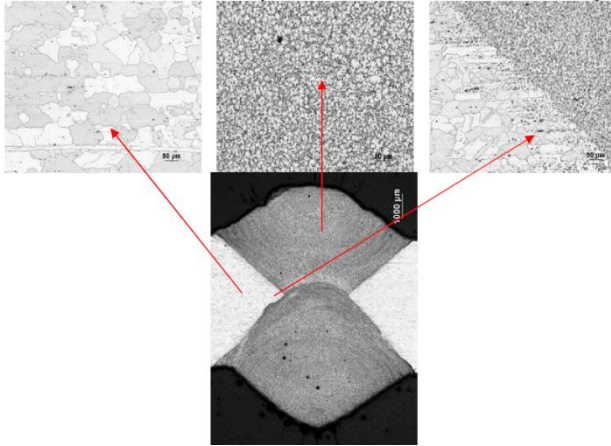
2.1 Hasar

Hasar, bir malzemenin veya yapının beklentiler ölçüsünde işlevini yerine getirememesi ve kullanılmaz hale gelmesidir. Oluşan hasarlar ürünün mekanik ya da kimyasal etkilerle aşırı zorlanması sonucunda meydana gelir [15]. Aşırı zorlanma; ürünün taşıyabileceği zorlanmaya ek olarak, ürünün tasarımı, malzeme içyapısı, imalat, montaj ve uygun olmayan çalışma koşullarında meydana gelen teknolojik hataların oluşturduğu zorlanmalarında eklenmesiyle oluşur. Çünkü bir ürün tasarım, imalat, montaj ve işletme evrelerinden geçirilerek kullanılır.



Şekil 1. Kaynağın sınıflandırılması [9]

Bu evrelerden birinde yapılan bir veya birkaç teknolojik hata nedeniyle hasar ortaya çıkar [16,17,18]. En basit haldeki hasarda sistem veya parça çalışır ancak amacına uygun fonksiyonlarını yerine getiremez. Bu hasar işlev hasarı olarak tanımlanabilir. Hasarın diğer aşamasında sistem veya parça görevini yerine getirir ancak emniyetsiz olarak çalışır. Bu aşama servis ömrünün zarara uğramasına neden olur. Hasarda en son aşama ise sistemin veya parçanın görevini yerine getiremez hale gelmesidir. Parçalarda oluşan hasarların tamamen önlenmesi ise mümkün değildir [19].



Şekil 2. Kaynak bölgesinde oluşan mikroyapı [12].

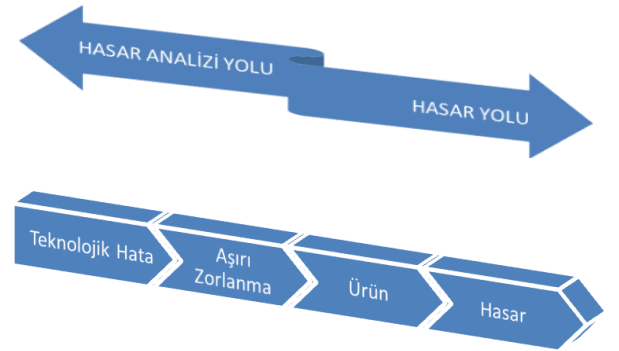
2.2 Hasar Çeşitleri

Hasarı sınıflandırmanın birçok yolu mevcuttur. Sınıflandırma sistemine bağlı olarak malzemelerin fiziksel hasarı birçok kategoriye ayrılır. Hasarı tanımlama, nedenlerini bulma ve bunun sonucunda hasarı önlemek için alınması gereken önlemlerin belirlenmesinde hasarları şu şekilde sınıflandırılabilirler; distorsiyon ve deformasyonlar, kırılma, korozyon, sürünme, aşınma, sıkışma, gevşeme gürtülü çalışma ve yorulma hasarı. Bu hasarlar, hasarın çeşitli temel mekanizmalarını içerir ve iki veya daha fazla mekanizma bazı hasarlarda aynı anda meydana gelebilir [18,20].

2.3 Hasar Analizi Aşamaları

Hasar analizi, hasara uğramış ürün üzerinde ve bu ürünün kullanıldığı her aşamada, geriye doğru yani üretim evrelerinin tersine doğru araştırma yaparak hasarın

türünü, hasara neden olan teknolojik hatanın cinsini, teknolojik hatanın hangi evrede oluştuğunu, bununla birlikte hasarın sorumlusunu ortaya çıkartarak benzer yapılar için gelecekteki tasarım ve üretim faaliyetlerinde bu hasarın oluşumunu önleyici tedbirleri önermek amacıyla gerçekleştirilen faaliyetlerin tümüne verilen addır (Şekil 3) [15].



Şekil 3. Hasar analizi yolu [15].

Hasar analizinin aşamaları oluşan hasara göre değişiklik gösterse de aşağıdaki aşamalar hasar analizinin temelini oluşturur [19].

1. Hasarın net olarak tanımlanması
2. Geçmişle ilgili bilgi toplamak ve numune seçimi
3. Hasara uğramış elemanın ön kontrolü
4. Hasarlı parçaların incelenmesi
5. Delillerin analizi, sonuçlar ve hasar raporu

3 Kaynaklı Bağlantılarda Hasar Analizi

Bugüne kadar yapılan incelemelerin birçoğunda hasara neden olan kaynak hatalarının oluşumundaki en yaygın neden; kaynağın uygulanışı ve esas metal ile kaynak metali arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kaynağın orijinal geometrik dizaynı ve orijinal kaynak parametrelerinin seçimi önemlidir. Bunlarla birlikte diğer önemli kaynak hatalarından biri de çalışmalarda kullanılan parametrelerin çok çeşitli olması ve doğru seçimin yapılamamasından kaynaklanmaktadır [2,21].

Kaynaklı bağlantılarda hasar analizi iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşama, parçanın özelliklerini tanımaya yönelik olarak hasara neden olan hatanın ne olduğunun ortaya çıkartarak hasarlı parçanın incelenmesidir. Bu aşamada kaynaklı bağlantılarda hatanın nedenine karar vermek için normal hasar analiz

teknikleri; görsel muayene, ışık mikroskobu ve tahribatsız muayeneleri diğer malzeme testleri takip eder. Bunlara ek olarak örnek numunelerin ve oluşan gerilmelerin analitik incelemesi yapılır. İncelemelerde ışık mikroskobunun yanında elektron mikroskobu da kullanılabilir. Mikroskobik ve kimyasal analizler hata bölgesi için tam yorum yapılmasını sağlar [21]. İkinci aşama ise benzer hatanın tekrarını önlemek için yapılacak analizi, sonuçları ve hasar raporunun hazırlanmasını içermektedir.

3.1 Hasarın Tanımlanması ve Kaynaklı Bağlantılarda Hasar Nedenleri

Hasar analizinde ilk olarak hasarın tanımı anlaşılır biçimde yapılmalıdır. Hasar göstergesi, nedeni ve hasar mekanizması arasındaki fark ve sonuçlar belirtilmelidir. Bundan dolayı içinde bulunulan durumun her bir parçasını iyi bir şekilde değerlendirmeli, hasar göstergeleri ve hasar mekanizmaları belirlenmelidir [22]. Bu aşamada; bir kaynaklı bağlantıda hasara neden olabilecek hataların bilinmesi gerekmektedir. Hasarlar aşırı zorlanma ve teknolojik hataların biraraya gelmesi ile ortaya çıkar. Kaynaklı bağlantılarda hasarın temel sebebidir teknolojik hatalardır. Bu nedenle, kaynakta hasar analizinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için parçada oluşan hasarın hangi teknolojik hatadan kaynaklandığının bilinmesi gerekir. Kaynaklı bağlantılarda hasarlar bir veya birkaç teknolojik hatanın bir araya gelmesinden dolayı oluşabilir [15,20]. Teknolojik hatalar ve bunların çözümü üç kategori içinde ele alınabilir [23].

1. Kaynaklı bağlantılardaki tasarım hataları (Tasarım ve malzeme hataları),
2. Üretim/tesis hataları (İmalat ve montajda yapılan hatalar)
3. Uygun olmayan çalışma koşullarına bağlı olan hasarlardır.

Teknolojik hatalar hasar çeşitlerinin biriyle veya birkaçıyla hasarın oluşmasına neden olurlar. Sistemi oluşturan elemanların aşırı zorlanması ile hasara uğraması dışındaki tüm hatalar teknolojik hata olarak sınıflandırılırlar. Teknolojik hatanın ne olduğunu tespit içinse hasar başlangıcının yani hasara neden olan veya hasarı başlatan bölgenin bulunması gerekir [20].

3.1.1 Kaynaklı Bağlantılardaki Tasarım Hataları

Tasarım aşaması, orijinal fikrin gelişimi, genel konfigürasyonun tanımı ve detaylı dizayn, malzeme seçimi ve üretim aşamalarının kullanıcı/üretici açısından optimize edilmesini içerir. Kaynaklı bağlantıların tasarım aşamasında yapılacak hatalar hasarın temel nedenini oluşturur. Kaynaklı bağlantılarda ortaya çıkan tasarım hataları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

1. Uygun olmayan geometriler
2. Kaynak yöntemi ve kaynak parametrelerinin doğru seçilmemesi
3. Isıl çevrimlere bağlı meydana gelen yüksek gerilmeler ve distorsiyon
4. Malzeme hataları ve uygun olmayan malzeme seçimi

Tasarım eksiklikleri yüzünden meydana gelen hasarlar genellikle hesaplanandan çok daha fazla gerilmelerin meydana gelmesine ve parçanın çok daha iyi performans gerektiren servis şartlarında hasara uğraması ile sonuçlanır. Bu nedenle konstrüksiftif olarak ele alınan kaynaklı bağlantıda kuvvet çizgilerinin akışı, dikişlerin konumu, parça kalınlığı, çentik etkisi, rijitlik farklılıkları değerlendirilmelidir. Kaynak bölgesinin güvenliği için gerilmelerin tür ve şiddeti, zorlanma hızı, sıcaklık ve korozyon gibi gerilmeye neden olacak durumlar ve kaynaklı birleştirme için hangi kaynak yönteminin seçileceğine ve kaynaktan sonra, uygulanması gereken (ısıtıl işlem/temizleme) işlemlerin ve malzeme türünün tasarım aşamasında belirlenmesi gerekir [3].

3.1.1.1 Uygun olmayan geometriler

Uygun olmayan geometriler parça veya sistemlerin kapasiteleri altında çalışmasına neden olur [24]. Kaynaklı bağlantılarda uygunsuz geometriler; parça kalınlığı, hatalı kaynak ağzı seçimi, hatalı kaynak profili ve birleştirilen parçalar arasındaki kalınlık farkları, kaynak dikiş şekli, çentik etkileri, zorlanma durumunun hatalı hesaplanması şeklinde sıralanabilir.

Tasarım aşamasında uygun olmayan bir geometrinin etkilerinin tek tek incelenmesi gerekmektedir. Düzgün hazırlanmış birleşim yüzeyleri ve uygun birleşim tasarımı özellikle sıcak çatlakların oluşumunu önleme açısından çok önemlidir. Birleşim tasarımı uygun olmadığında; geniş kaynak dikişlerinin oluşturulmasına neden olur. Örneğin sadece kaynak ağzı seçiminde oluşabilecek hatalar sonucunda; kaynak banyosu hacmi artmakta bu beraberinde kaynak bağlantı malzemesinin mekanik-teknolojik değerlerinin düşmesi gibi bazı problemleri meydana getirmekte bununla birlikte mikro gözenek gibi kaynak hatalarının meydana gelme olasılığı yükselmektedir [24,25].

3.1.1.2 Kaynak yöntemi ve kaynak parametrelerinin doğru seçilmemesi

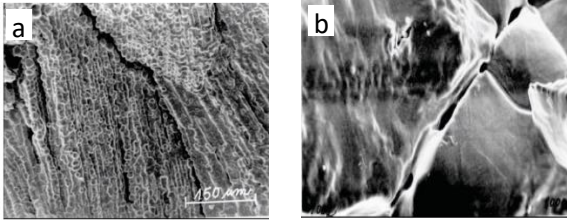
Kaynak yönteminin doğru seçilmesi tasarım aşamasına bağlıdır. Tasarımın seçilen kaynak yöntemi ile yapılabileceği yapılamayacağı araştırılmalıdır. Kaynak yöntemleri ve her bir yöntem için seçilecek parametre sayısı çok fazladır [26]. Bu durum doğru kaynak yöntemi ve doğru parametre seçimini zorlaştırır. Ayrıca uygun kaynak yöntemi ve parametrenin seçilmesi tek başına yeterli değildir. Çünkü kaynak parametrelerinin birbiri ile uyumu noktasında da optimizasyon yapılmalıdır. Optimizasyon işlemleri için farklı malzeme türlerinin herbiri için kaynak yöntemindeki parametreler ayrı ayrı değiştirilerek yapılmalı ve çıktılarının gözlemlenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Gözlemlenen veri gruplarının ortalamaları arasında önemli farklılıklarının olup olmadığının ölçülmesinde varyans analizi tekniği kullanılabilir [27].

3.1.1.3 Isıl çevrimlere bağlı meydana gelen yüksek gerilmeler ve distorsiyon

Kaynak işlemi boyunca oluşan ısı çevrimlerinin neden olduğu ve tasarımda hesaplanmayan yüksek

gerilmeler ile metalürjik faktörler tasarım hataları arasındadır [13]. Söz konusu ısıl çevrimler ile birlikte malzeme içyapısında ve mekanik özelliklerinde değişimler söz konusudur. Yüksek sıcaklık nedeniyle malzemede meydana gelen tane yapısındaki değişimleri engellemek mümkün değildir [28]. Kaynaklı bağlantı hasar analizlerinde mikroyapı değişikliklerine bağlı hasar oluşumları incelenmelidir.

Diğer taraftan kaynaklı bağlantılarda hasara neden olan dört temel çatlak tipi bulunmaktadır. Bu çatlaklar; sıcak çatlak, soğuk çatlak, lameller yırtılma ve yeniden ısınma ile ortaya çıkan çatlaklar olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4). Çatlaklar kaynak bölgesinde olabileceği gibi ısıdan etkilenen bölgelerde de görülmektedir [29]. Hasarın hangi nedenle ortaya çıktığının ana nedenlerinin bilinmesi için bağlantıda oluşan çatlakların ana metalürjik özelliklerinin incelenmesi gerekir. Çatlak tiplerini ayırt etmek için onların nedenlerini bilmek onların uygun tedbirlerin alınması için çok önemlidir. Bu incelemelerden yola çıkılarak hatanın tekrarı önlenmeye çalışılır.



Şekil 4. Kaynaklı bağlantılarda oluşan çatlak şekilleri [29]
a. Soğuk çatlak b. Sıcak çatlak

3.1.1.4 Uygun olmayan malzeme seçimi

Malzeme hataları tasarımdaki eksikliğin bir çeşididir. Malzemelerdeki kabul edilemez eksiklikler ve süreksizlikler kusur olarak tanımlanır. Kusurlar sistemin veya ürünün performansını olumsuz yönde etkilerler. Malzemelerde anizotropi veya bir üründe özelliklerin bölgesel değişimi gözlemlenebilir. Söz konusu durum nedeniyle malzeme içindeki hataların tasarım aşamasında göz önüne alınması gerekir [19].

Malzeme içinde, başlangıçta hatalar mevcutsa parça serviste iken bu hatalardan gelişen hasarlar meydana gelir. Böyle bir malzemenin kaynakla birleştirilmesinde hatalar ortadan kaldırılamayacağı için bu hatalar parçanın çalışması sırasında potansiyel tehlike noktaları olarak kalırlar. Bu gibi parçaları kaynak ile birleştirerek kullanmanın riski çok yüksektir. Bu nedenle hata içermeyen malzemeden yeni parça kullanmak gerekir [15].

Malzeme seçiminde yapılacak yanlışlar da malzeme hataları gibi tasarımdaki eksikliğin bir çeşididir. Çünkü seçilen malzeme talep edilen uygun mekanik özellikleri (korozyon, yüksek sıcaklık, yorulma vb.) sağlamalıdır [13]. Herhangi bir hasar oluşumunda malzeme performansı önemli bir role sahiptir. Nitekim parça veya sistemin performansı fabrika koşullarında üretilen malzemelerin davranışına bağlıdır. Malzeme hasarlarının nedenlerini sınıflandırırken, hasarın oluşumunu hızlandıran faktörler göz önünde tutulmalıdır. Faktör; direkt veya dolaylı olarak hasara neden olan dış etki olarak

tanımlanır. Bu etkileri anlamak temel nedenin kararlaştırılması ve hasar analizinin etkisinin anlaşılması bakımından önemlidir [20]. Diğer taraftan malzemelerin verilen bir yöntem ile bir dereceye kadar kaynak edilebildiği, seçilecek uygun bir yöntem uygulanarak metalik bağlantı elde edildiği zaman, bağlantı yerel özellikleri ve bunların konstrüksiyona etkisi bakımından, belirlenmiş bulunan özellikleri sağlayıp sağlamayacağına bakılmalıdır [13].

Kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemelerin istenilen doğru malzeme çeşidi olup olmadığı kimyasal analiz yöntemi ile tespit edilir. Eğer ortamda gerilmeli korozyon veya korozyon mevcutsa hasar nedeni saptanırken tufal ve diğer korozyon ürünleri ile malzemenin temasta olduğu ortamın kimyasal analizi yapılmalıdır. Bir malzemenin kimyasal analizi sonucunda belirli bir elementin olması gereken miktardan daha fazla miktarda olması, hasarın bu fazlalıktan kaynaklandığı anlamına gelmez. Belli sınırlar içinde, mikro yapısal bileşenlerin malzeme içindeki dağılımı, bunların malzeme içindeki oranlarından çok daha önemlidir [16]. Kaynak yöntemi ile birleştirilecek malzemelerin seçiminde kimyasal analizle birlikte bağlantının çalışma koşulları ve çalışma şekli göz önünde bulundurularak mekanik özelliklerine bakılmalıdır. Malzeme içyapısına bağlı olarak değişen mekanik özelliklerin tespitinde tahribatlı deneyler kullanılabilir ve malzeme sertifika belgeleri incelenebilir.

3.1.2 Üretim/Tesis Hataları

Üretim; teknik bilgiler ve ham malzemeyle yeni bir ürün oluşturma aşamalarını kapsar. Kaynak yönteminde üretim ise daha önceden yapılan kaynak tasarımına uygun olarak kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesidir. Kaynak parametrelerinin istenilen tolerans aralıklarında kullanılmaması durumunda ortaya hatalı ürün çıkar. Bu nedenlerle kaynak işlemlerinin mutlaka tasarım aşamasında hazırlanan kaynak prosedürlerine uygun olarak yapılması gerekmektedir. Diğer taraftan kaynak uygulamaların mutlaka yeterliliği olan kişilerce yapılması zorunludur. Bu aşamada yapılacak üretim/tesis hataları;

1. Kaynaklı bağlantı kusurları,
2. Temizleme/son işlem,
3. Fabrikadaki montaj/kurulum,
4. Kalite kontrol tekniklerindeki hatalardır [16].

3.1.2.1 Kaynaklı Bağlantı Kusurları

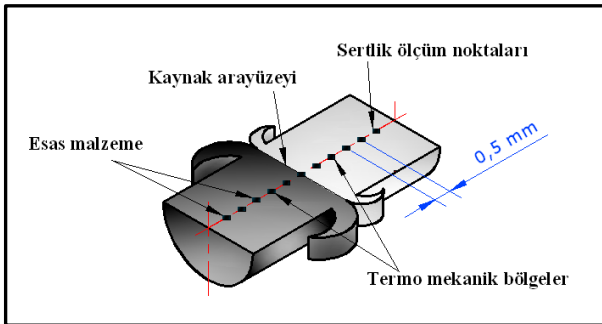
Kaynak işleminde kaynak kusurları istenmez ama pratikte hatasız bir kaynak işlemi mümkün değildir [30]. Üretim ve tesis hatası olarak karşımıza çıkan kaynak hataları genelde kaynak tasarımının yanlış yapılmasına veya kaynak prosedürlerine uyulmamasına (kaynağın uygulanışı) bağlı olarak meydana gelen hatalardır. Kaynak hatalarının oluşumundaki diğer nedenler ise esas metal ile kaynak metali arasındaki uyumsuzluk ve kullanılan sarf malzemelerin kirlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Muhtemel hasarların başlangıcı olabilen kaynak bağlantı kusurları [30] ve hasar analizlerinin yapılabilmesi için inceleme teknikleri aşağıda belirtilmiştir.

Kaynak işlemi boyunca ortaya çıkan kaynak hataları; nüfuziyet azlığı, birleştirme azlığı, yanma oluşu, kaynak dikişinin taşması, bindirme dikişlerinde levha kenarlarının erimesi, gözenekler, fişırma, curuf kalıntıları, çatlaklar, hatalı kaynak şekli ve boyutu, sıçramalar, çarpılma, mikroskopik iç hatalardır [31].

Kaynak kusurlarının tespitinde; doğrudan içyapı incelemelerinin yapıldığı ve sonuçların anında değerlendirilebildiği tahribatsız muayeneler, kaynaklı bağlantıların hasar analizlerinin yapılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Oluşan teknolojik hatalar hangi aşamadan olursa olsun tahribatsız muayene yöntemleri ile tespit edilebilir. Birbirlerinden farklı olan bu tahribatsız muayene yöntemleri kaynaklı bağlantıda hasar oluşmadan önce hataların tespiti amacı ile kullanılırlar. Söz konusu tahribatsız muayene yöntemlerinden yaygın olarak kullanılanlar 1.Görsel Muayene 2. Sıvı Penetran Testi 3. Girdap akımları (Eddy Akımı) ile Muayene 4. Manyetik Parçacık Testi 5. Ultrasonik Muayene 6. Radyografik (Röntgen) Işınları ile Muayene ve 7. Akustik Emülsiyon Testi şeklinde sıralanabilir.

Gerekli durumlarda sertlik ölçümü gibi diğer tahribatlı muayene yöntemleride kullanılabilir. Yapılacak iş belirlendiğinde, kullanılacak kontrol sisteminin de sınırları kendiliğinden ortaya çıkmış olur. Ancak muayene yöntemlerinin tamamında kaynaklı bağlantı ve özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Örneğin sertlik dağılımının belirlenmesi gereken bir durumda ölçümlerin tüm kaynak bölgesini kapsayacak şekilde kaynak yöntemine uygun olarak kaynak ekseninden esas metale doğru belirli ölçüm aralıkları ile yapılması gerekir (Şekil 5). Kontrol sistemine karar verilmesi ile kullanılacak tahribatlı muayene yöntemleri ise 1. Çekme Deneyi 2. Basma Deneyi 3. Yorulma Deneyi 4. Çentik Darbe Deneyi 5. Aşınma Deneyi ve 6. Eğme Deneyi ve 7. Sertlik Ölçümü şeklinde sıralanabilir.



Şekil 5. Kaynaklı bağlantılarda sertlik ölçüm noktaları [32]

Test yöntemlerinde muayene edilecek malzeme göz önüne alınarak, en uygun yöntemin, uygun standardın seçilmesi ve yöntemin doğru yapılması gerekir. Söz konusu yöntemler hasara uğramış olan kaynaklı parçaların kontrollerinde hasar başlangıcının bulunması amacı ile kullanılabilirler.

3.1.2.2 Temizleme/Son İşlem Yapılmamasından Kaynaklanan Hatalar

İyi bir hazırlık kaynaklı bağlantının başarısı açısından önemlidir. Kaynaktan önce ve kaynaktan sonra temizlik çoğu zaman kaynak işleminin en önemli

kısımudur. Kaynak edilecek malzemeler genellikle kimyasal veya mekanik yollarla temizlenir. Yüzeyler temizlenirken arzu edilmeyen durumların ortaya çıkmamasına özen gösterilmelidir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken faktörler [33];

- Birleştirilecek parçalar arasında kalan kir yağ ve curuf tabakasının süreksizliğe neden olması,
- Malzemeye önceden yapılmış olan uygun olmayan temizleme şartlarından kaynaklanan korozyon,
- Asitle temizleme yapılmasından kaynaklanan hidrojen gevrekliği veya taneler arası etkileşim.

3.1.2.3 Fabrikadaki Montaj/Kurulum aşamasında ortaya çıkan hatalar

Kaynaklı parçaların montaj/kurulumunda bağlantı üzerinde ek gerilme oluşturulmamasına dikkat edilmelidir. Söz konusu durumun tasarım aşamasında planlanmış olması gerekmektedir. Ortaya çıkabilecek önemli hatalardan bazıları aşağıda verilmiştir;

- Eksen kaçıklığı,
- Eksik/Yanlış parça,
- Kurulumun uygun olarak yapılmaması,
- Bağlantı sistemi ve sıkma torkunun uygun olarak uygulanmaması,
- Yetersiz yüzey hazırlığı [15]

3.1.2.4 Kalite Kontrol Tekniklerindeki Hatalar

İmal edilmiş parçaların son kontrollerinde uygulanan kontrol tekniklerinin karakteristiklerinden kaynaklanan hatalar;

- Manyetik partikül muayenesinden kaynaklanan ark yanıkları,
- Asitli derin dağlamadan kaynaklanan gevrekleşme,
- Damgalama izlerinden oluşan yorulmuş veya su verme çatlakları olarak ifade edilebilir [20].

3.1.3 Çalışma Koşullarına Bağlı Olan Hasarlar

Bir ürünün veya sistemin ömrü servisteki çalışma şekli ve ortamından etkilenir. Bir ürünün servis ömrü bu ürünün çalışma şekli, bakımı, muayenesi, tamiri ve modifiyesini içermektedir. [19]. Kaynaklı bağlantı elemanlarında işletme koşullarında düzensiz değişken, çok boyutlu kompleks zorlanmalara maruz kalmaktadır. Bu zorlamalar dolayısıyla işletme ömrünün, işletme mukavemetinin tespitinde pek çok zorluklarla karşı karşıya kalınmaktadır. Kaynak işlemi sırasında önceden belirlenemeyen oluşumlar gibi çok sayıda faktör matematiksel kesin bir çözümü imkansız kılmaktadır. Bu bağlantılarda hesap daha çok deneylerden kazanılan varsayımlara, hipotezlere, katsayılara ve tecrübelerle dayanmaktadır [24]. Çalışma koşullarında meydana gelen herhangi bir hasar tasarım aşamasında, malzeme temininde ve ürünlerin imalatı esnasında yapılan hata/hatalar nedeni ile meydana gelir [19]. Kaynaklı bağlantılarda servis esnasındaki uygun olmayan bakım uygulamalarında yapılacak hatalar kaynaklı bağlantının

hasara uğramasına neden olabileceği hasar analiz sürecinde göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2 Geçmişle İlgili Bilgi Toplamak ve Numunelerin Seçimi

Hasara uğramış elemanın veya yapının imalat ve işletme geçmişi araştırılır ve gerekli bilgiler toplanır. Bilgilerin kişisel duygu ve düşüncelerden uzak olması amacıyla kaynaklı bağlantının tüm tasarım hususlarını kapsayan kaynak prosedürleri, şartnameler ve teknik resmi elde edilmeli hasara uğrayan kaynaklı bağlantı fotoğrafları ile birlikte temin edilmelidir. Meydana gelen hasarla ilgili tüm detaylar öğrenilmelidir [16]. Hasarın çalışma şartları esnasında mı, montajda mı yoksa hasarlı bağlantının imalatından kaynaklanan bir hata mı, aşamasında mı meydana geldiğinin bilinmesi gerekir.

3.3 Hasara Uğramış Kaynaklı Bağlantılarda Ön Kontroller

Hasara uğramış eleman ve bu elemandan kırılmak suretiyle ayrılmış tüm parçalar direkt gözle veya ara elemanlar (optik mikroskop) kullanılarak kontrol edilmeli ve kayıt altına alınmalıdır. Gözle yapılan bu inceleme hasara neden olan hataların fark edilmesine yardımcı olabilir. Yeterli ışık altında yapılması gereken kontrollerde kaynak bölgesinde gözle görülür kaynak hataları ile hasara uğramış kaynak bölgesinde bulunan çatlak, çatlak ilerleme yönü ile kırık yüzeyler, kaynak boyutu ve geometrisi incelenmelidir. Kırık yüzeyinin geometrisinin incelenmesiyle hasara neden olan gerilme sistemi hakkında bilgi edinilebilir. Parçaların makroskobik etüdüyle hasarın orijini olan çatlak başlangıç noktası, çatlakın ilerleme saptanabilir [16]. Ayrıca kaynak geometrisinde kuvvet akışını engelleyen durumlar, dışardan gelen etkiler ön kontroller sonucunda tespit edilebilir.

3.4 Hasara Uğrayan Parçaların İncelenmesi

Hasar analizi yapılırken kırık yüzeylerinin mekanik ve kimyasal etkilerden korunması gerekmektedir. Kırık yüzeyine çıplak elle temas edilmemelidir. Zorunlu durumlar dışında kalan yüzeyler su ile yıkanmamalıdır. Kırık yüzeyinde temizleme işlemi yüzeyde incelemeyi zorlaştıran kirlerin bulunması halinde ve mikroskopla incelemeyi hemen önce yapılmalıdır. Temizleme işlemi yumuşak fırça, kuru hava akımı veya ultrasonik temizleme yöntemleri ile yapılabilir. Kırık yüzeyi korozyondan etkilenmiş parçaların temizlenmesi selüloz asetat ile yapılarak, gerekirse kırık yüzeyinden uzaklaştırılan yabancı maddeler muhafaza edilmelidir [16].

Kaynaklı bağlantılardaki muhtemel hatalar, imalat esnasında veya belli bir müddet kullandıktan sonra oluşan çatlaklar, iç kesimlerde oluşan boşluklar, kesit incelmeleri vb. hatalar herhangi bir numune hazırlanmadan doğrudan iş parçası üzerinde, tahribatsız muayene yöntemleri uygulanarak tespit edilebilir. Ancak tespit edilememesi durumunda metalografik incelemeler için numune hazırlanması gerekir. Bu durumda numune kesitlerinin kesme işlemi sırasında kırık yüzeyin ve buna yakın bölgelerin oluşan ısı nedeni ile değişime uğratılmamasına özen gösterilmelidir. Korozyon oluşmaması için kesme

işlemi esnasında zorunlu kalmadıkça soğutma sıvısı kullanılmamalıdır. Ayrıca numunelerin alındığı yerler ve doğrultular dikkatle belirtilmelidir [16]. Numunelerin ana metali, ITAB bölgesini ve kaynak bölgesini kapsayacak şekilde bir kesit alınarak yüzeyi uygun yöntemlerle zımparalanmalı ve parlatılmalıdır. Her durumda zorunlu olmasada uygun yöntemlerle yüzey dağlanarak, ısı girdilerinin farklılığından oluşan bir görüntünün açığa çıkması sağlanmalıdır. Kaynaklı numunelerin hasar analizinin en önemli aşaması bu parlatılan ve dağlanmış kesitlerin optik mikroskop ve SEM kullanılarak incelenmesi oluşturmaktadır. Bu amaçla hasara uğrayan kaynaklı bağlantılarda incelenecek bölgenin seçimi doğru bir analiz yapmak için önemli bir aşamadır. Numunenin hasarın özelliklerini temsil edecek şekilde olması gerekir. Bu nedenle nereden ve nasıl alınacağına dikkat edilmelidir. Hasar bölgesinde optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda kaynaklı birleştirmelerdeki çatlaklar, boşluklar, kalıntılar, ergime noksanlığı, nüfuziyet azlığı, birleştirme azlığı, yanma oluşu gibi gerilme yığılımları nedeni ile hasara neden olabilecek kaynak hatalarının olup olmadığı tespit edilebilir. Ayrıca ısıdan etkilenen bölgenin genişliği belirlenebilir. Kaynak pasosunun uygun atılıp atılmadığı kaynak ağız şeklinin ve hasar tiplerinin oluşumunun kaynak geometrisine bağlı ortaya çıkıp çıkmadığı ve uygunluğu incelenebilir [34]. Hasara katkıda bulunan faktörlerden, metal olmayan kalıntılar, mikro yapısal segregasyonlar, taneler arası korozyon ve hatalı ısı işlemi gibi birçok metalürjik hatalar bu aşamada ortaya çıkarılabilir. Kaynak bölgesinin metalografik kesit incelenmesinden elde edilen bilgilerin kırılmanın kök nedenini belirlemek için kırılma tipinin (gevrek, sünek, gerilmeli korozyon vb.) saptanması bu aşamada yapılır.

3.4.1 Kaynaklı Bağlantılardaki Hasar Çeşitleri

Kaynak işlemleri yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu nedenle malzemelerin hassas bir biçimde ayarlanmış kimyasal bileşimlerinde, planlı uygulanmış ısı işlem çevrimlerinde ve bazı hallerde de bir mekanik işlem ile kontrol altına alınan malzeme iç yapılarının değişerek mikro hatalar oluşmasına neden olur [13]. Kaynak işleminde ortaya çıkan bu hatalar; iç hatalar sonucunda ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) meydana gelen gevrek kırılma, ITAB' in hassasiyeti, artık gerilme çatlakları, cüruf inklüzyonları, kaynak dikişi sonundaki bölgede krater oluşumu, sıcak çatlaklar, düşük sıcaklıkta görülen çatlaklar, nemden kaynaklanan hidrojen gevrekliği ve kaplama kirliliğinden kaynaklanan sıvı metal gevrekliğine neden olarak kaynaklı birleştirmenin hasara uğramasına neden olur [19]. Söz konusu bu tasarım hataları kaynak prosedürlerine uygun kaynak yapılmaması durumunda artarlar. Oluşan hasar türleri çarpılma hasarları, kırılma hasarları, korozyon hasarları ve yorulma hasarları olarak ana başlıklar altında toplanabilir. Yıpranma kaynaklı hasarlar aşınma ve yapışma olarak ayrıştırılabilir [4].

3.5 Delillerin Analizi, Sonuçlar ve Hasar Raporu

Elde edilen bilgiler analiz edilerek ara raporlar hazırlanır. Araştırmaların ilk adımında belirlenen hasar

tipinin doğruluğunu kanıtlayan sonuçlar ve ara raporlardan elde edilen bilgilerle birlikte hasar raporu düzenlenir. Raporla bir hasar analiz sürecinde bulunması gereken temel bilgiler ve hasar analizinde sorulan genel sorular ve cevapları yazılmalıdır. Buna ek olarak kaynaklı bağlantıların yapısına uygun olarak aşağıda hazırlanan örnek soruların hasar incelemesinde sorularak cevapları rapora yazılmalıdır.

- Kaynaktan önce işlem yapılmış mı?
- Kaynak eşdeğerliği yüksek seçilmiş mi?
- Kaynaklı bağlantı geometrisi uygun mu?
- Kaynak ağız geometrisi uygun mu?
- Kaynak yöntemi doğru seçilmiş mi?
- Sarf malzeme depolama koşulları ve kullanım prosedürleri doğru mu?
- Kaynak parametrelerinin doğru seçilmiş mi? Kendi içinde parametreler uyumlu mu?
- Isıl çevrimlere bağlı meydana gelen yüksek gerilmeler ve distorsiyon var mı?
- Uygun malzeme seçimi yapılmış mı? Malzemede mikroyapı değişimleri var mı?
- Kaynak işlemleri ankastre bağlı parça üzerinde mi yapılmıştır?
- Çatlak ilerleme şekilleri nasıl olmuştur?
- Çatlaklarda ani yön değişimi var mı?
- Kaynak bölgesinde ani sertlik değişimleri var mı?
- Kırılma şekli gevrek mi, sünek mi?
- Kaynak metali akma sınırı ile esas metal akma sınırları uyumlu mudur?
- ITAB da sertlik değişimleri meydana gelmiş midir?
- Birleşmemiş kısımlar var mı?
- Kaynak bölgesinde gözenek mevcut mu?
- Nüfuziyet azlığı var mı?
- Birleşme azlığı gibi durumlar söz konusu mu?
- Kaynak bölgesinde yanma olukları gibi profil hataları var mı?
- Kaynak dikişinde taşma var mı?
- Bindirme dikişlerinde levha kenarlarında erime var mı?
- Levha kenarlarında erime olan bölgelerde (varsa) dolgu kaynağı yapılmış mı?
- Hızlı katılma nedeni ile fişkırmaya oluşmuş mu?
- Curuf kalıntıları var mı?
- Kaynak bölgesi kuvvet hatlarının yön değiştirdiği bölge mi? Bu bölgelerde uygun kaynak profili var mı?
- Sıçrama var mı? Yüzey pürüzlü mü?
- Korozyon var mı? Çevre koşulları nelerdir?
- Hangi tip korozyon oluşmuş, korozyon tipi ve hızı nedir? Var olan korozyon ürünleri nelerdir?
- Ortam ve bu metalle temasta olan metal yüzeyinin doğası ve bileşimi nedir?
- Bağlantı kimyasal bileşiminde farklılıklar meydana gelmiş mi?
- Bağlantı bölgesinde kalıntı var mı kalıntılar metal bileşiminden farklı mı?
- Bağlantı bölgesinde tekrarlı, değişen gerilme ve gerilmeler var mı?

4 Sonuç

Kaynaklı bağlantılarda hatalar tasarım, üretim/tesis ve çalışma koşullarına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Hasara neden olan bu hatalar bu adımların birinde veya birkaçında oluşur ve hasar türlerinden birinin oluşması sonucunda bağlantı kullanılamaz hale gelir. Kaynaklı bağlantılarda hatanın nedenine karar vermek için görsel muayene, ışık mikroskobu, elektron mikroskobu, tahribatsız ve gerekli durumlarda tahribatlı muayene yöntemleri ile kimyasal analizler kullanılabilir. Yapılacak incelemeler hata bölgesinin başlangıcının tespitine ve ilerlemesi hakkında yorum yapılmasını ve hasarın hangi nedenle ortaya çıktığının ana nedenlerinin bilinmesini sağlar. Hasarın nedenleri ve hasar türü belirlendikten sonra hasar analiz raporları hazırlanır. Raporun sağlamış olduğu verilerden yola çıkarak hatanın tekrarı önlenmeye çalışılır.

Bilgilendirme

Bu makale 20-22 Eylül 2018 tarihinde Sivas' ta gerçekleştirilen CIEA2018 International Conference On Innovative Engineering Applications” adlı kongrede sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

SOCAR Turkey Enerji AŞ. Malzeme ve Kontrol birim çalışanı teknisyen Şevket MALKOÇ’ a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

5 Kaynaklar

- [1] Mercan S., Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 2205 / AISI 1020 Malzeme Çiftinin Mikroyapı ve Yorulma Davranışının Araştırılması, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Ens. Doktora Tezi, 2013.
- [2] Sehgal, R., Angra, S., Sharma, V., Failure cause analysis of welded joints, Indian Jour. of Eng. Mat. Sci., 14,24-30, 2007.
- [3] Öndürücü, A., Kanbir, Ö., Bir Greyderin Dişli Rotunun Hasar Analizi, Süleyman Demirel Üniv. Fen Bil. Ens. Dergisi 21,2,599-606, 2017.
- [4] Toparlı, M.B., Soğuk Dövme Kalıplarında Ömür Artışı Elde Etmek İçin Baskın Hasar Mekanizmasının Belirlenmesi, Uludağ Üniv. Müh. Fak. Dergisi, 24,2,157-172, 2019.
- [5] Kumari, S., Satyanarayana, D.V.V., Srinivas, M. Failure Analysis of Gas Turbine Rotor Blades, Engineering Failure Analysis, 45,234-244, 2014.
- [6] Aktas A., Karakuzu R., Failure analysis of two-dimensional carbon-epoxy composite plate pinned joint, Mechanical Composite Material Structures, 6,347-361, 1999.
- [7] Tariq, F., Naz N., Amir, M., Rasheed, K., Baloch, A., Failure Analysis of High Density Polyethylene Butt Weld Joint, J Fail. Anal. and Preven. 12:168–180, 2012.
- [8] Malachowski, J., Damaziak, K., Platek, P., Sarzynski, M., Kupidura, P., Wozniak, R., Zahor, M., Numerical and experimental failure analysis of rifle extractor, Engineering Failure Analysis, 62,112–127, 2016.
- [9] <http://www.metaluzmani.com/kaynak-yontemlerinin-siniflandirilmesi/>.
- [10] <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Kaynak.pdf>.
- [11] <http://w3.bilecik.edu.tr/makine/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/kaynakteknigi-f%C3%B6y-notu.pdf>.
- [12] Karataş, Ö., Morgenstern, C., Sonsino, M., C., Vogt, M., Dilger, K., Gülsöz, A., “Biçimlenebilen Magnezyum Alaşımlardan Kaynaklı Birleştirilmelerin Yorulma Dayanımı

- Değerlendirmelerinde Mikro-Destek Etkisi Konseptinin Uygulanması, 8. Uluslararası Kırılma Konf., 2007.
- [13] Anık, S., Tülbentçi, K., Kulaç, E., Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı”, Gedik Holding Yayını, İstanbul, 1991.
- [14] Eroğlu, M., Aksoy, M., 15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı ve Mekanik Öz. Etkisi, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, S.31.
- [15] Eryürek, B., Dikicioğlu, A., Onarım Kaynağında Hasar Analizinin Önemi”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kong., 2003.
- [16] Eryürek, B., “Hasar Analizi”, Birsen Yayınevi, 171s., 1993.
- [17] Ay, İ., <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture1.pdf>.
- [18] <http://www.metaldunyasi.com.tr/haber/detay/1884>.
- [19] Varol, H., Av ve Spor Tüfeklerin İçin Kritik Parçaların Hasar Analizi, Süleyman Demirel Üniv. Fen Bil. Ens., Makina Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek L. Tezi, 2008.
- [20] Anonim, Failure Analysis and Prevention, ASM International, 11,2910, USA, 2002.
- [21] Ayşe, B.,R., Pense, A.,W., Welding Failure Analysis, Materials Characterization, 33,3,295-309, 1994.
- [22] http://www.tech.plym.ac.uk/sme/Interactive_Resources/tutorials/FailureAnalysis/index.html.
- [23] Canale, L.,C.,F., Mesquita, R.,A., Totten, G.,E., Failure Analysis of Heat Treated Steel Comp., ASM International, 2008
- [24] Özden, H., Gemi İnşaatında Kalın Çelik Sac Kaynak Bağlantılarının İşletme Mukavemeti, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, 2003.
- [25] <https://www.askaynak.com.tr/yayinlar/bultenler/kaynak-hatalarini-onleme-yollari>.
- [26] Çalhgülü, U., Dikbaş, H., Taşkın, M., Microstructural Characteristic of Dissimilar Welded Components (AISI 430 Ferritic-AISI 304 Austenitic Stainless Steels) by CO2 Laser Beam Welding, Gazi Unv. Jour. of Sci., 25(1):35-52, 2012.
- [27] Lazic', Z.,R., Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide, Wiley VCH, 157-165, 2004.
- [28] Çelik, A., Şen, S., Ece, H., Kaynak Sonrası Isıl İşlemlerin St-37-2 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Kaynak Teknolojisi I. Ulusal Kongresi 1997.
- [29] Bernasovský, P., Failure Analysis Of Welded Components – Importance For Technical Practice, IIW International Congress, High Tatras, Stará Lesná, Slovakia, 2009.
- [30] Gourd, L.,M., Kaynak Teknolojisinin Esasları, İTÜ Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [31] <http://docplayer.biz.tr/192387-Kaynak-hatalari-cizelgesi.html>.
- [32] Mercan S., Aydın S., Ozdemir N. Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205–AISI 1020 joined by friction welding, International Journal of Fatigue 81 (2015) 78–90, 2015.
- [33] Oğuz, B., Ark Kaynağı El Kitabı, Oerlikon Yayını, 1975.
- [34] Şen, F., Sayman, O., Seri Çift Civata Bağlantılı Çapraz Takviye Edilmiş Tabakalı Kompozit Levhaların Hasar Davranışı, DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Der., 9,3, 21-33, 2007.