

## TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ İLE ÇELİK BORU KAYNAK HATALARININ İNCELENMESİ

İbrahim Ofraz, Erdal Karadeniz

**Özet** - Bu çalışmada, çelik boru kaynaklarının tahrıatsız deney yöntemleri ile kontrol ve muayenesi, çelik boru hatlarında karşılaşılan kaynak hatalarının sınıflandırılması ve bu hatalar ile ilgili radyografik muayene sonuçları incelenerek kaynak hatalarının nedenleri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler** - Tahrıatsız muayene yöntemleri, Kaynak hataları, Çelik boru, Radyografik muayene

**Abstract** - In this study, the testing and control of welded steel pipelines by NDT methods, the classification of welding defects observed in pipelines and radiographic testing results applied to pipelines have been investigated and the result of these defects have been researched.

**Key Words** - NDT Methods, Welding Defects, Steel Pipe, Radiographic Testing

### I. GİRİŞ

Her gün dünyanın her bir tarafına binlerce kilometrelik boru hattı döşenmektedir. Bu boru hatlarının başarılı bir şekilde döşenmesi hem insan hem de çevre güvenliği açısından çok büyük önem arz etmektedir. Boru hatlarının güvenli olarak döşenmesinde ve işletilmesinde en önemli işlemlerden biri şüphesiz kaynaklı birleştirmedir. Doğalgaz boru hattı şebekelerinin inşası esnasında boru bağlantı noktalarındaki kaynak işlemleri, servis şartlarının kritik olmasından dolayı titiz bir kontrol ve muayene gerektirmektedir. Yüksek basınç altındaki statik ve dinamik yüklere maruz kalan kaynak dikişlerinin kalite güvencesi oldukça önem arz etmektedir. Kaynaklı birleştirmelerin kalifiye edilmiş kaynakçılar tarafından başarılı bir şekilde yapılması ve

yapılan kaynakların uzman kişiler tarafından tahrıatsız olarak değerlendirilmesi uzmanlık isteyen bir işlemdir. Bu kadar önemli bir işlemde başarıya ulaşabilmek için tüm kademelerin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir [1].

Bu çalışmada, kaynak dikişlerinin muayenesinde kullanılacak tahrıatsız muayene yöntemleri ele alınmıştır. Ayrıca, boru hatlarının muayenesinde en yaygın olarak kullanılan tahrıatsız test, radyografik muayene olduğu için, uygulamalarda radyografik muayene metodu ile tespit edilmiş hataların radyografik film üzerindeki görüntüleri ve bu hataların oluşum nedenleri incelenmiştir.

### II. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Tahrıatsız test yöntemlerinin amacı, üretilen malzemelerin mamul ve yarı mamul halde ve bu malzemelerin işletme esnasında herhangi bir tahribata uğramadan olabildiği muhtemel makro süreksizliklerin araştırılması ve tespit edilmesidir. Bilhassa makro süreksizlikler ve ender olarak da belirli seviyelerdeki mikro süreksizlikler muayenelerin esasını teşkil eder. Malzemedeki cüruf yığılmaları veya diğer yabancı element birikintileri, gaz boşlukları, çatlaklar, cidar kalınlığı farkları, segregasyonlar kaynağı yapılmış malzemelerin bağlantı hataları ve benzeri nice süreksizliklerin tespiti bu test yöntemleri vasıtası ile gerçekleştirilmektedir.

Yağ ve tebeşir testi yüzey hatalarını tespit etmede kullanılan en eski NDT yöntemlerinden biridir. X-ışınları Kasım 1895'de Prof. W.K. Rontgen tarafından keşfedilmiş ve 1930 yılında Amerikan Deniz Kuvvetleri Donanmasındaki gemilerin buhar kazanlarının kaynak dikişleri X-ışınları testiyle kontrol edilmiştir. Ultrasonik test ilk olarak 1931 de kullanılmıştır, fakat önemi mühendisler tarafından ancak 1945 ten sonra fark edilmiştir. Tahrıatsız muayenenin gelişimini sağlayan başlıca nedenler şunlardır;

- Parça ve konstrüksiyonların hafifletilmesi için, limit dizaynlara gidilmesi ve bu limit dizaynlarda kusursuzluk olayının ön plana çıkması.

İ. Ofraz, İGDAŞ (İstanbul Gaz Dağıtım ve Pazarlama A.Ş.), Yatırımlar Genel Müdür Yardımcılığı, Mukavale ve Kesin Hesap Müdürlüğü, Ümraniye, İstanbul.  
E. Karadeniz, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya.

- İmalatın belirli kademesinde hatayı önceden tespit ederek müteakip işçilik masraflarının minimuma indirilmesi.
- Kazaları önlemek yada sistemin durmasını önlemek için kusurlu parçanın önceden teşhis edilmesi ihtiyaçları.

Bütün tahrıatsız test yöntemleri iki esas fonksiyonla tanımlanır. Bunlardan birisi nüfuziyet, diğeri de algılama fonksiyonudur. Nüfuziyet fonksiyonunda, nüfuz edici eleman test malzemesi içerisine girer ve fiziksel süreksizlikleri algılama elemanına aktarır. Algılama elemanı ise, nüfuz edici elemandan aldığı bilgileri test operatörünün algılayacağı belirtiler haline getirir. Tahrıatsız test yöntemlerini genel olarak 2 ana bölüme ayırmak mümkündür [2].

- Yüzey yöntemleri; malzeme yüzeyinde ve yüzeyin hemen altında bulunabilecek süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılırlar. Gözle muayene, sıvı penetrant, manyetik parçacık ve girdap akımları muayene yöntemleri yüzeysel yöntemlerdir.
- Hacimsel yöntemler; malzemedeki test bölgesinin tamamına nüfuz etmek suretiyle bütün hacim boyunca bulunabilecek süreksizliklerin algılanmasını sağlarlar. Radyografik ve ultrasonik muayene yöntemleri hacimsel yöntemlerdir.

#### II.1. Gözle Muayene

Gözle muayene, yani kaynak dikişi yüzeylerinin dikkatlice incelenmesi en önemli kaynak dikişi muayene yöntemlerinden biridir. Gözle muayene kaynak dikişi kalitesi hakkında ilk fikrin edinilmesini sağlar. İç kısımdaki hataların doğal olarak belirlenememesine karşın, gözle muayene bulguları bir kaynak dikişinin ret edilmesine neden olabilir. Diğer yandan iyi bir dış görünüme sahip dikişin yüksek kalitede bir dikiş olduğu garanti değildir. Yine de dışarıdan fark edilen hataların önceden belirlenmesi üretim işleminde hataların çabucak düzeltilmesine olanak sağlar.

Boruların hazırlanması, montaj, kaynak işlemleri, kaynak yüzey kontrolleri, belirtilen esaslara göre her ekibin başında olan saha kontrol elemanları (teknişyen ve mühendis) tarafından yapılır. Kaynak işlemine başlanmadan önce kontrol edilmesi gereken hususlar şunlardır;

- Borunun kaynağa hazırlanması ve montajın nasıl yapıldığı
- Onaylı elektrodların kullanılıp kullanılmadığı
- Onaylı kaynak yönteminin uygulanıp uygulanmadığı
- Kaynakçıların kalifiye oldukları şekilde kaynakları yapıp yapmadığı

- Kaynak malzemeleri ve ekipmanlarının standartlara uygunluğunun bulunup bulunmadığı
- Montajda kaynak ağızı, eksen kaçıklığı, ovalite gibi faktörlerin şartnameye uygun olup olmadığı

Çıplak göz veya bir büyüteç yardımı ile kaynak bağlantıları üzerinde bir çok hata kolayca görülebilir. Hatta bu konuda tecrübeli kontrol elemanı kaynak hızı, akım şiddeti, ark boyu ve elektrod çapının uygun seçilip seçilmediğini dahi böyle bir kontrol sonucunda söyleyebilir. Gözle kontrol sonucunda aşağıdaki hatalar kolaylıkla belirlenebilir;

- Yanma çentikleri veya olukları
- Uygun olmayan kaynak dikişi boyutları
- Yüzey çatlakları
- Yüzeye açık gözenekler
- Uygun olmayan dikiş tırtılları
- Kraterler çatlakları
- Yeniden başlama noktaları
- Kök pasalarda nüfuziyet azlığı veya fazlalığı
- Birleşme hataları
- Çentikler
- Yakarak delme
- Kaynak dikişi yanında tutuşma yerleri
- Eriyerek yapışmış sıçrantılar

#### II.2. Sıvı Penetrant Muayenesi

Sıvı penetrant muayenesi, malzeme yüzeyindeki yüzeye açık olan süreksizlikleri belirlemek için kullanılan tahrıatsız muayene yöntemlerinden ekonomik ve basit bir yöntemdir. Aşırı gözenekli olmamak şartı ile hemen hemen her malzeme penetrant yöntemi ile muayene edilebilir. Bu yöntem yalnızca malzemenin yüzey devamlılığında meydana gelen kesiklikleri bulmak için kullanılan bir yöntem olup, yüzey altı süreksizliklerinin tespitini de kullanılmaz.

Sıvı penetrant muayenesinin prensibi, kuvvetli kontrast etkisine sahip penetrant sıvısının uygun geliştirici tabakası ile çok küçük hataları seçilebilir hale getirmesine dayanmaktadır.

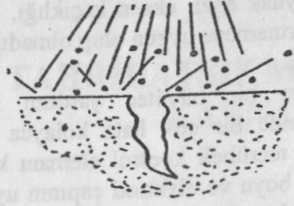
Sıvı penetrant muayene kademeleri sırasıyla şunlardır:

Muayenenin uygulanabilmesi için parçanın muayene edilecek yüzeyindeki yağ, kir, pas ve pullar olabildiğince giderilerek teste hazırlanır (Şekil 1).

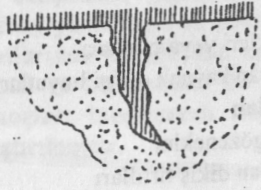
Parça temizlendikten sonra sıvı penetrant muayene edilecek kısma bir film tabakası oluşturacak şekilde tatbik edilmelidir. Penetrant daha sonra tatbik edilecek geliştirici ile kuvvetli bir kontrast oluşturmalıdır. Sıvı penetrant tabakasının muayene yüzeyindeki her bir açığa, çatlığa nüfuz etmesi için yeterli zaman tanınmalıdır.



Penetrasyon süresi genellikle 5-30 dak. arasındadır (Şekil 2).

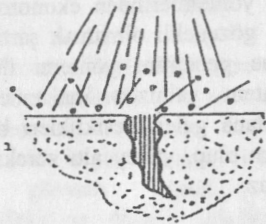


Şekil 1. Ön temizleme



Şekil 2. Penetrant'ın uygulanması

Uygun bir çözücü ile yüzeye yapışık kalan penetrant giderilir. Genelde çözücü olarak su, sıvı/gaz halindeki çözücüler ve emülgatörler kullanılır. Eğer penetrant olarak sonradan su ile çözülebilen pastemulsifier kullanılmışsa, ara yıkamada penetrantı su ile yıkanabilir hale getiren çözücü, yani emülgatör kullanılmalıdır. Ara yıkama uygun bir şekilde yapılmazsa, hataların içindeki penetrantta yıkanır ve hata belirlenemez. Doğru bir uygulamada penetrant hatalı bölge içerisinde kalır (Şekil 3).

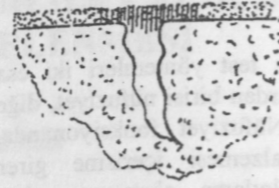


Şekil 3. Ara temizleme

Malzeme yüzeyinde kalan ara temizlik malzemesi silinerek, sıcak hava üfleyerek veya dikkatlice ısıtılarak giderilir.

Kuvvetli bir emiciliğe ve penetrantla kuvvetli bir kontrasta sahip geliştirici ince bir tabaka halinde kontrol edilen yüzeye uygulanır. Geliştirici hatalar içine kalmış penetrant sıvıyı yüzeye emer. Sonuçta yüzeyde çıplak göz ile görülebilir ve geliştirici etkisiyle büyümüş bir hata görüntüsü elde edilir. Geliştiriciler genellikle kuru yada çözücü sıvı içinde asılı halindeki tozlardır (tebeşir tozu gibi). Geliştirici genellikle beyaz, penetrant ise kırmızı veya sarımsı yeşil floresan renkte olur. Floresan penetrant ultraviyole ışık altında görünür hale gelir (Şekil 4).

Geliştirme işlemi tamamlandıktan sonra, muayene edilen yüzey üzerinde uygun aydınlatma koşulları altında (en az 500 Geliştirme işlemi tamamlandıktan sonra, muayene edilen lüks'lük bir aydınlatma) hata görüntüleri aranır.



Şekil 4. Geliştirme işlemi

Sadece muayene yüzeyine açık olan süreksizlikler, çatlaklar, gözenekler, birleşme hataları, yetersiz nüfuziyet vs. görülebilir minimum çatlak genişliği  $6.10^{-4}$  mm civarındadır [2].

### II.3. Manyetik Parçacık Muayenesi

Manyetik parçacık muayenesi oldukça basit, hızlı ve düşük maliyetle uygulanabilirliğinden dolayı çelik yapılarda oldukça geniş bir kullanıma sahiptir. Özellikle, çelik yapılardaki köşe kaynaklarının muayenesinde başarılı bir uygulama alanına sahiptir. Manyetik parçacık muayenesi yüzey ve yüzeye çok yakın yüzey altı hatalarının tespitinde kullanılır. Bu yöntemle yüzey altı hatalarının algılanması, hatanın konumuna ve yüzeye yakınlığına bağlıdır. Bu yöntem sadece ferromanyetik yani mıknatıslanabilme özelliğine sahip malzemelere uygulanır. Yöntemin esas test malzemesinin manyetize edilmesi esasına dayanır. Manyetize etme işlemi, test parçasından elektrik akımı veya doğrudan manyetik akı geçirilerek yapılabilir. Ferromanyetik malzemeler bu manyetik akıya diğer malzemelerin aksine hiç bir direnç göstermezler dahası manyetik akımın geçmesine katkıda bulunurlar. Çünkü manyetik iletkenlikleri havanın veya alüminyumun iletkenliğine göre 100 kat daha fazladır. Eğer ferromanyetik kesit içerisinde manyetik alan çizgilerine dik düzlemsel hatalar varsa, bu bölgelerde alan çizgileri engellenecek ve başka yöne sapacaklardır. Bu durum hata üzerinde yoğun bir kaçak alan oluşturur ve hatanın boyutu ne kadar büyük ise akı çizgilerindeki süreksizliklerden dolayı meydana gelen sapma o derecede büyük olacaktır [2].

Manyetik parçacık yönteminin ikinci elemanı olan manyetik tozlar parça üzerine serpildiğinde manyetize olurlar ve hata üzerinde yoğunlaşarak kaçak alan çizgilerinin geçişi için köprü oluştururlar. Şekil 5'de boyuna (a) ve enine (b) magnetize edilmiş iki ayrı test parçasındaki manyetik parçacık testi ile algılanabilen süreksizliklere ait resim görülmektedir.

Manyetik parçacık testinde kullanılan tanecikler boyu, şekli ve geçirgenliği uygun olan ferromanyetik malzemelerden yapılırlar. Bu tanecikler pratik olarak kalıcı manyetikliğe sahip değildir ve eğeleme ile elde

edilen demir tozlarından daha incedir. Tanecikler kuru iken un görünümünde toz şeklindedir. Tanecikler kullanıldıkları şekle göre yağ ve kuru olarak sınıflandırılırlar.

Yaş banyo yönteminde tanecikler süspansiyon halinde bir sıvı kabında bulunur ve bu sıvı su veya yağ olabilir. Banyo devamlı bir şekilde karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanır. Banyo bir pompa vasıtasıyla parçaya püskürtülür. Yaş banyo yönteminde kullanılacak manyetik parçacıklar siyah, kırmızı veya floresans maddelerle kaplı olabilir. Siyah ve kırmızı tanecikler, mıknatıslanacak olan parçanın zeminine karşı bir renk kontrastı oluştururlar. Banyodaki tanecikler parça üzerinden tekrar banyoya geçerler. Taneciklerin akı kaçığında toplanması süreksizliğin varlığını gösterir. Yaş banyo yönteminde floresans tanecikler, siyah ışık altında incelenir. Akı kaçığında toplanmış olan floresans tanecikler parlayarak süreksizliği gösterir. Floresans taneciklerin büyük avantajı siyah ışık altında görünürlüklerinin artmasıdır.

Manyetik taneciklerin yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması istenir. Çünkü bu durumda zayıf akı kaçığı bile tanecikleri çeker ve tutar. Genel olarak mıknatıslığı tutma yeteneği düşük tanecikler arzu edilir. Çünkü bunlar mıknatıslıklarını kolaylıkla kaybederler. Bu şekilde tanecikler akı kaçığı tarafından tutulmazlarsa parçadan kolaylıkla giderilebilirler [3,4].

Özet olarak, manyetik parçacık testinde kullanılacak tanecikler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdırlar:

- Yüksek manyetik geçirgenlik,
- Çok düşük mıknatıslığı tutma yeteneği,
- Test malzemesinin yüzeyi ile iyi bir kontrast teşkil edebilecek bir renk.

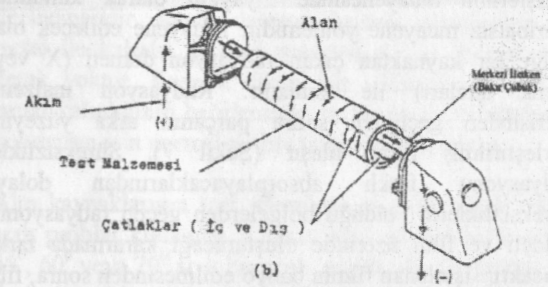
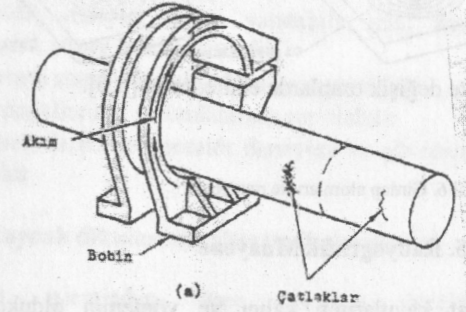
Bu yöntemle akım yönüne paralel veya manyetik alana dik yüzeyin en fazla 40  $\mu$ m altındaki çatlaklar, gözenekler, çentikler, yetersiz kaynak nüfuziyeti ve yakıp delme hataları belirlenebilir. En az 10  $\mu$ m derinliğinde en az 1  $\mu$ m genişliğinde ve en az 0.2 ile 1 mm boyutundaki hatalar bu yöntemle belirlenebilir.

### II.4. Girdap Akımları ile Muayene

Girdap akımları yüzey ve yüzeye yakın süreksizliklerin belirlenmesi için uygun bir yöntem olup, elektrik iletkenliğine sahip bütün metal alaşımlarına uygulanabilir. Ancak ferromagnetik olmayan malzemelerde daha etkindir.

Prensibi, bir alternatif akım bobini etrafında oluşturulan değişken manyetik alanın, iletken malzeme yüzeyinde dairesel girdap akımlarını endüklemesine dayanır. Endüklenen bu girdap akımları, bobindeki manyetik alana

zıt yönde ikinci bir manyetik alan meydana getirir. Test malzemesinde girdap akımlarının olduğu bölgede bir süreksizlik var ise test malzemesi ve süreksizlik arasında elektrik direnci farkından dolayı akımların düzgün daireselliği bozularak farklı bir yörünge izleyeceklerdir. Bu farklılık yine bobin tarafından algılanacaktır (Şekil 6).



Şekil 5. Manyetik parçacık testi; (a) Boyuna magnetizasyon yöntemi (b) Enine magnetizasyon yöntemi

Girdap akımı test teçhizatı temel olarak bir alternatif akım kaynağı, bu akım kaynağına bağlı bir bobin (prob) ve bobinden geçen voltaj değişimlerini ölçmek amacıyla bunların bağlı olduğu bir gösterge elemanından oluşur. Güç kaynağı, 1 kHz'den 2 MHz'e kadar olan frekans aralığında bir akım temin edebilecek kapasitede olabilir. Prob'un içindeki bobin uygun bir şekilde sarılmış ve izolasyonu yapılmış bakır bir teldir. Tel çapı, sarım sayısı ve bobin boyutları istenen test neticelerini bulmak için hassas bir şekilde tayin edilmesi gereken değişkenlerdir.

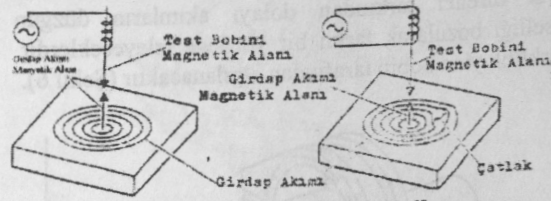
Testin türüne göre bir girdap akımı test probu; hem verici hem de alıcı olarak çalışan yalnız bir test bobininden oluşabileceği gibi, uyarıcı bobinle birlikte ayrıca bir algılayıcı bobin düzenlenmesini de ihtiva edebilir.

Gösterge elemanı elektriksel şartların, iletken malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ve test malzemesiyle bobin arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak değişen bobin gerilimindeki değişimleri gösterir. Bu gerilim değişimlerinden, bobinden geçen akıma bağlı bir genlik ve faz dönüşümü olarak istifade edilir.

Girdap akımı yöntemiyle yapılan test işleminde süreksizlik konumu ve yönü, sıcaklık, malzeme geometrisi ve yapısı, temas şekli, prob hızı ve frekans



gibi faktörler göz önüne alınmalıdır. Uygulanan test türüne ve ölçülmek istenen büyüklüğe göre bu faktörler



teste değişik oranlarda etki ederler [5,6].

Şekil 6. Girdap akımları ile muayene

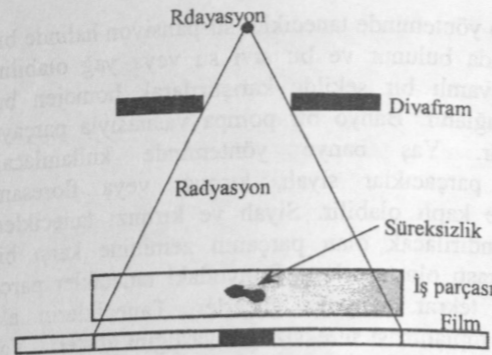
## II.5. Radyografik Muayene

Test kayıtlarının kalıcı ve yöntemin oldukça hassas olmasından dolayı radyografi boru hatları kaynak dikişlerinin muayenesinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemidir. Muayene edilecek olan bölge bir kaynaktan çıkan radyasyon demeti (X veya gama ışınları) ile ışınlanır. Radyasyon malzeme içerisinden geçtikten sonra parçanın arka yüzüne yerleştirilmiş filme ulaşır (Şekil 7). Süreksizlikler radyasyonu farklı absorplayacaklarından dolayı, süreksizliklerin olduğu bölgelerden geçen radyasyonun şiddeti ve film üzerinde oluşturacağı kararmada farklı olacaktır. Işınlanan filmin banyo edilmesinden sonra, film üzerindeki kararmalar hatanın belirtisi olarak görünür hale gelir. Düzlemsel hatalar radyasyon demetine paralel doğrultuda buldukları sürece radyografi yöntemi ile algılanabilirler. Endüstriyel radyografide genellikle ya X-ışını tüpü yada Co-60 veya Ir-192 gibi radyoizotop kaynaklar kullanılmaktadır. Radyografi, ana malzeme ile yoğunluk farkı oluşturan hacimsel iç hataların tespitinde en uygun yöntemdir. Radyografinin avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir [7].

- Kalıcı kayıt elde edilir ve zaman içinde karşılaştırma yapılması mümkündür.
- İş sahasında kalibrasyon gerekmez
- İç süreksizliklerin tespitinde mükemmel bir yöntem
- Demet yönü geometriden etkilenmez
- Radyasyon tehlikesi
- Hatanın derinliği gösterilmez
- Çizgisel süreksizliklerin doğrultusu önemlidir
- Nispeten pahalıdır.
- Sınırlı nüfuziyet derinliği
- Parçanın iki tarafından da ulaşılabilirlik

Radyografi tekniğinde kullanılan iki tip radyasyon vardır. Bunlar, gama ve X-ışınlarıdır. Gama ışınları, bilindiği üzere, radyoaktif elementlerin bozunması sırasında meydana gelir. X-ışınları ise yüksek voltajlı elektron tüplerinde yapay olarak elde edilir. X ve gama ışının seçimi test edilecek malzemenin kalınlığına, cinsine,

kullanılacak ışınlama düzenine ve gerekli olan test sınıfına göre yapılır.



Şekil 7. Süreksizlik görüntüsünün oluşumu

### II.5.1. Radyografik muayene prosedürü

Radyografik muayene yapılmadan önce bir prosedür hazırlanmalı ve işlemler bu prosedürün ön gördüğü şekilde yapılmalıdır. Kullanılan prosedürün yeterliliği, radyograflar alınırken yoğunluğun ve penetrametre görüntüsü şartları, kullanılan prosedürün yeterliliğinin kanıtı olarak düşünülmelidir. Radyografi prosedürü en az aşağıda verilen teknik değişkenleri içermelidir :

- Malzeme veya kaynak yüzeyi durumu
- Radyografi çekilecek malzeme
- Malzeme kalınlığı
- Radyasyon kaynağının türü, odak büyüklüğü, X-ışını cihazı voltajı
- Filmin ticari markası, türü, kasetteki film sayısı
- Minimum radyasyon kaynağı – film mesafesi
- Eğer kullanılıyorsa maskeleme tekniği
- Filterenin ve ekranların kalınlığı
- Banyo işlemleri
- Film yoğunluğu
- İşaretleme harflerinin kullanımı
- Geometrik yarı gölge
- Penetrametre seçimi

### II.5.2. Radyografların değerlendirilmesi

Radyografların değerlendirilmesinde insan, yer ve zaman faktörlerinin neden olabileceği değerlendirme farklarını azaltmak için referans radyograf takımları hazırlanmıştır. Yapılacak iş eldeki radyografi referans radyografla mukayese ederek değerlendirmektir [8]. Çeşitli referans takımları mevcuttur. Fakat iki tanesi uluslararası alanda geçerlilik kazanmıştır. Bunlardan biri, I.I.W ((International Institute of Welding "I.I.W") uluslararası kaynak enstitüsü referans radyograf takımıdır ve sadece kaynak için hazırlanmıştır. Diğeri ise ASTM (Amerikan Malzeme Muayenesi Cemiyeti) tarafından hem kaynak

hem de döküm için hazırlanmış referans radyografi takımıdır. Referans radyograflar kaynaklar için bir kabul standardı değildir, sadece hataların mukayesesi ve tanımlanması için kullanılmalıdır. Filmler, hataların izafi ehemmiyetine göre 5 gruba ayrılmıştır. Gruplar Tablo 1'de belirtildiği gibi renklerde işaretlenmiştir.

Radyograflar özel yapılmış (negativoskop) cihazlar kullanılarak değerlendirilmelidir. Okuma cihazı bir ışıklı kutudur. Kutu, ekranın üzerine konulan radyografa yüksek şiddette ışık verilir. Işık şiddeti ekranın her noktasında aynıdır. Böylece fotoğrafik yoğunluk farklarının algılanma olasılığı radyografin her yerinde aynıdır. Değerlendirmeyi yapan şahısta görme kusurunun bulunmaması esastır. Okuma hızı hiç bir zaman 1 cm / sn'yi aşmamalıdır. Şayet kılcal çatlaklar gibi kısa çok ince ve zayıf kontrast veren hatalar söz konusu ise okuma hızı daha yavaşlatılmalıdır. Radyografların değerlendirilmesi bir uzmanlık işidir. Bundan dolayı, radyografik değerlendirme yapacak kişiler akredite edilmiş kuruluşlardan radyografik muayene eğitimini almalı ve yazılı, uygulamalı imtihanları başarıyla tamamlamalıdır. Radyografları değerlendirecek kişiler en az Seviye 2 radyografik muayene metodu üzerine belgelendirme özel komitesi tarafından yetkilendirilmiş olması gerekir.

Tablo 1. I.I.W'ya göre hataların izafi önemine göre sınıflandırılması

Renk	Radyografinin görünüşü
Siyah	Sadece birkaç ufak gaz kabarcığı ihtiva eden sağlam kaynak dikişleri (Aa ,Ab )gibi
Mavi	Gaz kabarcığı, curuf kalıntısı oyuk gibi, hafif kaynak hataları (Ba'dan Bf'ye kadar ve F gibi)
Yeşil	Gözenek, curuf kalıntısı, oyuk nüfuziyeti azlığı gibi, küçük kaynak hatalarının biri veya bir kaçının bir arada olması (D) gibi
Kahverengi	Bir veya birkaç hatanın bir arada bulunduğu dikkat çekilen kaynak hataları gözenek, curuf kalıntısı, oyuk nüfuziyet azlığı (BD) (C) gibi
Kırmızı	Bir veya birkaç hatanın bir arada bulunduğu büyük kusurlar; gaz ve curuf kalıntıları oyuk, erime ve nüfuziyet azlığı. (Ea ve Eb) gibi

## II.6. Ultrasonik Muayene

Bu NDT yöntemi, test edilecek parçadaki süreksizlikleri dedekte etmek için 0.2-25 Mhz aralıkta yüksek frekanslı ses dalgalarını kullanmaktadır. Burada, hertz (Hz) frekans birimi olup, saniyedeki titreşime eşittir. Ultrasonik test, malzeme içinde yayılan ses demetinin akustik empedansda (bir malzemenin ses yayılmasına karşı gösterdiği direnç) meydana gelen değişim sonucu kısmen veya tamamen yansımaya (yankı) prensibine dayanmaktadır. Yüksek frekanslı ses, elektrik enerjisini mekanik enerjiye ve mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahip bir piezoelektrik kristal tarafından malzemeye gönderilir. Algılanan yankılar katot ışını tüpünde, görünen elektrik sinyallerine dönüştürülür. Ultrasoniğin üstünlükleri ve kısıtlamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir [9].

- Malzemenin sadece bir tarafından giriş yeterli
- Düzlemsel iç süreksizliklerin belirlenmesinde en uygun yöntemdir
- Oldukça portatif
- Yüksek nüfuziyet yeteneği
- Anında sonuca varma
- Otomatik sistemlere adapte edilebilir
- Pürüzlü yüzeyler sorun yaratabilir yani kontrol edilecek yüzey temiz olmalıdır.
- Referans standartlar ve kalibrasyon gereklidir
- Ses sinyallerinin yorumlanması zor olabilir
- Yüksek derecede operatör deneyimi ve güvenilirliği gerekir

### II.6.1. Kaynak dikişlerinin ultrasonik muayenesi

Muayene işleminden önce, probun hareketini engelleyebilecek yüzey bozuklukları giderilmelidir. Dikiş yüzeyi dalgalı ise, yanıtıcı belirtileri gidermek için yüzey düzlenmelidir. Ancak dalgasız kaynak yüzeylerinin ana metal ile kalınlık farkı 3 mm'den az ise düzlenmesine gerek yoktur. Kaynak dikişi test edilmeden önce, ana metal kalınlığının belirlenmesi ve laminasyon hatalarının bulunması için normal proba tarama yapılmalıdır.

Alın kaynaklarının test işleminde genelde enine dalgalı açılı problemler kullanılır. Kaynak ağzı açısına bağlı olarak 45°, 60° veya 70° açılı bir prob seçilir. Açılı seçiminde, ses demetinin iki metal sınırına dik olarak gelmesi göz önüne alınmalıdır. Çatlakların tespiti için 45° açılı prob tercih edilmelidir. Kullanılacak prob sayısı kaynağın şekline ve tespit edilecek hata tipine bağlıdır. Test edilecek hata tipine göre farklı konumlarda tarama yapılmalıdır. Boyuna hataların tespiti için tüm kaynak kesiti taranmalıdır. Bunun için prob kaynak eksenine dik doğrultuda konumlanır ve aşağıdaki şekillerde hareket ettirilir.

- Enine yönde hareket; prob amaca göre yarım ve tam ses adımı mesafelerinde hareket ettirilir.
- Boyuna yönde hareket; prob kaynak eksenine paralel ve % 10 bindirme ile hareket ettirilir.
- Zikzak hareket; boyuna ve enine yöndeki hareketin kombinasyonudur.

## III.SIK KARŞILAŞILAN KAYNAK HATALARININ İNCELENMESİ

İGDAŞ uygulamalarında kaynak hatası tespit edilmiş 500 adet radyografi filmi incelenmiş ve hata türleri dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Bu bölümde, radyografik muayene yöntemi ile tespit edilmiş hata çeşitleri ve bu hataların film üzerindeki görüntüleri hakkında bilgi verilmiştir.



### III.1 Eksen Kaçıklığı

Kaynaklanacak parçaların yanlış hizalanması olarak tanımlanır. Filmde kaynak görüntüsünün genişliği boyunca film yoğunluğunda ani değişme şeklinde görünür (Şekil 8.a). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.2. Eksen Kaçıklığından Kaynaklanan Yetersiz Nüfuziyet

Kaynaklanacak parçaların yanlış hizalanmasından dolayı kaynağın kök bölgesinin bir kenarının birleşmemesi sonucu meydana gelen hatadır. Filmde kaynak görüntüsünün genişliği boyunca film yoğunluğunda ani değişme ve bu yoğunluk değişiminin kenarı boyunca kaynak görüntüsünün ortasında doğrusal boyuna koyu yoğun çizgi şeklinde görünür (Şekil 8.b). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.3. Dış Konkavite veya Yetersiz Doldurma

Kaynağın üst bölgesinin veya kapak pasonun normal dikiş kalınlığından düşük yapılması ve çukur kalmasıdır. Filmde kaynaklanacak parçanın yoğunluğundan daha yoğun bölge ve bu yoğunluğun kaynak görüntüsünün tüm genişliği boyunca devam etmesidir (Şekil 8.c). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.4. Kök Sarkması, Aşırı Nüfuziyet

Kaynağın kök bölgesinde fazladan metal bulunmasıdır. Filmde kaynak görüntüsünün merkezinde düşük yoğunluklu, kaynak bölgesi boyunca yada ayrı damlalar halinde bölge şeklinde görünür (Şekil 8.d). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.5. Dış Yanma Çentigi

Kaynağın üst bölgesinin kenarı boyunca ana malzemede çentikler ve oyuklar vardır. Filmde kaynak görüntüsünün kenarı boyunca düzensiz yüksek yoğunluklu koyu bölgeler şeklinde görünür. Bu bölgelerdeki yoğunluklar kaynaklanacak parçanın film üzerindeki yoğunluğundan daima büyüktür (Şekil 8.e). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.6. İç Yanma Çentigi

Kaynağın iç yüzeyinin veya kök bölgesinin kenarı boyunca ana malzemede çentikler ve oyuklar şeklinde oluşan hatadır. Filmde kaynak görüntüsü genişliğinin merkezine yakın ve kök paso görüntüsünün kenarı boyunca düzensiz yoğunluklu koyu bölgeler görünür (Şekil 8.f). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.7. İç Konkavite

Kök paso yüzeyi merkezinde çukurlar vardır. Filmde kaynak görüntüsü genişliğinin ortasında düzensiz uzunlamasına koyu yoğunluk şeklinde görünür (Şekil 8.g). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.8. Yakıp Delme

Kaynağın alt bölgesinde krater tipi ve uzun olmayan birden fazla çukur vardır. Filmde kaynak görüntüsü genişliğinin ortasında lokal yoğunluklu bölgeler şeklinde görünür ve bu bölgelerin genişliği kök paso görüntüsünün genişliğinde daha büyük olabilir (Şekil 8.h). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.9. Yetersiz Nüfuziyet

Kaynaklanacak parçaların kenarları birbirine tam olarak kaynamamıştır. Bu hata genellikle V alın kaynaklarında kök bölgesinde meydana gelir. Filmde kaynak görüntüsünün ortasında kenarları birbirine paralel olan tam doğrusal yüksek yoğunluklu koyu şerit şeklinde görünür (Şekil 8.i). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.10. Pasolar Arası Curuf Kalıntıları

Kaynak metalinin üzerinde katılaştıran ve temizleme ile uzaklaştırılamayan metalik olmayan kalıntılardır. Filmde genellikle sıralanmış ve hafifçe uzanmış düzensiz şekilli yüksek yoğunluklu koyu noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.j). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.11. Yan cidara Kaynamama

Kaynak pasosu ile ana metalin birleşim yüzeyleri arasında uzanmış bloklar vardır. Filmde uzanmış curuf şeridi gibi kıvrımlı olmayan ve uzunluğu boyunca tam doğrusal olan yan cidara kaynamama hattı boyunca dağılmış uzunlamasına paralel veya tek, yüksek yoğunluklu koyu çizgiler ve noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.k). Yöntem : Gazaltı Kaynağı.

### III.12. Pasolar Arası Soğuk Bindirme

Alt pasoların kenarları ve üst yüzeyleri boyunca erime eksikliği vardır. Filmde kaynak yönü boyunca kaynak görüntüsünün kenarlarında hafifçe uzanmış yüksek yoğunluklu koyu noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.l). Yöntem : Gazaltı Kaynağı.

### III.13. Dağınık Proziteler

Yuvarlak rasgele boyutta gelişigüzel dağılmış boşluklardır. Filmde yüksek yoğunluklu koyu noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.m). Yöntem : Elektrik Ark ve Gazaltı Kaynağı.

### III.14. Küme Şeklinde Proziteler

Yuvarlak ve hafifçe uzanmış grup halinde boşluklardır. Filmde gelişigüzel dağılmış yoğunluklu koyu noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.n). Yöntem : Elektrik Ark ve Gazaltı Kaynağı.

### III.15. Kök Pasoda Sıralı Proziteler

Kök pasoda kaynak merkezi boyunca sıralanmış uzun ve sıralı boşluklardır. Filmde kaynak görüntüsünün ortasında doğrusal bir hat şeklinde ayrı ayrı veya birleşmiş yüksek yoğunluklu koyu noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.o). Yöntem : Elektrik Ark ve Gazaltı Kaynağı.

### III.16. Enine Çatlak

Kaynak genişliği boyunca uzanan çatlaklardır. Filmde kaynak görüntüsünün genişliği boyunca uzanan kıvrımlı koyu çizgiler şeklinde görünür (Şekil 8.p). Yöntem : TIG

### III.17. Boylamasına Çatlaklar

Kaynak yönü boyunca uzanan çatlaklardır. Filmde kaynak görüntüsünün genişliği boyunca uzanan kıvrımlı koyu çizgiler şeklinde görünür (Şekil 8.r). Yöntem : TIG

### III.18. Boylamasına Kök çatlağı

Kaynak metalinde kök pasonun kenarındaki çatlaklardır. Filmde kök paso görüntüsünün kenarı boyunca uzanan yüksek yoğunluklu koyu kıvrımlı çizgiler şeklinde görünür (Şekil 8.s). Görüntünün kıvrımlı olması kök çatlağının kök bölgesindeki yetersiz nüfuziyet hatasından ayırt edilebilmesini sağlar. Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

### III.19. Tungsten Kalıntıları

Kaynak metali içerisinde erimemiş halde bulunan rasgele dağılmış tungsten parçacıklarıdır. Filmde kaynak görüntüsü içerisinde gelişigüzel dağılmış düzensiz şekilli düşük yoğunluklu açık renkli noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.ş). Yöntem : TIG

### III.20. Uzamış Cüruf Şeridi Sıralı Cüruflar

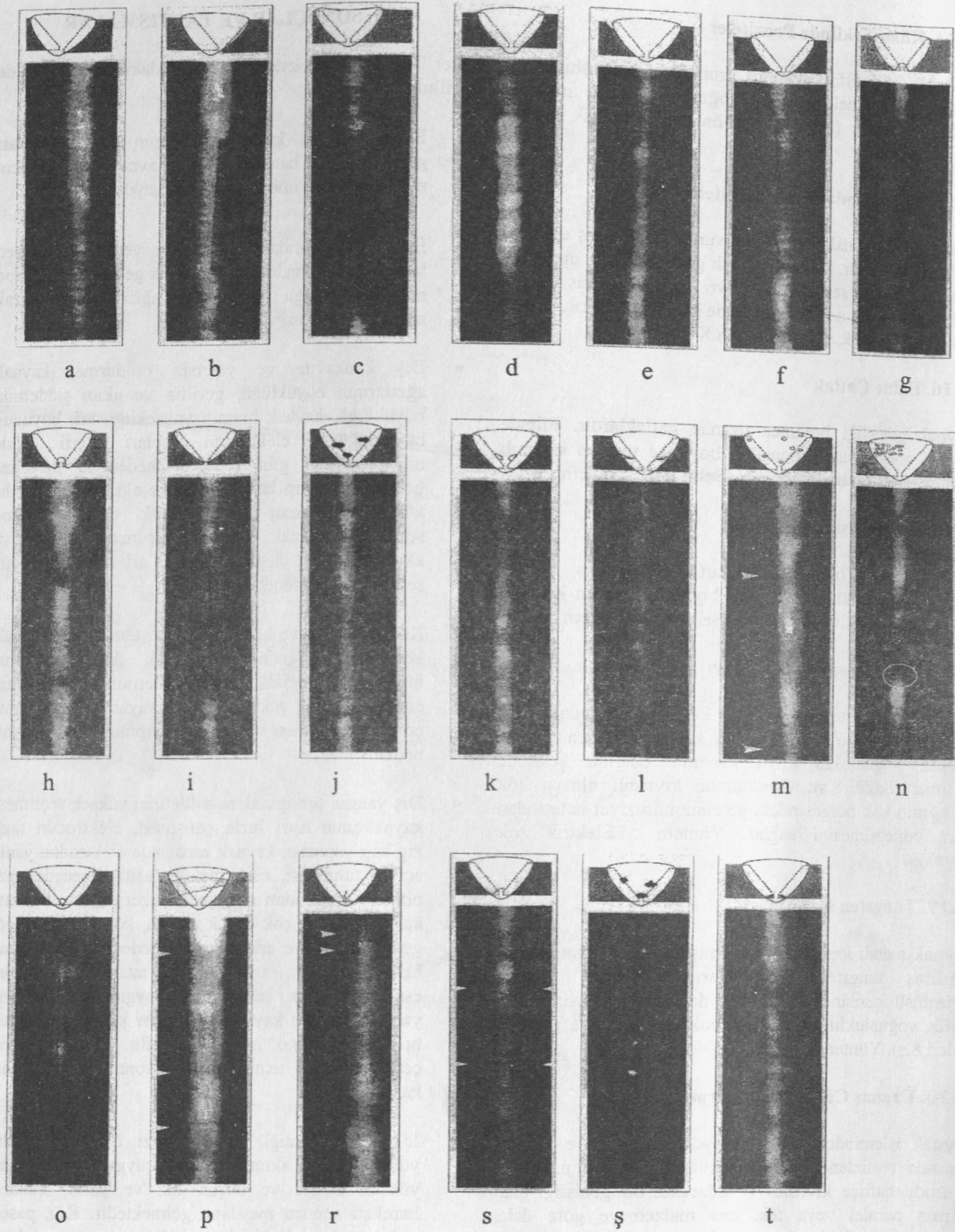
Kaynak işleminden sonra yüzeyde katılaştıran ve pasolar arasında temizlenemeyen kalıntılardır. Filmde uzunluğu yönünde hafifçe kıvrımlı ve düzensiz bir genişliği olan uzamış paralel veya tek, ana malzemeye göre daha yüksek yoğunluklu koyu noktalar şeklinde görünür (Şekil 8.t). Yöntem : Elektrik Ark Kaynağı.

## IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Her tip hata incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir ;

- Eksen kaçıklığı, kaynak bölgesinin temiz olmaması gibi görüntüsel hatalardan veya kaynakçının ayar için master kullanmaması nedeniyle meydana gelmiştir.
- Eksen kaçıklığından kaynaklanan yetersiz nüfuziyet, başka bir hata nedeniyle meydana gelmiştir. Elektrod mümkün olduğu kadar açık ağızda çalıştırılarak nüfuziyet sağlanabilir.
- Dış konkavite ve yetersiz doldurma, kaynak ağızlarının büyüklüğü, gerilim ve akım şiddetinin büyüklüğü, kaynak hızının yüksekliği, ark boyunun büyüklüğü ve elektrodun pasoları yeterli ölçüde oluşturmaması gibi sebepler nedeniyle meydana gelmiştir. Bu tip hatalar, kaynak ağız açısının daha küçük yapılması, daha büyük çapta elektrod seçilmesi, kaynak hızının azaltılması, gerilim ve akım şiddetinin düşük olması ve ark boyunun küçük seçilmesiyle önlenir.
- Kök sarkması ve aşırı nüfuziyet, alın kaynaklarında kök yüksekliğinin küçüklüğü, kök aralığının büyüklüğü, kaynak dikiş eksenlerinin kaçıklığı, ark enerjisinin çok yüksek olması, kaynak ağız açısının çok büyük olması ve elektrod çapının büyük olması nedeniyle.
- Dış yanma çentigi, akım şiddetinin yüksek seçilmesi, kaynakçının aşırı hızla çalışması, elektrodun fazla zig zag yapması, kaynak esnasında elektrodun yanlış açıyla tutulması, esas metalin aşırı derecede gazlı olması, elektrodun esas metal üzerine çarptırılması, kaynak hızının çok düşük olması, kök aralığının çok geniş olması ve ark üfleme nedeniyle. Kaynak hızı artırılarak, ark gerilimi azaltılarak, kaynak esnasında ağız kenarlarında uygun bir bekleme yaparak, uygun kaynak ağız açısı kullanarak ve ark boyunu azaltarak hata önlenir. Tamiri için ise çentikler iyice temizlendikten sonra yeni bir paso kaynak yapılır.
- İç yanma çentigi, kaynak ağız ölçüsünün, adım yüksekliği ve akım şiddetinin uygun seçilmemesi, yüksek amper ve düşük hız ve yanlış elektrod hareketi sonucu meydana gelmektedir. Kök pasosu atılırken daha düşük akım şiddeti ve uygun elektrod hareketine dikkat edilerek hata oluşumunu önlemek mümkündür.





Şekil 8. Radyografik film görüntüleri

- İç konkavite, yüksek akım değerlerinde küçük çaplı elektrod kullanılması, yanlış elektrod açısı ve hareketleri nedeniyledir. Kök pasosu atılırken elektrod hareketi ve çapı uygun seçilerek önlenir.
- Yakıp delme, kök pasonun fazla taşlanması ve sonraki paso için yüksek akım değerleri kullanılması nedeniyledir. Kök pasonun fazla taşlanması ve sonraki paso için yüksek akım değerleri kullanılması nedeniyledir. Kök pasonun fazla taşlanmaması ve sonraki pasoda yüksek akım değerleri kullanılmamasıyla bu hata önlenmiş olur.
- Yetersiz nüfuziyet, erimenin bütün malzeme kalınlığı boyunca olmaması neticesinde meydana gelir. Başlıca sebepleri; uygun olmayan kaynak ağzı (çok küçük ağız açısı ve kök aralığı, çok büyük kenar kayması, aşırı dış bükey pasolar, taşlama çentikleri, büyük sıçırantı ve cüruf birikimi), düşük ark gücü (çok düşük gerilim, akım şiddeti çok küçük, kaynak hızı çok büyük, ark boyu çok büyük), ark önünde akan kaynak banyosu, elektrod çapının çok büyük olmasıdır. Bu hatanın oluşumunu önlemek için kaynak ısısı artırılmalı, kaynak ağzı temizlenmeli, uygun elektrod çapı kullanılmalı, uygun elektrod açısı ve manyetik ark üfleme etkisi azaltılmalıdır.
- Pasolar arası curuf kalıntıları, uzamış curuf şeridi ve sıralı curuflar, curufun veya deoksidasyon ürünlerinin kaynak metaline hapsolmesi, elektrod hareketinin çok geniş olması ve düzensiz bir hızla ilerlemesi, ark boyu uzunluğu, ark başlangıcında cüruf boşluğu oluşması, düşük akım şiddeti ve kaynak ağzı kirliliği nedeniyledir. Kaynak ağzını pas, pislik ve yağ gibi maddelerden temizleme, çok pasolu dikişlerde bir önceki kaynak pasosunun dikiş yüzeyinde oluşturduğu cürufu kaldırma, kaynak ağzı açısını artırma, uygun çapta elektrod kullanma, düzenli bir kaynak hızı, elektrod hareketinin daraltılması ve ark boyunun azaltılması ile bu hata önlenmiş olur.
- Yan cidara kaynamama, cüruf, oksit kav veya diğer demir olmayan yabancı maddelerin varlığı, kaynak ağzının darlığı, kaynak hızının ve kaynak akımının çok fazla olması, ark boyunun uzun olması, elektrod tipinin yanlış seçimi ve elektrod açısının uygun olmaması gibi nedenlerden meydana gelir. Kaynak ağzının temizlenmesi ve uygun aralık verilmesi, kısa ark boyu, derin nüfuziyetli elektrodların kullanımı, kaynak ilerleme hızının düşürülmesi ve kaynak ısısının artırılması ile bu tip hataların önlenmesi mümkündür.
- Pasolar arası soğuk bindirme, erime azlığından meydana gelen bir hata türüdür. Düşük kaynak akımından, kaynak ağzlarının kirli olmasından

meydana gelir. Temizliğe ve uygun kaynak akımına dikkat edilerek önlenir.

- Dağınık prozitetler, küme şeklindeki prozitetler ve kök pasoda sıralı prozitetler, kaynak banyosunda veya ana metal içerisinde çökelen gazlar ve boşluklar veya aralıkların kaynağında ortaya çıkan gazlar nedeniyledir. Yeteri kadar deoksidan elementler (Mn, Si, Al, ve Ti) içeren elektrodlar kullanarak, kaynak banyosunun soğuma hızını kontrol ederek pasolar arası temizliğe dikkat ederek, elektrodu kurutarak, gaz akış hızı ve gaz temizliği kontrol edilerek, kaynak hızı düşürülerek ve kaynak bölgesi temizlenerek bu tip hatalar önlenir.
- Enine çatlaklar ve boylamasına çatlaklar, alaşımın solüdes sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda, çoğunlukla kaynak metalinin katılaşması sırasında meydana gelen sıcak çatlak tipi çatlaklardır. Kaynak metalinin katılaşması sırasında kükürt gibi kalıntı elementlerin segregasyonu ve katılaşma tamamlanırken kaynak metali içerisinde hala ergime sıcaklığı düşük sıvı fazlarının bulunması bu tip çatlaklara neden olur. Hatalar kaynak metalinde olup, kaynak metalinin katılaşması sırasında oluşur ve katılaşmadan sonra büyür. Kaynak metalinde Mn/S oranı artırılarak, S, P, C ve Nb oranı azaltılarak, kaynak bölgesindeki iç gerilmeleri azaltmak için ön tavlama yaparak, bazik elektrod kullanma ve kullanım öncesi kurutarak, kaynak ağzını veya köşesini bir miktar takviye edip, kaynak dikişini konveks yaparak ve soğutma hızını düşürerek bu tip hataları önlemek mümkündür.
- Boylamasına kök çatlağı, kök pasosu atılmasının hemen sonrasında sıcak pasonun tamamlanmasını beklemeden kaynak edilen parçanın hareket ettirilmesinden dolayı gerilmelerin neden olduğu çatlaklar nedeniyledir. Önlemek için, kök pasodan hemen sonra (max 5 dakika) sıcak pasonun atılması ve sıcak paso atılmadan parçanın hareket ettirilmemesi gerekir.
- Tungsten kalıntısı, sıcak tungsten elektrodun kaynak banyosu ile temasından, kaynak teli ile temasından ve kaynak akımının yüksek olmasından meydana gelir. Kaynak akımı uygun seçilerek ve erimeyen tungsten elektrodun teması önlenerek tungsten kalıntılarının oluşumu önlenmiş olur.

Sonuç olarak doğalgaz çelik boru kaynak hatalarının;

- Kaynakçı personelinin dikkatsizliği,
- Kaynakçı personelinin bilgi yetersizliği,
- Temizlik şartlarına uyulmaması,



- Uygulamada tavsiye edilen kaynak şartlarına uyulmaması v.b. nedenlerden meydana geldiği tespit edilmiştir.

Bu nedenle, kaynak işlemi öncesi ve kaynak işleminin her kademesinde muayene ve kontrol ile meydana gelebilecek hatalar önlenebilecek ve maliyet azalacaktır.

### KAYNAKLAR

- [1] KENNEDY. L. J., "Oil and Gas Pipeline Fundamentals", Second Edition, PennWell Publishing Company, Oklahoma, 1993.
- [2] EKİNCİ.Ş., "Tahribatsız Test, Ultrasonik Seviye 2", Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, İstanbul, Mart 1994.
- [3] GENERAL DYNAMICS., "Nondestructive Testing Magnetic Particle", Convair Division, Training Handbook, CT-6-3 Second Edition, 1977.
- [4] GLARDONI.A., "Nondestructive Testing NDT", Italy, 1981.
- [5] GENERAL DYNAMICS., "Nondestructive Testing Eddy Current", Convair Division, Classroom Training Handbook, CT-4-5, Second Edition, 1980.
- [6] GENERAL DYNAMICS., "Nondestructive Testing Eddy Current", Convair Division, Classroom Training Handbook, CT-6-5 Second Edition, 1979.
- [7] AKGÜN.A.F., BAŞ.N. ve YILDIRIM.A., "Tahribatsız Test, Radyografik Donanım", Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, İstanbul, Kasım 1990.
- [8] TOPUZ.A., "Tahribatsız Muayeneler", YTÜ, İstanbul, 1993.
- [9] BERKE.M., "Nondestructive Material Testing with Ultrasonic", Krautkramer Training System, Level1, 1990.