

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMPERLENMİŞ MARTENZİTİK ÇELİKTEN İMAL EDİLMİŞ KAYNAKLI
ZIRH ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Umut Yaşar UZUNALI

ŞUBAT 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEMPERLENMİŞ MARTENZİTİK ÇELİKTEN İMAL EDİLMİŞ KAYNAKLI
ZIRH ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Umut Yaşar UZUNALI

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 01 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 22 / 02 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

ORCID :

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Temperlenmiş Martenzitik Çelikten İmal Edilmiş Kaynaklı Zırh Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının Belirlenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI ’ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP birimine tez çalışmama FSI-2020-8765 ve FAY-2021-9785 numaralı proje dolayısıyla maddi desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Deneyleri gerçekleştirdiğimiz cihazın üniversitemiz bünyesine kazandırılması aşamasında ve vermiş oldukları desteklerden dolayı hocalarım Sayın Prof. Dr. Recep GÜMRÜK ’e ve Sayın Doç. Dr. Mustafa ASLAN ’a, deneysel çalışmalarım da daima yanımda olan değerli dostum Sayın Ümit KARTAL ’a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde hiçbir yardımdan kaçınmayan değerli dostlarım Sayın Doç. Dr. Barbaros ATMACA ’ya, Dr. Öğr. Üyesi Erhan SESLİ ’ye ve Öğr. Gör. Ahmet AKDOĞAN ’a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararım da arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Umut Yaşar UZUNALİ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Temperlenmiş Martenzitik Çelikten İmal Edilmiş Kaynaklı Zırh Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/02/2024

Umut Yaşar UZUNALİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Zırh Çelikleri	6
1.3. Kaynak Metalürjisi	8
1.3.1. Alaşımlar.....	8
1.3.2. Faz Dönüşümleri	9
1.3.3. Isıl İşlemlerin Etkileri	9
1.3.4. Kaynaklı Birleşimlerde TTT-CCT Diyagramları	10
1.4. Çelik Malzemelerin Kaynaklanabilirliği	12
1.4.1. Karbon Eşdeğeri.....	12
1.4.2. Kaynak Parametreleri.....	14
1.4.3. T _{8/5} Süresi.....	15
1.4.4. Kaynak Yöntemleri	16
1.5. Kaynak Profili	18
1.5.1. Kaynak Profili Tanımlamaları	18
1.5.2. Değerlendirme İçin Öneri	22
1.6. Kaynak Kalitesi	24
1.6.1. Süreksizliklerin Sınıflandırılması	24
1.6.2. Süreksizliklerin Kalite Seviyeleri – EN ISO 5817.....	25
1.6.3. Süreksizliklerin Kalite Seviyeleri – Volvo Standartları.....	27
1.6.4. Uluslararası Kaynak Enstitüsü Kılavuzu – Yorulma Mukavemetiyle İlişkili Kaynak Kalitesine İlişkin Kılavuz.....	28

1.7. Yorulma.....	36
1.7.1. Gerilme-Ömür Teorisi.....	39
1.7.2. Gerinim-Ömür Teorisi	56
1.7.3. Lineer Elastik Kırılma Mekanığı	63
1.7.4. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma	67
1.7.5. Kaynaklı Bağlantılarda Nominal Gerilme Yaklaşımı	69
1.7.6. Kaynaklı Bağlantılarda Yapısal Hot-spot Gerilme Yaklaşımı.....	73
1.7.7. Kaynaklı Bağlantılarda Etkin Çentik Gerilme Yaklaşımı.....	80
1.7.8. Kaynaklı Bağlantılarda Gerilme Yoğunluk Faktörü	82
1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	83
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	87
2.1. Plakalara Uygulanan Testler	87
2.1.1. Kimyasal Analiz Testi.....	87
2.1.2. Metalografik Test.....	87
2.1.3. Sertlik Testi	88
2.1.4. Ultrasonik Muayene	88
2.1.5. Çekme Testi	89
2.1.6. Yorulma Testi	90
2.2. Kaynaklı Parçalara Uygulanan Testler.....	90
2.2.1. Kaynaklı Parçaların Görsel Muayenesi.....	91
2.2.2. Kaynaklı Parçaların Penetrant Muayenesi	92
2.2.3. Kaynaklı Parçaların Ultrasonik Muayenesi	92
2.3. Kaynaklı Numunelere Uygulanan Testler	94
2.3.1. Kaynaklı Numune Sertlik Testi.....	96
2.3.2. Kaynaklı Numune Çekme Testi.....	96
2.3.3. Kaynaklı Numune Mikro Testi	97
2.3.4. Kaynaklı Numune Makro Testi.....	98
2.3.5. Kaynaklı Numune Kaynak Nüfuziyeti Testi.....	99
2.3.6. Kaynaklı Numune Kaynak Ucu Yarıçap Ölçümü.....	100
2.3.7. Kaynaklı Numune Gerinim Ölçümü ve Doğrulama Testi	103
2.3.8. Kaynaklı Numune Yorulma Testi	105
2.3.9. Kırılma Yüzeyi İnceleme	106
2.4. Kaynak İşlemleri	107
2.4.1. Kaynaklı Numunelerin Oluşturulması	109

3. BULGULAR.....	111
3.1. Plakalara Uygulanan Testlerden Elde Edilen Bulgular	111
3.1.1. Kimyasal Analiz Bileşimi	111
3.1.2. Metalografi Testinden Elde Edilen Bulgular	112
3.1.3. Sertlik Testinden Elde Edilen Bulgular	112
3.1.4. Ultrasonik Testinden Elde Edilen Bulgular	113
3.1.5. Çekme Testinden Elde Edilen Bulgular	114
3.1.6. Yorulma Testinden Elde Edilen Bulgular	114
3.2. Kaynaklı Parçalara Uygulanan Testlerden Elde Edilen Bulgular	118
3.2.1. Kaynaklı Parça Görsel Muayenesinden Elde Edilen Bulgular	118
3.2.2. Kaynaklı Parça Penetrant Muayenesinden Elde Edilen Bulgular	119
3.2.3. Kaynaklı Parça Ultrasonik Muayenesinden Elde Edilen Bulgular	119
3.3. Kaynaklı Numunelere Uygulanan Testlerden Elde Edilen Bulgular	120
3.3.1. Kaynaklı Numune Sertlik Testinden Elde Edilen Bulgular	120
3.3.2. Kaynaklı Numune Çekme Testinden Elde Edilen Bulgular	123
3.3.3. Kaynaklı Numune Mikro Testinden Elde Edilen Bulgular	123
3.3.4. Kaynaklı Numune Makro Testinden Elde Edilen Bulgular	128
3.3.5. Kaynaklı Numune Kaynak Nüfuziyet Testinden Elde Edilen Bulgular	133
3.3.6. Kaynaklı Numune Kaynak Ucu Yarıçap Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular	136
3.3.7. Kaynaklı Numune Gerinim Ölçümü ve Doğrulama Testinden Elde Edilen Bulgular	138
3.3.8. Kaynaklı Numune Yorulma Testinden Elde Edilen Bulgular	141
3.3.9. Kırılma Yüzeyi İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular	144
4. SONUÇLAR.....	155
5. ÖNERİLER.....	157
6. KAYNAKLAR	158
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

TEMPERLENMİŞ MARTENZİTİK ÇELİKTEN İMAL EDİLMİŞ KAYNAKLI ZIRH ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Umut Yaşar UZUNALI

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

2024, 171 Sayfa

Askeri araçlarda kullanılan zırh çelikleri, personelin korunması gibi kritik bir amaca hizmet etmektedir. Kaynak prosesi en önemli birleştirme yöntemlerinden biridir. Kaynak prosesi birleştirme tekniği açısından birçok avantaj sağlasa da kaynaklı bölgede dayanım düşüşü kaçınılmaz olabilmektedir. Bu çalışmada, temperlenmiş martenzitik çelikten imal edilmiş kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip yük taşımayan çift taraflı T birleşim tipte kaynaklı numuneler öncelikle tahribatsız testlere sonrasında tahribatlı testlere tabi tutulmuştur. Kaynaklı numuneler kaynak nüfuziyeti ve kaynak ucu yarıçap ölçümlerine tabi tutulmuştur. Yeni bir değerlendirme metodunun sunulmasıyla kaynak nüfuziyetinin değerlendirilmesi bu metotla gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu tarama cihazı kullanılarak elde edilen nokta bulutu verileri üzerinden kaynak ucu yarıçap değerleri eğrilik metodu ile belirlenmiştir. Kaynaksız numunelerde, yorulma dayanımı en yüksek olan numunelerin eğilme önleyici aparatlı su jeti kesim yöntemiyle kesilmiş numuneler olduğu tespit edilmiştir. Kaynak parametrelerinin artışıyla kaynak nüfuziyetinin arttığı ve artan kaynak nüfuziyeti ile yorulma dayanımının düştüğü belirlenmiştir. En düşük kaynak nüfuziyetine sahip olan 1 numaralı kaynaklı numunelerin en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zırh çeliği, tahribatsız-tahribatlı testler, kaynak nüfuziyeti, yorulma

PhD. Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF FATIGUE BEHAVIOR OF WELDED ARMOR STEEL MADE OF TEMPERED MARTENSITIC STEEL

Umut Yaşar UZUNALI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Material Engineering Program
Supervisor: Prof.Dr. Hamdullah ÇUVALCI
2024, 171 Pages

Armor steels utilized in military vehicles serve the critical purpose of safeguarding personnel. The welding process is one of the most important joining methods. Although the welding process provides many advantages in terms of joining technique, a decrease in strength in the welded area may be inevitable. This study aimed to ascertain the fatigue strength of welded samples composed of tempered martensitic steel. Cruciform welded samples with different penetrations were first subjected to non-destructive tests and then to destructive tests. Detailed measurements of weld penetration and weld toe radius were performed. A novel evaluation method was introduced for assessing weld penetration. Weld toe radius values were determined by the curvature method based on the point cloud data obtained using a three-dimensional scanner. Notably, among non-welded samples, those cut by the water jet method with anti-buckling restraints exhibited the highest fatigue resistance. It was observed that as welding parameters increased, weld penetration also increased, leading to a decrease in fatigue strength. Welded sample number 1, with the lowest weld penetration, demonstrated the highest fatigue strength.

Key Words: Armor steel, non-destructive-destructive tests, weld penetration, fatigue

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Yorulma dayanımına çentiğin ve kaynağın etkisi	1
Şekil 2. Global ve lokal bölgelerde gerilme dağılımı	2
Şekil 3. Çelik için nominal gerilme kapsamında standart uygulamalar için yorulma direnci S-N eğrileri	4
Şekil 4. Kaynak ucundaki yarıçap ve yan yüzeyin tanımı	6
Şekil 5. İndüksiyon makinesi ısıtma işlem konsolları	10
Şekil 6. 0.15 karbona sahip düşük alaşımlı çelikten imal edilmiş kaynaklı numunelerin CCT diyagramı	11
Şekil 7. 0.38 karbona sahip düşük alaşımlı çelikten imal edilmiş kaynaklı numunelerin CCT diyagramı	12
Şekil 8. MAG gazaltı kaynak makinesi şematik gösterimi.....	17
Şekil 9. Yatay karakteristik eğri.....	17
Şekil 10. MAG kaynağı ayar mekanizması	18
Şekil 11. AWS A3.0 standardına göre kaynaklı numunelerin ergime derinliği	22
Şekil 12. Her bir yüzdeki FOP alanı ve toplam alan (a) FOP alanı, (b) Toplam alan.....	23
Şekil 13. Kaynaklı numunenin enine kesit görüntüsü	23
Şekil 14. Yorulma mukavemetini önemli ölçüde etkileyen iç köşe kaynağı geometrisi, a; boğaz kalınlığı, a*; iç köşe boyutu, h; alt kesme derinliği, i; kaynak nüfuziyeti, ρ; kaynak köşesi yarıçapı, a ₀ ; soğuk yapışma uzunluğu ve α kaynak açısı	29
Şekil 15. Alın kaynağında açısal bozulma ve hizalama hataları.....	32
Şekil 16. Bağlantı sınıflandırması (a) Boyuna kesme yüklü iç köşe kaynağı, (b) Boyuna normal yüklü iç köşe kaynağı, (c) Enine normal yük taşımayan iç köşe kaynağı, (d) Enine normal yük taşıyan iç köşe kaynağı, (e) Enine yük taşıyan iç köşe kaynağı.....	33
Şekil 17. Bir çatlakın hasar modları.....	37
Şekil 18. Tekrarlı çekme gerilmesi altında bir ince plakadaki yorulma süreci.....	38
Şekil 19. Kırılma yüzeyi işaretleri ve çizgileri	39
Şekil 20. Yorulma sonrası ince çizgilerin görünümü.....	39
Şekil 21. Sabit genlikli tekrarlı yükleme için terminoloji.....	41
Şekil 22. İdealleştirilmiş S-N Diyagramı.....	43
Şekil 23. Çelikten yapılmış komponentler için modifiye edilmiş S-N eğrisi	44

Şekil 24.	Çelikler için farklı yüklemeler için genelleştirilmiş S-N eğrileri	48
Şekil 25.	C _s yüzey kalitesi faktörünün yüzey pürüzlülüğü açısından açıklaması	49
Şekil 26.	ISO 2553'e göre nominal ve derin nüfuziyet TT (a) Nominal TT, (b) Derin nüfuziyet TT	49
Şekil 27.	C _D boyut faktörünün niteliksel açıklaması	50
Şekil 28.	S-N davranışı üzerine çentik etkisi	51
Şekil 29.	Gerber ve Goodman diyagramları için Haigh eğrisi	52
Şekil 30.	Goodman ve Morrow'un ortalama gerilme modellerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 31.	Ortalama gerilme duyarlılık faktörleri.....	54
Şekil 32.	Ortalama gerilme etkilerini dikkate alan yorulma hasar kriterleri.....	56
Şekil 33.	Lokal gerinim ömrü yaklaşımı kavramı	57
Şekil 34.	Geçiş davranışı - tekrarlı sertleşme.....	58
Şekil 35.	Geçiş davranışı - tekrarlı yumuşama	58
Şekil 36.	Histerisiz eğrisi	59
Şekil 37.	Tekrarlı gerilme-gerinim eğrisi.....	60
Şekil 38.	Tekrarlı ve monotonik gerilme-gerinim davranışı.....	61
Şekil 39.	Toplam gerinim-ömür eğrisi şematik gösterimi	62
Şekil 40.	Yorulma ömrünün çatlak başlama ve ilerleme safhaları	63
Şekil 41.	Yorulma çatlağı uzunluğu.....	64
Şekil 42.	Çatlak büyüme hızına karşı gerilme yoğunluk faktörü aralığına ilişkin tipik eğri.....	65
Şekil 43.	Yorulma ömrü üzerine başlangıç çatlak boyutu etkisi	66
Şekil 44.	Nominal gerilme ile maksimum çentik gerilmesi arasındaki bağlantıyı oluşturan maksimum yapısal gerilme	69
Şekil 45.	Lineer olmayan hasar birikimi.....	71
Şekil 46.	Makro geometrik etkilere örnekler	71
Şekil 47.	Kiriş benzeri bir bileşendeki nominal gerilme.....	71
Şekil 48.	Eksenel ve açısal yanlış hizalama.....	72
Şekil 49.	Kaynak ucuna yaklaşan yüzey gerilmesi dağılımından lineer ekstrapolasyon yoluyla kaynak ucundaki yapısal hot-spot gerilmesinin belirlenmesi.....	74
Şekil 50.	Kaynaklı takviyeli bir kirişteki nominal, yapısal ve hot-spot gerilmelerinin karşılaştırılması	75
Şekil 51.	Kaynaklı bağlantılarda yorulma çatlağı başlaması ile ilgili örnekler	75
Şekil 52.	Kaynaklı bir kirişteki iki hot-spot tipi örnekleri	76

Şekil 53.	Bir elemanın yüzeyindeki membran ve kabuk eğilme gerilmelerinin toplamı olarak yapısal gerilmenin gösterimi	76
Şekil 54.	Her iki ana gerilmenin de çekme olduğu bir durumda hot-spot gerilme olarak kullanılan gerilme bileşeninin tanımı	77
Şekil 55.	Tip “a” hot-spotunda levha kalınlığı boyunca tipik bir lineer olmayan gerilme dağılımı.....	77
Şekil 56.	Kaynak ucuna yaklaşan kalınlık boyunca gerilim dağılımındaki değişiklik.....	79
Şekil 57.	Yapısal hot-spot gerinimini tahmin etmek için kaynak ucuna lineer ekstrapolasyon	79
Şekil 58.	Simgesel çentik yuvarlama	81
Şekil 59.	Plakaların ultrasonik muayenesi (a) Ultrasonik muayene sistemi, (b) Plakaların ultrasonik muayenesi	89
Şekil 60.	Kaynaksız numune çekme testi	89
Şekil 61.	Kaynaksız numunelerin yorulma testleri (a) Kaynaksız numune yorulma testleri, (b) Eğilme önleyici aparat	90
Şekil 62.	Kaynaklı parçalar.....	91
Şekil 63.	Kaynaklı parça görsel muayenesi	91
Şekil 64.	Kaynaklı parça penetrant muayenesi	92
Şekil 65.	Kaynaklı parçaların ultrasonik muayenesi (a) Ultrasonik muayene sistemi kalibrasyon ve hassasiyet ayarı, (b) Kaynaklı parçaların ultrasonik muayenesi	93
Şekil 66.	Kaynak kökü muayenesi için değerlendirme (a) 70 dereceli proba tarama değerlendirmesi, (b) 60 dereceli proba tarama değerlendirmesi, (c) 45 dereceli proba tarama değerlendirmesi.....	94
Şekil 67.	Kaynaklı numuneler ve kesim yüzeyi zımparalama (a) Kaynaklı numuneler, (b) Kesim yüzeyi zımparalama.....	95
Şekil 68.	Kaynaklı numunelerin sertlik testleri (a) Kaynaklı numune sertlik hatları, (b) Sertlik hatları görünümü (Hv 1kg).....	96
Şekil 69.	Kaynaklı numune çekme testi.....	97
Şekil 70.	Kaynaklı numune mikro inceleme bölgeleri (a) Dağlama sonucu kesit görünümü, (b) Kaynaklı numune detaylı mikro inceleme bölgeleri.....	98
Şekil 71.	Farklı kaynak nüfuziyetine sahip kaynaklı numunelerin makro incelemesi (a) Kaynaklı numune1, (b) Kaynaklı numune2, (c) Kaynaklı numune3.....	98
Şekil 72.	Kaynak nüfuziyeti ölçümü.....	99
Şekil 73.	ISO/TR 14345 A2 ölçüm metodu.....	100
Şekil 74.	ISO/TR 14345 A3 ölçüm metodu.....	101
Şekil 75.	Kaynak ucu yarıçapını ölçmek için boyutlandırılmış daireler.....	101

Şekil 76.	Üç boyutlu tarama ile elde edilen nokta bulutu üzerinden kaynak ucu yarıçap ölçümü (a) Kaynaklı numunelerin 3 boyutlu tarama cihazı ile taranması, (b) Tarama sonucu elde edilen nokta bulutu modeli, (c) 1 mm aralıklarla kaynak yönüne dik yüzey atama, (d) Her bir enine kesit kaynak profili üzerinde yarıçap belirleme	103
Şekil 77.	Gerinim ölçüm deney düzeneği (a) Deney düzeneği, (b) Gerinim ölçer.....	104
Şekil 78.	Kaynaklı numune gerinim ölçümleri ve sistemi (a) Gerinim ölçümüne tabi tutulan numuneler, (b) Yorulma test cihazı ve veri toplama düzeneği, (c) Cihaza bağlı numune görünümü	105
Şekil 79.	Kaynaksız ve kaynaklı numune kırılma yüzeyi görüntüleri (a) Kaynaksız numune kırılma yüzeyi görüntüsü, (b) Kaynaklı numune kırılma yüzeyi görüntüsü	107
Şekil 80.	Kaynaklı parça kesim şeması ve kaynaklı numune ebatları (a) Kaynaklı parçadan kaynaklı numune çıkartma, (b) Kaynaklı numune ebatları	110
Şekil 81.	Malzeme iç yapı görüntüleri (a) 5X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (b) 10X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (c) 20X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (d) 50X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü.....	112
Şekil 82.	Sertlik alınan bölgeler (a) Brinell sertlik ölçümü (b) Vickers sertlik ölçümü	113
Şekil 83.	Plakaların laminasyon kontrolü ve sonuçları (a) 50 mm mesafe aralığında arka duvar yankısı ve DGS eğrisi, (b) 25 mm mesafe aralığında tarama sonuçları.....	113
Şekil 84.	Lazer kesim sonrası iç yapı görüntüsü (a) 5X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (b) 10X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (c) 20X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü	116
Şekil 85.	Lazer kesim yüzeyi vickers sertlik testi sonuçları	117
Şekil 86.	Kaynaksız numune S-N eğrileri.....	118
Şekil 87.	Kaynaklı parça görsel muayenesi (a) Kaynak öncesi ön ısıtma, (b) Kaynak öncesi hizalama ve çarpılma kontrolleri, (c) Kaynak sonrası kaynak dikişi kontrolleri.....	119
Şekil 88.	Kaynaklı parça penetrant muayene sonuçları (a) Kaynaklı parça no 1 penetrant muayene sonucu, (b) Kaynaklı parça no 2 penetrant muayene sonucu, (c) Kaynaklı parça no 3 penetrant muayene sonucu	119
Şekil 89.	Tarama hatlarına göre sertlik değerleri(a) Hat1 sertlik dağılımı, (b) Hat2 sertlik dağılımı, (c) Hat3 sertlik dağılımı, (d) Hat4 sertlik dağılımı, (e) Hat5 sertlik dağılımı	121
Şekil 90.	Numunelere göre sertlik değerleri (a) Numune1 sertlik dağılımı, (b) Numune2 sertlik dağılımı, (c) Numune3 sertlik dağılımı.....	122
Şekil 91.	Hardox ve Weldox'un farklı kesme yöntemleriyle termal kesimi sonrasında ITAB'daki sertlik profilleri	122

Şekil 92.	KN 1 kaynaklı numunenin mikroyapı sonuçları.....	124
Şekil 93.	KN 2 kaynaklı numunenin mikroyapı sonuçları.....	125
Şekil 94.	KN 3 kaynaklı numunenin mikroyapı sonuçları.....	126
Şekil 95.	Kaynak metali makro-mikro yapı görüntüsü (a) Kaynak metali kesit görüntüsü, (b) Kaynak metali 10X büyütme sonucu kesit görüntüsü, (c) Kaynak metali 20X büyütme sonucu kesit görüntüsü, (d) Kaynak metali 40X büyütme sonucu kesit görüntüsü.....	127
Şekil 96.	Kaynaklı numune ITAB bölgesi 20X büyütme görüntüleri (a) KN 1 , (b) KN 2, (c) KN 3,.....	127
Şekil 97.	Kaynaklı numune orta kesit görüntüleri (a) 5 X büyütme, (b) 10 X büyütme, (c) 20 X büyütme, (d) 40 X büyütme	128
Şekil 98.	KN 1 makro muayene görüntüleri (a) KN 1-1, (b) KN 1-2, (c) KN 1-3, (d) KN 1-4, (e) KN 1-5, (f) KN 1-6, (g) KN 1-7, (h) KN 1-8, (i) KN 1-9, (j) KN 1-10	130
Şekil 99.	KN 2 makro muayene görüntüleri (a) KN 2-1, (b) KN 2-2, (c) KN 2-3, (d) KN 2-4, (e) KN 2-5, (f) KN 2-6, (g) KN 2-7, (h) KN 2-8, (i) KN 2-9, (j) KN 2-10	131
Şekil 100.	KN 3 makro muayene görüntüleri (a) KN 3-1, (b) KN 3-2, (c) KN 3-3, (d) KN 3-4, (e) KN 3-5, (f) KN 3-6, (g) KN 3-7, (h) KN 3-8, (i) KN 3-9, (j) KN 3-10	132
Şekil 101.	Kaynak ucu yarıçap ölçüm bölgeleri	138
Şekil 102.	KN 1 numune nominal – hot-spot gerilme değerleri	139
Şekil 103.	KN 2 numune nominal – hot-spot gerilme değerleri	139
Şekil 104.	KN 3 numune nominal – hot-spot gerilme değerleri	139
Şekil 105.	Kaynaklı numune nominal - hot-spot gerilme değerleri.....	140
Şekil 106.	Kaynaklı numune S-N eğrileri.....	142
Şekil 107.	Kaynaklı-kaynaksız numune S-N eğrileri	143
Şekil 108.	Kaynaksız numune 1.3 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	145
Şekil 109.	Kaynaksız numune 1.6 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	145
Şekil 110.	Kaynaksız numune 1.9 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	146
Şekil 111.	Kaynaksız numune 1.11 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	146

Şekil 112.	Kaynaksız numune 2.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	147
Şekil 113.	Kaynaksız numune 2.4 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	147
Şekil 114.	Kaynaksız numune 3.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	148
Şekil 115.	Kaynaksız numune 3.4 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	148
Şekil 116.	Kaynaksız numune 3.7 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	149
Şekil 117.	KN 1.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	149
Şekil 118.	KN 1.6 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	150
Şekil 119.	KN 2.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	150
Şekil 120.	KN 2.7 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	151
Şekil 121.	KN 3.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	151
Şekil 122.	KN 3.7 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü.....	152
Şekil 123.	Yorulma numunesi kırılmış yüzey görüntüsü.....	152
Şekil 124.	Kaynaksız numunelerin kesim yüzeyi pürüzlülük ölçümü.....	153
Şekil 125.	Kaynaklı numune kırılma yüzeyi yorulma izleri (a) 35X-50X büyütme, (b) 250X büyütme, (c) 2000X büyütme	154

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Nominal gerilmeler temelinde çelik ve alüminyum malzemelerde yapısal detaylar için yorulma direnci değerleri	3
Tablo 2.	Farklı kademelerde üretilmiş zırh çelikleri.....	6
Tablo 3.	El silahları ve tüfeklerle yapılan testlere ilişkin sınıflandırma ve gereklilikler.....	7
Tablo 4.	Test koşulları ve mermi özellikleri	7
Tablo 5.	CE formülüne göre malzemelerin kaynaklanabilirliği	14
Tablo 6.	Kaynak yöntemleri için termal verimlilik faktörü k.....	15
Tablo 7.	EN 1993-1-8, AWS A3.0, ISO 2553 ve DIN EN ISO 17659 standartlarına göre terimler ve tanımlar.....	20
Tablo 8.	Uzunluk ve alan birimi cinsinden FOP oranı	24
Tablo 9.	Süreksizliklerin sınıflandırılması ve tanımlamaları.....	26
Tablo 10.	Süreksizliklerin kabul kriterleri ISO 5817	26
Tablo 11.	Alın kaynak bağlantısı kabul kriterleri	27
Tablo 12.	Köşe, iç köşe ve T-bağlantılardaki dış süreksizlik kabul kriterleri	27
Tablo 13.	Köşe, iç köşe ve T-bağlantılardaki iç süreksizlik kabul kriterleri	28
Tablo 14.	Yorulma değerlendirme yöntemleri, süreksizlikler ve yanlış hizalamalar arasındaki ilişkiler	31
Tablo 15.	Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere kaynak ucu yorulma mukavemeti FAT 63 ve kaynak kökü yorulma mukavemeti FAT 40 olan bir iç köşe kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) yüzey kusuru kalite grupları	34
Tablo 16.	Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere kaynak ucu yorulma mukavemeti FAT 63 ve kaynak kökü yorulma mukavemeti FAT 40 olan bir iç köşe kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) iç kusur kalite grupları.....	34
Tablo 17.	Çelik için UKE Yorulma Tavsiyelerini karşılamak üzere kaynak ucu yorulma mukavemeti FAT 63 ve kaynak kökü yorulma mukavemeti FAT 40 olan bir iç köşe kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) kaynak geometrisi kusurları ve çoklu kusur kalite grupları.....	34
Tablo 18.	Çelik için UKE Yorulma Tavsiyelerini karşılamak üzere FAT 90 yorulma mukavemetli alın kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) yüzey kusuru kalite grupları	35

Tablo 19.	Çelik için UKE Yorulma Tavsiyelerini karşılamak üzere FAT 90 yorulma mukavemetli alın kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) iç kusur kalite grupları	35
Tablo 20.	Çelik için UKE Yorulma Tavsiyelerini karşılamak üzere yorulma mukavemeti FAT 90 olan bir alın kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) kaynak geometrisi kusurları ve çoklu kusur kalite grubu	35
Tablo 21.	Farklı değişken tekrarlı yükleme çeşitleri.....	42
Tablo 22.	S1000’in tahmini	46
Tablo 23.	Güvenilirlik faktörü, CR.....	46
Tablo 24.	Çeliklerin mikro yapısının temel eğilmeli yorulma sınırı üzerindeki etkisi.....	47
Tablo 25.	Yük faktörleri, CL	48
Tablo 26.	Ortalama gerilme etkisini dikkate alan eğri denklemleri.....	55
Tablo 27.	Yorulma çatlağı başlangıcını belirleyen parametreler	67
Tablo 28.	Deney malzemesi maksimum alaşım elementi miktarı	87
Tablo 29.	Kaynaklı numunelere uygulanan testler	95
Tablo 30.	Test düzeneği ölçüm ve analiz sonuçları	105
Tablo 31.	Kaynak parametreleri.....	108
Tablo 32.	Kaynak teli kimyasal ve mekanik özellikleri.....	109
Tablo 33.	Koruyucu gaz bileşimi	109
Tablo 34.	Deney malzemesi kimyasal analiz sonuçları	111
Tablo 35.	Plakaların brinell ve vickers sertlik değerleri	113
Tablo 36.	Çekme testi sonuçları.....	114
Tablo 37.	Lazer kesim kaynaksız numune yorulma testi sonuçları	116
Tablo 38.	Su jeti kesim kaynaksız numune yorulma testi sonuçları.....	117
Tablo 39.	Kaynaklı numune çekme testi sonuçları	123
Tablo 40.	Kaynaklı numunelerin makro inceleme sonuçları	129
Tablo 41.	KN 1 numunelerin kaynak nüfuziyeti ölçüm sonuçları.....	133
Tablo 42.	KN 2 numunelerin kaynak nüfuziyeti ölçüm sonuçları.....	134
Tablo 43.	KN 3 numunelerin kaynak nüfuziyeti ölçüm sonuçları.....	135
Tablo 44.	Kaynak dikişlerine göre kaynak nüfuziyet ortalaması.....	136
Tablo 45.	Kaynaklı numunelerin kaynak ucu yarıçap değerleri	137
Tablo 46.	A, B, C, D kaynak dikişi yarıçap ölçüm ortalama değerleri.....	138
Tablo 47.	Kaynaklı numunelerin yorulma testi sonuçları.....	141
Tablo 48.	Yüzey incelemesine tabi tutulan kaynaklı kaynaksız numuneler	144

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Çatlak uzunluğu
a_f	: Kırılma noktasındaki çatlak uzunluğu
a_p	: Çentik kökünden kritik bir mesafedeki p noktasının gerilmesi
a_0	: İlk çatlak uzunluğu
a	: Kaynak kalınlığı
a_P	: Tane boyutu
A	: Genlik oranı
A_{C1}	: 723°C'deki ötektoid sıcaklık
A_{C3}	: α -demirinin γ demirine dönüştüğü sıcaklık
A_0	: Orijinal kesit alanı
A_1	: Ötektoid reaksiyon sıcaklığı
A_3	: Ötektoid altı çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığı
b	: Yorulma mukavemeti üssü
c	: Yorulma süneklik üssü
C	: Özgül ısı kapasitesi
C_D	: Boyut faktörü
C_L	: Yükleme faktörü
C_R	: Gerilme – CR, belirli bir güvenilirlik seviyesinde değiştirici faktördür ömür
C_S	: Yüzey kalitesi faktörü
D	: Kümülatif hasar
e	: Gerinim
E	: Elastisite modülü
f_y	: Malzemenin gerçek veya belirlenmiş akma dayanımı
F_2	: İki boyutlu ısı akışı için şekil faktörü
F_3	: Üç boyutlu ısı akışı için şekil faktörü
I	: Akım
k	: Kaynak prosesi termal verimlilik faktörü

k_m	: Gerilme büyütme faktörü
$k_{m,eff}$	: İlave gerilme büyütme faktörü
k	: Gerilme –(eğim faktörü) k ömür
K	: Mukavemet katsayısı
K_c	: Kırılma tokluğu
K_f	: Çentiksiz yorulma sınırının çentikli yorulma sınırına oranı
K_{1c}	: Minimum kırılma tokluğu değeri
K_t	: Gerilme konsantrasyon faktörü
K_m	: Büyütme faktörü
$K_{s,a}$	: Eksenel yükleme durumunda yapısal gerilme konsantrasyon faktörü
$K_{s,b}$	: Eğilme durumunda yapısal gerilme konsantrasyon faktörü
K'	: Döngüsel mukavemet katsayısı
l_0	: Orijinal uzunluk
l_w	: Kaynak boyu
M	: Ortalama gerilme duyarlılık faktörü
$M_{k,b}$	: Kabuk eğilmesi açısından lineer olmayan gerilme piki için düzeltme
$M_{k,m}$	: Membran hareketi açısından lineer olmayan gerilme piki için düzeltme
n	: a değerinde bir çatlak uzunluğu elde etmek için uygulanan tekrar sayısı
n'	: Döngüsel gerinim sertleştirme üssü
n	: Gerinim sertleşme üssü
N_f	: Son kırılmada a_f çatlak uzunluğuna ulaşmak için uygulanan tekrar sayısı
ρ	: Yarıçap
ρ	: Yoğunluk
Q	: Isı girdisi
q	: Çentik duyarlılık faktörü
r	: Çentik kök yarıçapı
r_f	: Simgesel yarıçap
R	: Gerilme oranı
s	: Derin nüfuziyet
S	: Nominal gerilme

S_a	: Gerilme genliği
S_{ar}	: Yüksek tekrarlı yorulma bölgesindeki belirli bir ömre karşılık gelen bir gerilme genliği
S_{be}	: Eğilme yorulma sınırı
S_e	: Yorulma dayanımı
S_m	: Ortalama gerilme
S_{max}	: Maksimum gerilme
S_{min}	: Minimum gerilme
S_u	: Maksimum çekme dayanımı
S_{1000}	: Farklı yükleme koşulları altında standart test numunelerine dayalı olarak 10^3 tekrardaki yorulma mukavemeti
S'_f	: Yorulma mukavemeti katsayısı
$T_{8/5}$	: 800°C ila 500°C sıcaklık aralığında geçen süre
U	: Voltaj
V	: İlerleme hızı
λ	: Isıl iletkenlik
$\emptyset$	: Kontak açısı
σ^e	: Elastik çentik gerilmesi
ε	: Gerçek gerinim
ε_a	: Toplam gerinim genliği
$\varepsilon_{a,rev}$	: Tam değişken çevrimli gerinim
ε'_f	: Yorulma süneklik katsayısı
$\varepsilon-N$	: Gerinim - ömür
$2N_f$	: Yorulma ömrü
$2N_T$	: Geçiş yorulma ömrü
σ	: Gerçek gerilme
$\sigma_{a,rev}$	: Tam değişken çevrimli gerilme
σ_b	: Kabuk eğme gerilmesi
σ_{comp}	: Hesaplanmış toplam gerilme
σ_{mem}	: Membran gerilme
σ_{nl}	: Lineer olmayan gerilme piki

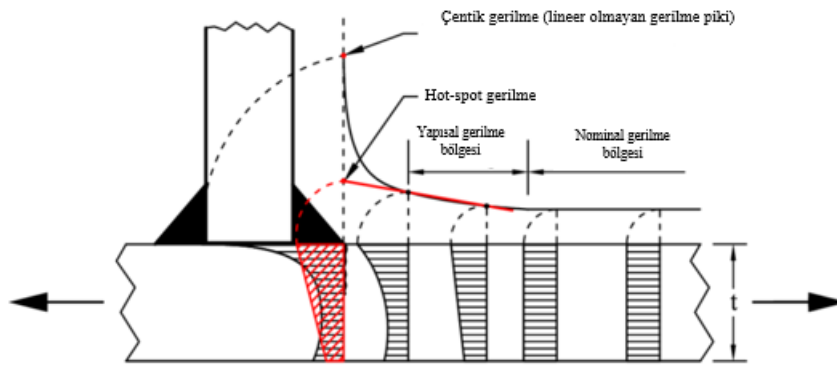
σ_{nlp}	: Lineer olmayan gerilme tepe noktası
$\sigma_{nom,a}$	: Eksenel yükleme nedeniyle değiştirilmiş nominal gerilme
$\sigma_{nom,b}$	: Eğilme momenti nedeniyle değiştirilmiş nominal gerilme
σ_s	: Yapısal gerilme
σ_{shs}	: Yapısal hot-spot gerilme
σ_{sur}	: Yüzey gerilmesi
σ_w, τ_w	: Kaynak boğazındaki gerilmeler
σ'_f	: Ortalama gerilme düzeltmesi
σ'_y	: Tekrarlı akma gerilmesi
γ_m	: Membran gerilme yoğunluk faktörü için düzeltme
γ_b	: Kabuk eğilme gerilme yoğunluk faktörü için düzeltme
$\Delta\epsilon$	: Toplam gerinim aralığı
$\Delta\epsilon^p/2$	: Gerçek plastik gerinim genliği
$\Delta\sigma$	: Toplam gerilme aralığı
ΔK	: Gerilme yoğunluk aralığı faktörü
ΔK_{th}	: Çatlağın daha büyümediği gerilme yoğunluk değeri
ΔS	: Gerilme aralığı
CCT	: Sürekli soğuma dönüşüm diyagramları
CE	: Karbon eşdeğeri formülü (alaşımsız, ince taneli, düşük alaşımlı çelikler için)
CET	: Karbon eşdeğeri formülü (karbon-mangan çelikleri için)
DAT	: Boyutsal analiz tekniği
DGS	: Mesafe-kazanç-boyut diyagramı
DOF	: Ergime derinliği
FAT	: S-N eğrisi için sınıflandırma referansı; $2 \cdot 10^6$ tekrarda MPa değerinde gerilme aralığı
FEA	: Sonlu elemanlar analizi
FOP	: Ergime ya da nüfuziyet
HCF	: Yüksek tekrarlı yorulma
LCF	: Düşük tekrarlı yorulma
LEFM	: Lineer elastik kırılma mekaniği

ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
UKE	: Uluslararası Kaynak Enstitüsü
MAG	: Metal aktif gaz kaynağı
MIG	: Metal asal gaz kaynağı
NDT	: Tahribatsız muayene
SH-CCT	: ITAB bölgesi için sürekli soğuma dönüşüm diyagramları
SW-CCT	: Kaynak metali için sürekli soğuma dönüşüm diyagramları
SWT	: Smith, Watson ve Topper denklemi
S-N	: Gerilme - ömür
TA	: Toplam alan
TIG	: Tungsten asal gaz kaynağı
TMÇ	: Temperlenmiş martenzitik çelik
TT	: Boğaz kalınlığı
TTT	: Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramları
WP	: Kaynak nüfuziyeti
WPS	: Kaynak yöntem şartnamesi

Son yıllarda özellikle Avrupa Birliği'nde ortak standartların benimsenmesi açısından yorulma tasarım kurallarının oluşturulması veya revizyonu için önemli çaba harcamaktadır. Bu standartlardan bazıları; BSI (1980), AASHTO (1994), Eurocode 3 (1992), Offshore

installations (1995), API (1993), BS 8118 (1992), ECCS (1992), Eurocode 9 (1996) genel yapılara atıfta bulunmaktayken, ANSI/AWS D.1 (1996), BS 7608 (1993), Radaj-Dieter-Vormwald (2013), URL-1 (2000) ise genel olarak kaynaklı bağlantılara atıfta bulunmaktadır.

Yorulma ömrü tahmini için en sık kullanılan hesaplama yöntemleri gerilme-ömür (S-N), gerinim-ömür (ϵ -N) ve lineer elastik kırılma mekaniğidir (LEFM). Malzemelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi üzerine yapılan çalışmaların ardından, kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarını belirleme amacıyla bazı yaklaşımlar ortaya çıkmış ve bu yaklaşımlar kitaplar, makaleler, kılavuzlar, dokümanlar gibi çeşitli kaynaklarda yer almıştır. Radaj (1996), kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımlarını belirleme üzerine geliştirilen tüm yaklaşımları bir çalışmada özetlemiştir. Bu yaklaşımlar daha sonra Uluslararası Kaynak Enstitüsü (UKE) tarafından yayımlanan kılavuz ve tavsiyeler dokümanlarında yer bulmuştur. UKE, 2008 yılında yayımladığı "Kaynaklı Bağlantı ve Birleşimlerin Yorulma Tasarımı için Öneriler" dokümanında bu yaklaşımları tavsiye niteliğinde sunmuştur (IIW, 2008). Gerilme yoğunluk faktörü ve gerilme değerlendirme yaklaşımları üzerine oluşturulan bu dokümanda, kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımlarını belirlemede nominal gerilme, yapısal hot-spot gerilmesi, etkin çentik gerilmesi ve gerilme yoğunluk faktörü, sonlu eleman analizleri de dikkate alınarak açıklanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Global ve lokal bölgelerde gerilme dağılımı (Aygül, 2013)

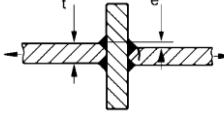
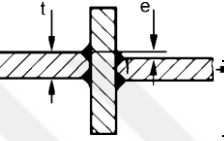
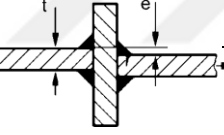
UKE, 2008 yılında yayımlamış olduğu bu dokümanda kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının değerlendirilebilmesi için kaynak tipine bağlı olarak her bir kaynak tipi için FAT sınıfı belirlemiştir (Tablo 1’de dokümanda yer alan birkaç kaynak tipi

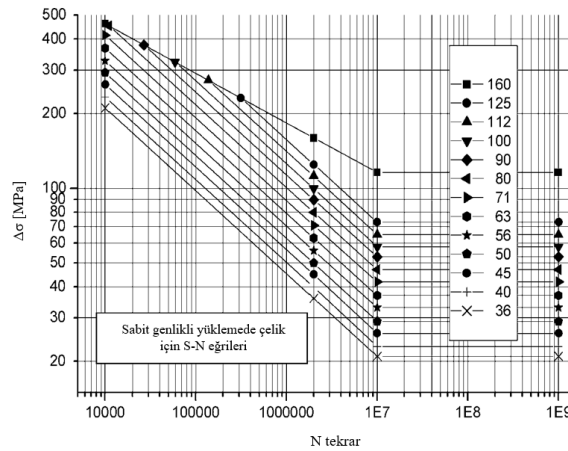
verilmiştir) ve bu FAT sınıfı birleşim tipleri için S-N eğrilerini (Şekil 3) sunmuştur. İlgili birleşim tipi için seçilecek yaklaşımla kaynaklı birleşimin yorulma dayanımlarının tahmini gerçekleştirilmektedir.

Tablo 1. Nominal gerilmeler temelinde çelik ve alüminyum malzemelerde yapısal detaylar için yorulma direnci değerleri (IIW, 2008)

Sayı	Yapısal Detay	Tanım	FAT	FAT	Gereksinimler ve Açıklamalar
		(St.= Çelik; Al.= Alüminyum)	St.	Al.	
200		Alın kaynakları, Enine yükleme			
211		Enlemesine yüklenmiş alın kaynağı (X veya V kaynak ağızlı) plakaya sıfır taşlanmış, % 100 NDT,	112	45	Tüm kaynaklar, gerilme yönüne paralel yüzeye sıfır olarak taşlanır. Levha kenarları, gerilme yönünde aynı hizada taşlanmıştır. Her iki taraftan kaynaklıdır. Plaka kalınlığının %5'inden az hizalama hatası, Uygun NDT ile önemli kusur barındırmadığı kanıtlanmıştır,
212		Atölyede düz konumda yapılan enine alın kaynağı, NDT, Kaynak takviyesi < 0.1 x kalınlık,	90	36	Levha kenarları, gerilme yönünde aynı hizada taşlanmıştır. Her iki taraftan kaynaklıdır. Plaka kalınlığının %5'inden az hizalama hatası,
213		212, NDT koşullarını karşılamayan enine alın kaynağı Kaynak ucu açısı <50° olan alın kaynakları Kaynak ucu açısı >50° olan alın kaynakları	80	32 25	Levha kenarları, gerilme yönünde aynı hizada taşlanmıştır. Her iki taraftan kaynaklıdır. Plaka kalınlığının %10'undan az hizalama hatası,

Tablo 1'in devamı

400	ÇTTB ve/veya T bağlantı tipi		
411		ÇTTB tipte bağlantı veya T-bağlantısı, K-alın kaynakları, tam nüfuziyet, Tek taraflı T-bağlantıları ve yanlış hizalama olmadan çapraz biçimli bağlantılar	80 28
			90 32
412		ÇTTB tipte bağlantı veya T-bağlantısı, K-alın kaynakları, tam nüfuziyet, Tek taraflı T-bağlantı ve ÇTTB	71 25
		Hatalı hizalama olmaksızın bağlantı	80 28
413		ÇTTB tipte birleştirme veya T-bağlantısı, iç köşe kaynakları veya kısmi nüfuziyetli K-alın kaynakları, Hatalı hizalama olmaksızın tek taraflı T-bağlantı ve ÇTTB bağlantı	63 22
		Tek taraflı T-bağlantı ve ÇTTB	71 25
			Ayrıca 414 olarak değerlendirilecek



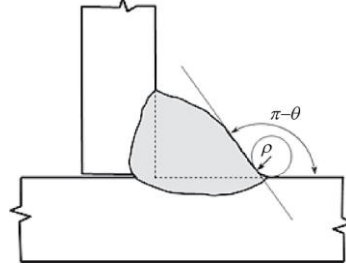
Şekil 3. Çelik için nominal gerilme kapsamında standart uygulamalar için yorulma direnci S-N eğrileri (IIW, 2008)

UKE'nin bu dokümanında, tavsiyeler, akma mukavemeti 960 N/mm^2 'ye kadar olan ferritik/perlitik veya bñitlik yapı çeliklerinin işlenmiş veya ekstrüde edilmiş ürünlerinden, östenitik paslanmaz çeliklerden ve yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından yapılan kaynaklı birleşimler için yorulma dayanımları ile ilgili verileri içermektedir. Akma mukavemeti 960 N/mm^2 'den fazla olan malzemelerle ilgili yeterli sayıda çalışma bulunmaması nedeniyle bu sınırlama getirilmiştir. Ancak, UKE'nin 2016 yılında yayımladığı "Yorulma Mukavemetine İlişkin Kaynak Kalitesi" kılavuzunda, "alüminyum kaynakları ve ultra yüksek dayanımlı çelikler için deneysel verilerin bulunmaması nedeniyle, yorulma dayanımı (veya S-N) eğrileri, yalnızca belirtilen maksimum akma dayanımı 960 N/mm^2 'ye kadar olan yapısal çelikler için geçerlidir" ifadesi yer almaktadır (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016). Bu bağlamda, doktora çalışmasının hem kaynak nüfuziyetini dikkate alması hem de test malzemesinin akma dayanımının belirtilen sınır değerinden daha yüksek olması nedeniyle literatüre önemli bir katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Bir kaynaklı yapının emniyetli bir şekilde fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için yapının kaynak kalitesi ve kaynak profili önem taşımaktadır. Kaynak kalitesi iç ve dış süreksizlikler olmak üzere birçok standartta tanımlanmıştır. Bu standartlar, yapının servis şartlarını göz önünde bulundurarak kaynak kalitesini 3 veya 4 farklı seviyede sunabilmektedir. Kaynak profiliyle ilgili olan aşırı içbükey, aşırı dışbükey, asimetrik kaynak vb. süreksizlikler de ilgili kalite standartlarında tanımlanmıştır. 2000'li yıllar öncesi kaynak kalitesiyle ilgili yayımlanmış standartlara bakıldığında kalite sınıflarının daha çok statik yükler dikkate alınarak belirlendiği görülmektedir. Kaynak dikişlerinde kusurlar için kalite seviyelerini tanımlayan EN ISO 5817 standardının 2014 yılı versiyonuna bakıldığında standardın Ek-C kısmında yorulmaya maruz kalan kaynaklı yapılar için kalite seviyelerinin tanımlandığı görülmektedir (EN ISO 5817, 2014). Ayrıca kaynaklı yapıların yorulma testleri için kılavuz niteliği taşıyan ISO/TR 14345 (2012) standardı, yorulma dayanımını etkileyen kaynak ucu yapı çapı ve kontak açılarını standardın Ek-A kısmında açıklamıştır (Şekil 4).

UKE'nin yayımlamış olduğu kılavuz ve tavsiyelere bakıldığında malzeme grubunun akma dayanımı 960 N/mm^2 'den düşük olanlara hitap ettiği ve kaynaklı birleşimlerin hiçbirinde kaynak nüfuziyeti ile ilgili bir sınıflandırma yapılmadığı görülmektedir. Literatüre bakıldığında, akma mukavemeti bu değerin üzerinde olan malzemelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi üzerine ve ayrıca farklı kaynak nüfuziyet değerlerinin yorulma

dayanımına etkisi üzerine yapılmış çalışmalara rastlanmaktadır. UKE’de belirtilen bu sınır değeri üzerinde bir akma mukavemetine sahip kaynaklı numunelerde farklı kaynak nüfuziyet değerlerinin yorulma dayanımına etkisi üzerine yapılmış çalışmaların kısıtlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Kaynak ucundaki yarıçap ve yan yüzeyin tanımı (ISO/TR 14345, 2012)

1.2. Zırh Çelikleri

Zırh çelikleri temperlenmiş martenzitik çelik (TMÇ) grubuna girmektedir ve ince taneli yapı çeliklerine oranla yüksek akma ve çekme mukavemetine sahiptir. Temper işlemine göre kademeli olarak üretilen bu çelikler Tablo 2’de gösterildiği üzere 380 Brinell sertlik değerinden 650 Brinell sertlik değerlerine kadar farklı sertlik değerlerinde elde edilebilmektedir. Karbon ve alaşım elementlerinin artışı malzemede sertlik, akma ve çekme mukavemetlerinde artışa neden olurken yüzde uzama değerinde azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca artan karbon eşdeğeriyle birlikte malzemelerin kaynaklanabilirlikleri de düşebilmektedir.

Tablo 2. Farklı kademelerde üretilmiş zırh çelikleri (URL-2, 2019)

Ürün Kalitesi	Kalınlık	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (A5%)	Sertlik (HBW)	CEV
Protection 400	4-40mm	1000	1250	10	360-450	0.58
Protection 450	4-40mm	1100	1350	8	400-480	0.63
Protection 500	4-40mm	1300	1600	8	480-560	0.70

TMÇ'ler EN 1522 (Seviye FB1-FB7) standardı veya STANAG 4569 (Seviye1-5) standartlarına göre istenilen balistik seviyede zırh çelikleri olarak üretilmektedir. Balistik seviyeye göre sınıflandırma EN 1522 standardı için Tablo 3'te, Stanag 4569 standardı için Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. El silahları ve tüfeklerle yapılan testlere ilişkin sınıflandırma ve gereklilikler (EN 1522, 2021)

Sınıf	Silah tipi	Kalibre	Mermi		Test koşulları	
			Tipi	Kütlesi (g)	Test aralığı (m)	Mermi hızı (m/s)
FB1	Tüfek	22 LR	L / RN	2.6 ± 0.1	10 ± 0.5	360 ± 10
FB2	Tabanca	9 mm luger	FJ / RN / SC	8.0 ± 0.1	5 ± 0.5	400 ± 10
FB3	Tabanca	357 Mag.	FJ / CB / SC	10.2 ± 0.1	5 ± 0.5	430 ± 10
FB4	Tabanca	357 Mag.	FJ / CB / SC	10.2 ± 0.1	5 ± 0.5	430 ± 10
		44 Rem. Mag.	FJ / FN / SC	15.6 ± 0.1	5 ± 0.5	440 ± 10
FB5	Tüfek	5.56 x 45	FJ / PB / SCP1	4.0 ± 0.1	10 ± 0.5	950 ± 10
FB6	Tüfek	5.56 x 45	FJ / PB / SCP1	4.0 ± 0.1	10 ± 0.5	950 ± 10
		7.62 x 51	FJ / PB / SC	9.5 ± 0.1	10 ± 0.5	830 ± 10
FB7	Tüfek	7.62 x 51	FJ / PB / HC1	9.8 ± 0.1	10 ± 0.5	820 ± 10

Tablo 4. Test koşulları ve mermi özellikleri (Stanag 4569, 2004)

Seviye	Mühimmat	$V_{tanımlı}$ (m/s)	Açı aralığı	Ağır silah durumu (FSP 20mm)	
				$V_{tanımlı}$ (m/s)	Açı aralığı
3	7.62mm x 51 AP	930	$0-360^0$	---	$0-360^0$
	7.62mm x 54R B32 API	854	$0-360^0$	---	$0-360^0$
2	7.62mm x 39 API BZ	695	$0-360^0$	---	$0-360^0$
1	7.62mm x 51 Nato	833	$0-360^0$	---	$0-360^0$
	5.56mm x 45 Nato	900	$0-360^0$	---	$0-360^0$
	5.56mm x 45 M 193	937	$0-360^0$	---	$0-360^0$

1.3. Kaynak Metalürjisi

Kaynak metalürjisi, kaynak işlemi gerçekleşecek malzemelerin kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkileyen, kaynak işlemleri sırasında meydana gelen etkileşimlere odaklanan bir alandır. Prensibi gereği kaynak işlemleri birer mikro döküm işlemi olarak düşünülebilir. Döküm prosesinde olduğu gibi kaynakla ilgili çeşitli metalürjik olaylar erime, donma, difüzyon, çökelme, katı hal dönüşümleri, termal gerilmeler ve büzülme gerilmeleri gibi birçok durum pratik soruna neden olabilir. Oluşabilecek bu istenmeyen durumlar uygun metalürjik prensiplerin uygulanmasıyla çözülmektedir. Döküm prosesinde olduğu gibi kaynak metalürjisinin de anlaşılabilmesi için geniş bir fiziksel metalürji bilgisi gerekmektedir. Fiziksel metalürji, metalik malzemelerin yapı ve özelliklerinin incelenmesinin yanında, metallerin cevherden çıkartılması, rafine edilmesi ve kullanıma hazırlanması gibi tüm metalürjik süreçlerle ilgilidir (Weman, 2011).

1.3.1. Alaşımlar

Metallerin doğada saf halde bulunması pek mümkün değildir. Bu sebepten metaller, doğadan çıkartıldıktan sonra bir takım saflaştırma işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bazı metalik malzemelerde saflaştırma değerleri %99,99'lara erişse de yüzde yüz saf bir metal elde etmek çok zordur. Saflaştırma işlemleri sonrası mekanik özelliklerinin ve korozyon direncinin iyileştirilmesi adına ana muhteva içine farklı elementlerin eklenmesi ile kullanılabilir malzemeler elde edilmektedir. Bu işleme alaşımlama denir (Callister, 2015).

Alaşım için yapıya eklenen elementler yapının metalik özelliklerini etkilemektedir. Eklenen elementler yapıda yer alan ya da ara yer atomu olarak yer almaktadır. Ana metaldeki atomun yerini alan atomlara yer alan, ana atomlar arasındaki boşluklarda yer alan atomlara da yer alan atomu denmektedir.

Günümüzde kullanılmakta olan çoğu ticari yapı çok fazlı alaşımdan oluşmaktadır. Bu yapılar genellikle çözücü ve çözünen olarak bir veya daha fazla alaşım elementinden oluşmuş yapılardır. Alaşım elementlerinin bilinçli olarak eklenmesiyle yapının mukavemet değerleri, korozyon direnci vb. malzeme servis şartları ve ömründe iyileştirmeler elde edilmektedir. Her bir alaşım, içerdiği çözücü ve çözünen miktarına göre farklı mikro yapı sergileyebilmektedir. Bir yapıdaki fiziksel ve mekanik özelliklerin mikro yapıya birincil dereceden bağlı olduğu düşünüldüğünde kaynaklı bağlantılarda bağlantı bölgesinin fiziksel

ve mekanik özelliklerini belirleyen birincil etmenin mikro yapı olduğu aşîkârdır. Kaynak işlemleri sırasında ve sonrasında kaynak bölgesine etkiyen ısı ve mekanik etkiler sonucu ana metale yakın bölgelerde değışiklikler gerçekleşebilmektedir. Bir kaynaklı yapının, kaynak metali, ITAB ve ana metalden oluştuğunu düşünürsek, ısı ve mekanik etkiler sonucu kaynak metali ve ITAB’da metalürjik değışikliklerin kaçınılmaz olduğu söylenebilir.

1.3.2. Faz Dönüşümleri

Metalürjik açıdan irdelendiğinde faz dönüşümünü herhangi bir denge fazından başka bir denge fazına geçiş olarak tanımlayabiliriz. Birçok metalde faz dönüşümleri belirli sıcaklık değeriğinde gerçekleşmektedir. Bu sıcaklık değeri genellikle kritik sıcaklık olarak adlandırılmaktadır. Saf demirden örneklemek gerekirse, 910⁰C’ye kadar olan sıcaklıklarda demirin kristal yapısı kübik hacim merkezli, 910⁰C - 1390⁰C sıcaklıkları arasında kübik yüzey merkezli yapı, 1390⁰C - 1535⁰C sıcaklıkları arasında yine kübik hacim merkezli yapıdadır. Bir kristal yapıda bu şekilde gerçekleşen dönüşüm allotropik dönüşümdür. Kaynak sırasında kaynak metali ve ITAB’ın farklı sıcaklık değeriğine maruz kaldığı düşünöldüğünde, kaynaklı birleştirmelerde yapının top yekûn faz dönüşümü açısından değeriendirilmesi gerekmektedir.

1.3.3. Isıl İşlemlerin Etkileri

Isıl işlemler çoğunlukla metalik malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirme amaçlı uygulanan bir ısı işlem sürecidir. Isıl işlemler, döküm, dövme vb. yöntemlerle üretimi gerçekleştirilen ürünlerde üretim sonrası oluşan yapının minimum gereksinimler sağlayacak şekilde ısı etki ile değıştirilmesi/giderilmesi işlemleridir. Tane irileşmesi, gerilme giderme, yeniden kristalleşme vb. birçok ısı işlem ile yapıda minimum gereksinimler sağlanmaktadır. Kaynak prosesi açısından bakıldığında süreç biraz daha karmaşılaşmaktadır. Ark kaynak yöntemlerinden biri ile gerçekleştirilen bir kaynak prosesinde ergime sıcaklığının üzerine çıkıldığı için kaynak havuzu döküm işlemine benzer bir ergime-katılaşma safhası geçirmektedir. Kaynak bölgesinden ITAB bölgesine doğru gerçekleşen sıcaklık düşüşü ITAB bölgesinin farklı sıcaklık değeriğine maruz kalmasına yol açmaktadır. Bu durumda ITAB bölgesi farklı ısı etki altında kalıp farklı yapı dönüşümleri sergileyebilmektedir.

1.3.4. Kaynaklı Birleşimlerde TTT-CCT Diyagramları

Demir karbon denge diyagramı çok yavaş soğuma şartları dikkate alınarak hazırlanmış bir diyagramdır. Östenitin denge durumundaki yapısı dışında farklı soğuma hızlarında oluşabilecek fazlar hakkında bilgi verememektedir. Bu sebepten soğuma hızlarını dikkate alarak oluşabilecek fazları sunabilecek diyagramlar mevcuttur. Bu kapsamda zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramları ve sürekli soğuma dönüşüm (CCT) diyagramları devreye girmektedir. Bu diyagramlardan soğuma hızına göre oluşabilecek yapılar tahmin edilebildiği için kontrollü soğutma sonucu istenen yapıların elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

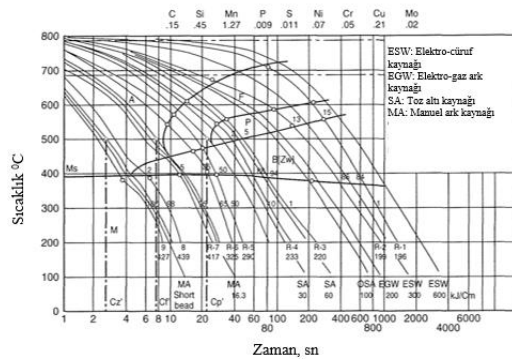
Kaynak prosesi açısından bakıldığında olay biraz daha karmaşıklaşmaktadır. Kaynak sırasında ITAB bölgesinin farklı sıcaklıklara maruz kalması sebebiyle, soğuma hızlarının bu bölgelerde nasıl bir etki yapacağı iyi analiz edilmelidir. Son yıllarda otomotiv, savunma sanayi ve konstrüksiyon imalatında kullanılmak üzere yüksek alaşımlı çelikler tercih edilmektedir. Yüksek alaşımlı çeliklerin kullanımı ilgili alaşımın soğuma eğrilerinin sola kaymasına sebebiyet vermektedir. Kaynak prosesinde soğuma hızları nispeten yüksek olduğundan bilhassa yüksek mukavemetli çeliklerin kaynak işlemi sırasında ve/veya sonrasında özel önlemler almak gerekmektedir. İndüksiyon makinesi, ısıtma işlemi konsolları ile kaynak metali ve ITAB bölgelerinin yavaş soğutulması sağlanabilmektedir. Çoğunlukla yüksek karbon eşdeğerine sahip malzemelerin kaynak işlemlerinde gerçekleştirilen bu işlem kaynak metali ve bilhassa ITAB bölgesinin yavaş soğumasını sağlamaktadır. Şekil 5'te bir indüksiyon makinesi ile kaynak metali ve ITAB bölgesinin ısıtılarak yavaş soğutulması resmedilmektedir.

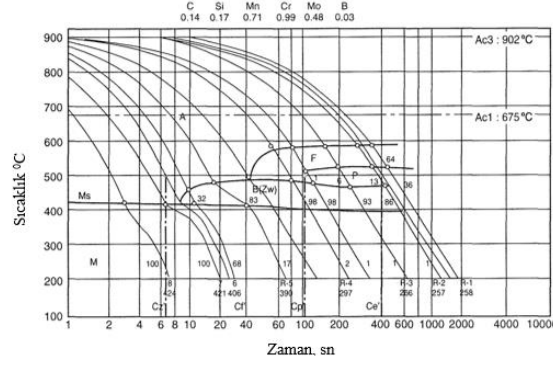


Şekil 5. İndüksiyon makinesi ısıtma işlem konsolları (URL-3. 2023)

Denge dışı diyagramlar, ferrit dönüşümünün gerçekleşmeye başladığı bir A3 sıcaklığına dayalı olarak dönüşüm sıcaklığının denge durumundan nasıl değiştiğini veya soğutma denge dışı durumda yapıldığında denge dışı mikro yapıların hangi sıcaklık ve zaman aralığında ortaya çıktığını gösterir. Kaynak prosesi sonrası oluşabilecek yapıların tahmini için çoğunlukla CCT diyagramları kullanılmaktadır. Kaynak prosesi sürecinde iki tür CCT diyagramı kullanılmaktadır. Kaynak metali için SW-CCT diyagramları, ITAB bölgesi için SH-CCT diyagramları kullanılmaktadır. SH-CCT diyagramlarının çoğu, kaynak bölgesindeki soğuk çatlak ve çentik darbe tokluğu gibi çeliklerin ark kaynağının kaynaklanabilirliğinin değerlendirilmesi için önemli olan ergime hattının yakınındaki bölgeye odaklanmaktadır. Ergime hattından uzaktaki ITAB'a karşılık gelen yaklaşık 850°C-1200°C derecelik bir maksimum ısıtma sıcaklığına sahip CCT diyagramları derinlemesine incelenmemiştir. Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için yaklaşık 200 çeşit kaynak prosesi için SH-CCT diyagramları, Bilim ve Teknoloji Kuruluşunun Ulusal Araştırma Enstitüsü tarafından hazırlanmıştır (Kasugai & Fujita 1999).

Numuneler, kaynak ısı döngüsüne göre hızlıca 1350°C'ye kadar ısıtılmakta ve bu sıcaklıkta tutulmadan hemen soğutulmaktadır. Kaynak erime çizgisine yakın bölgelerde termal tekrarı simüle ederek ITAB'ın dönüşüm davranışını araştırmak için SH-CCT diyagramı kullanılmaktadır. Şekil 6'da verilen diyagram, ilgili numunede 1350°C'lik maksimum ısıtma sıcaklığına sahip bir kaynak termal döngüsünü simüle ederek elde edilmektedir. Dönüşüm mikro yapısı genellikle A₃'ten (veya 800°C) 500°C'ye soğutma süresiyle belirlendiğinden, A₃'ten soğuma eğrisi apsis eksenini boyunca logaritmik ölçek kullanılarak gösterilmektedir (Kasugai & Fujita 1999). Şekil 6'da verilen CCT diyagramına ilaveten karbon değeri 0.38 olan düşük alaşımlı çelikten imal edilmiş kaynaklı numunelerin CCT diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.





Şekil 7. 0.38 karbona sahip düşük alaşımlı çelikten imal edilmiş kaynaklı numunelerin CCT diyagramı (Kasuga & Fujita 1999)

1.4. Çelik Malzemelerin Kaynaklanabilirliği

Kaynaklanabilirlik, bir malzemenin kaynak edilebilirliğinin değerlendirilmesi olarak ifade edilebilir. Karbon ve alaşım elementlerindeki artış çeliğin mekanik özelliklerinde değişikliklere sebebiyet vermektedir. Bir alaşımda kullanılacak olan alaşım elementi cinsi ve oranı, elde edilmek istenen çeliğin mekanik özelliklerine göre belirlenmektedir. Karbon ve alaşım elementlerinin artışı belirli değerlere kadar çeliğin mukavemet değerlerinde artışa sebebiyet vermektedir. Çeliğin muhteviyatındaki karbon ve alaşım elementlerinin artışı çeliğin kaynaklanabilirliğini etkileyebilmektedir. Yüksek karbon ve alaşım elementlerine sahip bir çeliğin özel şartlar altında kaynaklanması gerekebilecektir. Önlemlerin alınmaması durumunda kaynak sonrası oluşabilecek beynitik ve/veya martenzitik yapı ITAB bölgesinde malzemenin gevrek davranış göstermesine neden olabilecektir (Odebiyi, Adedayo, Tunji, & Onuorah, 2019). Bu sebepten kaynak tavsiye dokümanları, standartlar vb. artan karbon ve alaşım elementlerine ilaveten alınacak tedbirleri tavsiye etmektedir.

1.4.1. Karbon Eşdeğeri

EN ISO 1011-2 (2001) standardı alaşımsız, ince taneli, düşük alaşımlı çelikler ve karbon-mangan çelikleri için karbon eşdeğer formülleri sunmaktadır. Karbon eşdeğeri karbon ve alaşım elementlerinin dikkate alınmasıyla elde edilen bir ön değerlendirme formülüdür. EN ISO 1011-2’de verilen CE ve CET karbon eşdeğerlerine ek olarak birçok

karbon eşdeğer formülü de mevcuttur. Standartta tanımlanmış CE formülü, 1967'de UKE tarafından benimsenen Dearden ve O'Neill formülüdür (Lancaster, 1999). Bu formül, yaygın olarak kullanılan çeşitli karbon ve karbon-mangan çeliklerinde sertleşebilirliği tahmin etmek için uygun bulunmuştur, ancak mikro alaşımlı yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler veya düşük alaşımlı Cr-Mo çelikler için uygun bulunmamıştır (Ginzburg & Ballas, 2000).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \text{ (\%cinsinden)} \quad (1)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \text{ (\%cinsinden)} \quad (2)$$

EN ISO 1011-2 ve IIW haricinde Yurioka, düşük karbonlu çeliklerin ITAB bölgesinde martenzitik oluşum için $t_{8/5}$ kritik süreyi saniye cinsinden hesaplayabilmek için özel bir karbon eşdeğeri geliştirmiştir (Yurioka, 1990).

$$CE * = \%C + \frac{\%Mn}{3.6} + \frac{\%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{9} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{4} \quad (3)$$

Tüm bu karbon eşdeğeri formülleri kaynak sonrası ITAB bölgesinde oluşabilecek gevrek yapıların önceden tahmini üzerine oluşturulmuştur. EN ISO 1011-2'de verilen CE formülüne göre, malzemelerin sahip oldukları karbon eşdeğerine göre kaynaklanabilirlik durumu Tablo 5'te sunulmaktadır (Ginzburg, & Ballas, 2000; Yurioka, 1990; ASME BPVC Section II, 2001).

Tablo 5'e göre CE değeri 0,46 ve üzeri olan çeliklerin kaynak işlemleri için özel şartlar gerekebilir. Bu şartlar çoğunlukla kaynak öncesi ve/veya kaynak sonrası ısıtma işlemleri uygulamalarıdır. Bu uygulamalardaki amaç kaynak sonrası kaynaklı birleşimin yavaş soğumasını sağlayabilmektir. Ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıtma işlemleri uygularken sac üreticisi tavsiyelerine de dikkat etmek gerekebilir. Bilhassa yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahip sacların uygulanacak olan yüksek ısıtma işlem sonucu mekanik özelliklerinde kayıplar söz konusu olabilecektir.

Tablo 5. CE formülüne göre malzemelerin kaynaklanabilirliği

Karbon Eşdeğeri (KE)	Kaynaklanabilirlik
0.35'e kadar	Mükemmel
0.36-0.40	Çok iyi
0.41-0.45	İyi
0.46-0.50	Orta
0.50'den büyük	Şartlı

1.4.2. Kaynak Parametreleri

Akım, gerilim, ilerleme hızı, tel besleme hızı vb. kaynak parametreleri, kaynağın kalitesini ve kaynak profilini etkileyen parametrelerdir. Seri imalat öncesi parametre optimizasyonunun yapılarak ilgili birleşim tipi için tüm kaynak parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kaynak sırasında kaynak havuzuna etkiyecek ısı girdisinin hesaplanması için kullanılan formüllerden bir tanesi EN ISO 1011-1 (2010) standardında verilmiştir. Malzemenin sahip olduğu alaşım elementi muhteviyatı ve mekanik özelliklerini düşündüğümüzde, ısı girdisinin malzeme çeşidi, birleştirme tipi, et kalınlığı vb. faktörler dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Her bir kaynak yöntemi için termal verimlilik faktörü Tablo 6'da verilmiştir. Sac üretici firmalar çoğunlukla kaynak işlemleri için ısı girdisi tavsiyelerinde bulunmaktadır.

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \text{ kJ/mm} \quad (4)$$

Q: Isı girdisi

k: Kaynak prosesi termal verimlilik faktörü

U: Voltaj

I: Akım

V: İlerleme hızı

Tablo 6. Kaynak yöntemleri için termal verimlilik faktörü k

Proses Numarası	Proses İsmi	Faktör k (birimsiz)
121	Tozaltı ark kaynağı	1.0
111	Elektrik ark kaynağı	0.8
131	MIG gazaltı kaynağı	0.8
135	MAG gazaltı kaynağı	0.8
136	Özlü telle ark kaynağı	0.8
141	TIG gazaltı kaynağı	0.6
15	Plazma ark kaynağı	0.6

1.4.3. $T_{8/5}$ Süresi

Kaynaklı proseslerde takip edilebilirliği daha kolay olması açısından soğuma süresi $t_{8/5}$ izlenebilmektedir. $T_{8/5}$, kaynak metali ve ITAB bölgesinin soğuması sırasında 800°C ila 500°C sıcaklık aralığındaki geçen süreyi ifade etmektedir. Katı cisimlerdeki ısı iletiminin genel diferansiyel denkleminde, kaynak dikişi bölgesindeki sıcaklık seyrini yer ve zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlayan denklemler türetilmektedir. Uygun dönüşümden sonra bu denklemler, kaynak metalinin 800°C ila 500°C sıcaklık aralığından geçmesi için gerekli soğutma süresi $t_{8/5}$ 'i hesaplamak için uygun olabilmektedir (Uwer, & Degenkolbe, 1975).

Soğutma süresi hesaplanırken ısı yayılımının türüne dikkat edilmelidir. İki boyutlu ya da üç boyutlu ısı yayılımından hangisi söz konusu ise hesaplamalar ilgili boyuta göre gerçekleştirilmelidir. Çoğunlukla kalın et kalınlığına sahip malzemelerde ısı dağılımı üç boyutlu gerçekleşmektedir. İki boyutlu ısı yayılımında, ısı akışı sadece iş parçasının düzleminde gerçekleşmektedir (URL-4. 2023). EN ISO 1011-1 standardı, ısı akışının boyutu, malzeme kalınlığından bağımsız olup olmaması üzerine $t_{8/5}$ süresinin hesaplanabilmesi için formüller vermektedir. Isı akışı üç boyutlu ve soğuma süresi malzeme kalınlığından bağımsız olduğunda soğuma süresi aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır;

$$t_{8/5} = \frac{Q}{2\pi\lambda} \times \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (5)$$

Alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler için yukarıdaki eşitlik altta verilen formüle dönüştürülür;

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \times Q \times \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \times F_3 \quad (6)$$

Isı akışı iki boyutlu ve soğuma süresi malzeme kalınlığına bağlı ise, soğuma süresi aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır;

$$t_{8/5} = \frac{Q^2}{4\pi\lambda\rho cd^2} \times \left(\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right) \quad (7)$$

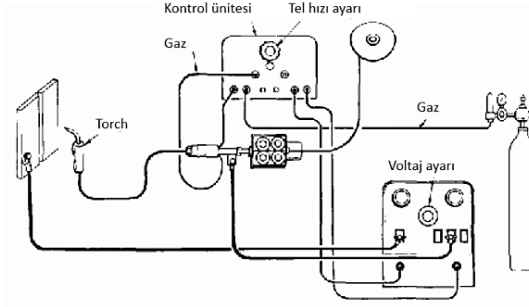
Alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler için yukarıdaki eşitlik altta verilen altta verilen formüle dönüştürülür;

$$t_{8/5} = (4300 - 4.3 T_0) \times 10^5 \times \frac{Q^2}{d^2} \times \left(\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right) \times F_2 \quad (8)$$

1.4.4. Kaynak Yöntemleri

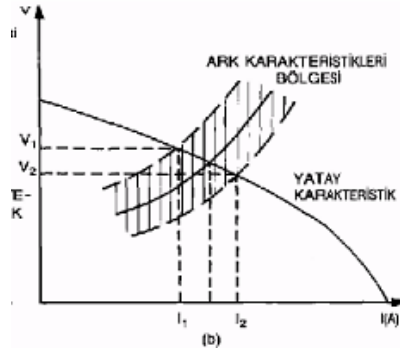
Ergitme kaynak yöntemleri olarak bakıldığında elektrik ark kaynağı, TIG, MIG, MAG, tozaltı kaynağı vb. birçok kaynak yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler koruyucu ortam, dolgu malzemesi, besleme tipi vb. durumlara göre farklılıklar göstermektedir. Seri imalata uygunluğu ve kısmen düşük ısı girdisi sağlayabilmesi sebebiyle zırh saclarının kaynağında çoğunlukla MAG kaynağı kullanılmaktadır. MAG gazaltı kaynak yöntemi ark kaynağı prensibine göre çalışan, tel sürme mekanizması sayesinde kaynak bölgesine sürekli tel besleyen bir sistemdir. Ark, kaynak teli ile iş parçası arasında oluşmaktadır. Kaynak teli hem arkın oluşmasını hem de ergiyerek kaynak dolgu metalini oluşturmaktadır. Kaynak sırasında torcun içinden kaynak bölgesine beslenen karışım gazı kaynak havuzu ile atmosferik ortam arasında koruyucu bir kalkan görevi üstlenmektedir. Malzeme et kalınlığına göre tel çapı ve koruyucu gaz debisi seçilmektedir. Bu yöntem diğer kaynak yöntemlerine nazaran seri imalata uygunluğu, homojen bir kaynak dikişi profili, daha düşük ısı girdisi vb. hususlarda üstünlük sağlamaktadır. Zırh sacı kaynaklı

imalat süreçlerinde çoğunlukla tercih edilen bir ark kaynak yöntemi olması sebebiyle plakaların kaynak işlemleri MAG gazaltı kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. MAG gazaltı kaynak yönteminin şeması Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. MAG gazaltı kaynak makinası şematik gösterimi (Tülbentçi, 1990)

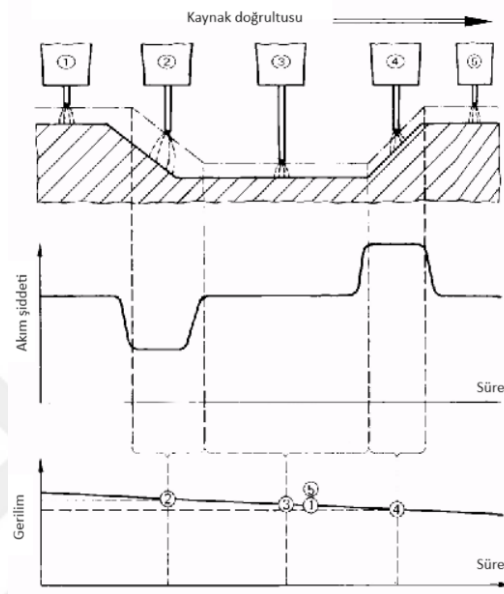
MAG gazaltı kaynak yönteminde kullanılan akım üreteçleri yatay karakteristiktir. Bu karakteristikte voltaj neredeyse sabit kalırken akım değerlerinde büyük değişiklik olmaktadır. MAG gazaltı kaynak yönteminde kaynak akım üreteçlerinin yatay karakteristikte olması voltaj değerlerinde ufak bir değişim sonucu amper değerlerinde büyük değişimlere yol açmaktadır. Yatay karakteristik eğrisi Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Yatay karakteristik eğri

MAG gazaltı kaynak makinaları iç ayar mekanizmasına göre ark boylarını ayarlamaktadır. Kaynak sırasında operatöre bağlı olarak, ayrıca düzgün olmayan bir yüzeyde kaynak sırasında torch – iş parçası mesafesi değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 10’da görüleceği üzere kaynak sırasında herhangi bir nedenle ark boyu uzarsa akım değeri azalacaktır. Buna bağlı olarak eriyen tel miktarı azalacağından ark normal boyuna tekrar

dönecektir. Ters bir durumda ise ark boyunun kısalmasıyla akım şiddeti artacak ve beraberinde eriyen tel miktarı da artacaktır. Bu durum operatörün kontrol edebileceği bir durum olmayacağından ark boyu kaynak akım üreticinin yatay karakteristiği ile kendiliğinden ayarlanmaktadır (Tülbentçi, 1990).



Şekil 10. MAG kaynağı ayar mekanizması

1.5. Kaynak Profili

1.5.1. Kaynak Profili Tanımlamaları

Kaynak nüfuziyeti (WP), ergime derinliği (DOF) ve boğaz kalınlığı (TT) kaynak profili ile ilgili tanımların en başında gelmektedir. Bir kaynak dikişinin uzunluğunun yanı sıra kaynak kesitindeki boyutların da tanımlanması gerekmektedir. Bu değerler statik ve bilhassa dinamik yüke maruz kalan yapılarda önem arz etmektedir. Kaynak prosesinin onaylanması sürecinde yürütülen kaynak yöntem şartnamesi (WPS) süreçlerinde kaynaklı numune makro kesit değerlendirilmeleri yapılarak bu boyutlar değerlendirilmektedir. Bilhassa dinamik yüke maruz kalan yapılarda bu değerlerin yapının servis ömrü üzerine önemli etkileri vardır.

Her bir standart WP, DOF ve TT ile ilgili kendi tanımlamasını yapmaktadır. Bu standartlara bakıldığında tanımlamalardan bazıları örtüşse de çoğu standart kendi

tanımlamasını yaptığından tanımlamalar standartlara göre farklılıklar göstermektedir. AWS A3.0, ISO2553, EN 1993-1-8 ve DIN EN ISO 17659 gibi her standart kendi tanımını yapmakta ve WP, DOF ve TT'nin her birinin nasıl ölçüleceğini ve değerlendirileceğini şekiller üzerinde göstermektedir. Ayrıca bu standartlarda bu tanımların değerlendirilmesinde uzunluk biriminin dikkate alındığı görülmektedir. Bu durumda ergime ya da nüfuziyet (FOP) oranı değerlendirmesinde hatalı sonuçlar alınabilmektedir. Bu nedenle, bir sonraki bölümde açıklanan, alan birimini dikkate alan değerlendirme yöntemi FOP oranının değerlendirilmesi için önerilmektedir.

Kaynaklı yapılarda WP, DOF ve TT, kaynak kalitesi ve yapının mukavemeti açısından önemli kaynak boyutlarıdır (Ishigami, Roy, Walsh, & Withers, 2017). Bunun önemi birçok standartta, kaynak el kitaplarında ve ISO 5817 (2023), AWS D1.1/D1.1M (2020), AASHTO/AWS D1.5M/D1.5 (2010), ASM Handbook (1993), EN 1090-2 (2019), EN 1993-1-8 (2005), belgelerinde belirtilmiştir. ISO 5817 (2023) standardı, tipik kusurların boyutlarını tanımlamakta ve bunları üç farklı kalite sınıfında sunmaktadır. Bu standart, doğrudan WP, DOF ve TT'nin değerlendirilmesine atıfta bulunmamaktadır. Ancak aşırı kaynak metali, aşırı dışbükeylik gibi WP, DOF ve TT'nin boyutsal kalitesini etkileyen kusurların et kalınlığına ve kaynak dikişi genişliğine göre değerlendirilmesini sağlamaktadır. AWS D1.1/D1.1M (2020), kaynak tasarımı için bazı tanımları açıklamakta ve statik yüklü boru bağlantılarının tasarımı için ANSI/AISC 360 gibi standartlara atıfta bulunmaktadır. Efektif boğaz ile ilgili bağlantı açılarını dikkate alarak gerekli ölçü hesabını tanımlamaktadır. Bu kapsamda, bu standart, 2 eleman arasındaki açının 105 dereceden büyük olduğu durumlarda, yapının mukavemeti için efektif boğazın bacak uzunluğundan (boyutundan) daha önemli olması gibi bazı durumları vurgulamaktadır. AASHTO/AWS D1.5M/D1.5 (2010), kaynaklı bağlantıların mukavemet, sertlik, esneklik ve yorulma gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanacağını ve detaylandırılacağını belirtmektedir. Ayrıca, minimum efektif kaynak boyutu gibi kaynak boyutunun bazı tanımları da bu standartta verilmektedir. Birleştirme tipine göre minimum ve maksimum kaynak boyutları ilgili standartta şekil ve tablolarda sunulmaktadır. ASM El Kitabı (1993), kaynak teknolojisi hakkında çok çeşitli bilgiler sağlamaktadır. WP, DOF ve TT ile ilgili tanımlamalar yapmanın yanı sıra derinliğin genişliğe oranı konusunda da önerilerde bulunmaktadır. ASM El Kitabı, ince kesitlerdeki yüksek vakumlu kısmi nüfuziyetli kaynaklar gibi özel birleştirmeler için ilgili tablolarda derinliğin genişliğe oranını sunmaktadır. EN 1090-2 (2019), çelik yapılar için teknik gereklilikleri tanımlamaktadır.

Ayrıca iç köşe kaynakları için kaynak kalınlığına dayalı bir formülle gerekli minimum boğaz kalınlığını belirtmektedir. EN 1993-1-8 (2005), duvar kalınlığı veya kaynak genişliğine bağlı olarak kaynak ve boğaz kalınlığı için bazı formüller ve ayrıca duvar kalınlığı veya boğaz kalınlığı dikkate alınarak kaynak uzunluğunun ne olması gerektiğini sunmaktadır. Yukarıdaki standartların ötesinde, EN 1993-1-8, boğaz kalınlığını dikkate alarak bir iç köşe kaynağı için minimum kaynak uzunluğunun ne olması gerektiğini formüle etmektedir. Hesaplanacak bu değer altındaki köşe kaynağı boyutlarının ilgili yükleri taşıyamayacağı ifade edilmektedir.

EN 1993-1-8, AWS A3.0, ISO 2553 ve DIN EN ISO 17659'a göre her standardın kendi terimi ve tanımı mevcuttur. WP, DOF ve TT ile ilgili tüm terimler ve tanımlar aşağıdaki Tablo 7'de özetlenmiştir.

WP, DOF veya TT'yi ölçebilmek için farklı yöntemler de geliştirilmektedir. Saeed ve arkadaşları, kalibre edilmiş şarj bağlantılı bir cihaz sensörü ve yapılandırılmış ışık kullanarak yakalanan görüntülerden kaynak havuzunun nüfuziyet derinliği olarak yüzey bilgisi elde etmek için bir teknik sunmuştur. Bu yöntem benzer şekilde, kaynak havuzunun derinliğini ölçmek için simülasyon algoritmaları da geliştirilmiştir (Saeed, & Zhang, 2007). Çalışmalarında, lazer ışınlarının aynasal yansımından 3 boyutlu kaynak havuzu yüzeyinin belirlenmesi için yeni bir hesaplama yöntemi sunulmuştur. Bu yöntemin dışında WP, DOF veya TT'yi belirlemek için temassız ultrason yöntemleri ve Lazer/EMAT ultrasonik (LEU) teknikleri de kullanılmaktadır (Yang, & Ume, 2017; Hardt, & Katz, 1984; Rogge, 2009; Kita, 2005).

Tablo 7. EN 1993-1-8, AWS A3.0, ISO 2553 ve DIN EN ISO 17659 standartlarına göre terimler ve tanımlar

Standart	Kaynak Nüfuziyeti (WP)		Ergime Derinliği (DOF)		Kaynak Kalınlığı (TT)	
	Tanım	Şekil	Tanım	Şekil	Tanım	Şekil
EN 1993-1-8	Tam nüfuziyetli alın kaynağı	Şekil yok	(-) Tanım yok	Şekil yok	Köşe kaynaklarında TT	Şekil var
	Kısmi nüfuziyetli alın kaynağı	Şekil yok			Derin nüfuziyetli köşe kaynak TT	Şekil var

Tablo 7'nin devamı

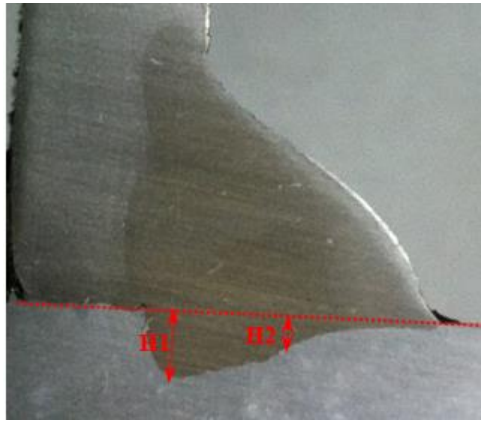
AWS A3.0	Kök nüfuziyeti	Şekil var	Ergime Derinliği	Şekil var	Gerçek TT	Dışbükey için, Şekil var
	Bağlantı nüfuziyeti	Şekil var			Efektif TT	İçbükey için, Şekil var
ISO 2553	Nüfuziyet derinliği	Tam nüfuziyet için; Şekil var	(-) Tanım yok	Şekil yok	Nominal TT	Şekil var
		Kısmi nüfuziyet için; Şekil var			Derin nüfuziyet TT	Şekil var
DIN EN ISO 17659	Ergime nüfuziyeti	Şekil var	(-) Tanım yok	Şekil yok	Efektif TT	Şekil var
	Kök nüfuziyeti				Gerçek TT Tasarım TT Maksimum TT	

Sonuç olarak, kaynak dikişi geometrisini tanımlayan WP, DOF ve TT ilgili standartlarda farklı tanımlarla açıklanmıştır. WP bu standartlarda kök-bağlantı nüfuziyeti, nüfuziyet derinliği, tam-kısmi nüfuziyet olarak farklı terim ve tanımlamalarla açıklanmaktadır. DOF'un tanımı yalnızca AWS A3.0 standardına mevcuttur. TT, AWS A3.0'da gerçek, efektif ve teorik boğazlar olarak üç farklı tanımla, ISO 2553'te nominal ve derin nüfuziyetli TT olarak iki farklı tanımlanmaktadır. 1993-1-8, DIN EN ISO 17659 standardında efektif, gerçek, tasarım ve maksimum TT olarak dört farklı tanımlama mevcuttur. Standartlara bakıldığında açıklamalar ve değerlendirmeler daima uzunluk birimi cinsinden yapılmaktadır. Ayrıca iç köşe kaynaklarında FOP oranı değerlendirmesi çoğunlukla maksimum FOP derinliğinin malzeme kalınlığına oranı olarak yapılmaktadır. Derinlik değerlendirmesi (uzunluk birimi cinsinden), özellikle iç köşe kaynaklarında FOP oranlarının doğru değerlendirilmesi için genellikle ideal değildir. Kaynaklı birleştirmelerde FOP oranlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağladığından, alan biriminin dikkate alındığı değerlendirme daha uygun olmaktadır. İç köşe kaynaklarının enine kesit görünümleri üzerinde FOP alanı belirlenebilmekte ve bu alan toplam alana (TA) oranlanarak FOP oranı belirlenebilmektedir. Bu durum, FOP oranlarını belirlemek için daha doğru bir değerlendirmedir.

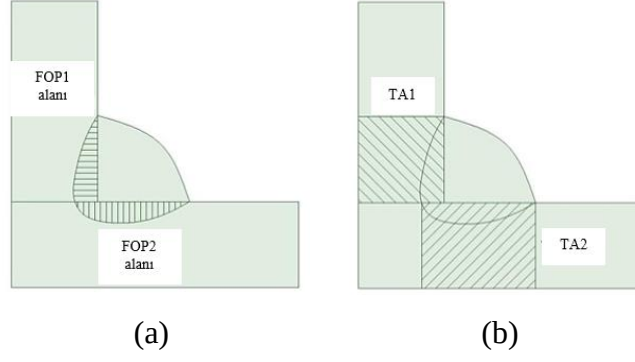
1.5.2. Değerlendirme İçin Öneri

Kaynak geometrisinin oluşumu kaynak parametrelerine ilaveten torç açısına ve salınımına bağlıdır (Mostafa, & Khajavi, 2006; Uzunali, & Cuvalci, 2015; Uzunali, Çuvalcı, & Atmaca, 2019). Bu nedenle, özellikle kaynak kökünde derin nüfuziyete sahip iç köşe kaynaklarında (Şekil 11’de gösterildiği gibi) üniform bir DOF her zaman elde edilemeyebilir. Çok küçük bir alanda maksimum derinlik değeri (h_1 “maks.” DOF’tur ve $h_1 > h_2$ ’dir) elde edilirken, diğer alanlarda nüfuziyet derinliği çok daha düşük olabilmektedir.

FOP alanının hesaplanması, sayısal entegrasyon yöntemleri, çok değişkenli görüntü analizi gibi farklı yöntemlerle yapılabilir (Prats-Montalbán, de Juan, & Ferrer, 2011; Graham, & Ume, 1997). FOP alanının düzensiz şeklini ölçmek için sayısal yöntemlerden yamuk kuralı, Simpson kuralı veya Hough dönüşümü kullanılabilir. Çok değişkenli görüntü analizi, son yıllarda belirsiz alanların tespiti için kullanılan bir yöntemdir (Prats-Montalbán, de Juan, & Ferrer, 2011). Yukarıda belirtilen yöntemler dışında kaynak enine kesit görünümünü aydınlatıcı kâğıdına aktararak da değerlendirmek mümkündür. Bu yöntemlerle köşe kaynağının her bir tarafındaki FOP alanı da belirlenebilir. FOP oranı, Şekil 12’de gösterildiği gibi, FOP alanının toplam alana (TA) oranı ile elde edilmektedir. TA, malzeme et kalınlığı ile kaynak kökü-kaynak ucu arasındaki uzunluğun meydana getirdiği dörtgenin alanıdır.



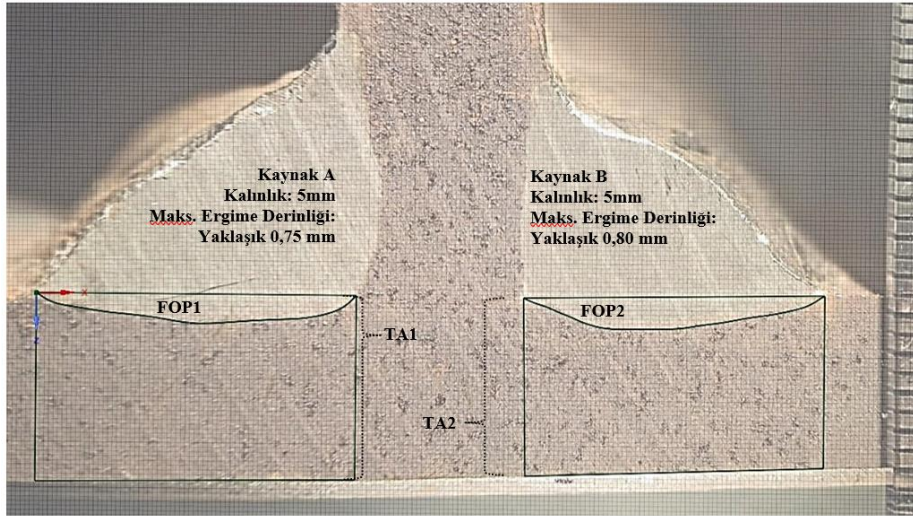
Şekil 11. AWS A3.0 standardına göre kaynaklı numunelerin ergime derinliği



Şekil 12. Her bir yüzdeki FOP alanı ve toplam alan (a) FOP alanı, (b) Toplam alan

Şekil 13'te gösterilen çalışma, kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların DOF'u üzerindeki etkilerini belirlemek için yapılmıştır. Kaynak işleminden sonra kaynaklı numuneler küçük parçalar halinde kesilerek dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama işleminden sonra enine kesit görüntüsü üzerinden ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 8'de hem uzunluk birimi hem de alan olarak verilmiştir. Her iki numunenin DOF'u A kaynağı ve B kaynağı için hemen hemen aynı olsa da ikinci numunenin FOP alanı birinci numuneden daha büyüktür. Ayrıca alan birimi cinsinden hesaplanan FOP oranı her zaman uzunluk biriminden daha düşük olacaktır. Bu durum bize FOP oranının uzunluk birimi dikkate alınarak değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu göstermektedir.

FOP oranı, Kaynak A ve Kaynak B için uzunluk birimi dikkate alındığında sırasıyla yüzde 15 ve yüzde 16'dır. Alan birimi dikkate alındığında FOP oranı, Kaynak A ve Kaynak B için sırasıyla yüzde 9.7 ve yüzde 14.7'dir.



Şekil 13. Kaynaklı numunenin enine kesit görüntüsü

Tablo 8. Uzunluk ve alan birimi cinsinden FOP oranı

	FOP Oranı (Ergime Derinliği / Kalınlık)	FOP Oranı (FOP alanı / Toplam alan)
Kaynak A	0,153	0,097
Kaynak B	0,162	0,147

Sonuç olarak, iç köşe kaynakları için WP, DOF ve TT, kaynak geometrisini tanımlamak için önemli boyutlardandır. Standartlarda bu tanımlamaların uzunluk birimi cinsinden yapıldığı görülmektedir. Bu terimlere ek olarak, FOP oranı hemen hemen tüm çalışmalarda uzunluk birimi cinsinden hesaplanmaktadır. Uzunluk birimi cinsinden değerlendirme, özellikle iç köşe kaynaklarında FOP oranının değerlendirilmesi için ideal değildir. Kaynaklı birleştirmelerde FOP oranının daha doğru değerlendirilmesine olanak sağladığı için alan biriminin dikkate alınması daha uygundur.

1.6. Kaynak Kalitesi

Bir kaynaklı yapıda kaynak kalitesini en basit haliyle, kaynak metali ve ITAB bölgesinin ilgili çalışma şartlarında servis ömrünü yerine getirmesi olarak tanımlayabiliriz. Servis ömrünü sağlayabilmesi için kaynak metali kimyasal ve mekanik özellikleri, kaynak boyutları ve kaynakta olası süreksizliklerin minimum gereksinimleri sağlaması gerekecektir. Kaynak teli-elektrodu ve koruyucu gaz-toz seçimi kaynak dikişi mukavemetini ve kaynak kalitesini belirleyen en önemli etkidir. Sonrasında servis şartlarına göre kaynak boyutlarının belirlenmesiyle bir kaynaklı yapıdan minimum gereksinimler karşılanabilir. Kaynak sırasında ve/veya sonrasında oluşabilecek süreksizlikler kaynak dikişi servis ömründe ciddi kayıplara yol açabilmektedir. Bu kapsamda standartlar kaynak dikişinde oluşabilecek iç ve dış süreksizlikleri tanımlamış ve bu süreksizlikleri ilgili kalite seviyelerine göre kategorize ederek kullanıcılara sunmuştur.

1.6.1. Süreksizliklerin Sınıflandırılması

EN 6520-1 (2007) kaynak prosesinde metalik malzemelerdeki geometrik süreksizliklerin sınıflandırılmasını açıklamaktadır. Bu standart süreksizliklerin kesin bir

şekilde sınıflandırılması ve tanımlanması için temel teşkil etmektedir. Süreksizlikler karışıklığı önlemek için resimlerle de açıklanmıştır. Bu süreksizlik tanımlamalarına metalürjik süreksizlikler dâhil edilmemiştir. 100'den başlayıp 600'e kadar aralıklı olarak giden referans numaraları iç ve dış süreksizlikleri tanımlamaktadır. Dinamik yüklemelere maruz kalan yapılarda bilhassa yapının servis ömrünü etkileyen iç ve dış süreksizliklerden sadece boylamasına çatlak, yanma oluşu ve aşırı konkavite Tablo 9'da sunulmuştur. Bu süreksizliklerin haricinde tanımlı her bir süreksizliğin referans numarası, açıklaması ve görseli EN ISO 6520-1 standardında mevcuttur.

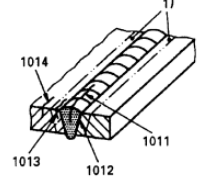
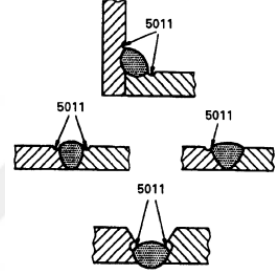
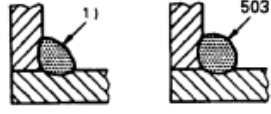
1.6.2. Süreksizliklerin Kalite Seviyeleri – EN ISO 5817

ISO 5817 (2023) standardı, çelik, nikel, titanyum ve bunların alaşımlarının ergitme kaynaklı bağlantılarındaki süreksizliklerin kalite seviyelerini vermektedir. EN ISO 6520-1'tariflenmiş iç ve dış süreksizlikler için kalite seviyesini malzeme et kalınlığı ve kaynak dikiş genişliğine bağlı olarak formüle etmektedir. EN ISO 5817 standardı, B, C ve D olmak üzere 3 farklı kalite sınıfı sunmaktadır. Kalite seviyesi B, bitmiş kaynaktaki en yüksek gereksinime karşılık gelmektedir. Bu standartta çeşitli yük türleri örneğin statik yük, termal yük, korozyon yükü, basınç yükü dikkate alınmaktadır. 2014 yılında revizyonu gerçekleştirilen bu standardın Ek-C bölümüne yorulma yüküne maruz kalan yapılar için süreksizliklerin nasıl değerlendirileceğine dair tavsiyeler eklenmiştir. Kaynak süreksizlikleri için kabul kriterleri Tablo 10'da verilmiştir.

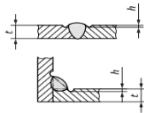
Standartta yaklaşık 40 adet iç ve dış süreksizlikle ilgili B, C ve D kalite seviyesine göre değerlendirme yöntemleri mevcuttur. Kalite seviyesi tasarımdan beklentiye göre belirlenmektedir. Bazı durumlarda B kalite seviyesinin de üzerinde bir kalite seviyesi de istenebilmektedir. Bu durumda kalite seviyesi imalatçı ve müşteri arasında yapılan antlaşma ile belirlenmektedir. Tablo 10'u dikkate alarak 10 mm et kalınlığına ve kaynak dikiş genişliğine sahip bir iç köşe kaynağını B kalite seviyesine göre örneklersek; kaynak dikişinde görülebilecek tüm çatlaklar, 0.5 mm'den derin yanma olukları ve 1mm'den daha büyük aşırı konkav kaynak dikişlerinin reddedilmesi gerekmektedir. Bilhassa dinamik yüke maruz kalan yapılarda ilgili değerleri aşan süreksizlikler yapının servis ömrünü çok düşürmektedir. Çatlak lineer süreksizlik sınıfına girdiğinden tüm kalite sınıfları tarafından kabul ölçütü bulunmamaktadır. Yanma oluşu, aşırı konkavite vb. süreksizlikler de gerilme

konsantrasyon artışına sebebiyet verdiğinden belirli değerlere kadar olmasına müsaade edilmektedir.

Tablo 9. Süreksizliklerin sınıflandırılması ve tanımlamaları (EN 6520-1, 2007)

101	Boylamasına çatlak	
1011	Esasen kaynak eksenine paralel bir çatlak, şu konumda olabilir:	
1012	Kaynak metalinde	
5011	Sürekli yanma oluğu	
5012	Kesintisiz önemli uzunlukta yanma oluğu;	
503	Aşırı konkavite	
503	Köşe kaynaklarının yüzeyinde aşırı kaynak metali	

Tablo 10. Süreksizliklerin kabul kriterleri ISO 5817 (2023)

No	ISO 6520-1	Süreksizlik gösterimi	Notlar	t mm	Kalite seviyeleri için süreksizlik limitleri		
					D	C	B
1.1	100	Çatlak	-	≥ 0.5	İzin verilmez	İzin verilmez	İzin verilmez
1.7	5011	Sürekli yanma oluğu		0.5-3	Kısa süreksizlikler : $h \leq 0.2t$	Kısa süreksizlikler : $h \leq 0.1t$	İzin verilmez
	5012	Kesintili yanma oluğu		> 3	$h \leq 0.2t$, fakat max.1mm	$h \leq 0.1t$, fakat max.0.5mm	$h \leq 0.05t$, fakat max.0.5mm
1.1 0	503	Aşırı konkavite		≥ 0.5	$h \leq 1mm + 0.25b$, fakat max.5mm	$h \leq 1mm + 0.15b$, fakat max.4mm	$h \leq 1mm + 0.1b$, fakat max.3mm

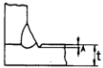
1.6.3. Süreksizliklerin Kalite Seviyeleri – Volvo Standartları

Volvo STD 181-0001 (2014) standardı, çelik malzemeden imal edilmiş kaynak dikişleri için kalite seviyelerini tanımlamaktadır. Bu standart, çelik malzeme et kalınlığı minimum 3 mm olan sacların kaynağı için geçerlidir. EN ISO 5817 standardının aksine Volvo standardı kalite seviyelerini dört gruba ayırmıştır. Bu kalite seviyeleri A, B, C, D'dir ve A sınıfı en katı kalite gerekliliklere sahiptir. A-D kaynak kalite sınıfları için gereksinimler standarttaki tablolarda açıklanmakta ve şekiller üzerinden gösterilmektedir. Tablo 11 alın bağlantılarından bazılarını, Tablo 12, köşe, iç köşe ve T-bağlantılardaki dış süreksizlikleri ve şekil sapmalarından bazılarını, Tablo 13 ise alın, iç köşe, köşe ve T-bağlantılardaki iç süreksizliklerden bazılarını göstermektedir.

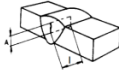
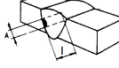
Tablo 11. Alın kaynak bağlantısı kabul kriterleri (Volvo STD 181-0001, 2014)

Sıra No	Süreksizlik	Açıklama
1	Çatlak 	İzin verilmez
2	Aşırı nüfuziyet 	İzin verilmez
3	Yanma oluğu 	$A \leq 0.2t$, fakat max.2mm

Tablo 12. Köşe, iç köşe ve T-bağlantılardaki dış süreksizlik kabul kriterleri (Volvo STD 181-0001, 2014)

Sıra No	Süreksizlik	Açıklama
1	Çatlak 	İzin verilmez
2	Yanma oluğu 	$A \leq 0.2t$, fakat max.2mm

Tablo13. Köşe, iç köşe ve T-bağlantılardaki iç süreksizlik kabul kriterleri (Volvo STD 181-0001, 2014)

Sıra No	Süreksizlik	Açıklama
1	Çatlak 	İzin verilmez
2	Yetersiz ergime 	$A \leq 0.2t$, fakat max.4mm

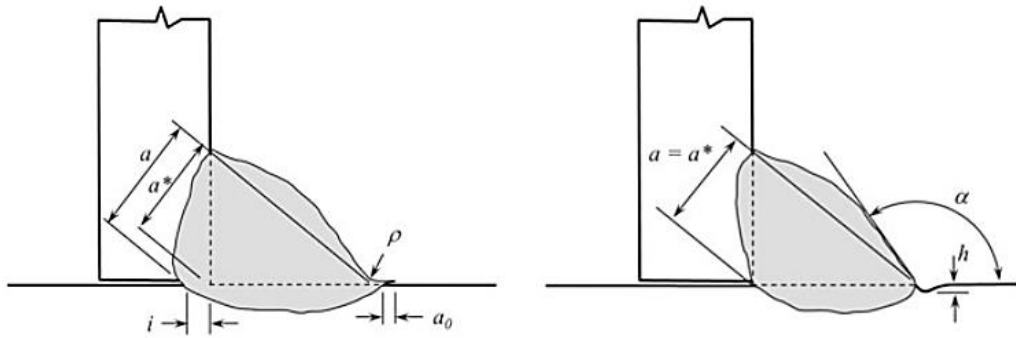
1.6.4. Uluslararası Kaynak Enstitüsü Kılavuzu – Yorulma Mukavemetiyle İlişkili Kaynak Kalitesine İlişkin Kılavuz

UKE son yıllarda kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının belirlenmesi üzerine birçok tavsiye ve kılavuz yayımlamıştır. Bu tavsiye ve kılavuzlara bakıldığında nominal gerilme, yapısal gerilme, etkin çentik gerilmesi, lineer elastik kırılma mekaniği vb. yorulma değerlendirmelerinin açıklandığı görülmektedir. Bu tavsiye ve kılavuzlar çoğunlukla D. Radaj, C. M. Sonsino, W. Fricke, A. Hobbacher, E. Niemi, S. J. Maddox'un kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemetlerinin değerlendirilmesi üzerine yazılmış kitaplarından alıntılar yapılarak hazırlanmış olduğu görülmektedir (Radaj, & Vormwald, 2013; Hobbacher, 1996; Radaj, Sonsino, & Fricke, 2006; Macdonald, 2011). 2016 yılında UKE, kaynak kalitesinin yorulma mukavemeti üzerine etkileri ile ilgili bir kılavuz yayımlamıştır. Bu belge, yorulma dayanımı üzerine yayımlanmış tavsiye ve kaynak kalitesi ile ilgili standartları birleştiren bir kılavuzdur. Kılavuz EN ISO 5817 gibi standartlara atıfta bulunmasının yanında Volvo STD standartlarına da atıfta bulunmaktadır.

Kılavuz et kalınlığı 3 mm'den büyük olan levha tipi kaynaklı çelik yapılar için geliştirilmiştir. Kılavuz daha çok nominal gerilme ve yapısal gerilme yaklaşımları için referans niteliğindedir. Alüminyum malzemeden imal edilmiş kaynaklı yapılar ve ultra yüksek dayanımlı çelikler için deneysel verilerin bulunmaması nedeniyle, yorulma dayanım (veya S–N) eğrileri, yalnızca maksimum akma dayanımı 960 N/mm^2 'ye kadar olan yapısal çelikler için geçerlidir. Bununla birlikte, kılavuzdaki kabul kriterlerinin daha yüksek dayanımlı çelikler, paslanmaz çelikler için de geçerli olması ve bazı kavramların kaynaklı yapılarda yaygın olarak kullanılan 5000 ve 6000 serisi alüminyum alaşımları için

geçerli olması beklenebilmektedir (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016). Statik yüke maruz kalan kaynaklı yapılar için tasarım hesaplamaları, kaynak alanındaki ortalama gerilmeyi temel almaktadır. Bu nedenle ITAB ve kaynak metalinin sünekliği ve yeterli kaynak boğazı kalınlığı en önemli etkenlerdir. Kaynaklı yapı sünek olduğu ve süreksizlikler, kaynak kesit alanını beklenmedik bir şekilde azaltmayacak kadar küçük olduğu sürece, gözenek, yanma oluşu veya soğuk yapışmalar gibi kusurların statik yüklemeye maruz kalan yapıların dayanımı üzerinde çok az etkisi vardır. Boğaz kalınlığı, ağırlıklı olarak statik yüklemeye maruz kalan bir kaynağın açık ara en önemli geometrik özelliğidir (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016). Kaynaklı yapının et kalınlığı, birleşim tipi, kaynak pozisyonu vb. faktörlerin göz önünde bulundurularak kaynak parametrelerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar sonrası ilgili prosesler için WPS'ler oluşturulmaktadır. WPS'lerde kaynaklı yapının mukavemet gereksinimlerini de sağlayabilmesi adına boğaz kalınlığı ilgili WPS'de tanımlanabilmektedir. Lakin kaynaklı yapı yorulma yüklerine maruz kalacaksa kaynak bölgesinin sünekliği ve yeterli seviyede boğaz kalınlığı mutlaka sağlanmalıdır.

Yorulma mukavemeti kaynaklı yapının lokal özelliklerinden fazlaca etkilendiğinden kaynak geometrisi ve süreksizliklere ilişkin özel önlemler alınmalıdır. Jonsson ve arkadaşları nüfuziyet, soğuk yapışma, yetersiz ergime, kaynak ucu geçiş yapıçapı, yanma oluşu boyutu, bağlantı eksenel kaçıklığı ve porozitenin yorulma mukavemetini güçlü bir şekilde etkileyen yedi adet etken olarak belirlemiştir (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016). Bu etkenler Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Yorulma mukavemetini önemli ölçüde etkileyen iç köşe kaynağı geometrisi, a; boğaz kalınlığı, a*; iç köşe boyutu, h; alt kesme derinliği, i; kaynak nüfuziyeti, ρ; kaynak köşesi yarıçapı, a₀; soğuk yapışma uzunluğu ve α kaynak açısı

Kaynaklı yapıların yorulmaya ilişkin kaynak kalitesi, kaynak ucu bölgesinde kaynak geometrisine dayalı olarak da kontrol edilmektedir. ISO/TR 14345 bölgesel kaynak geometrisini tanımlamaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi kaynak uçlarındaki kaynak geometrisi plaka yüzeyi ve kaynak yüzü arasındaki kontak açısı (θ) ve yarıçap (ρ) olarak tanımlanmaktadır. Kaynak ucu bölgesinde kaynak geometrisi yanma oluşunun derinliğiyle de ilgili olabilecektir. Bu değerlerin ölçüm için birçok metot mevcuttur. ISO /TR 14345 kontak açısı (θ) ve yarıçap (ρ) ölçümlerinin standart bir kaynak kumpası veya yarıçap ölçer kullanılarak doğrudan ölçülebileceğinden bahsetmektedir. Bununla birlikte standart, en hassas ölçümlerin kaynakların enine kesit görüntüleri üzerinden yapılan ölçümler olduğunu vurgulamaktadır (ISO /TR 14345, 2012). Lakin bu yöntemlerde kontak açısı (θ) ve yarıçap (ρ) değerlerinin sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi için ideal değildir.

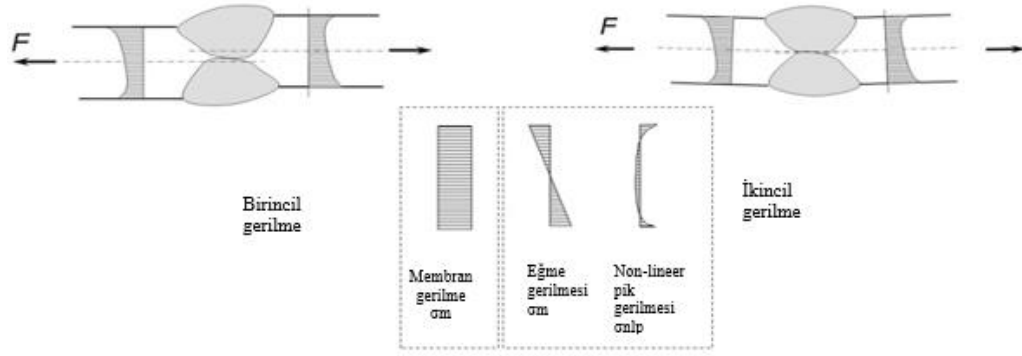
Schubnell ve arkadaşları 2020'de yapmış oldukları çalışma neticesinde optik olarak ölçülen 3 boyutlu verilerden geometrik parametreleri türetmek için beş farklı değerlendirme yöntemi sunmuştur. Yöntemler; eğrilik yöntemi, optimizasyon yöntemi, değerlendirme yöntemi, yarı-otomatik analiz yöntemi ve manuel ölçüm yöntemi olarak adlandırılmıştır. Sunulan bu değerlendirme yöntemlerinin ortak noktası 3 boyutlu verilerin tekli 2 boyutlu kesitlere dönüştürülmesi ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi üzerinedir. Eğrilik yönteminin kaynak ucu yarıçapının ölçümü için en ideal yöntem olduğu belirlenmiştir. Yöntemlerle ilgili detaylı bilgiler deneysel çalışmalar kısmında açıklanmıştır.

Tablo 14, kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerde, kaynak süreksizlikleri ve yanlış hizalamalar arasındaki ilişkileri tanımlamaktadır. Alın kaynaklı bağlantılar, ÇTTB tipi bağlantılar, tek taraflı enine köşe kaynaklı bağlantılar vb. hot-spot yapısal gerilme analizinde kaynaklı yapının çok iyi şekilde hizalanmış olması gerekmektedir. Yanlış hizalama durumu söz konusu olduğunda sonlu eleman analiz modelinde veya uygun bir gerilme büyütme faktörü k_m uygulanarak dikkate alınması gerekmektedir (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016).

Tablo 14. Yorulma değerlendirme yöntemleri, süreksizlikler ve yanlış hizalamalar arasındaki ilişkiler (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016).

Yorulma Değerlendirme Yöntemleri	Süreksizlik	Yanlış Hizalama
Nominal Gerilme	Bazı bağlantı türleri için bazı süreksizlik kabul limitleri belirtilmiştir.	Farklı bağlantı türleri için kabul limitleri belirtilmiştir, yorulma eylemi için büyütme faktörü ile yanlış hizalama hesaplanmalıdır.
Yapısal Gerilme	Normal işçilik süreksizlikleri, yorulma direnci (S–N) eğrisine dâhil edilmektedir	
Çentik Gerilmesi	Normal işçilik süreksizlikleri, yorulma direnci (S–N) eğrisine dâhil edilmektedir; diğer bazı süreksizlik türleri, örneğin büyük yanma olukları modellenenbilmektedir	Gerilmede %5'e kadar artış, yorulma direnci (S–N) eğrisine dahildir—yorulma eylemi için büyütme faktörü ile ek yanlış hizalama hesaplanmalıdır
Lineer Kırılma Mekanığı	Normal işçilik süreksizlikleri, Paris yasası verilerine dâhil edilmektedir; diğer bazı süreksizlik türleri, örneğin büyük gözenekler modellenenbilmektedir	

Şekil 15, bir alın kaynağındaki açısal bozulma ve hizalama hatalarını göstermektedir. Kaynak dikişinin soğumasıyla ortaya çıkan büzülme etkileri sebebiyle açısal bozulmalar meydana gelmektedir. Bu durum kaynak kalitesi ile ilişkili değildir. Hot-spot gerilme için S-N eğrileri, yanlış hizalama nedeniyle oluşabilecek ikincil gerilmeler için bir büyütme faktörü (%5) içermektedir. Eğer hizalama hatası büyük değerlerde ise bu durum tasarımcı tarafından belirlenmeli ve ek yapısal gerilme yüklemesi olarak dikkate alınmalıdır. Maximum yanlış hizalama belirtilmemiş ise UKE tavsiyelerinde bulunan değerler dikkate alınmalıdır (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016).

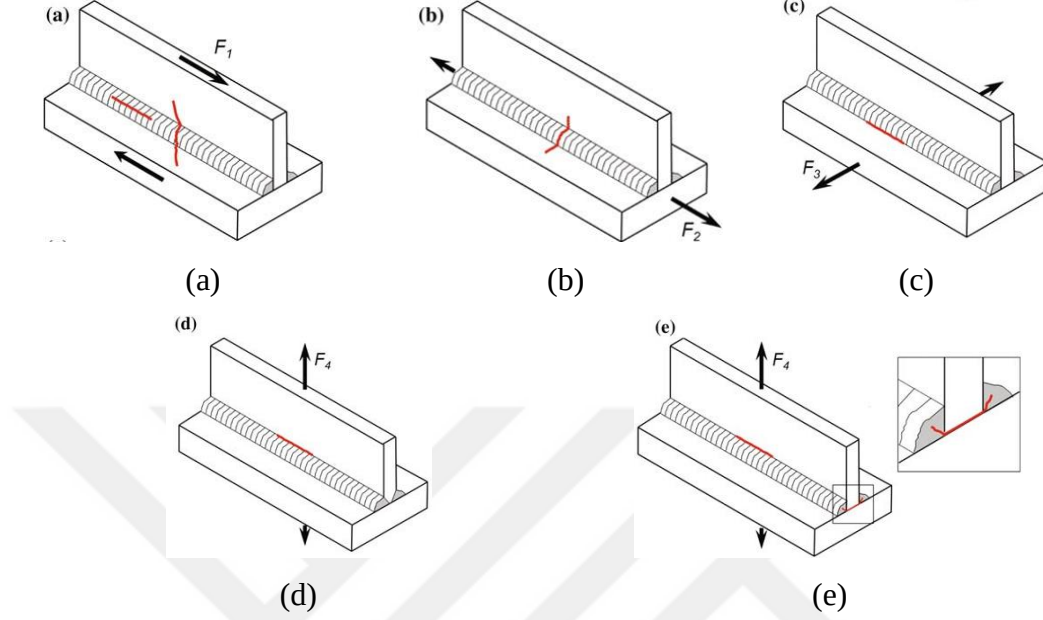


Şekil 15. Alın kaynağında açılma bozulma ve hizalama hataları (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016)

Kaynaklı yapının maruz kaldığı yükün çeşidine göre bağlantı kategorileri arasında ayırım yapılmalıdır. Şekil 16’da gösterilen kaynaklı T bağlantısı maruz kalacağı F1-F4 kuvvetlerine bağlı olarak farklı fonksiyonlara sahip olabilmektedir. F1 kuvveti, kaynak dikişini uzunlamasına yönde bir kesme kuvveti etkisinde bırakabilir. Bu tarz kuvvet etkisindeki kaynak dikişinde kaynak uçlarından ziyade kaynak köklerinde hasar oluşabilmektedir. F2 kuvveti durumunda kaynak başlama ve bitiş bölgeleri kritik hale gelmektedir. F3 kuvveti alt plakaya uygulanan bir kuvvet olmakla birlikte bu plaka üzerindeki kaynak uç kısmı ve geometrik yapısı çok önem arz etmektedir. F4 kuvveti ile kaynak dikişleri yük taşıyıcı durumda olacaktır, bu durumda yan cidar ergime ve kaynak nüfuziyetine göre kaynak kökünde yorulma etkisiyle çatlak oluşabilecektir. F4 tipinde kuvvete maruz kalan tasarımlar için daha fazla özen gösterilmelidir. Çünkü hem kaynak uçları hem de kaynak kökü kuvvet etkisiyle hasar oluşturma eğilimi taşımaktadır (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016).

UKE’nin yayımlamış olduğu “Kaynaklı Bağlantı ve Bileşenlerin Yorulma Tasarımı için Tavsiyeler” dokümanı kaynak dikişlerinin yorulma açısından değerlendirilebilmesi için büyük öneme sahip bir tavsiye dokümanıdır. Birleşim tipi, yük taşıma durumuna göre kaynaklı yapıların yorulma sınıflarını (FAT) belirleyen bu tavsiye dokümanı yorulma yüklemelerini, yorulma direncini ve yorulma değerlendirmelerini açıklarken kaynak kalitesi ile ilgili herhangi bir bilgilendirme yapmamaktadır. Bu kapsamda UKE’nin yayımlamış olduğu “Yorulma Mukavemetiyle İlişkili Kaynak Kalitesine İlişkin Kılavuz” UKE yorulma tasarımı için tavsiyeler dokümanı ile EN ISO 5817 standardı arasında bağ kurmaktadır. UKE yorulma tasarımı için tavsiyeler dokümanı çeliğin farklı kaynaklı

birleştirme türleri için (örneğin alın ve iç köşe kaynakları) FAT yorulma sınıfları hakkında bilgi içermektedir.



Şekil 16. Bağlantı sınıflandırması (a) Boyuna kesme yüklü iç köşe kaynağı, (b) Boyuna normal yüklü iç köşe kaynağı, (c) Enine normal yük taşımayan iç köşe kaynağı, (d) Enine normal yük taşıyan iç köşe kaynağı, (e) Enine yük taşıyan iç köşe kaynağı (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, Kassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016).

Kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının sınıflandırılması iki milyon döngüdeki yorulma mukavemeti olarak tanımlanmaktadır. Örnekleme yapacak olursak FAT 100 sınıfındaki bir kaynaklı yapının iki milyon tekrarlı bir ömrü için verilen gerilme değeri 100 MPa olacaktır. EN ISO 5817 Ek C’de kaynak kalite sınıfları FAT sınıfı ile eşleştirilmiştir. Kalite seviyesi C ve B için, C kalite seviyesini veren FAT 63 karşılığı C 63, B kalite seviyesini veren FAT 90 karşılığı B 90 kullanılmaktadır. FAT 125 yorulma seviyesini temsil eden bir kalite seviyesi B 125 bazı süreksizlikler için Seviye B’ye ek gereksinimlerle temsil edilmektedir. Kaynak ucu süreksizliği için yorulma sınıfı FAT 63 veya kök hatası için yorulma sınıfı FAT 40 olup yük taşıyan iç köşe kaynaklarında yüzey süreksizlikleri, iç süreksizlikler ve kaynak geometrisine bağlı ve çoklu kusurlar ile ilgili kalite gereklilikleri Tablo 15, Tablo 16 ve Tablo 17’de (3’er adet süreksizlik için) verilmiştir. Benzer şekilde Tablo 18, tablo 19 ve Tablo 20, FAT 90’a karşılık gelen alın kaynaklarında sırasıyla yüzey süreksizlikleri, iç süreksizlikler ve kaynak geometrisine bağlı ve çoklu kusurlar ile ilgili kalite gereklilikleri vermektedir.

Tablo 15. Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere kaynak ucu yorulma mukavemeti FAT 63 ve kaynak kökü yorulma mukavemeti FAT 40 olan bir iç köşe kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) yüzey kusuru kalite grupları (Hobbacher, & Kassner, 2012)

Süreksizlik numarası	Süreksizlik tipi	Açıklamalar	Kaynaklar için gerekli min. kalite grubu	İstenen kalite grubundaki kusur sınırları ISO 5817
1.1	Çatlak	Kaynak ucu ve kökte çatlak	D	İzin verilmez
1.2	Krater çatlağı	Kaynak ucu çatlak	D	İzin verilmez
1.3	Yüzey deliği	Kaynak ucu çatlak	D	$d \leq 0.3 a$, fakat en çok 3mm

Tablo 16. Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere kaynak ucu yorulma mukavemeti FAT 63 ve kaynak kökü yorulma mukavemeti FAT 40 olan bir iç köşe kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) iç kusur kalite grupları (Hobbacher, & Kassner, 2012)

Süreksizlik numarası	Süreksizlik tipi	Açıklamalar	Kaynaklar için gerekli min. kalite grubu	İstenen kalite grubundaki kusur sınırları ISO 5817
2.1	Çatlak	Kaynak ucu ve kökte çatlak	D	İzin verilmez
2.2	Mikro çatlak	Kaynak ucu ve kökte çatlak	D	İzin verilebilir
2.3	Gaz deliği	RT’de alanın yüzdesi	D	Çoklu paso $\leq \%5$ Tekli paso $\leq \%2.5$

Tablo17. Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere kaynak ucu yorulma mukavemeti FAT 63 ve kaynak kökü yorulma mukavemeti FAT 40 olan bir iç köşe kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) kaynak geometrisi kusurları ve çoklu kusur kalite grupları (Hobbacher, & Kassner, 2012)

Süreksizlik numarası	Süreksizlik tipi	Açıklamalar	Kaynaklar için gerekli min. kalite grubu	İstenen kalite grubundaki kusur sınırları ISO 5817
3.1a	Lineer kaçıklık	ÇTTB tipteki bağlantılarda lineer yanlış hizalama		$e \leq 0.15t$
3.2	İç köşe kaynakları için yanlış kök boşluğu	Boşluk h, daha kalın köşe kaynağı ile telafi edilebilir	D	$h \leq 1 + 0.3 a$, fakat en çok 4mm

Tablo18. Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere FAT 90 yorulma mukavemetli alın kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) yüzey kusuru kalite grupları (Hobbacher, & Kassner, 2012)

Süreksizlik numarası	Süreksizlik tipi	Açıklamalar	Kaynaklar için gerekli min. kalite grubu	İstenen kalite grubundaki kusur sınırları ISO 5817
1.1	Çatlak		D (hem de C, B)	İzin verilmez
1.2	Sonda krater çatlağı		D (hem de C, B)	İzin verilmez
1.3	Yüzey deliği		B	İzin verilmez

Tablo 19. Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere FAT 90 yorulma mukavemetli alın kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) iç kusur kalite grupları (Hobbacher, & Kassner, 2012)

Süreksizlik numarası	Süreksizlik tipi	Açıklamalar	Kaynaklar için gerekli min. kalite grubu	İstenen kalite grubundaki kusur sınırları ISO 5817
2.1	Çatlak		D (hem de C, B)	İzin verilmez
2.2	Mikro çatlak		C (hem de B)	İzin verilebilir
2.3	Gözenek porozitesi	Radyografide yansıtılan alanın yüzdesi, en büyük gözenek.	C	Çoklu paso $\leq 3 \%$ Tek paso $\leq 1.5 \%$ d ≤ 0.3 , s max 4 mm

Tablo 20. Çelik için UKE yorulma tavsiyelerini karşılamak üzere yorulma mukavemeti FAT 90 olan bir alın kaynağı için EN ISO 5817’de gerekli (bazı) kaynak geometrisi kusurları ve çoklu kusur kalite grubu (Hobbacher, & Kassner, 2012)

Süreksizlik numarası	Süreksizlik tipi	Açıklamalar	Kaynaklar için gerekli min. kalite grubu	İstenen kalite grubundaki kusur sınırları ISO 5817
3.1	Eksenel yanlış hizalama	Alın kaynaklarına sahip düzlem plakalar	B	$h \leq 0.1 t$, max 3 mm
4.1	Rastgele bölümde çoklu kusurlar.	Kusurların maksimum birleşik yüksekliği Σh .	B	$\Sigma h \leq 0.2t$
4.2	Kaynağın boyuna yönünde çoklu kusurlar	Radyografide öngörülen kusur alanının yüzdesi.	B+	$\Sigma(h l) \leq 3 \%$ B yeterli değildir

EN ISO 5817 standardı eski versiyonlarında yorulma ile ilgili denklikler mevcut değildir. 2014 yılında yapılan revizyonla EN ISO 5817’de mevcut olan iç ve dış süreksizlikler yorulma sınıfları ile eşleştirilmiştir. Bu durum kaynaklı yapıların yorulma sınıflarına göre değerlendirmelerinin daha sağlıklı yapılmasına imkân tanımaktadır.

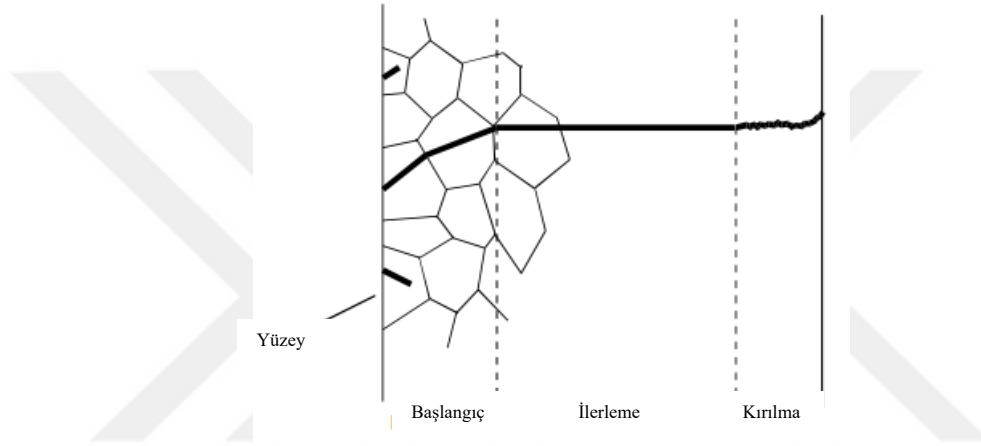
Yük taşıyan iç köşe kaynaklarındaki birçok süreksizlik için minimum D kalite seviyesi tanımlanmıştır. Lineer süreksizlik olan çatlak tipi süreksizliklere bakıldığında izin verilmediği görülmektedir. Alın kaynaklarında minimum kalite seviyesi B ve C kalite seviyesinde olduğu görülmektedir. Köşe kaynaklarında olduğu gibi lineer süreksizlik sınıfına giren çatlak tipi süreksizliğe bakıldığında izin verilmediği görülmektedir. Bilhassa alın kaynaklı yapılarda B kalite seviyesinin de yetersiz olduğu ve bu seviyeden daha üst seviyede kalite gereksinimi olduğu görülmektedir.

1.7. Yorulma

Yorulma, yükün tek seferde uygulandığında herhangi bir hasara yol açmayan fakat tekrarlı ya da değişken olarak uygulandığında malzemede çatlama ya da kırılmaya yol açabilen bir hasar durumudur. Bir yapıya statik olarak etkiyen yükler o yapıya ait akma ve çekme mukavemet değerlerini aştığı takdirde yapıda kalıcı şekil değişimi ve hasarlar meydana getirmektedir. Akma mukavemeti değerinden çok daha düşük değerlerin tekrarlı olarak malzemeye uygulanması durumunda da yapıda hasar ortaya çıkabilmektedir.

Malzeme bilimi açısından bakıldığında yorulmayı tekrarlı yükleme nedeniyle bir malzemede çatlakların başlaması ve ilerlemesi olarak basitçe tanımlayabiliriz. Modern yorulma analizleri çatlak referans olarak çatlakların her bir aşaması için farklı analizler sunmaktadır. Bu aşamalar, bir bileşenin çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve son kırılmasından oluşan kümülatif sürecin sonucudur. Çatlak başlama teorileri, yorulma sebebiyle oluşacak çatlakların yüzeydeki lokal şekil değiştirmeler ve gerilmeler tarafından başlatıldığı varsayımına dayanmaktadır. Tekrarlı yükleme sonucu yapıda gerilmenin maksimum düzeyde olduğu bölgede lokal olarak plastik deformasyon meydana gelebilmektedir. Bu plastik deformasyon o bölgede kalıcı hasara sebep olabilmekte ve böylece bir çatlak başlanması gerçekleşebilmektedir. Bu yaklaşım çatlak başlangıcını ele almaktadır. Tekrarlı yüklemelerin devam etmesi ile çatlak ilerlemesi gerçekleşebilmektedir. Bu durumda da çatlak yayılma ya da ilerleme teorileri devreye girmektedir ve çatlak büyümesini yapıdaki gerilmeyle ilişkilendirmektedir. Tekrarlı yüklemelerin devamında

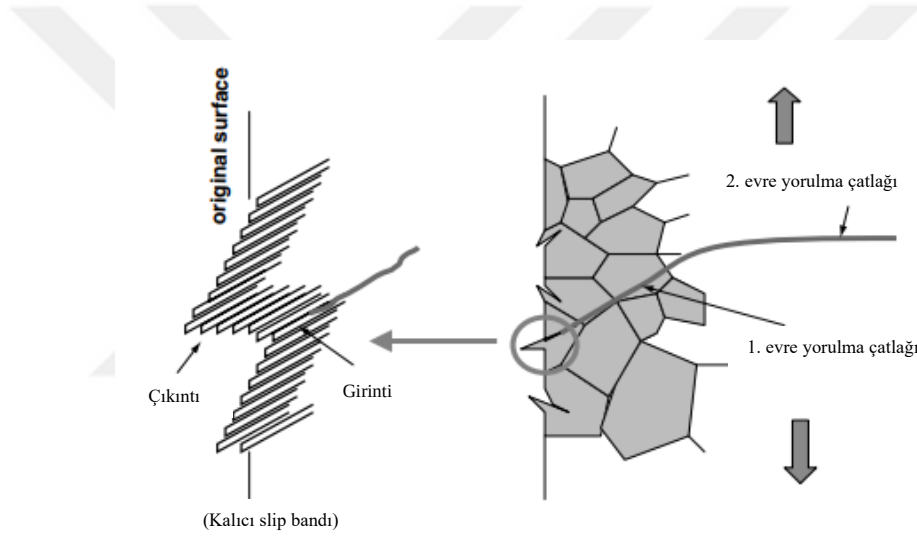
yapı kırılmaya gitmekte nihai olarak da yapının kırılması gerçekleşmektedir. Bu durumda da kırılma mekaniği yaklaşımı devreye girmektedir. Yorulma süreçleri çatlak ile ilişkilendirildiğinde bu aşamalar; çatlak çekirdeklenmesi, kısa çatlak büyümesi, uzun çatlak büyümesi ve nihai kırılma olarak kategorize edilmektedir. Yorulma çatlakları genellikle yapıların dış yüzeylerinden başlamaktadır (Şekil 17). Bu başlangıç safhasına çatlak başlangıcı, sonrasında bu çatlağın çoğunlukla gerilmeye dik bir yönde ilerlemesine de çatlak yayılımı denmektedir. Çatlak yayılımı sonrası son safhada yapı kırılmaktadır ki bu safha da kırılma safhasıdır (Lee, 2005).



Şekil 17. Bir çatlağın hasar modları (Lee, 2005)

Çatlaklar genellikle malzeme içindeki inklüzyon, gözenek vb. süreksizliklerin mevcut olduğu yüksek gerilme konsantrasyonuna sahip bölgelerde veya yakınında lokalize kayma düzleminde başlamaktadır. Bu düzlemler genellikle ya yüzeyde ya da tane sınırları içinde meydana gelmektedir. Çatlağın çekirdeklenmesi yorulma sürecindeki ilk adımdır. Çekirdeklenmenin oluşması sonrası bölgede tekrarlı yüklemelerin devam etmesi durumunda çatlak maksimum kesme gerilmesi düzlemi ve tane sınırı boyunca büyüme eğilimi göstermektedir. Şekil 18, kalıcı kayma bantlarındaki en yüksek gerilme konsantrasyon yerlerinde çatlak çekirdeklenmesinin nerede başladığını göstermektedir. Çekirdeklenme sonrası ikinci aşama büyüme aşamasıdır. Bu aşamada çatlakların büyümesi Aşama 1 ve Aşama 2 şeklindedir. Aşama I çatlak çekirdeklenmesi ve büyümesi, genellikle, lokal maksimum kesme gerilmesi düzleminde birkaç tane mertebesinde sonlu bir uzunluk boyunca ilk kısa çatlak ilerlemesi olarak kabul edilmektedir. Bu aşamada, çatlak boyutu malzeme mikro yapısı ile karşılaştırılabilir olduğundan, çatlak ucu plastisitesi kayma

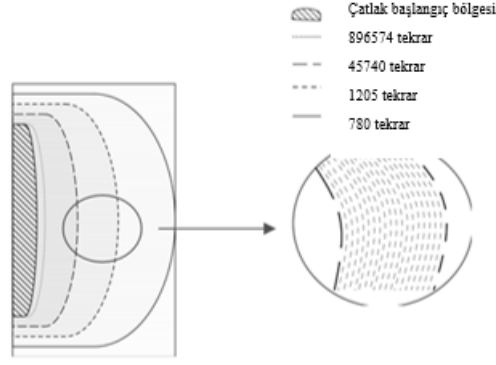
özelliklerinden, tane boyutundan ve gerilme seviyesinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Aşama II çatlak büyümesi, genel olarak çekme gerilme düzlemine normal ve lokal olarak maksimum kesme gerilmesi yönünde uzun çatlak yayılımını ifade etmektedir. Bu aşamada, uzun çatlağın özellikleri, mikro yapının özelliklerinden Aşama I çatlağına göre daha az etkilenmektedir. Bunun nedeni, Aşama II çatlak için çatlak ucu plastik bölgesinin malzeme mikro yapısından çok daha büyük olmasıdır. Çatlak çekirdeklenmesi ve kısa çatlak büyümesi genellikle çatlak başlama periyodu olarak ifade edilirken, uzun çatlak büyüme ömrü çatlak yayılma periyodu olarak ifade edilmektedir. Çatlak başlangıcından yayılma periyoduna geçiş döneminin kesin bir tanımı çoğunlukla mümkün olmamaktadır (Lee, 2005).



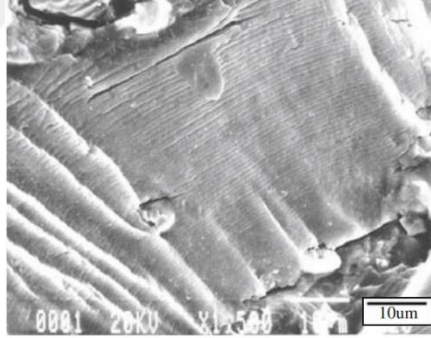
Şekil 18. Tekrarlı çekme gerilmesi altında bir ince plakadaki yorulma süreci (Lee, 2005)

Bir çatlağın oluşması sonucu veya yapının hasarlanmasıyla hasarlı yüzeyler incelenebilmektedir. Eğilmeli veya aksel yorulma hasarı genellikle yapıda istiridye kabuğu veya kumsal çizgilerine (beachmarks) benzer işaretler bırakmaktadır. Bu isimler görüntülerden esinlenerek belirlenmiştir. Bu işaretlerin bir örneği Şekil 19'da verilmiştir. Çatlak çekirdeklenme bölgesi bu çizgilerin merkezidir ve çatlağın çekirdeklenme bölgesinden uzağa, genellikle radyal bir şekilde yayıldığı görülmektedir. Geriye yarı eliptik bir desen kalmaktadır. Bazı durumlarda, geride kalan çizgilerinin boyutunun ve konumunun incelenmesi, farklı bir çatlak büyümesinin nerede başladığını veya nerede bittiğini gösterebilmektedir (Lee, 2005).

Çizgilerin içinde ayrıca ince çizgiler (striations) vardır. Bu ince çizgiler iki adet çizginin arasında çok fazla sayıda olabilmektedir. Şekil 20’de gösterilen ince çizgiler, bir ağacın enine kesitindeki halkalara benzer görünmektedir. Bu ince çizgiler, bir yükleme tekrarı sırasında çatlağın genişlemesini temsil etmektedir. Her büyüme yılı için bir halka yerine, her yükleme tekrarı için bir halka vardır.



Şekil 19. Kırılma yüzeyi işaretleri ve çizgileri



Şekil 20. Yorulma sonrası ince çizgilerin görünümü (Devries, Ruth, & Dennies, 2010)

1.7.1. Gerilme-Ömür Teorisi

Wöhlerin 1800’lü yıllarda akslar üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarla malzemelerde yorulma etkilerinin tespiti üzerine çalışmalar başlamıştır. Kurmuş olduğu deney düzeneği sayesinde yapıları kuvvet veya gerilme üzerinden tekrarlı yüklere maruz bırakarak yapıların hasarlanma durumlarını incelemiştir. Bu çalışmalar, yorulma üzerine yapılan ilk deneysel çalışmalardandır.

Gerilme-ömür yaklaşımı, günümüze kadar yapılan çalışmalara bakıldığında malzeme karakterizasyonu için en çok kullanılan yaklaşımdır. Wöhler eğrisi olarak da bilinen S-N eğrileri, malzemede hasar oluşturacak tekrar sayısı ile gerilme büyüklüğünü gösteren bir grafiklerdir. Lineer olarak da gösterildiği gibi çoğunlukla logaritmik ölçeklerde gösterilmektedir. Gerilme-ömür yaklaşımı kuvvet ya da gerilme esaslı olduğundan malzemenin gerçek gerilme-şekil değiştirme davranışını dikkate almamaktadır ve tüm şekil değiştirmeler elastik olarak esas alınmaktadır (Bannantine, Comer, & Handrock, 1990). Bu sebepten gerilme-ömür yaklaşımı 10^3 tekrar sayısından daha düşük tekrarlarda çoğunlukla doğru sonuçlar vermeyebilmektedir. Düşük tekrarlı yorulma (LCF) testleri plastik deformasyonla karakterize edilirken yüksek tekrarlı yorulmalar (HCF) ise elastik deformasyonla karakterize edilmektedir. LCF testleri çoğunlukla düşük tekrar sayılarında tamamlanırken HCF testleri çoğunlukla yüksek tekrar sayılarında tamamlanmaktadır. Bu sebepten elastik ve plastik deformasyonla karakterize edilen bu testler çoğunlukla LCF ve HCF olarak adlandırılmaktadır. LCF ve HCF arasındaki geçiş, gerilme seviyesi, yani plastik ve elastik deformasyonlar arasındaki geçiş tarafından belirlenmektedir. Bu, sabit bir geçiş ömrü olmadığı anlamına gelmektedir ancak bu geçiş ömrü malzemenin sünekliğine bağlı olmakta ve yaklaşık 10^4 tekrar değerinde olmaktadır. HCF için gerilme-ömür yaklaşımı tipik olarak uygun olmaktadır (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).

Test numuneleri hasarlanana kadar ya sabit bir gerilme genliği (S_a) ya da sabit bir gerilme aralığı (ΔS) ile tanımlanmış yüklemelere maruz bırakılmaktadır. Gerilme aralığı bir tekrardaki maksimum gerilme ve minimum gerilme arasındaki cebirsel fark olarak tanımlanmaktadır;

$$\Delta S = S_{max} - S_{min} \quad (9)$$

Gerilme genliği, gerilme aralığının yarısına eşittir;

$$S_a = \Delta S / 2 = (S_{max} - S_{min}) / 2 \quad (10)$$

Yorulma test çalışmalarında çoğunlukla çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri negatif olarak değerlendirilmektedir. Numunenin hasarlanana kadar maruz kaldığı tekrar sayısına yorulma ömrü (N_f) denir ve her bir tekrar (cycle) iki çevrime ($2N_f$; reversal) eşittir.

Gerilme ömür testlerinin malzeme karakterizasyonu adına tam değişken tekrarlı yükleme koşullarında yapılması karakterizasyonun daha detaylı gerçekleşmesini sağlamaktadır. Tam değişken tekrarlı yükleme şeklinde gerçekleştirilen test, yüklemenin sıfır ortalama gerilme etrafında dönüşümlü olduğunu göstermektedir. Farklı değişken tekrarlı yüklemeler de mevcuttur ve çoğunlukla bu durum R değeri üzerinden ifade edilmektedir. Ortalama gerilme (S_m) aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$S_m = (S_{max} + S_{min})/2 \quad (11)$$

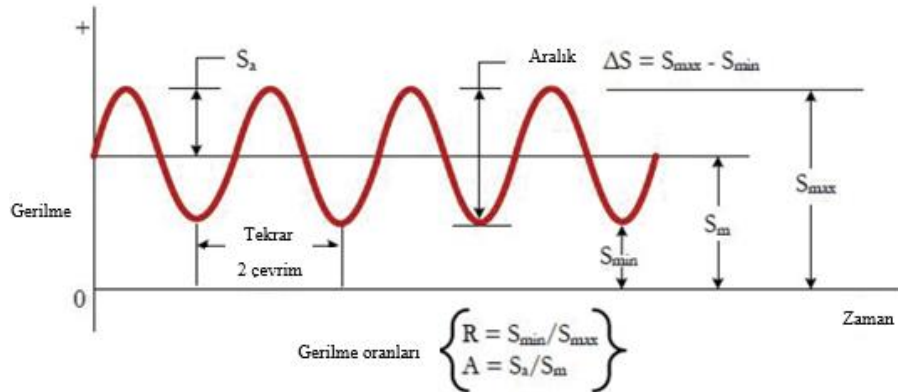
Gerçek yapısal bileşenler genellikle ortalama gerilmeye sahip alternatif yüklere maruz kalmaktadır. İki parametre, gerilme oranı (R) ve genlik oranı (A), genellikle bir cisme uygulanan ortalama gerilmenin temsili olarak kullanılmaktadır. Gerilme oranı, minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır:

$$R = S_{min}/S_{max} \quad (12)$$

Genlik oranı, gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranıdır:

$$A = S_a/S_m = 1 - R/1 + R \quad (13)$$

Şekil 21 sabit genlikli bir tekrarlı yüklemeyi göstermektedir. Farklı değişken tekrarlı yükleme tipleri Tablo 21’de verilmiştir.



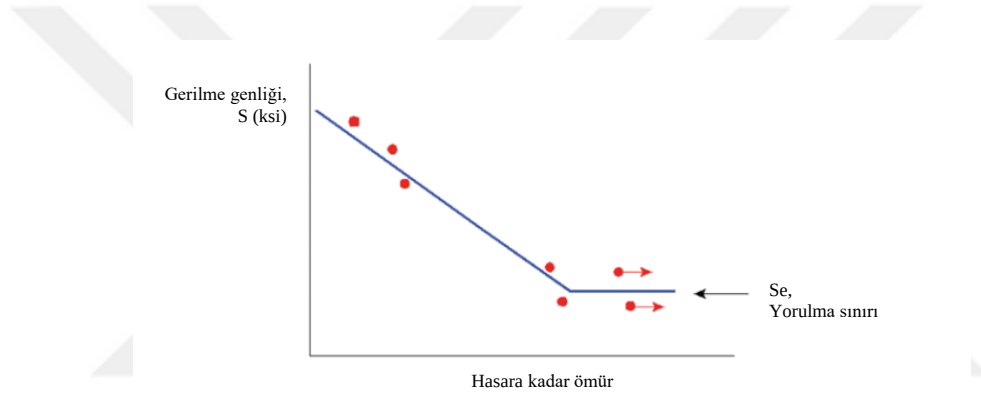
Şekil 21. Sabit genlikli tekrarlı yükleme için terminoloji (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017)

Tablo 21. Farklı değişken tekrarlı yükleme çeşitleri

R Değeri	Yükleme Tipi	Yükleme Eğrisi
$R < 1$	Çeki – Çeki (n çekme gerilmesi uygulandıktan sonra çeki-çeki yükleme yapılır)	
$R = 0$	Çek – Bırak (minimum gerilmenin sıfır olduğu yükleme durumu)	
$R < -1$	Çeki – Bası (çekme gerilmesinin basma gerilmesinden daha büyük olduğu yükleme durumu)	
$R = -1$	Çeki – Bası (çekme gerilmesinin basma gerilmesine eşıt olduğu yükleme durumu)	
$R > -1$	Çeki – Bası (çekme gerilmesinin basma gerilmesinden daha küçük olduğu yükleme durumu)	
$R = \infty$	Bas – Bırak	
$R > 1$	Bası – Bası (n basma gerilmesi uygulandıktan sonra bası-bası yükleme yapılır)	

Gerilme-ömür yaklaşımı dikkate alınarak ilgili standartlar kapsamında hazırlanan yorulma numuneleri belirli gerilme değerlerine denk gelecek şekilde tekrarlı yüklere maruz bırakılarak gerilme değerine karşılık gelen tekrar sayısı elde edilmektedir. Gerilme büyüklüğüne bağlı olarak numunelerin hasara kadar sağlamış olduğu tekrar sayıları geniş aralıklarda olduğu için eğri üzerinde gösterimde ya semi logaritmik ya da log-log eğrisi tercih edilmektedir.

Şekil 22’de S-N eğrisi veya diğer adıyla Wöhler eğrisi gösterilmektedir. Bu eğri çoğunlukla tam değişken tekrarlı yüklemeler ($R = -1$) için oluşturulmuştur. Eğrinin eğimli kısımdan yatay kısma geçtiği nokta dayanıklılık (veya yorulma) sınırı (S_e) olarak adlandırılmaktadır.



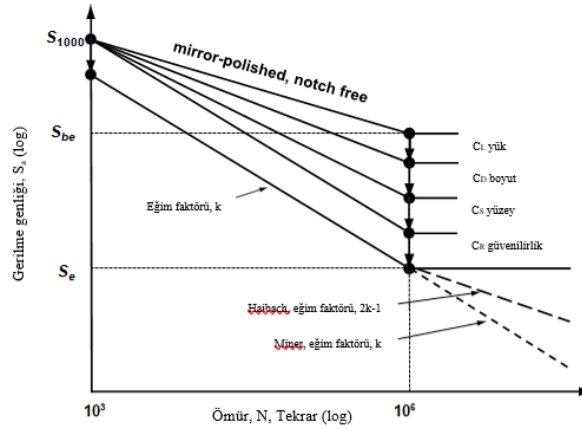
Şekil 22. İdealleştirilmiş S-N Diyagramı

Yorulma sınırı, çatlak çekirdeklenmesinin birinci tane sınırı veya baskın bir mikroyapısal bariyer tarafından durdurulması olgusuyla ilişkilidir. Yorulma eğrisinde y koordinatı gerilme genliği veya gerilme aralığı ile ifade edilirken x koordinatı hasara karşılık gelen tekrar sayısı veya çevrim sayısı ile ifade edilmektedir. Burada yorulma ömrü (tekrarlar veya çevrimler) görünür çatlak uzunluğuna kadar küçük bir çatlağın çekirdeklenmesi ve büyümesi için gereken ömrü ifade etmektedir. Denklem 14 tipik S-N eğrisini temsil etmektedir. Denklem 14’te verilen b , yorulma mukavemeti üssü ve S'_f , yorulma mukavemeti katsayısıdır. Logaritmik S-N grafiklerinden geliştirilen bu ifade, yorulma analizi ve tasarımına yönelik gerilme dayalı yaklaşımda en yaygın olarak kullanılan denklemdir. (Lee, 2005).

$$S_a = S'_f (2N_f)^b \quad (14)$$

Bir malzemenin ya da bir yapının S-N eğrisinin mevcut olmadığı durumlarda S-N davranışını tahmin etmeye yönelik yöntemler tasarım süreci için çok önemli ve faydalı olabilmektedir. Bu durumda S-N eğrisi tahmini yapılabilmektedir. Standart numuneler üzerinde tam değişken tekrarlı, döner eğmeli yorulma testlerine dayalı olarak geçmişte fazla miktarda S-N eğrisi verisi oluşturulmuştur (Bannantine, Comer, & Handrock, 1990; Juvinall, 1967; Dowling, & Kral, 1999).

Uzun yıllara dayanan deneyim ve testler sayesinde, yorulma mukavemeti verileri ile nihai gerilme mukavemeti S_u 'yu ilişkilendiren ampirik ilişkiler geliştirilmiştir. Bu ilişkiler bilimsel temelli değildir, ancak yüksek tekrarlı yorulma bölgesindeki bileşenlerin yorulma ömürlerini tahmin etmek için basit ve kullanışlı mühendislik araçlarıdır. Bu nedenle, temel test numuneleri için iki yorulma ömrüne (10^3 tekrar ve 10^6 tekrar) karşılık gelen tahmini yorulma mukavemet değerleri tartışılmaktadır. Bir bileşen veya yükleme koşulu, yukarıda belirtilen S-N verilerini oluşturmak için kullanılan test standardından saparsa, farklılıkları hesaba katmak için temel S-N eğrisini değiştirmek gerekmektedir. Bu tür ayarlamalar, değiştirici faktörlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Şekil 23, temel bir S-N eğrisi üzerinde değiştirici faktörlerin etkilerini göstermektedir (Lee, 2005).



Şekil 23. Çelikten yapılmış komponentler için modifiye edilmiş S-N eğrisi

Tekrarlı gerilmeler nedeniyle bir mikro çatlak bir malzeme tanesi içinde çekirdeklenebilmekte ve daha sonra büyüebilmektedir. Büyüme tane sınırına kadar devam edebilmekte ve tane sınırı bu büyümeyi engelleyebilmektedir. Bu durumda çatlak sadece o tane boyutu kadar büyüme gerçekleştirecektir. Tane sınırı çatlağı durdurabilecek bir yapıda değilse, bu durumda çatlak bir mikro çatlaktan makro çatlağa dönüşecektir. Çatlak

ilerlemesi için, çatlak büyüme bariyerini aşabilmek için gerekli minimum gerilme genliği yorulma sınırı olarak adlandırılmaktadır (Mcgreevy, & Socie, 1999; Murakami, & Nagata, 2002). Yorulma sınırı, periyodik aşırı yüklenme durumları, yüksek sıcaklık, korozyon vb. faktörlerden etkilenebilmektedir. Periyodik aşırı yüklemeler nedeniyle çatlak itici kuvvetteki artışın, orijinal tane bariyerini aşacağına ve çatlağın kırılmaya kadar ilerlemesine yardımcı olacağına inanılmaktadır. Şekil 23'te gösterildiği gibi, iki yöntem, Miner kuralı ve Miner-Haibach modeli, orijinal yorulma sınırının altındaki gerilme tekrar davranışı üzerindeki periyodik aşırı yüklenmelerin etkisini dahil etmek için önerilmiştir (Haibach, 1970). Miner kuralı, sıfır gerilme genliğine yaklaşmak için aynı eğim faktörü k ile S-N eğrisini genişletirken, Miner-Haibach kuralı, orijinal S-N eğrisini yorulma sınırının altına, daha düz bir eğim faktörü olan $2k-1$ ile sıfır gerilme genliğine kadar genişletmektedir (Lee, 2005).

Bir bileşen için, temel bir S-N eğrisi oluşturmak için verilen malzemenin nihai mukavemeti önceden bilinmeli veya bir şekilde belirlenmelidir. Bir kez belirlendikten sonra, 10^3 tekrardaki ve yorulma sınırı ömründeki yorulma dayanımları, nihai dayanım kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu dayanım değerleri daha sonra S-N eğrisi üzerindeki yüklenme, yüzey kalitesi, boyut ve güvenilirlik gibi diğer faktörlerin etkilerini içerecek şekilde değiştirilebilmektedir. 10^3 tekrarda (S_{1000}) yorulma dayanımı, güvenilirlik düzeyine ve yüklenme tipine bağlıdır. S_{1000} , farklı yüklenme koşulları altında standart test numunelerine dayalı olarak 10^3 tekrardaki yorulma mukavemetidir ve C_R , belirli bir güvenilirlik seviyesinde değiştirici faktördür. Ampirik olarak, S_{1000} değerinin eğilme için nihai çekme mukavemetinin yaklaşık %90'ı, S_u 'nun ve eksenel yüklenme için nihai çekme mukavemetinin %75'i olduğu gözlenmektedir. Burulma yüklemesi (S_{us}) için S_{1000} değeri, nihai kesme dayanımının %90'ı olarak tahmin edilmektedir. Nihai kesme mukavemeti malzemeye bağlı olmaktadır ve kabaca çelik, demir dışı metaller ve dökme demirler için nihai çekme mukavemetinin sırasıyla %80, %70 ve %130'u olarak tahmin edilmektedir. S_{1000} 'in tahminleri Tablo 22'de özetlenmiştir. (Lee, 2005).

$$S_{1000,R} = S_{1000} \times C_R \quad (15)$$

Tablo 22. S_{1000} 'in tahmini (Lee, 2005)

Malzeme tipi	Yükleme tipi	S_{1000}
Tüm	Eğme	$0.9 \times S_u$
Tüm	Eksenel	$0.75 \times S_u$
Çelik	Burulma	$0.9 \times S_{UTS} = 0.72 \times S_u$
Dökme demir	Burulma	$0.9 \times S_{UTS} = 0.17 \times S_u$

Yorulma verilerinin istatistiksel dağılımı dikkate alınır, bir bileşenin yorulma mukavemeti, belirli bir güvenilirlik seviyesi için medyan S-N verilerinden modifiye edilmektedir. Yorulma testi verileri mevcut değilse, yorulma ömrünün rastgele doğasını hesaba katan titiz bir istatistiksel analiz yapılamamaktadır. Titiz bir istatistiksel analizin yokluğunda, çeşitli güvenilirlik seviyeleri için C_R faktörlerini değiştirmek için önerilen değerler Tablo 23'te verilmektedir. 10^3 tekrarda yorulma dayanımları için bir değiştirici faktör olarak sunulmasına rağmen, Tablo 23'te listelenen güvenilirlik faktörleri yorulma sınırındaki yorulma dayanımını tahmin etmek için de kullanılabilir (Lee, 2005).

Tablo 23. Güvenilirlik faktörü, C_R (Lee, 2005)

Güvenilirlik	C_R
0.50	1.000
0.90	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659
0.999999	0.620

Yorulma sınırlarını tahmin etmek için sertlik ve çekme mukavemeti gibi malzemenin mekanik özelliklerinden yola çıkılarak yorulma sınırı formüle edilmeye çalışılmıştır. Bir malzemenin yorulma sınırı ile nihai mukavemeti arasında genel bir ilişki gözlemlenmiştir.

Ayrıca çelik malzemelerin mikro yapıları temel eğilmeli yorulma sınırı üzerine de formüle edilmiştir. Tablo 24 çeliklerin mikro yapısının temel eğilme yorulma sınırı üzerindeki etkisini göstermektedir (Juvinall, 1967).

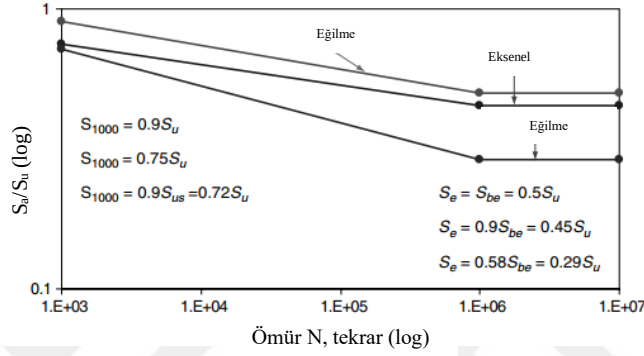
Yorulma üzerine gerçekleştirilmiş ilk çalışmalara bakıldığında bu çalışmaların tam değişken tekrarlı eğilmeli yorulma çalışmaları olduğunu görmekteyiz. Günümüz imkân ve teknolojileri sayesinde yorulma testleri, tek ve çift eksenli olmak üzere birçok farklı yükleme koşullarında altında yürütülmektedir. Bununla birlikte gerçek yapılara bakıldığında bu yüklemeler harici farklı yükleme tiplerine de maruz kaldığı durumlar olabilmektedir. Bu gibi durumlarda yükleme faktörü (C_L) dikkate alınabilmektedir. Yükleme faktörü, gerilme gradyanının etkileri ve gerilmelerin türü (normal veya kesme gerilmeleri) dikkate alınarak belirlenmektedir. Test sonuçları, eksenel yükleme altında çentiksiz yapılar için C_L 'nin 0,7 ile 0,9 arasında değiştiğini göstermektedir. Eksenel yükleme ve eğilme arasındaki fark, her bir yükleme koşulu için farklı gerilme gradyanlarının sonucudur. Ayrıca C_L değeri, yanlış hizalamadan kaynaklanan hafif eğilmeye sebebiyet verecek yükler için 0,7 olarak tavsiye edilmektedir. C_L 'nin etkileri Tablo 25'te özetlenmekte ve farklı yükleme koşulları altındaki çelikler için bu değiştirici faktörleri içeren genelleştirilmiş S-N eğrileri Şekil 24'te gösterilmektedir.

Tablo 24. Çeliklerin mikro yapısının temel eğilmeli yorulma sınırı üzerindeki etkisi (Juvinall, 1967)

Malzeme çeşidi	S_{be}	Tekrar	Açıklamalar
Çelik-ferrit	$0.58 \times S_u$	10^6	-
Çelik – ferrit + perlit	$0.38 \times S_u$	10^6	-
Çelik-perlit	$0.38 \times S_u$	10^6	-
Çelik - tempersiz martenzit	$0.26 \times S_u$	10^6	-
Çelik-yüksek temp. martenzitik	$0.55 \times S_u$	10^6	-
Çelik-yüksek temp. Martenzitik + temp. beynit	$0.55 \times S_u$	10^6	-
Çelik-temp. beynit	$0.50 \times S_u$	10^6	-
Çelik-östenitik	$0.37 \times S_u$	10^6	-

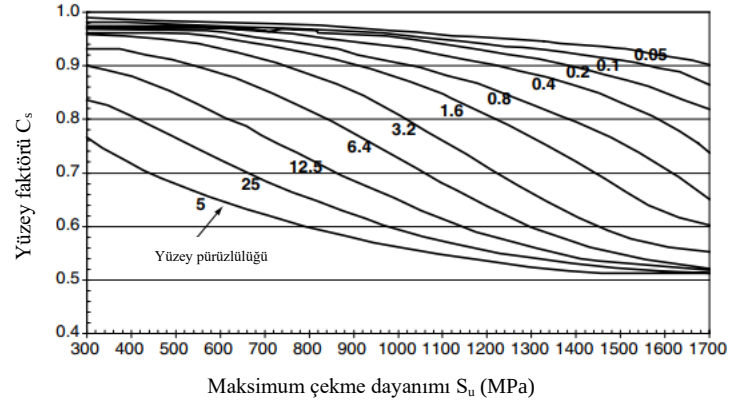
Tablo 25. Yük faktörleri, C_L (Lee, 2005)

Yük çeşidi	C_L	Açıklamalar
Eksenel yükleme	0.9	
Eksenel yükleme (hafif bükülme ile)	0.7	
Eğilme	1.0	
Burulma	0.58	Çelik için

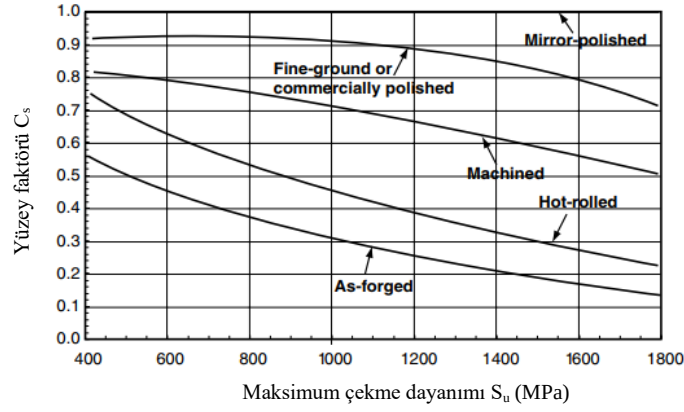


Şekil 24. Çelikler için farklı yüklemeler için genelleştirilmiş S-N eğrileri (Lee, 2005)

Yorulma sebebiyle oluşan çatlaklar genellikle malzeme yüzeyinde başladığından yüzeyin durumu önem arz etmektedir. Yüzeydeki çentik, malzeme pürüzlülüğü, vb. faktörler haricinde yüzeyde var olan ya da belirli işlemler sonrası yüzeyde sonradan oluşan kalıntı gerilmeler çatlak başlangıcına neden olabilmektedir. Yüzeye uygulanan işlemler genellikle kalıntı gerilmeyi giderme adına gerçekleştirilen işlemlerdir. Ayrıca imalat sonrası yüzeyde oluşan çekme gerilmelerinin yorulma dayanımlarını düşürmesi sebebiyle yüzeyde basma gerilmesi oluşturacak birçok proses de uygulanabilmektedir. Kaynak dikişlerinin yorulma ömürlerinin artırılması adına bilyeleme, çekiçleme vb. metotlar kullanılmaktadır. Yüzeyde basma gerilmelerinin oluşturulması ile yorulma ömürlerinde iyileştirme elde edilmektedir. Şekil 25 yüzey pürüzlülüğünün ölçümü bilindiğinde çelikler için yüzey tesviyesi değiştirme faktörünü (C_S) belirlemek için kullanılan ampirik bir çizelgedir. Şekil 26 ise çelikler için üretim sürecine dayalı olarak yüzey değiştirici faktörleri tahmin etmek için kullanılmaktadır (Lee, 2005).

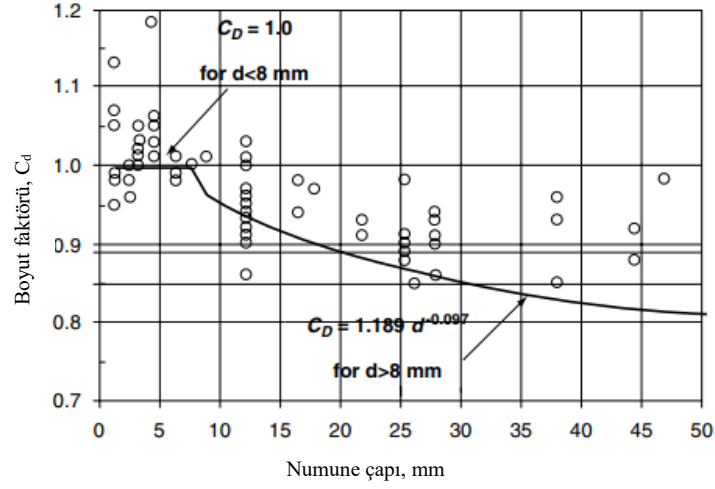


Şekil 25. C_s yüzey kalitesi faktörünün yüzey pürüzlülüğü açısından açıklaması (Lee, 2005)



Şekil 26. C_s yüzey kalitesi faktörünün işleme açısından açıklaması (Lee, 2005)

Yorulma dayanımında malzeme ya da yapının boyutunun (C_D) pek bir önemi olmadığı düşünülse de yorulma dayanımı üzerindeki boyut etkisi, Kuguel'in kritik hacim teorisi ile açıklanabilmektedir. Yorulma hasarı, uygulanan maksimum gerilmenin %95 ila %100'ü olarak alınan kritik gerilme aralığına maruz kalan malzemenin hacmiyle ilişkilendirilmektedir (Kuguel, 1961). Aynı maksimum eğilme gerilmesinde, yuvarlak bir numunenin çapı arttıkça, malzemenin daha büyük bir hacmi kritik gerilme aralığına maruz kalmaktadır. Bu, daha küçük çaplı yuvarlak bir numuneye göre daha yüksek hasar ve daha küçük yorulma mukavemeti ile sonuçlanmaktadır. Eğilme ve burulma yükü altında yuvarlak bir bileşen için boyut faktörünün açıklaması Şekil 27'de gösterilmekte ve aşağıdaki şekillerde ifade edilmektedir (Lee, 2005);



Şekil 27. C_D boyut faktörünün niteliksel açıklaması (Lee, 2005)

Yukardaki bilgiler ışığında, yorulma sınırı S_e , yükleme tipi (C_L), yüzey kalitesi (C_S), boyut (C_D) ve güvenilirlik seviyesi (C_R) için dört faktörle eğilmeli yorulma sınırı (S_{be}) değiştirilerek tahmin edilebilmektedir. Bu değiştirici faktörler ampirik temellidir ve genellikle 0.0 ile 1.0 arasında değişmektedir.

$$S_{e,R} = S_{be} \times C_L \times C_S \times C_D \times C_R \quad (16)$$

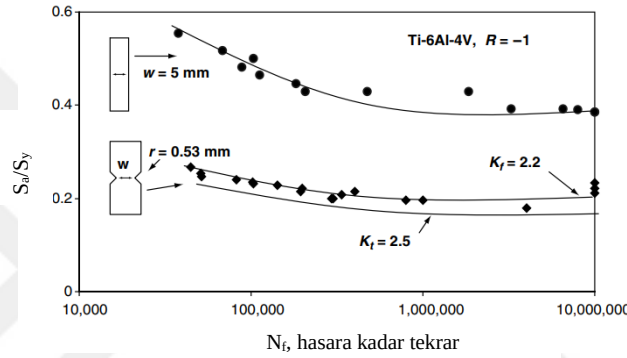
Bir yapının yorulma hasarı genel olarak gerilme konsantrasyon etkisi nedeniyle gerilme seviyesinin arttığı yüzeydeki çentikte meydana gelmektedir. Çentik terimi, bir delik gibi tasarımla veya imalat süreciyle, inklüzyonlar, kaynak kusurları, döküm kusurları veya işleme işaretleri gibi malzeme ve fabrikasyon kusurları şeklinde ortaya çıkabilen geometrik bir süreksizlik olarak tanımlanmaktadır. Yüzey çentiğine sahip bir yapı için, maksimum elastik çentik gerilmesi (σ^e), nominal gerilme (S) ve elastik gerilme konsantrasyon faktörünün (K_t) çarpımı ile belirlenmektedir (Lee, 2005).

$$\sigma^e = S \times K_t \quad (17)$$

Yorulma sınırında çentik etkisi teorik olarak bakıldığında; aynı yüksek tekrarlı yorulma ömrüne dayalı olarak pürüzsüz bir bileşenin nominal mukavemeti, çentikli bir bileşeninkinden K_t faktörü kadar daha yüksektir. Ancak testler, yorulma sınırında, tekrarlı nominal gerilmeler altında bir yapı üzerinde bir çentik bulunmasının, pürüzsüz bileşenin yorulma mukavemetini K_t faktörü kadar değil, bir K_f faktörü kadar azalttığını

göstermektedir. Şekil 28’de yüksek tekrarlı yorulma bölgesinde Ti-6Al-4V için yorulma mukavemeti azalmasının etkisini ortaya koyan bir çalışma sunulmaktadır (Tryon, & Dey, 2003). K_f faktörü, yorulma mukavemeti azaltma faktörü veya yorulma çentik faktörü olarak da adlandırılmakta ve genellikle düzgün ve çentikli test numuneleri veya yapıları için nominal yorulma sınırlarının oranı olarak tanımlanmaktadır (Lee, 2005).

$$K_f = \frac{\text{çentiksiz yorulma sınırı}}{\text{çentikli yorulma sınırı}} \quad (18)$$



Şekil 28. S-N davranışı üzerine çentik etkisi

Genel olarak, K_f , K_t 'den ya daha düşük ya da eşit olmaktadır. K_t ve K_f arasındaki fark hem çentik kök yarıçapında hem de nihai çekme mukavemetinde bir azalma ile artmaktadır. Bu fark ya lokal tekrarlı akma davranışı ya da gerilme alanı yoğunluğu teorisi ile açıklanabilmektedir (Weixing, 1993).

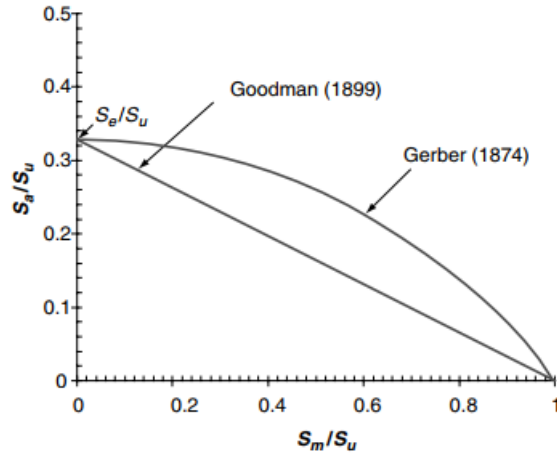
Şekil 29, Gerber ve Goodman ortalama gerilme düzeltmelerinin Haigh grafiğini göstermektedir. Haigh grafiğinin koordinatı, normalleştirilmiş yorulma sınırıdır ve maksimum ortalama gerilme, nihai dayanım (S_u) ile sınırlıdır. Bu iki noktayı iki eksenle birleştiren eğri, yorulma sınırı ömründe verilen gerilme genlikleri ve ortalama gerilmelerin kombinasyonlarını temsil etmektedir. Matematiksel olarak Haigh koordinatlarındaki Gerber parabolü ve Goodman doğrusu aşağıdaki ifadelerle gösterilmektedir (Lee, 2005);

- Gerber ortalama gerilme düzeltmesi

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2} \quad (19)$$

- Goodman ortalama gerilme düzeltmesi

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)} \quad (20)$$



Şekil 29. Gerber ve Goodman diyagramları için Haigh eğrisi

S_e , gerilme genliği S_a ve ortalama gerilme S_m ile yük durumuna eşdeğer olan tam değişken tekrarlı yükleme için yorulma sınırıdır. Soderberg, maksimum ortalama gerilmenin akma mukavemeti S_y ile sınırlandırılması gerektiğini ve bu ortalama gerilme düzeltmesinin aşağıdaki şekilde temsil edilmesi gerektiğini öne sürmüştür (Lee, 2005; Soderberg, 1930);

$$S_e = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_y}\right)} \quad (21)$$

Bu denklemler daha sonra, yüksek tekrarlı yorulma bölgesindeki belirli bir ömre karşılık gelen bir gerilme genliği (S_{ar}) ile yorulma limiti S_e 'nin değiştirilmesiyle ortalama gerilme etkisini hesaba katacak şekilde genişletilmiştir. Ampirik denklemler arasında, Goodman formülü basit ve yorulma sınırındaki çekme ortalama gerilme durumları için oldukça uygundur. Sünek malzemeler için, çentikli bir elemanın nihai mukavemeti,

pürüzsüz bir elemanınkiyle yaklaşık olarak aynıdır. Bu nedenle, sünek malzemelerin çentikli ve pürüzsüz elemanları için Goodman denklemi aşağıdaki gibi özetlenebilir (Lee, 2005);

$$S_{ar} = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S_u}\right)} \quad (22)$$

Hem çekme hem de basma ortalama gerilmeleri için düzeltilmiş bir Goodman diyagramı mevcuttur. Wilson ve Haigh, yorulma sınırı ve akma dayanımı için güvenli tasarım bölgesi olarak adlandırılan, güvenli tasarım gerilme bölgesi üzerinde sünek malzemeler için ek bir kısıtlama olarak sabit akma dayanımı çizgisini tanıtmıştır (Lee, 2005; Wilson, & Haigh, 1923; Williams, Ottson, Lawence, & Munse, 1970). Ortalama gerilme ile ilgili ortaya çıkmış birçok modelin sonralardan iyileştirmeleri ya da düzeltmeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar da incelendiğinde çekme ortalama gerilmelerinin yorulma mukavemetini azaltıcı, basma ortalama gerilmelerinin de yorulma mukavemetini artıracağını göstermektedir. Morrow, gerilme genliği ve ortalama gerilmenin, malzemenin monotonik akma ve nihai mukavemetinin o malzemenin yorulma davranışını tanımlamak için uygun olmadığını öne sürerek, yorulma mukavemeti katsayısı S'_f 'yi aşamayacağını öne sürmüştür. Morrow'un ifadesi aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir (Lee, 2005; Morrow, 1968);

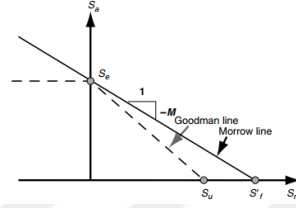
$$S_{ar} = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_m}{S'_f}\right)} \text{ veya } S_a = (S'_f - S_m) \times (2N_f)^b \quad (23)$$

Şekil 30'da verilen Haigh grafiğinde gösterildiği gibi, Goodman ve Morrow denklemleri arasındaki fark dikkate alınan değerler durumuyla farklılık göstermektedir. M değeri, ortalama gerilme duyarlılık faktörü olarak adlandırılmakta ve çizginin eğiminin negatif değeri olmaktadır. Eğer M faktörü verilirse, ortalama gerilme düzeltme çizgisi Haigh diyagramında aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir (Lee, 2005).

$$S_{ar} = S_a + M \times S_m \quad (24)$$

Bu denklemlere ilaveten kullanılmakta olan bir diğer denklem Smith, Watson ve Topper'in (SWT) denklemidir. Eşdeğer tam çevrimli gerilme genliği aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Smith, 1970). SWT formülü yapı ömrü verileri için ortalama gerilme etkilerinin değerlendirilmesinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Dowling, Kampe, & Kral, 1999).

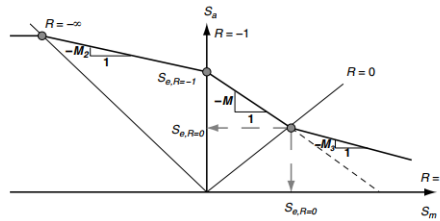
$$S_{ar} = \sqrt{S_{max} \times S_a} = S'_f \times (2N_f)^b \quad S_{max} > 0 \quad (25)$$



Şekil 30. Goodman ve Morrow'un ortalama gerilme modellerinin karşılaştırılması

Düşük ortalama gerilme yüklemeleri için Morrow ve SWT yaklaşımları daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Malzeme ya da yapının yorulma özellikleri ile ilgili bilgi mevcut olmadığında Goodman ortalama gerilme düzeltme formülü kullanılabilmektedir. SWT modeli çoğunlukla metallerin bilhassa alüminyum alaşımlarının deneysel yorulma verileriyle daha iyi çalıştığı görülmektedir. Yüksek ortalama gerilme koşulları için Radaj ve Sonsino, ortalama gerilme duyarlılık faktörü kavramına dayanan yeni bir ampirik model tanıtmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu M faktörlerinin farklı ortalama gerilme seviyelerinde değişiklik gösterebileceği gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 31'de gösterilmektedir. Bu kapsamda düşük ortalama gerilme yüklemesi için ortalama gerilme duyarlılık faktörü, M, aşağıdaki formülle tanımlanmıştır (Radaj, Sonsino, & Fricke, 2006);

$$M = \frac{S_{e,R=-1} - S_{e,R=0}}{S_{e,R=0}} \quad (26)$$

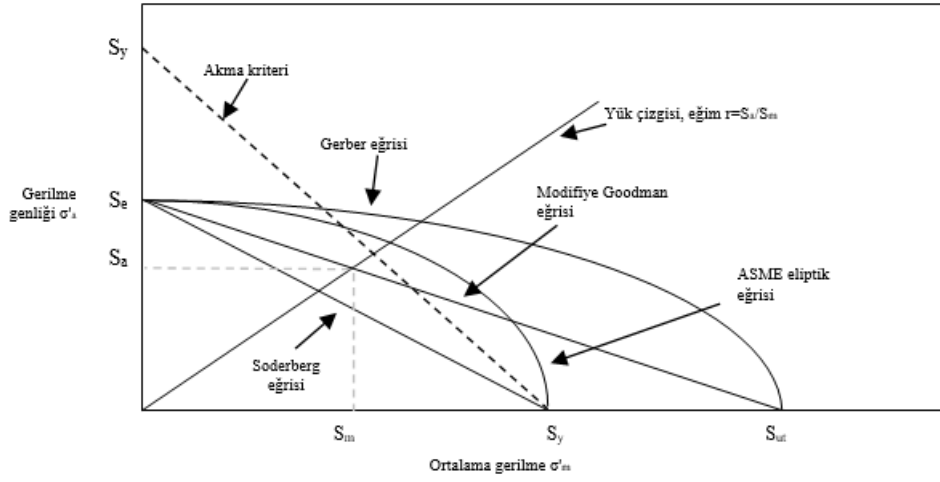


Şekil 31. Ortalama gerilme duyarlılık faktörleri

Düşük yüklemeler için ortalama gerilme duyarlılık faktörü, basma ortalama gerilme seviyeleri ($-\infty \leq R < -1$) M_2 'yi ifade etmekte ve 0 ile M arasında değişmektedir. Daha yüksek ortalama gerilme seviyeleri için ortalama gerilme duyarlılık faktörü ($0 \leq R \leq 1$ veya $S_m > S_a$) M_3 'ü ifade etmektedir ve genellikle M'den 3 kat daha düşüktür ($M_3 \approx M/3$). Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak sonrası akma gerilmesinin yaklaşık üçte ikisi olan yüksek çekme kalıntı gerilme seviyelerinin varlığından dolayı lokal çentik plastisitesi çok düşük nominal gerilmelerde gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle, ortalama gerilme düzeltmeleri olmaksızın nominal gerilme genliğine dayalı olarak kaynaklı parçaların yorulma ömrünü tahmin etmek kaynak endüstrisinde yaygın bir uygulamadır ve Radaj ve Sonsino'ya göre bu durum, Haigh grafiğindeki $M_3 = 0$ değerine karşılık gelmektedir (Radaj, Sonsino, & Fricke, 2006). Ortalama gerilme etkisini dikkate alan yaklaşımlarda düzeltmeler sonucu elde edilen denklemler Tablo 26'da ve Şekil 32'de özetlenmiştir;

Tablo 26. Ortalama gerilme etkisini dikkate alan eğri denklemleri

$\frac{S_a}{S_{ar}} + \frac{S_m}{S_y} = 1$	Soderberg eğri denklemi, S_y akma gerilmesini gösterir,
$\frac{S_a}{S_{ar}} + \frac{S_m}{S_u} = 1$	Modifiye Goodman eğri denklemi,
$\frac{S_a}{S_{ar}} + \frac{S_m}{\sigma_f} = 1$	Morrow eğri denklemi, σ_f gerçek kırılma mukavemeti,
$\frac{S_a}{S_{ar}} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1$	Gerber eğri denklemi,
$\frac{S_a}{S_{ar}} = \left(\frac{1-R}{2}\right)^{1/2}$	Smith-Watson-Topper eğri denklemi, R gerilme oranını gösterir,
$\frac{S_a}{S_{ar}} = \left(\frac{1-R}{2}\right)^{1-\gamma} = 1$	Walker eğri denklemi,



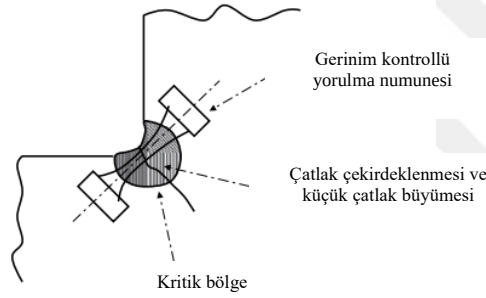
Şekil 32. Ortalama gerilme etkilerini dikkate alan yorulma hasar kriterleri

1.7.2. Gerinim-Ömür Teorisi

Mühendislik bileşenlerinin neredeyse tamamı, gerilmeler ve şekil değiştirmelerin elastik sınırın altında olacak şekilde tasarlanmasına rağmen bileşende bulunan çentikler, kaynaklar vb. gerilme konsantrasyonları sebebiyle bileşenin lokal bölgelerinde tekrarlı plastik deformasyona neden olabilmektedir. Bu durum bileşenin servis ömrünü olumsuz yönde etkileyeceğinden çoğunlukla istenmeyen bir durumdur. Yorulma kavramının gelişmesi ile gerilme esaslı ömür tahmin yöntemleri gelişmiş olup, malzemelerin ya da bileşenlerin servis ömrü ile ilgili değerlendirmeler gerilme-ömür yaklaşımı üzerinden yapılmaktaydı. 1950'li yılların sonlarına doğru plastik şekil değişimlerini dikkate alan gerinim-ömür yönteminin bir bileşenin yorulma ömrünü tahmin etmede daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Gerinim ömür analizi, tekrarlı elastik-plastik şekil değiştirmelere karşı malzeme tepkisinin ve bu şekil değiştirmeler ile yorulma dayanıklılığı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Gerinim ömür yönteminde malzemenin hem plastik hem de elastik deformasyonu ölçülmektedir (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).

Lokal gerinim-ömür yöntemi, çentikli bir bileşenin çatlak çekirdeklenmesi ve küçük çatlak büyümesi için harcanan ömrün, çatlak başlangıç bölgesinde aynı tekrarlı deformasyon altında pürüzsüz bir laboratuvar numunesi tarafından tahmin edilebileceği varsayımına dayanmaktadır. Bu durum Şekil 33'te gösterilmektedir. Bu yaklaşım dikkate alınarak, numunedeki lokal gerinim ile yorulma ömrü arasındaki ilişki bilinebilirse, tekrarlı

yüke maruz bir bileşenin belirli bir bölgesindeki yorulma ömrünü tahmin etmek mümkün olabilmektedir. Gerinim-ömür ilişkisi tipik olarak yorulma ömrüne karşı gerinim eğrisi olarak temsil edilmektedir ve malzemenin pürüzsüz, cilalı numuneleri üzerinde gerinim kontrollü eksenel yorulma testleri gerçekleştirilerek oluşturulmaktadır. Bir bileşen her ne kadar tekrarlı yüklemeye elastik davranış göstermesine rağmen bileşende mevcut olabilecek çentik ve gerilme konsantrasyonları sebebiyle lokal bölgelerde tekrarlı plastik deformasyona maruz kalabileceğinden gerinim kontrollü eksenel yorulma testleri çoğunlukla önerilmektedir. Ayrıca bileşene gelen yüklerin düzensiz ve rastgele olması, ortalama gerilme ve yük sırası etkilerinin de önemli olduğu düşünüldüğünde lokal gerinim-ömür yaklaşımının tercih edilmesi önerilmektedir. Bu yöntem, yüksek tekrarlı ve düşük tekrarlı yorulma rejimlerini ayırt edebilmek ve yorulma ömrü üzerindeki ortalama gerilme etkisini ve lokal çentik plastisitesini dahil etmek için rasyonel bir yaklaşım sağlamaktadır (Lee, 2005).

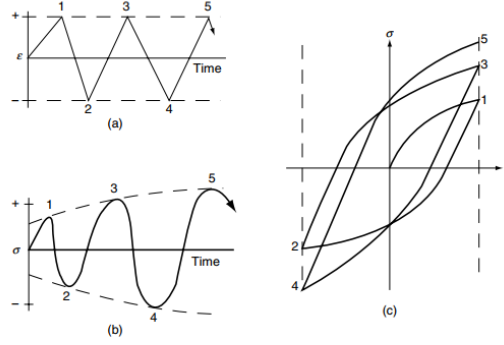


Şekil 33. Lokal gerinim ömrü yaklaşımı kavramı

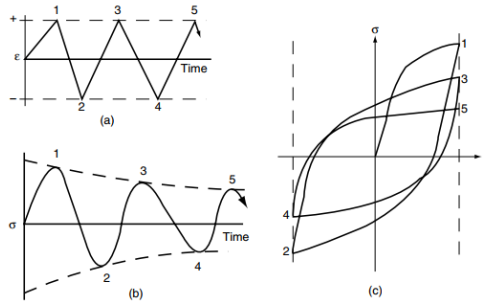
Gerilme ve şekil değiştirmelerin lineer ilişkide olduğu ve plastik şekil değiştirmelerin ihmal edilebilir olduğu servis ömürlerinde, gerilme-ömür ve gerinim-ömür yöntemleri eşdeğerdir. Gerinim-ömür yönteminin en önemli avantajlarından biri malzemenin hot-spot bölgelerindeki tepkisinin genellikle gerinim veya deformasyon faktörüne bağlı olmasıdır. Gerinim-ömür yöntemi, gerilme-ömür yönteminden farklı olarak düşük tekrarlı yorulma testlerini analiz etmek için daha uygundur. Gerinim-ömür yöntemi yaklaşık 1 mm çatlak uzunluğunda bileşenin hasara uğradığını varsaymakta ve çatlak büyümesini hesaba katmamaktadır (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).

Bir malzeme tekrarlı bir yüklemeye maruz bırakıldığında malzemenin tepkisi, yükleme nedeniyle deformasyona karşı direncindeki değişim sürecidir. Malzeme gerinim kontrollü tam değişken tekrarlı yüklemelere maruz bırakılırsa malzemede tekrarlı

sertleşme, tekrarlı yumuşama, kararlı kalma veya bu durumlardan bazılarının kombinasyonları görülebilmektedir. Şekil 34 ve Şekil 35 gerinim kontrollü yükleme altında geçici tekrarlı sertleşme ve geçici tekrarlı yumuşamayı göstermektedir. Geçici tekrarlı sertleşmede, her bir ardışık gerinim çevriminde oluşan gerilme değeri, tekrar sayısı arttıkça artmaktadır. Geçici tekrarlı yumuşamada, tekrar sayısı arttıkça gerilme değeri azalmaktadır. Her iki durumda da uygulanan gerilmenin değişim hızı kademeli olarak azalacaktır ve gerilme büyüklüğü kararlı bir düzeye ulaşacaktır. İlk yorulma çatlağının saptanmasına kadar yorulma ömrünün geri kalanı boyunca değişim hızı sabit kalacaktır. Geçici tekrarlı yumuşama ve sertleşme sırasındaki tekrar sayısının yüzdesi, toplam yorulma ömrüne kıyasla çok küçük olduğundan lokal gerinim-ömür yaklaşımı tekrarlı kararlı davranış olarak değerlendirilmektedir (Lee, 2005).



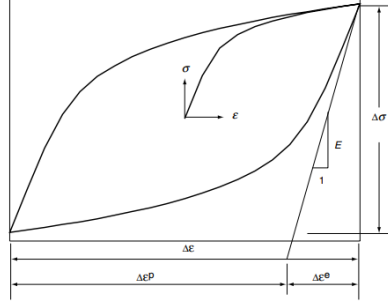
Şekil 34. Geçiş davranışı - tekrarlı sertleşme



Şekil 35. Geçiş davranışı - tekrarlı yumuşama

Tekrarlı kararlı gerilme-gerinim tepkisi histerezis döngüsüdür ve Şekil 36'da gösterilmiştir. Toplam gerinim aralığı ($\Delta\epsilon$) ve toplam gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) tarafından tanımlanan histerezis döngü, yükleme ve boşalma geçiren bir malzeme üzerindeki toplam

elastik ve plastik işi temsil etmektedir. Genellikle, stabilize histerezis döngüsü, yorulma ömrünün yarısında alınmaktadır (Lee, 2005).



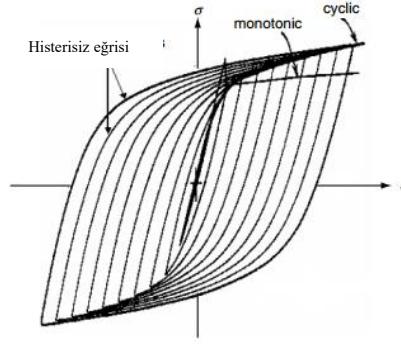
Şekil 36. Histerisiz eğrisi

Çeşitli gerinim genliği seviyelerine sahip bir stabilize histerezis eğrisi, Şekil 37’de gösterildiği gibi aynı eksenler üzerinde çizildiğinde, tekrar uçlarının yeri tarafından bir tekrarlı gerilme gerinim eğrisi tanımlanmakta ve monotonik gerilme gerinim tepkisine benzer aşağıdaki denkleme sahip olmaktadır (Lee, 2005);

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (27)$$

Gerilme gerinim eğrisi üzerindeki % 0.2 plastik gerinimdeki gerilme, tekrarlı akma gerilmesi (σ'_y) olarak adlandırılmaktadır. Sıfır gerilme noktasındaki % 0.2 gerinim kayması yoluyla elastisite modülüne paralel bir çizgi oluşturularak belirlenmektedir. Çizginin tekrarlı gerilme gerinim eğrisini kestiği gerilme, tekrarlı akma gerilmesi olarak alınmaktadır. Gerilme genliğine karşı gerinim genliği eğrisinin tekrarlı gerilme gerinim eğrisi ile tanımlanabileceğini belirtilmektedir (Lee, 2005);

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (28)$$



Şekil 37. Tekrarlı gerilme-gerinim eğrisi

Ayrıca malzemenin çekme ve basmada simetrik davranışa sahip olması gerekmektedir. Bu, birçok homojen metal için geçerlidir. Denklem 29, gerinim aralığı ve gerilme aralığı açısından yeniden yazılabilmektedir (Lee, 2005);

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon^e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon^p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (29)$$

Denklem aşağıdaki stabilize histerezis döngü denklemine indirgenebilmektedir;

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (30)$$

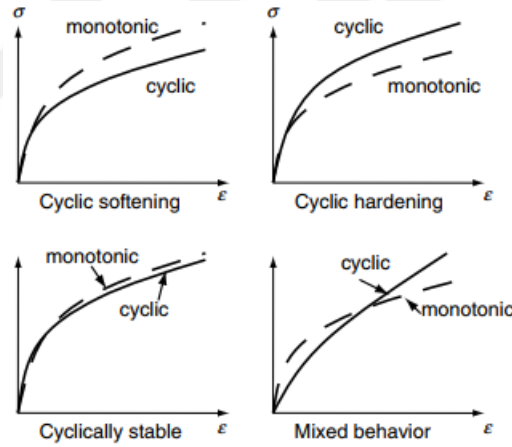
Denklem 30, değişken genlikli yükleme koşulları altında gerilme-gerinim davranışını tanımlamak ve izlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Döngüsel mukavemet katsayısı K' ve döngüsel gerinim sertleştirme üssü n' , bir log-log ölçeğinde çizilen gerçek plastik gerinim genliği $(\Delta \varepsilon^p / 2)$ verisine karşı gerçek gerilme genliği $\Delta \sigma / 2$ 'ye en uygun çizginin kesişimi ve eğimidir (Lee, 2005);

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = K' \left(\frac{\Delta \varepsilon^p}{2} \right)^{n'} \quad (31)$$

Gerçek plastik gerinim genliği aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır;

$$\frac{\Delta \varepsilon^p}{2} = \frac{\Delta \varepsilon}{2} - \frac{\Delta \sigma}{2E} \quad (32)$$

Gerçek plastik gerinim genliğinin logaritmaları istatistiksel olarak bağımsız değişkendir ve gerilme genliğinin logaritmaları istatistiksel olarak bağımlı değişkendir. Regresyon analizinde 0,0005 mm/mm'den küçük plastik gerinim genliklerinin ihmal edilmesi önerilmektedir (Williams, Lee, & Rilly, 2003). Döngüsel gerilme-gerinim eğrisi, bir malzemenin tekrarlı deformasyona karşı direncini yansıtmaktadır ve monotonik gerilme-gerinim eğrisinden farklı olabilmektedir. Üst üste bindirilmiş monotonik ve döngüsel eğriler Şekil 38'de gösterilmektedir. Tipik olarak, yüksek monotonik gerilme sertleştirme üssüne sahip metaller ($n > 0.2$) sertleşirken, düşük monotonik gerilme sertleştirme üssüne ($n < 0.1$) sahip olanlar tekrarlı olarak yumuşamaktadır. Temel bir kural $S_u/S_y > 1.4$ ise malzeme sertleşecek ve $S_u/S_y < 1.2$ ise malzeme yumuşayacaktır. 1.2 ve 1.4 arasındaki S_u/S_y oranları için malzeme sertleşme, yumuşama veya her ikisini birden sergileyebilmektedir. Bu rakamlar, yorulma ömrü tahminleri için monotonik malzeme özelliklerinin kullanılmasının bazen yanlış sonuçlara yol açabileceğini göstermektedir (Lee, 2005; Bannantine, Comer, & Handrock, 1990; Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).



Şekil 38. Tekrarlı ve monotonik gerilme-gerinim davranışı

Morrow'un önerisine dayanarak, toplam gerinim genliği (ϵ_a) ve yorulma ömrü ($2N_f$) arasındaki ilişki aşağıdaki biçimde ifade edilebilmektedir (Morrow, 1965).

$$\epsilon_a = \epsilon_a^e + \epsilon_a^p = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (33)$$

Gerinim-ömür denklemi olarak adlandırılan denklem 33, yorulma için gerinim tabanlı yaklaşımın temelidir. Bu denklem, elastik gerinim genliği-ömür ($\epsilon_a^e - 2N_f$) ve

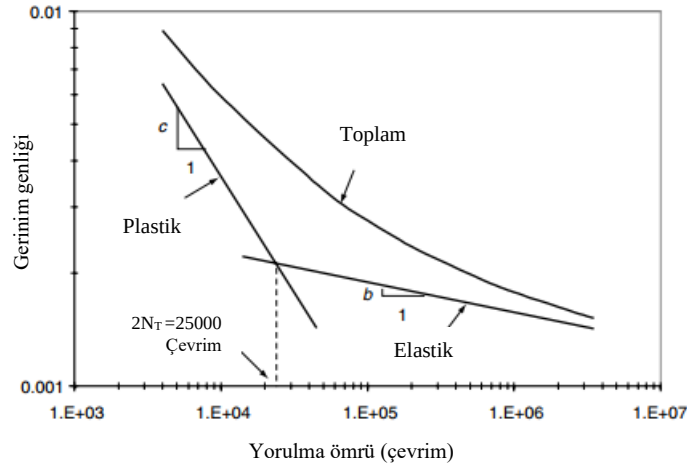
plastik gerinim genliği ömrü ($\epsilon_a^p - 2N_f$) için iki ayrı eğrinin toplamıdır. Basquin denkleminin elastisite modülüne bölünmesi, elastik gerinim genliği-ömür eğrisi denklemini vermektedir (OH, 1910).

$$\epsilon_a^e = \frac{\Delta \epsilon^e}{2} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b \quad (34)$$

Hem Manson hem de Coffin aynı anda plastik gerinim genliği-ömür eğrisi denklemini önermişlerdir (Coffin, 1954; Manson, 1953).

$$\epsilon_a^p = \frac{\Delta \epsilon^p}{2} = \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (35)$$

Log-log ölçeklerinde çizildiğinde, her iki eğri de Şekil 39'da gösterildiği gibi düz çizgiler haline gelmektedir. E elastisite modülünün yanı sıra, temel gerinim ömrü ifadesi yorulma mukavemeti katsayısı (σ_f'), yorulma mukavemeti üssü (b), yorulma süneklik katsayısı (ϵ_f') ve yorulma süneklik üssü (c) olmak üzere dört regresyon parametresi ile tanımlanmaktadır.



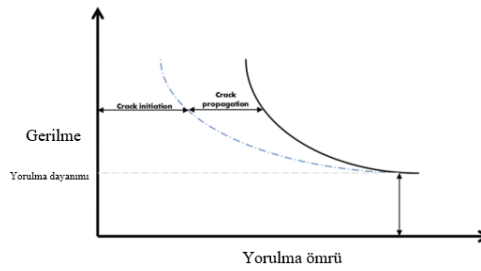
Şekil 39. Toplam gerinim-ömür eğrisi şematik gösterimi (Lee, 2005)

Geçiş yorulma ömrü noktası, plastik gerinim genliğinin büyüklüğü elastik gerinim genliğine eşit olduğunda yorulma ömrü olarak tanımlanmaktadır. Şekil 39'da gösterildiği gibi, geçiş yorulma ömrü ($2N_T$), elastik ve plastik gerinim ömrü eğrilerinin kesişimidir. Bu durumda, 25.000 çevrimlik yorulma ömrü, geçiş ömrünün meydana gelebileceği yerlere sadece bir örnektir. Yorulma ömrünün geçiş yorulma ömründen daha az olduğu bu

noktanın solundaki bölge, plastik gerinim baskın bölge olarak kabul edilmekte ve LCF bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Yorulma ömrünün geçiş yorulma ömründen daha yüksek olduğu sağdaki bölge, elastik gerinim baskın bölgedir ve HCF bölgesi olarak adlandırılmaktadır (Lee, 2005)

1.7.3. Lineer Elastik Kırılma Mekanîği

Yorulma tasarımı, çeşitli bileşenlerde çatlak oluşumunu önlemek amacıyla uygulanan tasarım süreçlerini içermektedir. Bu süreç, özellikle bileşenlerin toplam tasarım ömrünü kapsayan önlemleri içerir. Çatlakların başlama aşamasından itibaren çatlak ilerleme hızı genellikle çok yüksek olduğundan, çatlak başlama anından önce geçen süre neredeyse toplam ömrü temsil etmektedir. Bu bağlamda, kısa çatlaklar ve kusurlardan kaynaklanan genellikle gevrek kırılma olaylarının incelenmesi, kırılma mekanîği alanına odaklanmaktadır. Yorulma analizinde kırılma mekanîği yaklaşımı, yorulma çatlak büyüme hızının ve bileşenin sonraki hasar çevrimlerinin hesaplanmasını içermektedir. Genellikle bir bileşenin yorulma ömrü safhaları başlama ve yayılma aşamalarından oluştuğu varsayılmaktadır. Şekil 40 çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi ile ilgili gerilmeye karşı yorulma ömrü eğrilerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Çatlak ilerleme analizlerinin gerçekleştirilmesi için çatlak başlangıcının ne olduğu tanımlanmalıdır.



Şekil 40. Yorulma ömrünün çatlak başlama ve ilerleme safhaları

Çatlak başlangıcının boyutu için genel olarak kabul edilmiş bir tanım yoktur. Metaller için, çatlak başlangıcının boyutuna ilişkin çeşitli tanımlar rapor edilmiştir. Bir çalışmada, yapısal kaynaklar için 0.5mm, En7A çeliği için 1mm değeri çatlak uzunluğu olarak kabul edilmiştir (Martin, & Wirsching, 1991). Bir başka çalışmada BS250A53 çeliği için 0.12mm, karbon çeliği için 0.051mm değeri çatlak uzunluğu olarak kabul edilmiştir

(Murtaza, & Akid, 1995). Şekil 41 tekrar sayısı N 'e karşılık gelen çatlak uzunluğunun çizimlerini göstermektedir. Bileşen ömrünün çoğu, çatlak uzunluğunun nispeten küçük olduğu periyotları kapsamaktadır. Bu grafik aynı zamanda eğrinin eğimi olarak çatlak büyüme oranını (da/dN) da göstermektedir. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM), çatlaklar veya kusurları içeren yapıların esneklik teorisine dayanmaktadır. LEFM yöntemi için, ilk çatlak boyutunun yaklaşık 1 mm olduğu varsayılmaktadır. LEFM, çatlak ucunun yakınındaki gerilme büyüklüğünü uzak bölgelerdeki gerilmeler, çatlak boyu ve şekli, malzeme özellikleri ile ilişkilendirmek için kullanılmaktadır (Bannantine, Comer, & Handrock, 1990).

İlerleyen bir çatlak durumunda, gerilme yoğunluk faktörü K , çatlak ucu lokal gerilme büyüklüğünün ölçeğini temsil etmektedir. Gerilme yoğunluk faktörü çatlak boyutu, çatlak şekli ve geometrik sınırlar gibi faktörlerden etkilenmektedir. Gerilme yoğunluk faktörü için denklem aşağıda verilmiştir (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017);

$$K = f(g) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (36)$$

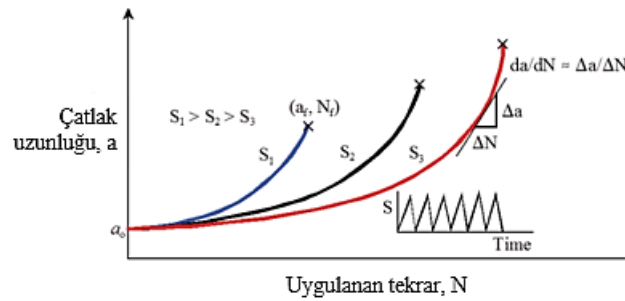
σ = bileşene uygulanan (uzak) gerilme

a = çatlak uzunluğu

$f(g)$ = test numunesinin malzeme özelliklerinden ve çatlak geometrisinden etkilenen düzeltme faktörü.

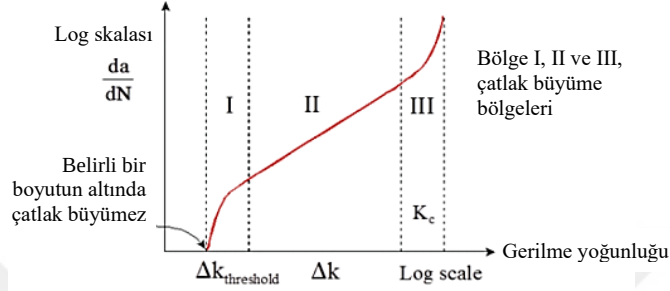
Gerilme yoğunluk faktörü aralığı aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır;

$$\Delta K = K_{mak} - K_{min} \quad (37)$$



Şekil 41. Yorulma çatlak uzunluğu (Bannantine, Comer, & Handrock, 1990)

Bu miktar, çatlak ucundaki gerilme ortamının ilk göstergesini sağladığından, LEFM yorulma analizi yönteminde son derece önem arz etmektedir. Şekil 42, $\log \Delta K$ 'ya karşı tipik bir da/dN eğrisini göstermektedir. Bu eğri üç bölgeden oluşmaktadır ve bu bölgeler Bölge I, II ve III olarak eğimlerine göre ayrılmaktadır (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017);



Şekil 42. Çatlak büyüme hızına karşı gerilme yoğunluk faktörü aralığına ilişkin tipik eğri

Bölge I; Bu bölgede ΔK değeri düşüktür, bu da çatlak ilerlemesinin çok yavaş olduğu anlamına gelmektedir. Çatlağın daha büyümediği gerilme yoğunluk değerini temsil eden ΔK_{th} değeri Şekil 42'de gösterilmiştir. Bileşenlerin tasarımında kullanım koşulları göz önünde bulundurulduğunda ΔK_{th} 'nin altında bir gerilme yoğunluk faktörüne sahip olunması arzu edilmektedir (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).

Bölge II, çatlak büyüme hızına karşı gerilme yoğunluğu aralığı çizimi için gerilme yoğunluklarının orta bölgesidir. Grafikte gösterildiği gibi, eğrinin eğimi yaklaşık olarak lineerdir. Bu bölge eğrisine uyan en yaygın ve kabul gören denklem, 1960'larda önerilen Paris denklemidir. Formüldeki C ve m birçok malzeme veri referansında bulunan malzeme sabitleridir (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (38)$$

Denklemin N_f 'ye kadar olan tekrarlar için ifade aşağıdaki gibi türetilenmektedir;

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (39)$$

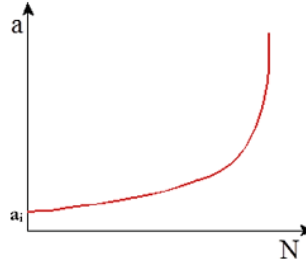
Yukarıdaki denklemi çözmek için önce nihai çatlak boyutu a_f belirlenmelidir.

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (40)$$

Son çatlak boyutunu a_f şu şekilde türetebilir;

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{f(g)\sigma_{max}} \right)^2 \quad (41)$$

K_c "kırılma tokluğu"dur, bir çatlağın yükte veya uygulanan enerjide bir artış olmaksızın hızlı bir şekilde uzandığı kritik K değeridir. Bu değer malzemeye, gerinim hızına, ortama, kalınlığa ve daha az ölçüde çatlak uzunluğuna bağlıdır. Minimum kırılma tokluğu değeri "düzlem gerinim kırılma tokluğu" K_{Ic} olarak bilinmektedir. Yorulma ömrü büyük ölçüde son boyutun aksine çatlağın başlangıç boyutuna bağlı olmaktadır. Bu durum Şekil 43'te gösterilmektedir. Sonuç olarak, yorulma ömrü, çok sert bir malzemenin çok büyük gerilmelere maruz kaldığı durumların ötesinde kırılma tokluğuna karşı daha az duyarlı olmaktadır (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017);



Şekil 43. Yorulma ömrü üzerine başlangıç çatlak boyutu etkisi

Bölge III; bu bölgede hızlı, kararsız çatlak büyümesi meydana gelmektedir. Burada, maksimum gerilme yoğunluk faktörü malzemenin kırılma tokluğuna yaklaştıkça çatlak büyüme hızı artmaktadır. Bu bölgede çok az yorulma ömrü söz konusudur ve bu nedenle birçok pratik uygulamada, toplam çatlak yayılma ömrünün tahmininde çok az etkisi olduğu için göz ardı edilmektedir. II. bölgeden III. bölgeye geçiş, malzemenin akma mukavemetine, gerilme yoğunluk faktörüne ve gerilme oranına bağlı olmaktadır (Modarres, Amiri, & Jackson, 2017).

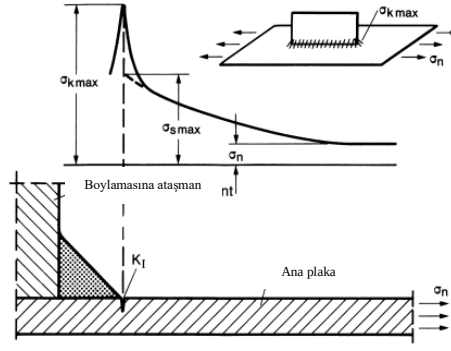
1.7.4. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma

Çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılmayı içeren yapısal bileşenlerin yorulma hasarı son derece lokalize bir prosestir. Bu nedenle, geometri, yükleme durumu ve malzemenin lokal parametreleri, yapı elemanlarının yorulma dayanımı ve servis ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahip olmaktadır. Bu lokal parametrelerin, yorulma mukavemeti değerlendirmesi yapılırken ve özellikle yorulma direnci açısından kaynak tasarımı optimize edilirken gerçeğe mümkün olduğunca yakın olarak dikkate alınmaları gerekmektedir. Değerlendirme süreci, hareketli dislokasyonların kayma bantlarında mikro çatlak başlatma ve çatlak ucunda lokal kayma mekanizmaları ile daha fazla çatlak büyümesini içeren mikro yapısal süreçlerle başlamaktadır. Son kırılmanın dâhil edilmesiyle çatlağın başlamasına ve ilerlemesine neden olan makroskobik elastik veya elastik-plastik gerilme ve gerinim analizleri yaklaşık olarak tanımlanabilmektedir. Uzunluğu yaygın teknik donanımlarla tespit edilebilecek değerlere ulaştığında (örneğin 1mm ve derinliği 0.5mm) bir çatlağın başladığı kabul edilmektedir (Radaj, Sonsino, & Fricke, 2006; IIW., 2008). Çatlağın belirli malzeme koşulları altında tekrarlı yükleme ile başlatılması, öncelikle çentik kökündeki tekrarlı gerilme ve gerinim bileşenlerinin genliği, tekrarlı gerilme durumu ve çok eksenli olması ile yönetilmektedir. Çatlak başlangıcını tanımlayan tekrarlı gerilme ve gerinim bileşenlerinin kritik değerlerini etkileyen parametreler, yükleme tiplerini karakterize eden lokal gerilmeler ve gerinimler dikkate alınarak Tablo 27’de özetlenmiştir (Fricke, 2012; Radaj, Sonsino, & Fricke, 2006).

Tablo 27. Yorulma çatlağı başlangıcını belirleyen parametreler (Fricke, 2012; Radaj, Sonsino, & Fricke, 2006)

Yapısal eleman	Yüzey	Materyal
Şekil	Pürüzlük	Tip
Büyüklik	Sertlik	Alaşım
Boyut	Kalıntı gerilme	Mikro yapı
Yükleme tipi	Yükleme dizisi	Çevresel şartlar
Gerilme genliği	Genlik spektrumu	
Kalıntı gerilme içeren ortalama gerilme	Genlik sıklığı	Sıcaklık
Faz açısı dahil çok eksenlilik	Durma süresi	Korozyon

Mukavemet değerlendirmesi, tanımlanmış bir hasara, belirli bir deformasyona, yeni başlayan bir teknik çatlağa veya toplam kırılmaya neden olan yüklerin, gerilmelerin veya gerinimlerin kritik değerleri ile karşılaştırılmasını içermektedir. Yükler, kuvvet ve momentleri içermekte, gerilme ve gerinimler nominal, yapısal veya çentik tipinde olmakta ve gerilme şiddeti faktörleri ve J integralleri de bunlardan türetilmektedir. Kritik değerler mukavemet değerleri olarak belirtilmektedir. Gerilme ve gerinimler, elastisite ve plastisite teorisine göre kuvvetlerden ve momentlerden kaynaklanmaktadır. Mukavemet değerleri, basit numuneler, bileşen benzeri numuneler veya bileşenin kendisi kullanılarak yapılan yükleme testlerinden belirlenmektedir (Radaş, Sonsino, & Fricke, 2006). Yorulma mukavemeti göz önüne alındığında, sabit genlik testi, değişken genlik testi ve benzer çatlak yayılma testleri en önemli testlerdendir. Sabit veya lineerleştirilmiş bir gerilme dağılımı varsayımı altında mukavemet değerlendirmeleri, doğrudan dış kuvvet ve momentlerden veya bunlardan türetilen kritik enine kesitteki nominal gerilmelerden ilerliyorsa, bu değerlendirmeler "global yaklaşımlar" olarak adlandırılmaktadır. Global yaklaşımlar, numunenin tamamen plastik akması veya toplam kırılması gibi global olaylarla ilgili kritik yük veya nominal gerilme değerlerini kullanmaktadır. Mukavemet değerlendirmeleri, lokal gerilme veya gerinim parametreleri üzerinden değerlendirilirse bu değerlendirmeler lokal yaklaşımlar olarak adlandırılmaktadır. Malzeme yorulmasından kaynaklanan lokal hasar süreçleri için tekrarlı çatlak başlangıcı, tekrarlı çatlak ilerlemesi ve nihai kırılma göz önünde bulundurulmaktadır. Çatlak başlangıcı, çentik kökündeki gerilme veya gerinimlere dayanan çentik gerilme veya çentik gerinimi yaklaşımı kapsamındadır. Öte yandan, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılma, mevcut bir çatlaktan ilerleyen çatlak ilerlemesi yaklaşımı ile tanımlanmaktadır. Bu nedenle, lokal yaklaşıma göre mukavemet değerlendirmesi, çentik gerilmesi veya çentik gerinimi yaklaşımı ve çatlak ilerlemesi yaklaşımından oluşmaktadır. Global ve lokal yaklaşımlar arasında bir bağlantı görevi gören yaklaşım ise yapısal gerilme yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, makro geometriden kaynaklanan gerilme konsantrasyonlarını Şekil 44'te gösterildiği gibi hesaba katmaktadır. Lokal yaklaşımın farklı varyasyonları, seçilen lokal gerilme veya gerinim parametrelerine ve tanıtılan kusur kriterlerinin tipine göre ayırt edilebilmektedir (Radaş, Sonsino, & Fricke, 2006; IIW., 2008).



Şekil 44. Nominal gerilme ile maksimum çentik gerilmesi arasındaki bağlantıyı oluşturan maksimum yapısal gerilme

Lokal yaklaşımın tipleri, seçilen lokal gerilme veya gerinim parametrelerine ve tanımlanan hasar tipi kriterlerine göre farklılık göstermektedir. Global ve lokal yaklaşımın en önemli temel değişkenleri, Şekil 44'te gösterilmektedir. Her bir tip, yük, gerilme veya gerinim parametresi ve karşılık gelen mukavemet diyagramı ile karakterize edilmektedir. Lokal parametreler, lokal koşulları giderek artan şekilde dikkate alarak grafiğin sol tarafından sağ tarafına doğru ilerleyen global parametrelerden meydana gelmektedir.

UKE kılavuzu ışığında, kaynaklı bağlantıda yorulma dayanımı hesabının yapılması istendiğinde, kaynaklı bağlantı tipinin UKE kılavuzunda verilen tablolardaki bağlantı tipine uygun olduğu durumlarda öncelikle nominal gerilme yaklaşımının kullanılması tavsiye edilmektedir. Kaynaklı bağlantıda hasarın kaynak uçlarında oluşması beklendiğinde hot-spot gerilme yaklaşımı, hasarın hem kaynak ucu hem de kaynak kökünde oluşması beklendiği durumlarda etkin çentik gerilme yaklaşımı, kaynakta başlamış bir çatlak varsa kırılma mekaniği yaklaşımı UKE tarafından önerilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucu kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının elde edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca kaynaklı numunelerin modellemelerinin yapılarak yapısal hot-spot analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda UKE kılavuzunda tanımlanmış yapısal hot-spot gerilme yaklaşımı detaylıca açıklanmıştır;

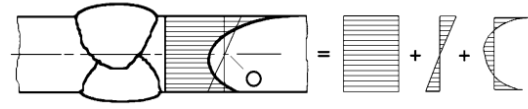
1.7.5. Kaynaklı Bağlantılarda Nominal Gerilme Yaklaşımı

Nominal gerilme yaklaşımı, kaynaksız yapıların yorulma ömrünü tahmin etmek için en basit ve en sık uygulanan yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntem esas olarak lineer elastisite teorisi göz önünde bulundurularak incelenen enine kesitteki ortalama gerilmeye

dayanmaktadır (Paris, & Erdogan, 1963). Kaynaksız yapıların yorulma mukavemetini ve servis ömrünü değerlendirmek için nominal gerilme yaklaşımı, kritik kesitteki nominal gerilme genliklerini dikkate almakta ve nominal gerilme genliklerinin S-N eğrisi ile karşılaştırılmasına dayanmaktadır. S-N eğrisinin eğimi ve saçılma aralığı, spesifik test verileri mevcut değilse yaklaşık olarak normalleştirilmiş S-N eğri şemasına göre tanımlanabilmektedir. Nominal gerilme S-N eğrisi, malzeme, geometri (çentik ve boyut etkisi dâhil) ve yüzey (sertleşme ve kalıntı gerilmeler dâhil) etkisini içermektedir (Niemi, 1995; Radaj, 1990). Geometrik konfigürasyonlar ve düzensizlikler, bir kesme deliği, bir kesitte süreksizlik veya bir kırışte bir bükülme olarak tanımlanabilmektedir. Başka bir deyişle, tüm kesit boyunca gerilme dağılımı üzerinde genellikle önemli bir etkiye sahip olan geometrik modifikasyonlar olarak tanımlanabilmektedir (Paris, & Erdogan, 1963). Servis ömrü, çoğunlukla Miner kuralının değiştirilmiş hasar birikiminin basit bir hipotezine göre nominal gerilme S-N eğrisinden ve nominal gerilme spektrumundan kaynaklanmaktadır. Nominal gerilme genlik spektrumu, kritik enine kesit ve yükleme tipi dikkate alınarak yük genlik spektrumundan gelmektedir. Servis ömrü hesaplaması genellikle son kırılma için yapılmaktadır lakin çatlak başlangıcı için de yapılabilir. Bir yük genliği spektrumu veya bir yük genliği matrisi esas alınır, yükleme sırası ve aşırı yüklenmenin etkileri çoğunlukla dikkate alınmamaktadır.

Yorulma sınıfları ve nominal gerilmeye karşılık gelen S-N eğrileri çoğu tasarım kodunda ve kılavuzlarda mevcuttur. Bu yöntemin kullanımı her zaman belirli bir geometri ve yük konfigürasyonunun yanı sıra çatlak konumu ile ilişkilendirildiğinden, incelenen kaynaklı detay, tasarım kodunda verilen detaya benzer olmalıdır. Bu nedenle, nominal gerilme hesaplanırken makro-geometrik özelliklerin etkileri dahil edilirken, kaynaklı birleştirmenin gerilme artırıcı etkilerinin dikkate alınmamasına özen gösterilmelidir (Wilson, & Haigh, 1923; Paris, & Erdogan, 1963).

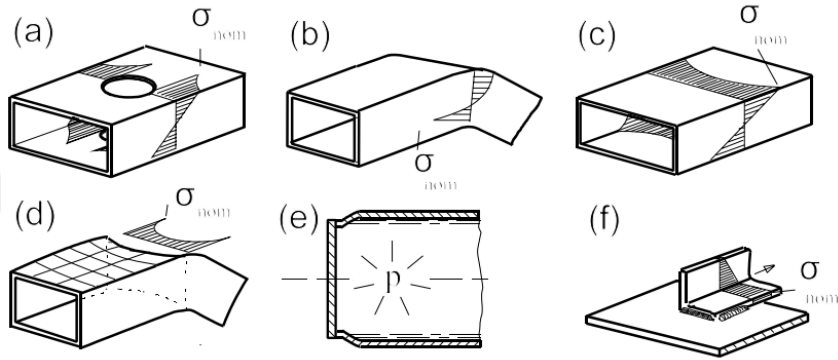
Kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemeti ve servis ömrünü genellikle son kırılmaya kadar değerlendirmek için kullanılan nominal gerilme yaklaşımı, kaynaksız yapıların yaklaşımı ile aynıdır. Bir kaynaklı yapının çentikli bölgesinde oluşan gerilme lineer değildir. Bu gerilme dağılımı Şekil 45'te gösterilmiştir.

$$\text{Çentik gerilmesi} = \sigma_{\text{mem}} + \sigma_{\text{ben}} + \sigma_{\text{nlp}}$$


The diagram illustrates the decomposition of crack stress. On the left, a rectangular plate with a central circular hole is shown under stress. This is equated to the sum of three components: a membrane stress component (represented by a uniform stress distribution across the plate), a bending stress component (represented by a linear stress distribution across the thickness), and a non-linear stress component (represented by a curved stress distribution across the thickness).

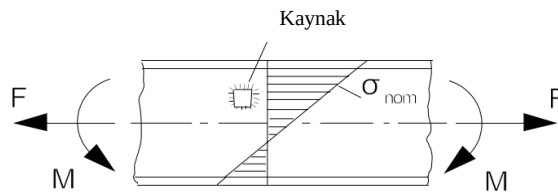
Şekil 45. Gerilme bileşenlerine ayrılmış lineer olmayan gerilme dağılımı

Burada σ_{mem} membran (çepher) gerilmeyi, σ_b kabuk eğme gerilmesini, σ_{nl} lineer olmayan gerilme pikini ifade etmektedir. Nominal gerilme, kaynaklı bağlantının lokal gerilme arttırıcı etkilerini dikkate almamakla birlikte, boşaltma, yüzey deliği, süreksizlik vb. bağlantı çevresindeki bileşenin makro geometrik şeklinin gerilme arttırıcı etkilerini de içeren, söz konusu kesitsel alanda hesaplanan gerilmedir. Bu yaklaşımda yapı genellikle elastik davranış gösterdiği varsayılmaktadır. Makro geometrik etkiye örnek sayılabilecek birkaç yapı örneği Şekil 46’da verilmiştir (Radaj, 1990).



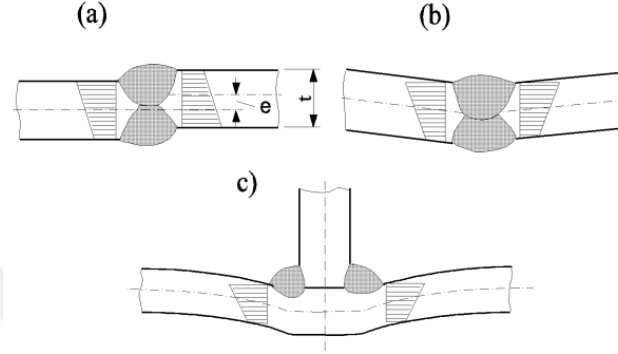
Şekil 46. Makro geometrik etkilere örnekler (Radaj, 1990)

Nominal gerilme, dikkate alınan bölüme göre değişebilmektedir. Örneğin Şekil 47’de verilen kirişe benzer bir bileşende, modifiye edilmiş nominal gerilme ve kesit üzerindeki varyasyon, basit kiriş teorisi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu gibi durumlarda, kaynaklı bir bağlantının etkisi göz ardı edilmektedir (Radaj, 1990).



Şekil 47. Kiriş benzeri bir bileşendeki nominal gerilme (Radaj, 1990)

Eksenel veya açısal yanlış hizalamanın neden olduğu ikincil eğilme gerilmesi, eğer yanlış hizalama yapısal detay için yorulma direnci S-N eğrisi tarafından kapsanan miktarı aşarsa dikkate alınmalıdır. Bu, ilave gerilme büyütme faktörünün ($k_{m,eff}$) uygulaması ile yapılmaktadır. Kaynaklı birleşimlerde oluşabilecek eksenel ve açısal yanlış hizalamalara ait örnekler Şekil 48’de verilmiştir (Radaaj, 1990);



Şekil 48. Eksenel ve açısal yanlış hizalama (Radaaj, 1990)

Basit bileşenlerde nominal gerilme, lineer elastik davranışı temel alan, yapısal mekanikğin temel teorileri kullanılarak belirlenebilmektedir. Nominal gerilme, yapısal detay tablolarında belirtildiği gibi, kaynak boğazındaki veya plakada kaynak ucundaki ortalama gerilmedir. Kaynak boğazı a'daki gerilme σ_w ya da τ_w , kaynak boyu, l_w , ve F kaynaktaki kuvvet için aşağıdaki gibi formüle edilmektedir;

$$\sigma_w \text{ ya da } \tau_w = \frac{F}{A_w} = \frac{F}{a \cdot l_w} \quad (42)$$

Aşırı karmaşık yapılar ve hiçbir analitik çözümü bulunmayan makro geometrik süreksizlikleri içeren yapısal bileşenler sonlu elemanlar yöntemi (FEM) modellemesi için kullanılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılıyorsa, meshleme basit ve kaba olabilmektedir. Sınıflandırılmış yapısal detayların yorulma direnci S-N eğrileri, kaynaklı bağlantı nedeniyle gerilme konsantrasyonlarını göz ardı ederek nominal gerilmeyi temel almaktadır. Ölçülen nominal gerilme, yapısal bileşendeki ilgili süreksizlik nedeniyle gerilme veya gerinim konsantrasyonunu hariç tutmalıdır. Bu sebepten, gerinim ölçerler kaynaklı bağlantının gerilme konsantrasyonu alanının dışına yerleştirilmelidir. Uygulamada, kaynak bağlantısı nedeniyle gerilme konsantrasyonu alanının gerilme

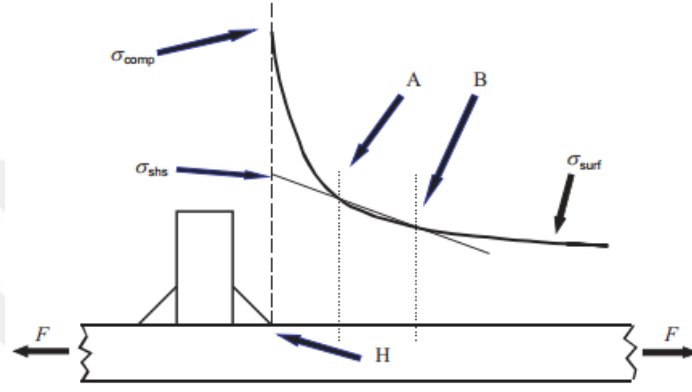
gradyanının ve derecesinin değerlendirilmesi gerekli olabilmektedir. Nominal gerilme yaklaşımının uygulanabilmesi için yapının çok karmaşık olmaması, UKE kılavuzunda verilen bağlantı tiplerinden bir tanesine benziyor olması, kaynaklı yapının kaynak kalitesinin kusursuz olduğu varsayılması gerekmektedir.

1.7.6. Kaynaklı Bağlantılarda Yapısal Hot-spot Gerilme Yaklaşımı;

Yorulma dayanımını ve kullanım ömrünü değerlendirmek için yapısal gerilme yaklaşımı, yapıdaki yapısal gerilme genliklerinden ilerlemekte ve bunları bir yapısal gerilme S-N eğrisi ile karşılaştırmaktadır. Yapısal (veya geometrik) gerilme, lokal çentik etkileri dikkate alınmadan makro yapı davranışını tanımlamaktadır. Bu gerilmeler, gerinim ölçerler ile ölçülebilmekte, mühendislik formülleri veya sonlu elemanlar analizi ile hesaplanabilmektedir. Yapısal elemanın dikkate alınan alanı ana malzemeden oluşuyorsa ve çentikler yoksa, yapısal gerilme S-N eğrisi ana malzemenin nominal gerilme S-N eğrisine eş olarak ayarlanabilmektedir. Yeni tasarlanan bir yapıdaki yapısal gerilme, eğer malzeme çentik etkisi ve servis şartları benzerse, eski tasarımdaki ilgili gerilmeler ile karşılaştırılabilir. Yapısal gerilme özellikle yapısal elemanın şekil parametrelerini optimize etmek için kullanılabilmektedir. Kaynaklı bağlantılara kadar genişletilmiş olan yapısal gerilme yaklaşımı, daha yüksek harcama gerektiren çentik gerilmesi yaklaşımına başvurmadan kritik alanlar için yorulma mukavemeti veya ömrü ile ilgili nicel ifadelerin nasıl elde edilebileceğinin bir göstergesi olabilmektedir. UKE tavsiyeleri haricinde yapısal gerilme ile ilgili farklı yapısal gerilme yaklaşımları da mevcuttur. Dong ve arkadaşları, Xiao-Yamada, kaynaklı yapıların yapısal gerilme değerlendirmesi için farklı yaklaşımlar öne sürmüştür (IIW, 2008; Radaj, 1990).

Kaynak ucundan kaynaklanan potansiyel yorulma hatalarının değerlendirilmesi için nominal gerilmeden ziyade yapısal hot-spot gerilme ($\Delta\sigma_{shs}$) kullanılmaktadır. Bu, kaynaklı bağlantı geometrisinin gerilme konsantrasyonu etkisini ve örneğin yanlış hizalamadan dolayı kaynaklanan herhangi bir ikincil gerilme içeren, ancak kaynak ucunun kendisinin lokal çentik etkisini içermeyen kaynak ucundaki gerilme aralığı olarak tanımlanmaktadır (ISO/TR 14345, 2012; Niemi, 1995). Test sonucunu yapısal hot-spot gerilme aralığı açısından değerlendirmek gerekirse, bu Şekil 49’da açıklandığı gibi, genellikle test numunesinin yüzeyinde gerinim ölçümlerinden elde edilen, kaynak ucuna yaklaşan gerilme dağılımından belirlenebilmektedir. Alternatif olarak, numunenin bir modelinin sonlu

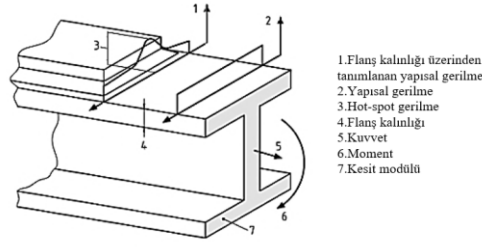
elemanlar gerilme analizi ile elde edilen, kaynak ucunun yakınındaki yüzeyden veya et kalınlığı boyunca ki gerilme dağılımından hesaplanabilmektedir (Jonsson, Dobmann, Hobbacher, AKassner, Marquis, Jonsson, & Marquis, 2016; Niemi, Fricke, & Maddox, 2006). Bazı özel durumlarda, bilhassa boru biçimindeki bağlantılarda yapısal hot-spot gerilme konsantrasyon faktörünü hesaplamak için parametrik formüller de mevcuttur (ISO/TR 14345, 2012; Ohta, Maeda, Mawari, Nishijima, & Nakamura, 1986).



Şekil 49. Kaynak ucuna yaklaşan yüzey gerilmesi dağılımından lineer ekstrapolasyon yoluyla kaynak ucundaki yapısal hot-spot gerilmesinin belirlenmesi (ISO/TR 14345, 2012)

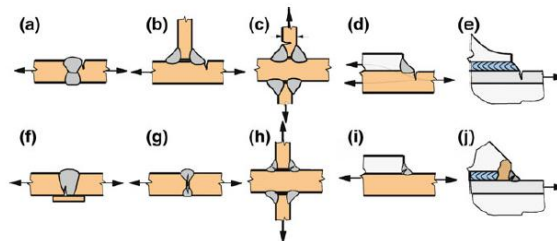
Şekil 49’da gösterilen A ve B noktaları referans noktaları, H noktası hot-spot noktası, σ_{shs} yapısal hot-spot gerilme, σ_{comp} hesaplanmış toplam gerilme ve σ_{surf} yüzey gerilmesidir. Kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının değerlendirilmesi üzerine birçok kitap ve doküman vardır. Lakin bu dokümanlara bakıldığında çoğu tavsiye veya kılavuz niteliğindedir.

BS 7608 (2015) standardı kaynaklı yapıların yorulma tasarımı ve değerlendirmesi üzerine bir kılavuz dokümandır. Şekil 50’de kaynaklı bir kiriş yapısında gösterildiği gibi bu standartta, yapısal hot-spot gerilmesinin kaynak ucu boyunca değişebileceğini, bu durumda en büyük değerin genellikle tasarım için kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca hot-spot gerilmesinin hesaplanması için üç farklı yöntem de ilgili standartta sunulmaktadır.



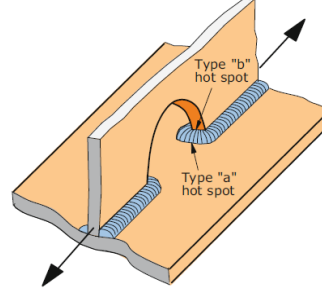
Şekil 50. Kaynaklı takviyeli bir kirişteki nominal, yapısal ve hot-spot gerilmelerinin karşılaştırılması (BS 7608, 2015)

Yapısal hot-spot gerilme yaklaşımı, dalgalı asal gerilmenin ağırlıklı olarak kaynak ucuna enlemesine etki edecek olduğu durumlarda ve potansiyel yorulma çatlaklarının kaynak ucunda veya kaynak sonunda başlayacak olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Yapısal hot-spot yaklaşımı Şekil 51’de gösterilen a-e durumları için geçerlidir. (c) ve (h) durumları yük taşıyan köşe kaynaklarını temsil ederken (b) durumu yük taşımayan köşe kaynaklarını temsil etmektedir. Bindirme kaynakları (d) ve (i), aslında kısmi yük taşıyan kaynaklardır. Ayrıca (e) ve (j) durumlarında, kaynaklı köşebentleri veya köşebentleri temsil eden uç kaynaklar plakalar üzerinde, kısmi yük taşımaktadır. Kategori seçiminde herhangi bir şüphe varsa, bağlantının yük taşıdığı varsayılmalıdır. Şekil 51’de verilen f-j bağlantı tipi için yapısal hot-spot gerilme analizi geçerli değildir. Çünkü yapısal hot-spot gerilme yaklaşımı çatlakın kaynak kökünden büyüyeceği ve kaynak boğazı boyunca yayılacağı, durumlar için geçerli değildir. Bir kaynaklı yapı tasarlanırken buna dikkat edilmeli ve tasarım bu durum dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir. Bu tarz bir kaynaklı yapı tasarımında çatlakın kökten başlaması çatlakın başlangıç anında tespit edilebilirliğini zayıflatmaktadır. Bununla birlikte yapısal hot-spot yaklaşımı, boyuna yüklemeye maruz kalan sürekli kaynaklara uygulanmamaktadır. Bu tür durumlarda nominal gerilme yaklaşımı yeterli olmaktadır (IIW, 2008; Hobbacher, 2016; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018).



Şekil 51. Kaynaklı bağlantılarda yorulma çatlak başlangıcı ile ilgili örnekler (IIW, 2008)

Hot-spotlar, Şekil 52’de gösterildiği gibi tip a ve tip b olmak üzere iki tipte sınıflandırılmaktadır. Tip a’da kaynak ucu plaka yüzeyinde, tip b’de ise kaynak ucu plaka kenarında bulunmaktadır. Tip a ve tip b için yapısal hot-spot gerilmesini belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018).



Şekil 52. Kaynaklı bir kirişteki iki hot-spot tipi örnekleri (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018)

Deneyler için hazırlanan numuneler ÇTTB tipte yük taşımayan kaynaklı numunelerdir. Bu sebepten deney numunelerinde tip a yani plaka yüzeyindeki yapısal hot-spot değerlendirilmesi yapılmıştır. Buna binaen tez kapsamında sadece a tipi hot-spot yapısal gerilmenin tanımı yapılmıştır.

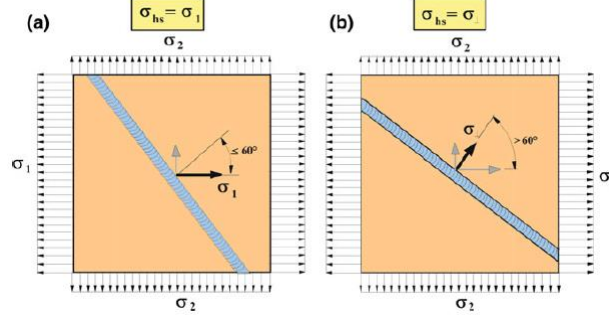
Hot-spot, bir yorulma çatlakının başlamasının beklenebileceği kaynak ucundaki veya kaynak sonundaki kritik konumdur. Yapısal hot-spot yaklaşımı, hot-spottaki yapısal gerilme aralığına dayanmaktadır. Yapısal gerilme (σ_s), Şekil 53’te gösterildiği gibi eleman yüzeyindeki membran gerilmesi (σ_m) ve kabuk eğilme gerilmesinin (σ_b) toplamıdır (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018).

$$\text{Kalınlık} \quad \sigma_s = \sigma_m + \sigma_b$$

Şekil 53. Bir elemanın yüzeyindeki membran ve kabuk eğilme gerilmelerinin toplamı olarak yapısal gerilmenin gösterimi (Niemi, Fricke, & Maddox, 2018)

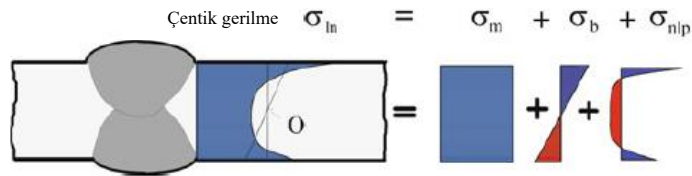
Birçok pratik durumda, daha büyük olan asal gerilme aralığı kaynağa yaklaşık olarak diktir. Bu nedenle, doğrudan hot-spot gerilmesi olarak değerlendirilmektedir. Daha genel olarak, hot-spot gerilmesi; yönü, kaynak ucuna göre normalin $\pm 60^\circ$ 'si içindeyse, en geniş

aralığa sahip ana gerilme (Şekil 54-a.) ve en büyük aralığa sahip asal gerilme yönü, kaynak ucuna göre normalin $\pm 60^\circ$ 'nin dışındaysa gerilme bileşeni kaynak ucuna dik veya minimum ana gerilmeden hangisi en geniş aralığı gösteriyorsa o değer hot-spot gerilmedir (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018).



Şekil 54. Her iki ana gerilmenin de çekme olduğu bir durumda hot-spot gerilme olarak kullanılan gerilme bileşeninin tanımı (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018)

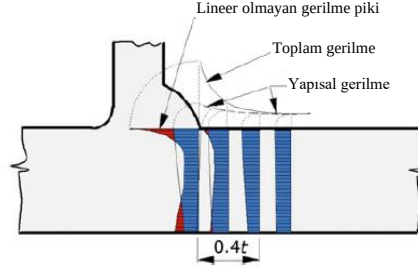
Kaynak ucu, Şekil 55'te gösterilen levha kalınlığı boyunca lineer olmayan bir gerilme dağılımına yol açan lokal bir çentiği temsil etmektedir. Kaynağın çentik etkisinden dolayı membran gerilmesi, kabuk eğilme gerilmesi ve lineer olmayan gerilme tepe noktası (σ_{nlp}) bu lokal bölgedeki dağılımı oluşturmaktadır. Çentik etkisi, kaynağın boyutuna, biçimine ve kaynak ucu geometrisine bağlı olmaktadır. Yapısal hot-spot yaklaşımının temel fikri, bu lineer olmayan gerilme pikini yapısal gerilmeden hariç tutmaktır. Çentiğin etkisi, deneysel olarak belirlenen S-N eğrisine dolaylı olarak dâhil edilmiştir. Bu nedenle, yapısal gerilmeye yalnızca iki lineer dağılmış gerilme bileşeni dâhil edilmektedir. Gerçek non-lineer gerilme dağılımının bilinmesi koşuluyla, membran ve kabuk eğilme gerilme bileşenleri hesaplanabilir. Ancak bilinmiyorsa, yapısal hot-spot gerilmesi, hot-spot'a yaklaşan gerilme dağılımından ekstrapolasyon ile tahmin edilebilmektedir (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018).



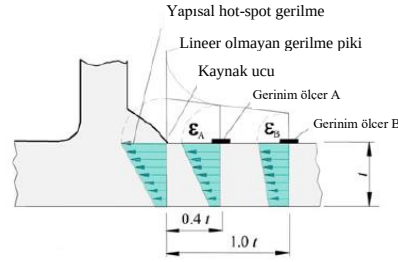
Şekil 55. Tip “a” hot-spotunda levha kalınlığı boyunca tipik bir lineer olmayan gerilme dağılımı (Niemi, Fricke, & Maddox, 2018)

Yapısal hot-spot gerilmesinin deneysel olarak belirlenmesi, gerinim ölçer aracılığıyla elde edilen gerinim değerlerinin ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanmasını kapsamaktadır. Bu durumda sadece bileşen veya yapının yüzeyindeki gerilmeler hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Bu bağlamda, yapısal hot-spot gerilmesi, genellikle belirli bir ekstrapolasyon yöntemi temelinde, söz konusu kaynağa yaklaşan gerilme dağılımından belirlenebilmektedir (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018). Şekil 56, a tipi bir hot-spotun çevresinde levha kalınlığı boyunca gerilme dağılımının nasıl değiştiğini göstermektedir. Levha yüzeyindeki kaynak ucundan 0.4 t mesafede, lineer olmayan bileşen neredeyse kaybolmuştur ve dağılım neredeyse lineerleşmiştir. Bu gerçek, Şekil 57’de gösterildiği gibi yapısal hot-spot gerilmesini tahmin etmek için kullanılan ekstrapolasyon tekniğinde kullanılmaktadır. Çoğu a tipi hot-spotlarda, kaynak ucuna yaklaşıldığında yapısal gerilme ve gerinim neredeyse lineer olarak artmaktadır. Yapısal hot-spot gerilmesi, örneğin yorulma testi veya prototiplerin saha testi gibi gerinim ölçerler kullanılarak belirlendiğinde, Şekil 57’de gösterildiği gibi lineer ekstrapolasyonun kullanılması yeterli olmaktadır. A ve B olmak üzere iki gerinim ölçer, kaynak ucuna 0.4t ve 1.0t konumuna yerleştirilmekte ve hot-spottaki yapısal gerilme, bu ekstrapolasyon noktalarındaki gerinimlerden lineer ekstrapolasyon ile belirlenmektedir. Aynı ekstrapolasyon noktaları, ince mesh sonlu eleman analizi tarafından elde edilen gerilmeleri analiz etmek için de uygun olmaktadır (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018).

Yapısal hot-spot gerilmesi (σ_{hs}), referans noktaları ve ekstrapolasyon denklemleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Deneysel olarak hot-spot gerilme değerlerini elde etmek için UKE kılavuzu gerinim ölçer sayısı ve referans nokta konumlarını tanımlamaktadır. Önerilen yerleştirme ve gerinim ölçer sayısı, kabuk bükme gerilmelerinin ölçüsüne, duvar kalınlığına ve yapısal gerilmenin tipine bağlı olmaktadır. Ölçer uzunluğu 0.2 t’yi geçmemesi gereken ilk ölçünün merkez noktası, kaynak ucundan 0.4 t uzaklıktadır. Örneğin küçük bir levha kalınlığı nedeniyle bu mümkün değilse, ölçerin ön kısmı, kaynak ucundan 0.3 t mesafeye yerleştirilmektedir. 0.4 t ve 1.0 t referans noktalarında iki ölçü ve lineer ekstrapolasyon için aşağıdaki formül kullanılmaktadır (IIW, 2008).



Şekil 56. Kaynak ucuna yaklaşan kalınlık boyunca gerilim dağılımındaki değişiklik



Şekil 57. Yapısal hot-spot gerinimini tahmin etmek için kaynak ucuna lineer ekstrapolasyon

$$\varepsilon_{hs} = 1.67 \times \varepsilon_{0.4t} - 0.67 \times \varepsilon_{1.0t} \quad (43)$$

0.4 t, 0.9 t ve 1.4 t referans noktalarda üç ölçüm ve kuadratik ekstrapolasyon için aşağıdaki formül kullanılmaktadır. Bu yöntem, hot-spotta doğru belirgin lineer olmayan yapısal gerilme artışı durumları için özellikle uygun olmaktadır (IIW, 2008);

$$\varepsilon_{hs} = 2.52 \times \varepsilon_{0.4t} - 2.24 \times \varepsilon_{0.9t} + 0.72 \times \varepsilon_{1.4t} \quad (44)$$

Genellikle, gerinim ölçerler arasında sabit mesafeler olan multi elemanlı gerinim ölçerler kullanılmaktadır. Bu nedenle, konumları yukarıdaki ekstrapolasyon noktalarıyla tam olarak örtüşmeyebilir. Bu gibi durumlarda, enterpolasyon yoluyla ekstrapolasyon noktalarında gerekli gerinimleri oluşturmak için sonuçlara bir eğrinin uydurulmasını sağlamak için yeterli ölçülerin kullanılması önerilmektedir. Gerilme durumu tek eksene yakınsa, yapısal hot-spot gerilmesi aşağıdaki denklem kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018);

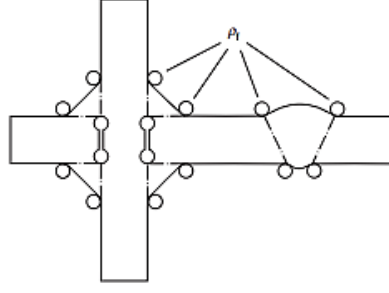
$$\sigma_{hs} = E \cdot \varepsilon_{hs} \quad (45)$$

Ancak, gerilme durumu iki eksenli ise, gerçek gerilme yukardaki formülden elde edilen değerdan %10'a kadar daha yüksek olabilmektedir. Yüksek doğruluk gerekiyorsa, boyuna ve enine gerinimlerin oranı, $\varepsilon_y / \varepsilon_x$, rozet gerinim ölçerlerinden veya FEA'dan belirlenmelidir. Yapısal hot-spot gerilmesi, σ_{hs} , aşağıdaki formülden hesaplanabilmektedir (IIW, 2008; Niemi, Fricke, & Maddox, 2018);

$$\sigma_{hs} = E \cdot \varepsilon_x \cdot \frac{1 + \gamma \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}}{1 - \gamma^2} \quad (46)$$

1.7.7. Kaynaklı Bağlantılarda Etkin Çentik Gerilme Yaklaşımı

Etkin çentik gerilmesi, lineer elastik malzeme davranışı varsayılararak elde edilen bir çentik kökündeki toplam gerilmedir. Yaklaşım, kaynak ucu veya kaynak kökü tarafından oluşturulan çentikte lokal gerilme artışını dikkate almaktadır. Kaynak şekli parametrelerinin ve çentik kökündeki lineer olmayan malzeme davranışının çeşitliliğini hesaba katmak için, gerçek kaynak şekli etkin olanla değiştirilmektedir. Bir gerilme gradyanı altında homojen olmayan malzeme yapısının yorulma davranışı üzerindeki etkisini dikkate alan malzemenin mikro yapısal destek etkisi, (elastik) çentik gerilme yaklaşımındaki farklı hipotezlerden, gerilme gradyan yaklaşımı, gerilme ortalaması yaklaşımı, kritik mesafe yaklaşımı ve yüksek gerilmeli hacim yaklaşımı dikkate alınarak değerlendirilebilmektedir (IIW, 2008; Siebel, 1955; Neuber, 1946; Peterson, 1959; Kuguel 1961; IIW, 2012). Sadece son üç hipotez kaynaklı bağlantılarda geniş bir uygulama bulmuştur. Etkin çentik gerilme yaklaşımı olarak da bilinen simgesel (fictitious) çentik yuvarlaması, gerilme ortalama yaklaşımını esas almaktadır (Şekil 58). Kritik mesafe yaklaşımı ise, elastik gerilme konsantrasyon faktörü K_t 'yi yorulma çentik faktörü K_f 'ye azaltmak için bir malzeme sabiti ve çentik yarıçapı oranını kullanmaktadır. Çentik yuvarlama yaklaşımın arkasındaki temel fikir, belirli bir derinlik üzerindeki gerilme ortalaması nedeniyle bir çentikteki gerilme azalmasının alternatif olarak çentik yarıçapının simgesel bir genişlemesi ile elde edilebilmesidir (IIW, 2012).



Şekil 58. Simgesel çentik yuvarlama (IIW, 2012)

Yapısal çelikler ve alüminyum alaşımları için, tutarlı sonuçlar verecek şekilde $r = 1$ mm'lik etkin bir çentik kök yarıçapı doğrulanmıştır. Yorulma değerlendirmesi için, etkin çentik gerilmesi, tek bir yorulma direnci eğrisi ile karşılaştırılmakta, ancak diğer değerlendirme yöntemlerinde olduğu gibi, ana metal için yorulma direnci eğrisinin aşılmadığını kontrol etmek gerekmektedir. Yaklaşım, kaynak ucu veya kaynak kökündeki potansiyel yorulma hasarları ile ilgili olarak kaynaklı bağlantıların değerlendirilmesiyle sınırlıdır. Yorulma değerlendirmesi bu yaklaşımla birlikte kaynak uçlarında ana malzemenin yapısal hot-spot gerilmesi ve ana malzeme için ilgili yorulma sınıfı (FAT) kullanılarak yapılmalıdır. Bu yaklaşım, hot-spot yaklaşımında olduğu gibi kaynağa paralel önemli bir gerilme bileşeni varsa da uygulanamamaktadır. Kaynak uçlarında, yapısal hot-spot gerilmesinin en az 1.6 katı, etkin çentik gerilmesi olarak varsayılmaktadır. Yaklaşım, alternatif kaynak geometrilerinin karşılaştırılması için çok uygun olmaktadır (IIW, 2008).

Etkin çentik gerilmeleri veya gerilme konsantrasyon faktörleri, parametrik formüllerle hesaplanabilmekte, diyagramlardan alınabilmekte, sonlu elemanlar veya sınır eleman modelleri tarafından hesaplanabilmektedir. Etkin çentik yarıçapı, yarıçapın ucu gerçek çentiğin köküyle çakışacak şekilde sunulmaktadır. Sonlu eleman analizi ile etkin çentik gerilmesinin belirlenmesi için, lineer elemanlar için yarıçapın $1/6$ 'sından ve daha yüksek elemanlar için yarıçapın $1 / 4$ 'ünden daha büyük olmayan eleman boyutları önerilmektedir. Bu boyutların kavisli kısımlarda ve ayrıca çentik yüzeylerinin düz kısmının başlangıcında, her iki yönde yüzeye normal ve teğet olmalıdır. Etkin çentik yarıçapı bir idealleştirme prosesi olduğundan, doğrudan kaynaklı bileşende ölçülememektedir (IIW, 2008).

1.7.8. Kaynaklı Bağlantılarda Gerilme Yoğunluk Faktörü

Kırılma mekaniği çatlakların davranışını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Başlangıçtaki bir çatlağın, a_i 'nin, nihai bir a_f boyuta büyümesini hesaplamak için kullanılmaktadır. Çatlak başlangıcı, yapısal metallerdeki kaynaklı bağlantıların ömrünün sadece küçük bir kısmını oluşturduğundan, yöntem yorulma ömrünün, inceleme aralıklarının, çatlak benzeri kaynak kusurlarının ve değişken genlikli yükleme etkisinin değerlendirilmesi için uygun olmaktadır. Bir çatlak ucundaki yorulma eylemini çatlak ilerlemesi açısından tanımlayan parametre, gerilme yoğunluk faktörü aralığı ΔK 'dır. Kaynaklı bağlantılarla ilgili kırılma mekaniği hesaplamaları genellikle çentik kökündeki örneğin kaynak kökündeki toplam gerilmeye dayanmaktadır. Çeşitli kaynaklı yapısal detaylar için, gerilme konsantrasyon etkisine izin veren düzeltme fonksiyonları oluşturulmuştur. Ek olarak, çatlağı içeren bileşenin boyutuyla karşılaştırıldığında çatlağın boyutuna ve şekline bağlı olarak başka düzeltme fonksiyonları da gerekebilmektedir. Bu düzeltme fonksiyonları uygulanan farklı gerilme tiplerine dayanmaktadır. Kullanılan fonksiyonun, söz konusu gerilme tipine karşılık gelmesi gerekmektedir (IIW, 2008).

İlk olarak, çatlağın başladığı bölgede herhangi bir çatlak olmadığı varsayılarak uygulanan gerilme belirlenmektedir. İdeal olarak gerilme, membran ve kabuk eğilme gerilmesi bileşenlerine ayrılmaktadır. Gerilme yoğunluk faktörü, K , her iki gerilme bileşeninin etkisinin bir birleşimi olarak sonuçlanmaktadır. Çatlak şeklinin ve boyutunun etkileri, Y düzeltme fonksiyonuyla karşılanmaktadır. Kalan herhangi bir gerilme artırıcı süreksizlik ya da çentik M_k ek faktörleri kapsayabilmektedir (IIW, 2008).

$$K = \sqrt{\pi a} (\sigma_m \cdot \gamma_m \cdot M_{k,m} + \sigma_b \cdot \gamma_b \cdot M_{k,b}) \quad (47)$$

K	gerilme yoğunluk faktörü
σ_m	membran gerilme
σ_b	kabuk eğilme gerilmesi
γ_m	membran gerilme yoğunluk faktörü için düzeltme işlevi
γ_b	kabuk eğilme gerilme yoğunluk faktörü için düzeltme işlevi
$M_{k,m}$	membran hareketi açısından non-lineer gerilme piki için düzeltme
$M_{k,b}$	kabuk eğilmesi açısından non-lineer gerilme piki için düzeltme

γ_m ve γ_b düzeltme fonksiyonları literatürden bulunabilmektedir (Frank, 1972; Murakami, 1987; Newman, & Raju, 1980; Newman, & Raju, 1981; Newman, & Raju, 1981). M_k faktörleri yapılmış çalışmalardan elde edilebilmektedir (Hobbacher, 1993; Maddox, 1985). Gerilme yoğunluk faktörleri, doğrudan sonlu eleman analizi tarafından belirlenmekte veya ağırlık fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Herhangi bir kusur tespit edilmemiş olan kaynaklı bağlantıların yorulma özelliklerini değerlendirmek için kırılma mekaniği kullanılabilmektedir. Bu gibi durumlarda, örneğin önceki metalürjik kanıtlara veya kullanılmış muayene yönteminin tespit limitine dayanarak ve gerilme yoğunluk faktörünü hesaplayarak bir çatlak varlığını varsaymak gerekmektedir. Kaynak ucundan başlayan çatlaklar için en azından 0.15 mm'lik bir başlangıç çatlak derinliğinin ve 0.1 en/boy oranının varsayılması önerilmektedir. Yük taşıyan ÇTTB biçimli köşe kaynaklarında kök çatlakları için, gerçek kök boşluğu başlangıç çatlağı olarak alınmaktadır.

1.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yorulma üzerine yapılan çalışmalara dair ilk izler, 1850'li yıllara kadar uzanmaktadır. Özellikle Wöhler'in lineer hasar modelini öne sürmesi sonucu yorulma çalışmaları Wöhler öncesi ve sonrası olarak ikiye ayrılabilir (Walter, 1996). Bu dönemde madenlerde kullanılan konveyör zincirlerinin değerlendirilmesine dair yapılan çalışma, yorulma ile ilgili ilk makale olarak kayıtlara geçmiştir. Bu çalışma, malzemenin yanı sıra gerçek bileşenlerin de test edildiği bir çalışmadır (Bergrath, 1837). Demiryolu taşımacılığının artmasıyla birlikte, trenlerde kullanılan parçaların minimum gereksinimlerinin belirlenmesi önem kazanmıştır. Bu bağlamda, demiryolu taşımacılığında kullanılan aksların yorulma mukavemeti üzerine yapılan çalışmalar, 1842'de Rankine tarafından başlatılmıştır. Bu çalışmaların etkisiyle güvenli ömür tasarımı yaklaşımı geliştirilmiş ve tren akslarının altmış bin kilometre sonrasında değiştirilmesi önerilmiştir (Morin, 1853). 1850'li yılların sonlarına gelindiğinde, makalelerde ilk kez "yorulma" terimi kullanılmıştır. Ayrıca, statik yüklemelere ek olarak yapıların maruz kalabileceği yorulma yükleri için izin verilebilecek maksimum gerilmeler incelenmiştir (Braithwaite, 1854). Bu dönemde meydana gelen demiryolu kazalarının kök nedeni tam olarak belirlenememiştir (Walter, 1996). 5 Ekim 1842'deki bir tren kazasında, lokomotif aksının kırılması altmış kişinin hayatına mal olmuştur (Smith, 1990). Bu dönemlerde çalışmalar yapan Joseph

Glynn, Versailles kazasının ardından bir akstaki yorulma hasarını ilk defa çizerek açıklamıştır (Milella, 2012). Yapılan çalışmalar neticesinde, hasar olasılıkları göz önüne alınarak akslar için yorulma ömrü dağılımları ve sonlu yorulma ömürleri önerilmiştir (Walter, 1996). 1800'lerin sonlarına doğru, malzemelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar dönel eğmeli test makineleriyle başlamıştır. Bu çalışmalar, malzemelerin statik mukavemetinden daha düşük değerlerde tekrarlı yüklere maruz kaldığında hasar görebileceğini ortaya koymuştur (Wöhler, 1870). Wöhler'in test verileri kullanılarak, malzemelerin ortalama ve alternatif gerilmelere göre yorulma davranışlarını tanımlayan S-N eğrileri oluşturulmuştur. Bu dönemde, Goodman-Haigh diyagramı da malzemenin ortalama ve alternatif gerilme etkileşimini ölçmek için önerilmiştir (Basquin, 1910). Lineer hasar kuralı ise 1924'te ilk kez Palmgren tarafından ortaya konmuştur. Miner daha sonra bu kuralı 1945'te geliştirmiş ve Miners kuralı olarak adlandırmıştır. Lineer hasar kuralının tanıtılmasından bu yana, yorulma ömrü tahmininin doğruluğunu artırmak için birçok farklı yorulma hasarı teorisi önerilmiştir (Lee, 2015). Bauschinger'in çalışmalarından ilham alarak, Manson ve Coffin 1954 yılında malzemelerin düşük tekrarlı, plastik bölgesindeki yorulma davranışlarını belirleyen dört parametrelili bir formül geliştirmiştir. Bu çalışmalar, gaz veya buhar türbinleri gibi yüksek sıcaklıkta görece az tekrarla yüklenen bileşenler için düşük tekrarlı yorulma adını verdiğimiz yeni bir faaliyet alanını ortaya çıkarmıştır (Walter, 1996). Böylece, plastik bölge davranışı da dikkate alınarak malzemelerin yorulma davranışları daha ayrıntılı bir şekilde tanımlanabilmiştir (Coffin, 1954).

Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, bu araştırmaların 1900'lü yıllarda başladığı görülmektedir. İlk çalışmalar, alın kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır (Wilson, 1939). Özellikle çelik köprülerin bağlantı bölgelerinde dinamik yüklerin etkisiyle meydana gelen yorulma çatlakları, büyük hasarların oluşmasına neden olmuştur. Çalışmalar, çelik köprülerde kullanılan düşük alaşımlı yapı çeliklerinin yorulma dayanımlarını belirleme amacıyla genişletilmiş ve numunelerdeki hasarların genellikle 100.000 ila 2.000.000 tekrar arasında meydana geldiği tespit edilmiştir (Nordmark, Stallmeyer, & Munse, 1955). 1960'lı yıllarda yapılan değerlendirmeler, yapıların meydana gelen hasarlarının büyük bir kısmının hesaplanan nominal gerilmelerin altında olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yorulma hasarlarını azaltmak için tekrarlı yüklemeye maruz kalan yapısal elemanlar ve bağlantılarda daha düşük izin verilen gerilmelerin kullanılması

önerilmiştir (Munse, 1965). Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarını artırmak adına kaynak geometrisinin optimizasyonu ile ilgili çalışmalar 1970’li yıllarda başlamıştır. Kaynak ucu yarıçapı, kontak açısı, kaynağın genişliği ve yüksekliğinin yorulma dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiş, kaynak ucundaki yarıçapın bir alın kaynaklı bağlantının yorulma davranışını tek başına tanımlayamayacağı ortaya konmuştur (Williams, Ottosen, Lawrence, & Munse, 1970). Kırılma mekaniğiyle ilgili gelişmelerin ardından, kaynaklı yapıların kaynak ucundaki ve kökündeki çatlakların değerlendirilebilmesi adına gerilme yoğunluk faktörünün belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde gerilme yoğunluğu faktörünün kaynak boyutu, kaynak açısı, plaka kalınlığı ve kaynak nüfuziyeti ile ilişkili olduğu gösterilmiş, gerilme yoğunluğu faktörünü tahmin etmek için çeşitli ilişkiler geliştirilmiştir (Frank, 1972). Gerilme yoğunluk faktörü üzerine yapılan çalışmaların ardından, kaynak gerilme konsantrasyon faktörünün belirlenmesi üzerine araştırmalar yürütülmüştür. Kaynaklı bağlantılarda, kaynak ucunda başlayan yarı eliptik bir yüzey çatlağının yayılmasıyla hasarın meydana geldiği ortaya konmuştur (Maddox, 1975). Kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar, kalıntı gerilme ölçümlerinin gelişimi ile yeni bir boyut kazanmıştır. Çekme kalıntı gerilmelerinin kaynaklı bağlantının yorulma dayanımına etkisi üzerine yapılan çalışmalar, yüksek dayanımlı çeliklerde kalıntı gerilme değerlerinin yumuşak çeliklerden daha yüksek olmadığını ortaya koymuştur. Bu sonuç, çeliğin çekme dayanımının hem kaynaklanmış hem de gerilme giderilmiş bağlantılardaki yorulma dayanımı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını göstermiştir (Maddox, 1982). Bu çalışmaların ardından, kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarını artırmak adına soğuk deformasyon işlemleri önerilmiştir. Bilyalı ve çekiçle dövme ile kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının artırılabilirliği ortaya konmuştur (Maddox, 1985). 1990’lı yılların başında, kaynaklı yapıların yorulma analizleri için çeşitli gerilme konsantrasyonları, gerilme kategorileri ve yorulma analiz yöntemleri tanımlanmıştır. Yorulma yaklaşım ve yöntemleri arasında nominal gerilme, hot-spot gerilme, çentik gerilme, çentik gerinimi ve kırılma mekaniği yer almaktadır. Ayrıca, gerilme tayini için sonlu elemanlar yöntemleri ve deneysel yöntemlerin uygulanmasına ilişkin kapsamlı tavsiyeler UKE tarafından sunulmuştur (Niemi, 1995). UKE ortak çalışma grubu çatısı altında, kaynaklı bağlantıların ve bileşenlerin yorulma tasarımı üzerine bir çalışma yayımlanmıştır. Bu çalışma, 2008 yılında UKE tarafından yayımlanan kaynaklı bağlantıların ve bileşenin yorulma tasarımı için öneriler dokümanının temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki öneriler, dalgalı kuvvetlere maruz kalan kaynaklı

yapıların tasarımı ve analizi için bir temel sağlamayı amaçlamaktadır. Öneriler, yapının sınır durumlarını etkileyebilecek kaynaklı bileşenlerde yorulma hasarının değerlendirilmesi için genel yöntemleri içermektedir. Ferritik/perlitik veya beynitik yapıli çeliklerden, akma mukavemeti 700 N/mm²'ye kadar olan dövme veya ekstrüde edilmiş ürünlerden, östenitik paslanmaz çeliklerden ve kaynaklı yapılar için yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından imal edilen kaynaklı yapılar için yorulma direnci verilerini sunmaktadır (Hobbacher, 1996). Kaynak nüfuziyetinin yorulma dayanımına etkisi üzerine yapılan çalışmalar 1970'li yıllarda başlamış olmasına rağmen (Gurney, 1979), farklı nüfuziyet değerlerinin mukayesesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalara 2000'li yıllarda daha fazla rastlanmaktadır. Çelik köprü tabliye bağlantılarındaki kırılmalar sebebiyle lokal bölgeleri dikkate alarak, kaynak nüfuziyetinin yorulma dayanımı üzerine olan etkisini tespit etmek amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, farklı birleşim tiplerinde farklı nüfuziyet oranına sahip numunelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi hedeflenmiştir (Kainuma, Mori, & Ichimaya, 2001; Dung, Sasaki, Tajima, & Suzuki, 2015; Hanji, Tateishi, Ohashi, & Shimizu, 2020).

Literatür ve yapılan çalışmalar incelendiğinde, TMÇ'lerin kaynaklanabilirliği, bu gruptaki çelik malzemelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi ve kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Kaynak nüfuziyetini dikkate alarak, kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalara daha çok son yıllarda rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan malzemeler genellikle ince taneli yapı çelikleridir. Ancak, TMÇ'lerin farklı nüfuziyet değerleri dikkate alınarak yorulma dayanımlarının belirlenmesi üzerine yapılmış çalışmalara pek rastlanmamaktadır.

Zırh çelikleri sahip oldukları mekanik özellikleri sebebiyle balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çelikler bilhassa zırhlı araçların monokok gövde yapılarında tercih edilmektedir. Günümüz teknolojik imkanları doğrultusunda yekpare bir gövde yapılabilmesi mümkün değildir ve bu tip araçlarda birleşim yöntemi olarak kaynaklı imalat sıklıkla kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Kaynak dikişleri genellikle gövde yapısında yük taşımamak üzere tasarlanmasına rağmen, ilgili bölgenin yorulma dayanımını etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu kapsamda doktora çalışmasında ÇTTB tipte yük taşımayan kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi ve artan nüfuziyet değerlerinin yorulma dayanımlarına olan etkisinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Plakalara Uygulanan Testler

Testler, plakaların imalatçı tarafından belirlenmiş kriterlere ve standartlarda tanımlanmış minimum gereksinimlere uygun olup olmadığının değerlendirilmesi için yürütülen testlerdir. Bu süreç, kimyasal ve mekanik özellikleri belirleme haricinde bilhassa haddelenmiş plakalarda iç süreksizlik kontrollerinin de yürütüldüğü tahribatsız testleri içeren doğrulama testleridir. Bu kapsamda kaynaklı numune elde etmek için kullanılacak olan plakalar ön değerlendirme testlerine tabi tutulmuştur.

2.1.1. Kimyasal Analiz Testi

Kimyasal analiz testi, ASTM A 751 (2021) standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Zırh çelikleri TMC'den imal edilmektedir. Su verme işlemi sonrası yapının martenzitik yapıya dönüşebilmesi için gerekli alaşım elementlerini içermesi ve yeterli hızlarda soğuması gerekmektedir. Bu kapsamda çalışmada kullanılacak olan malzemenin kimyasal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Üretici firmanın ilgili balistik seviyesindeki sac malzeme için sağlaması gereken maksimum alaşım elementi değerleri Tablo 28'de verilmiştir.

Tablo 28. Deney malzemesi maksimum alaşım elementi miktarı

Alaşım Elementi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Maksimum Değer	0.300	0.700	1.700	0.030	0.015	1.500	0.800	0.500	0.004

2.1.2. Metalografik Test

Metalografik test ile malzeme iç yapısının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Metalografik testler ASTM E3 standardı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (ASTM E3, 2017). Numuneler sırayla 80, 120, 180, 220, 320, 400, 500, 800 ve 1200 numaralı

zımparalar ile zımparalanmış ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler %3 nital çözeltisi ile yaklaşık 20 sn süresince dağlanmışır. Malzemenin tüm kesiti boyunca su verme ve sonrasında temperleme işleminin homojen olarak gerçekleşmesi beklenmektedir. Kesit boyunca su verme ve/veya temperlemenin homojen gerçekleşmemesi durumunda iç yapı ve sertlik değerlerinde kesit boyunca değişim söz konusu olabilecektir. Bu sebepten iç yapı inceleme ve sertlik testleri kesit boyunca gerçekleştirilmiştir.

2.1.3. Sertlik Testi

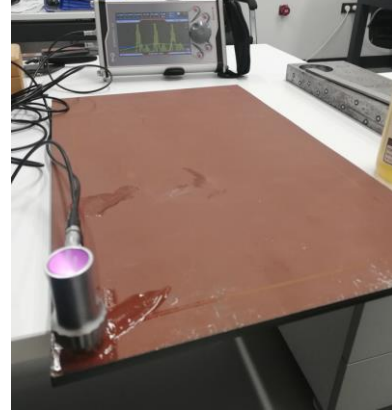
Sertlik testi bilhassa metalik malzemelerde yapının değerlendirilmesi için uygulanan tahribatlı testlerin başında gelmektedir. Sertlik testi hem ASTM E10 standardı (2023) kapsamında hem de EN ISO 6507-1 standardı (2018) kapsamında gerçekleştirilmiştir. ASTM E 10 standardı kapsamında plakaların Brinell sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik testleri malzeme yüzeyine uygulanmıştır. Her bir plakadan alınan parçalar üzerinden üçer adet ölçüm alınmıştır. MIL-DTL-46100E standardında (2008) her bir plakanın sahip olması gereken Brinell sertlik değerinin HB 477 - HB 534 değerleri arasında olması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca EN ISO 6507-1 (2018) kapsamında kaynaklı plakalarda Vickers testleri gerçekleştirilmiştir. Vickers testi plaka kesitine uygulanmıştır. Kesit boyunca 0.5 mm aralıklarla 1 kg yük uygulayarak sertlik dağılımı incelenmiştir. Vickers testindeki amaç kesit boyunca sertlik dağılımının nasıl değiştiğini gözlemlemektir.

2.1.4. Ultrasonik Muayene

Plakalar kaynak işlemi öncesi süreksizlik kontrolü amacıyla ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur (Şekil 59). Ultrasonik muayene EN 10160 standardı (2000) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Haddelenmiş saclarda görülen bilhassa laminasyon tipi süreksizlik yapının dayanımı için kritik bir süreksizlik tipidir. Bu sebepten kaynak öncesi plakalar ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Kontrol işlemleri çift kristalli proba tek taraflı gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet sınıfı S3E4 olacak şekilde seçilmiştir. Daha hassas kontrol yapılması adına DGS eğrisi 2mm disk şekilli yansıtıcıya denk gelecek şekilde oluşturulmuştur. DGS eğrisinin oluşturulması için arka duvar yankısı kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 59. Plakaların ultrasonik muayenesi (a) Ultrasonik muayene sistemi, (b) Plakaların ultrasonik muayenesi

2.1.5. Çekme Testi

Testte kullanılacak malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme testleri EN ISO 6892-1 standardı (2019) kapsamında gerçekleştirilmiştir (Şekil 60). Çekme testi ile hem malzemenin üretici kataloğundaki değerleri sağlayıp sağlamadığı hem de malzemenin nasıl bir akma ve kopma davranışı sergileyeceğinin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Çekme testiyle malzemenin akma, çekme mukavemeti ve yüzde uzamasının belirlenmesi hedeflenmiştir. Kaynaksız numunelere çekme testi uygulanmasındaki amaç kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları ile mukayesesinin yapılması adınadır.



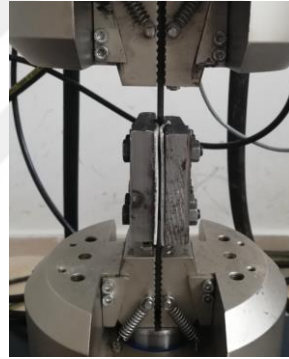
Şekil 60. Kaynaksız numune çekme testi

2.1.6. Yorulma Testi

Kaynaklı numunelerin yorulma testleri öncesi kaynaksız numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 61). Yorulma testi ASTM E 466 standardı (2021) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları yorulma cihazı kapasitesi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Yorulma testleri kuvvet kontrollü gerçekleştirilmiştir. Test dalga formu, sabit genlikli ve sinüzoidal olacak şekilde seçilmiştir. Numuneye uygulanan kuvvet, her enine kesitin merkezinden geçen uzunlamasına eksen boyuncadır. Testler, numune hasarlanana kadar veya en az iki milyon gerilme tekrarına kadar devam ettirilmiştir. Tüm testler 5 Hz frekans değerinde ve tam değişken tekrarlı yükleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan 2g kuvvetine ve 100 kN dinamik/statik yükleme kapasitesine sahip servo-hidrolik yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



(a)



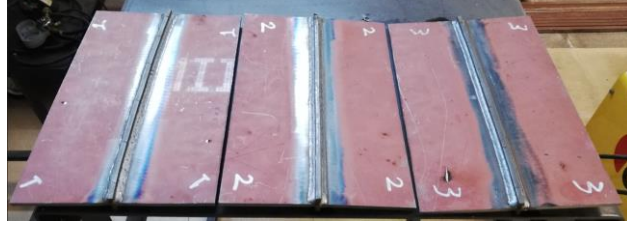
(b)

Şekil 61. Kaynaksız numunelerin yorulma testleri (a) Kaynaksız numune yorulma testleri, (b) Eğilme önleyici aparat

2.2. Kaynaklı Parçalara Uygulanan Testler

Şekil 62’de gösterilen kaynaklı parçalar kesim işlemi öncesi birtakım testlere tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarını daha doğru değerlendirebilme ve kök neden analizlerini daha sağlıklı yapabilme adına kaynaklı parçalar sırasıyla görsel muayene, penetrant muayene ve ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımlarını etkileyen önemli faktörlerden birisi de kaynak iç ve dış süreksizlikleridir. Yorulmanın süreksizlik etkisi ile başlaması veya çatlakların/kırılmaların süreksizlik

bölgesinden başlaması sonuçların sağlıklı değerlendirilememesine yol açabilmektedir. Bu kapsamda tahribatlı testler öncesi tahribatsız muayene kontrolleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 62. Kaynaklı parçalar

2.2.1. Kaynaklı Parçaların Görsel Muayenesi

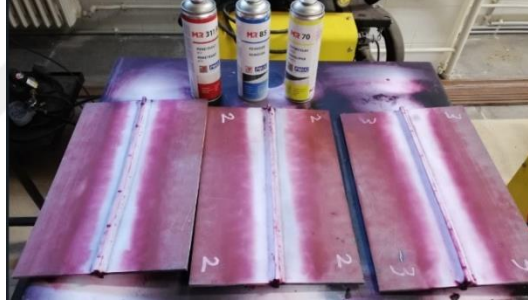
Kaynak dikişlerinin görsel muayenesi EN ISO 17637 (2017) standardı kapsamında gerçekleştirilmiş olup süreksizlik değerlendirilmesi EN ISO 5817 (2023) standardı B kalite sınıfına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 63). Görsel muayene kaynak ve ITAB bölgesinde oluşabilecek süreksizliklerin tespiti için yapılmıştır. Görsel muayeneyle yüzeye açık süreksizliklerin yanında yanma oluşu, aşırı kaynak metal, aşırı konkavite vb. kaynak profili ile ilgili süreksizliklerin tespiti de yapılabilmektedir. Diğer tahribatsız muayene işlemleri yapılmadan görsel muayenenin yapılması ve tespit edilen süreksizliklerin değerlendirilmesinin yapılması gerekmektedir. Bu sebepten öncelikle kaynaklı parçaların görsel muayenesi gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi öncesi ön ısıtma sıcaklığı ve çarpılma durumları incelenmiş olup kaynak işlemi için gerekli önlemler alınmıştır.



Şekil 63. Kaynaklı parça görsel muayenesi

2.2.2. Kaynaklı Parçaların Penetrant Muayenesi

Penetrant muayene yüzeye açık süreksizliklerin kontrolü yapılmıştır. Görsel muayene sonucu tespit edilemeyecek boyutlarda çatlak ve yüzey deliklerinin bu yöntemle görünür hale gelmesiyle ilgili belirtilerin değerlendirilmesi prensibine dayanan bir kontrol yöntemidir. Penetrant muayene EN ISO 3452-1 (2021) standardı kapsamında gerçekleştirilmiş olup süreksizlik değerlendirilmesi EN ISO 23277 (2015) standardı kabul seviyesi 1'e göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 64). Penetrant muayene ürün grubu olarak tip II-C-D seçilmiştir. Kontrol öncesi yüzeyler yüzeyi tıkama ihtimali olan çapak, kir ve yağdan arındırılmıştır. Temizleme işlemi sırasında mekanik yöntemler kesinlikle kullanılmamıştır. 700 lüks aydınlanma şiddeti ortamında 20 dk süresince penetrant uygulaması sonrası kaynaklı parçalar kaba ve hassas temizlik sonrası geliştirici uygulamasına tabi tutulmuştur. Geliştirici uygulanmasıyla birlikte 20 dk'lık bir süre zarfında kontrol işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 64. Kaynaklı parça penetrant muayenesi

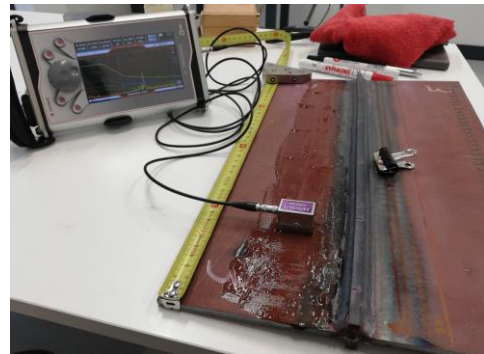
2.2.3. Kaynaklı Parçaların Ultrasonik Muayenesi

Ultrasonik muayene yöntemi görsel ve penetrant muayeneye nazaran malzeme iç yapısındaki süreksizliklerin tespiti amaçlı uygulanan bir yöntemdir. Statik testlere nazaran dinamik testlerde kaynak dikişindeki süreksizlikler çok daha önem arz etmektedir. Bu sebepten süreksizlik tespitinin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Kaynak dikişinde mevcut olan süreksizlikler gerilme konsantrasyonu oluşturduğundan yorulma çatlakları veya hasarlar genellikle bu bölgelerden başlayabilmektedir. Tahribatsız muayene ile süreksizlik değerlendirmesi yapılmadığı takdirde çatlağın veya hasarın kök neden

analizi pek de sağlıklı yapılamayacaktır. Bu sebepten ister statik test ister dinamik test olsun öncelikle malzemenin ve/veya yapının tahribatsız muayene testleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Ultrasonik muayene EN ISO 17640 (2018) standardı kapsamında kökte ergime durumunu değerlendirme adına gerçekleştirilmeye çalışılmıştır (Şekil 65). Kök değerlendirmesi, EN ISO 5817 (2023) B kalite seviyesine denk gelen EN ISO 11666 standardı seviye 2 dikkate alınarak kontroller gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler yük taşımayan tipte olduğundan kaynak dikişinde tespit edilecek süreksizliklerin yorulma dayanımına etkisinin olmayacağı düşünülmektedir. Zira kök değerlendirmesiyle birlikte Şekil 66-a'da gösterilen 70^0 'lık prob tarama alanındaki süreksizliklerin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Malzeme et kalınlık değerinin düşük ve kaynak dikişlerinin birbirine yakın olması sebebiyle kaynak dikişlerinin %100 kontrolü mümkün olmamaktadır. Kök nüfuziyetinin değerlendirilebilmesi için 70^0 'lık proba 3/2 sekme ile muayene gerçekleştirilmiştir. Muayene, yukarıda açıklanan sebeplerden ötürü 4 MHz frekansa sahip 70^0 'lık tek kristalli açılı prob kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mesafe kalibrasyonu EN ISO 7963 standardı kapsamında üretilmiş K2 kalibrasyon bloğu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet ayarı için Teknik 1 yöntemi yani mesafe-genlik eğrisi (DAC) yöntemi seçilmiştir. Transfer düzeltmesi DAC bloğu ve kaynaklı plaka için gerçekleştirilmiş olup 2 dB olarak belirlenmiştir. Kazanç değeri transfer düzeltmesi dahil edilerek 46.5 dB olarak belirlenmiş, kontroller 14 dB ilave edilerek 50.5 dB değerinde gerçekleştirilmiştir.

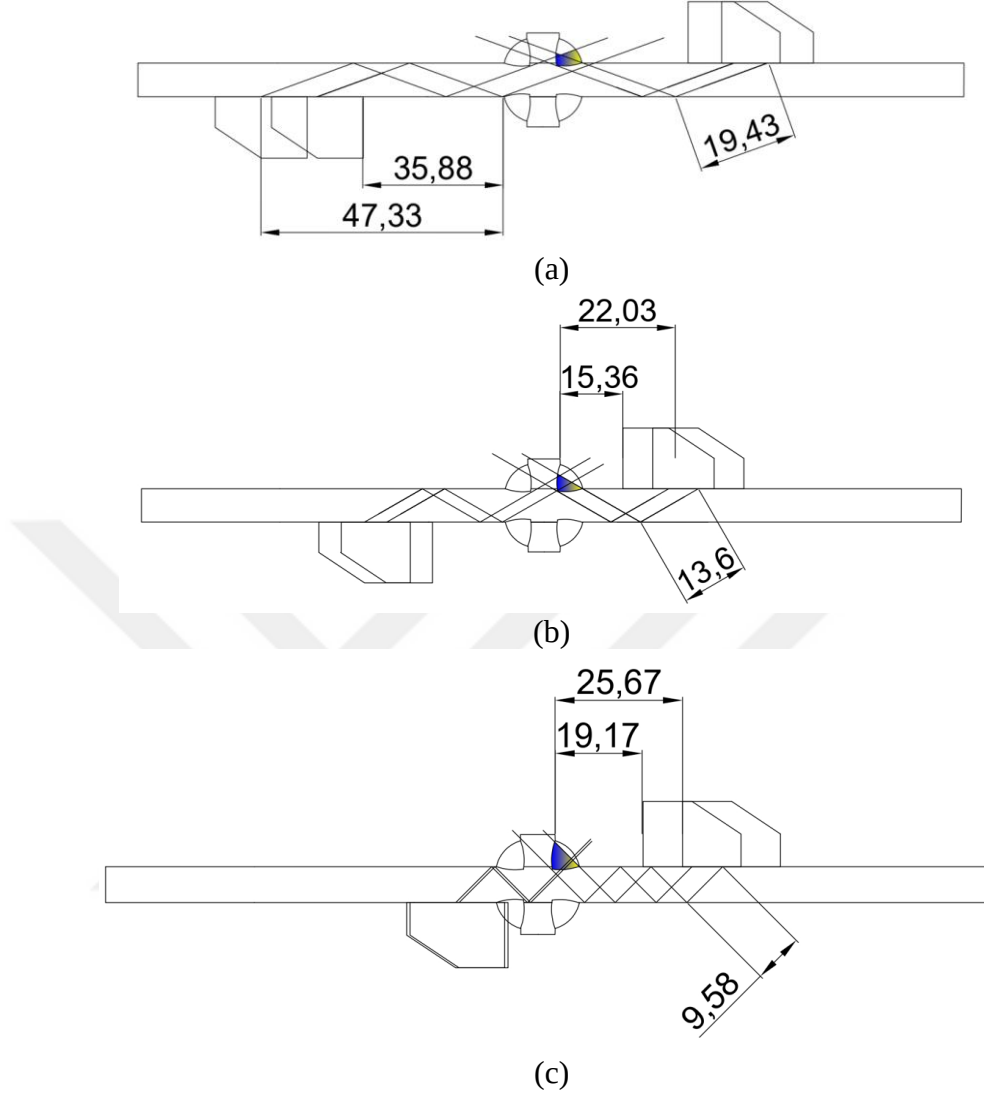


(a)



(b)

Şekil 65. Kaynaklı parçaların ultrasonik muayenesi (a) Ultrasonik muayene sistemi kalibrasyon ve hassasiyet ayarı, (b) Kaynaklı parçaların ultrasonik muayenesi



Şekil 66. Kaynak kökü muayenesi için değerlendirme (a) 70 dereceli proba tarama değerlendirmesi, (b) 60 dereceli proba tarama değerlendirmesi, (c) 45 dereceli proba tarama değerlendirmesi

2.3. Kaynaklı Numunelere Uygulanan Testler

Kaynaklı parçalardan su jeti yöntemi ile kesilerek çıkartılan kaynaklı numuneler yorulma testleri öncesi bazı testlere tabi tutulmuştur. Su jeti kesim yöntemi numunelere ısı girdisi olmaması adına tercih edilmiştir. Su jeti kesim sonrası üç farklı kaynak nüfuziyetine sahip on ikişer adet numune çentik etkisi oluşmaması adına zımparalama işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 67). Kaynaklı numunelere uygulanan testler Tablo 29’da özetlenmiştir.

Kaynaklı plaka 1 kaynak parametresi en düşük, kaynaklı plaka 3 kaynak parametresi en yüksek olan kaynaklı parçalardır. Bu kaynaklı parçalardan su jeti ile kesilerek çıkartılan her bir numune kaynaklı numune (KN) olarak adlandırılmıştır.

Tablo 29. Kaynaklı numunelere uygulanan testler

Kaynaklı numunelere uygulanan testler;	KN'lere uygulanan testler		
	(KN1)	(KN2)	(KN3)
2.3.1. Kaynaklı numune sertlik testi,	1 adet	1 adet	1 adet
2.3.2. Kaynaklı numune çekme testi,	2 adet	2 adet	2 adet
2.3.3. Kaynaklı numune mikro incelemesi,	1 adet	1 adet	1 adet
2.3.4. Kaynaklı numune makro incelemesi,	10 adet	10 adet	10 adet
2.3.5. Kaynaklı numune kaynak nüfuziyeti testi,	10 adet	10 adet	10 adet
2.3.6. Kaynaklı numune kaynak ucu yapı çap ölçümü	10 adet	10 adet	10 adet
2.3.7. Kaynaklı numune gerinim ölçümleri ve doğrulama testi	1 adet	1 adet	1 adet
2.3.8. Kaynaklı numune yorulma testi,	10 adet	10 adet	10 adet
2.3.9. Kırılma yüzeyi inceleme,	2 adet	2 adet	2 adet



(a)

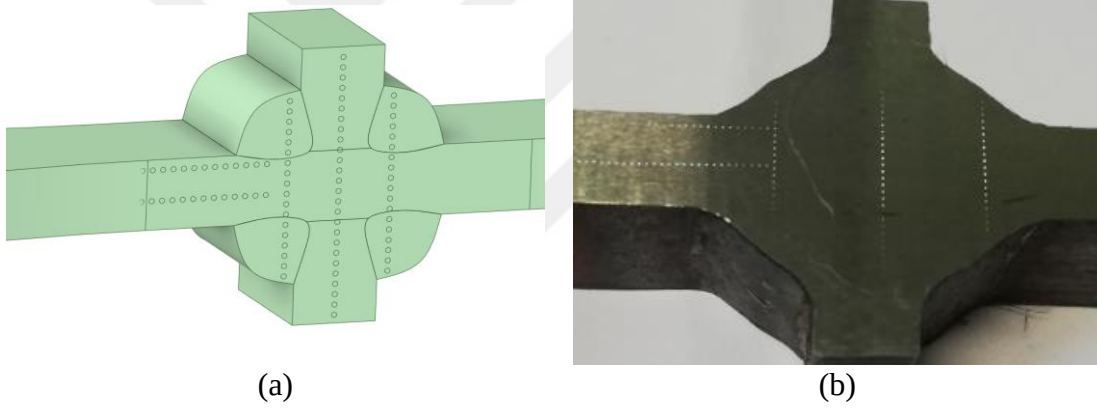


(b)

Şekil 67. Kaynaklı numuneler ve kesim yüzeyi zımparalama (a) Kaynaklı numuneler, (b) Kesim yüzeyi zımparalama

2.3.1. Kaynaklı Numune Sertlik Testi

Farklı kaynak nüfuziyetine sahip kaynaklı numunelerden birer adet numuneye EN ISO 9015-2 (2016) standardı kapsamında mikro sertlik testi uygulanmıştır. Her bir plaka kendi içinde ısı girdisi bakımından eşit bir dağılım gösterdiğinden sadece birer adet numuneye sertlik testi uygulanmıştır. Isı girdisi birbirine yakın olmasına rağmen amper değerindeki artışla birlikte artan kaynak nüfuziyetinin kaynaklı yapı orta bölgesindeki sertlik değerlerine olan etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. 1 kg'lık yüklerle gerçekleştirilen sertlik testi 4 adet kaynak metali, ITAB ve ana metali kapsayacak şekilde 0.5 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden yaklaşık 140 adet sertlik değeri alınmıştır. Sertlik izleri ve oluşan sertlik hatları her bir numune için aynı noktayı sağlayacak şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 68).

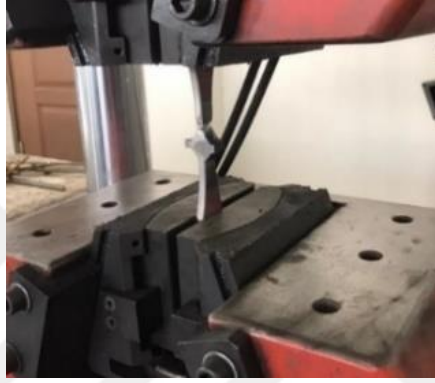


Şekil 68. Kaynaklı numunelerin sertlik testleri (a) Kaynaklı numune sertlik hatları, (b) Sertlik hatları görünümü (Hv 1kg)

2.3.2. Kaynaklı Numune Çekme Testi,

Farklı kaynak nüfuziyet değerine sahip ikişer adet kaynaklı numunenin çekme testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 69). ISO 9018'de (2015) tanımlanmış ÇTTB tipteki kaynaklı bağlantılar yük taşıyan bağlantılardır. Bu doktora çalışmasında yük taşımayan ÇTTB tipte kaynaklı bağlantı seçilmiştir. Bu sebepten bu standardın bazı ilgili maddeleri dikkate alınarak kaynaklı numunelerin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerdeki kopmanın birleşim bölgesinde oluşması adına numuneler, Şekil 67-a'da gösterildiği gibi kesilmiştir. Herhangi bir ısı girdisi ve çentik etkisi oluşmaması adına numuneler su jeti

kesim yöntemiyle kesilmiştir. Numune boyutları hem standardın vermiş olduğu kriterler hem de çekme test cihazı kapasitesi dikkate alınarak seçilmiştir. Kaynaklı numuneler kesildikten sonra yüzeyde çentik ihtimaline karşı tekrardan zımparalanmıştır. Çekme testi parametreleri ISO 6892-1 (2019) referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi öncesi kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bilhassa akma mukavemeti yorulma testlerindeki senaryonun belirlenmesi için önem arz eden mekanik özelliktir. Ayrıca çekme testi ile nüfuziyetin kaynaklı numunelerin akma ve çekme mukavemetlerine olan etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

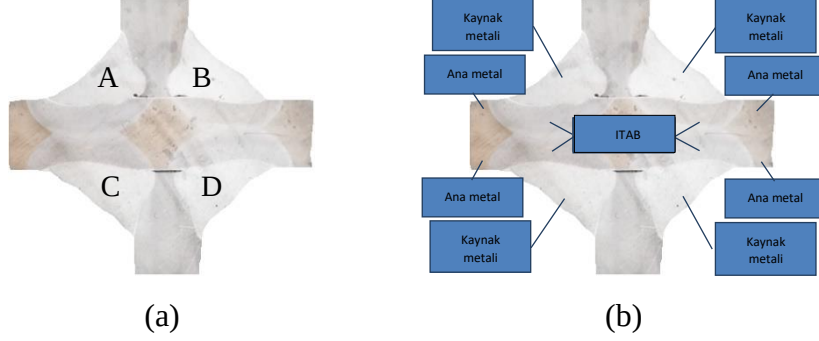


Şekil 69. Kaynaklı numune çekme testi

2.3.3. Kaynaklı Numune Mikro Testi

Kaynaklı numunelerin mikro incelemeleri EN ISO 17639 (2022) standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu standart, makro incelemeyi bir test numunesinin çıplak gözle veya düşük büyütmede (genellikle $\times 50$ 'den az) aşındırma yapılarak veya aşındırılmadan incelenmesi ve mikro incelemeyi bir test numunesinin genellikle $\times 50$ ila $\times 500$ büyütmeli mikroskopla, aşındırma yapılarak veya aşındırılmadan incelenmesi şeklinde tariflemektedir. Kaynaklı numunelerin hem mikroyapılarının incelenmesi hem de kaynak yüksekliği, kaynak boğazı ve kaynak süreksizliklerinin değerlendirilebilmesi için farklı kaynak nüfuziyetine sahip birer adet kaynaklı numune mikro incelemeye tabi tutulmuştur. Mikro inceleme ile ITAB bölgesi, erime çizgisi ve kaynak metalindeki yapıların incelenmesi hedeflenmektedir. Kaynaklı numuneler zımparalama ve parlatma sonrası %3 Nital dağlayıcı ile dağlanıp mikro yapılarının incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

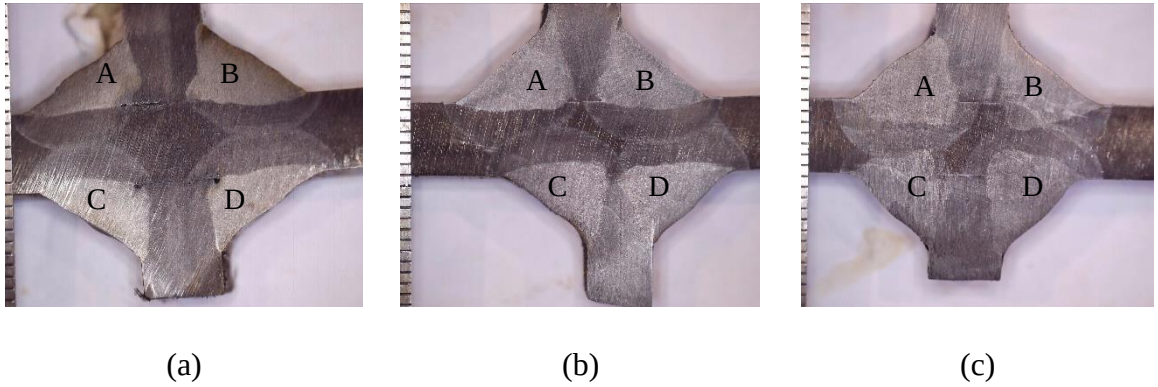
Farklı kaynak nüfuziyet değerine sahip birer adet numunenin kaynak metal, ITAB ve ana metal bölgeleri 50X büyütme ile detaylı incelemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 70).



Şekil 70. Kaynaklı numune mikro inceleme bölgeleri (a) Dağlama sonucu kesit görünümü, (b) Kaynaklı numune detaylı mikro inceleme bölgeleri

2.3.4. Kaynaklı Numune Makro Testi

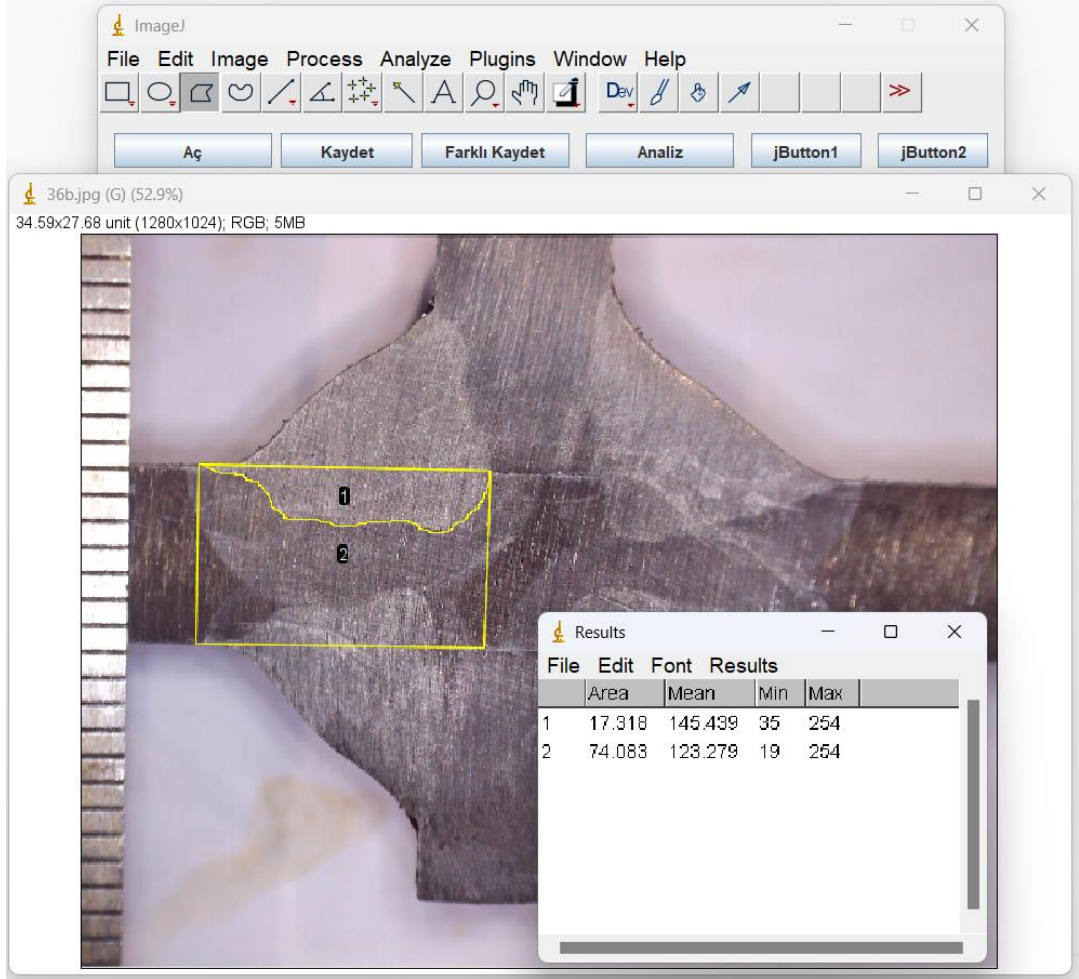
Kaynaklı numunelerin makro incelemesi de EN ISO 17639 (2022) standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Farklı kaynak nüfuziyet değerine sahip onar adet kaynaklı numune 2X büyütme ile incelenmiştir (Şekil 71). Makro inceleme ile kaynak kesitinde tespiti yapılabilen kaynak yüksekliği, kaynak dikişi genişliği, kaynak boğaz kalınlığı ölçümlerinin yanında kaynak kalitesine etkisi olan yetersiz ergime, yetersiz nüfuziyet, yanma oluğu, binme vb. süreksizliklerin değerlendirmesinin daha detaylı yapılması hedeflenmektedir.



Şekil 71. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip kaynaklı numunelerin makro incelemesi (a) Kaynaklı numune1, (b) Kaynaklı numune2, (c) Kaynaklı numune3

2.3.5. Kaynaklı Numune Kaynak Nüfuziyeti Testi

Kaynaklı numunelerin nüfuziyet değerlendirmesi ve ölçümleri için yeni bir değerlendirme önerisi sunulmuştur. Maximum kaynak nüfuziyet derinliğinin et kalınlığına oranı yerine nüfuz eden kaynak metali alanının toplam alana oranını dikkate alan değerlendirme yöntemiyle kaynaklı numunelerin nüfuziyet ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Uzunluk cinsi yerine alan cinsinden yapılan kaynak nüfuziyet değerlendirmeleri çok daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Her bir kaynaklı numunenin kaynak nüfuziyet ölçümleri makro kesit görüntüleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Toplam 30 adet kaynaklı numunenin kaynak nüfuziyet ölçümleri yapılmış olup her bir numunede mevcut olan 4 adet kaynak dikişinin nüfuziyet sonuçları elde edilmiştir (Şekil 72).



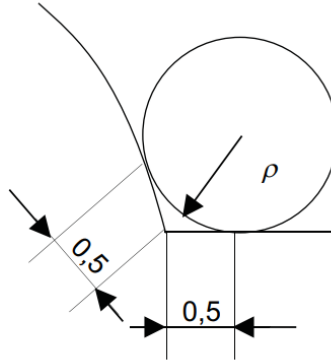
Şekil 72. Kaynak nüfuziyeti ölçümü

2.3.6. Kaynaklı Numune Kaynak Ucu Yarıçap Ölçümü

Kaynak ucu yarıçapı ve kontak açısı değeri kaynaklı numune yorulma dayanımını etkileyen en önemli geometrik parametrelerdendir (Şekil 4). ISO /TR 14345 kontak açısı ve kaynak ucu yarıçap değerinin standart bir kaynak kumpası veya yarıçap ölçer kullanılarak doğrudan ölçülebildiğinden bahsetmektedir. Ayrıca standart, kaynak enine kesit görüntüsünün özellikle 5 ila 10 kat büyütülerek ölçülmesini en hassas ölçüm yöntemi olarak belirtmektedir. Alternatif olarak, kaynak bölgesinin erimiş silikonla tersine modelinin çıkartılması ve silikon modelin kesit görüntüsü üzerinden kaynak ucu yarıçapı ve kontak açısı ölçümlerinin gerçekleştirilebileceğinden bahsetmiştir. ISO/TR 14345 ilgili ölçümlerin yapılması için Ek A kısmında ölçüm yöntemlerini A2 ve A3 metodu olarak tanımlamıştır;

- a. A2 metodu; 1 mesafesindeki teğet çember metodu,
- b. A3 metodu; En düşük yarıçap metodu,

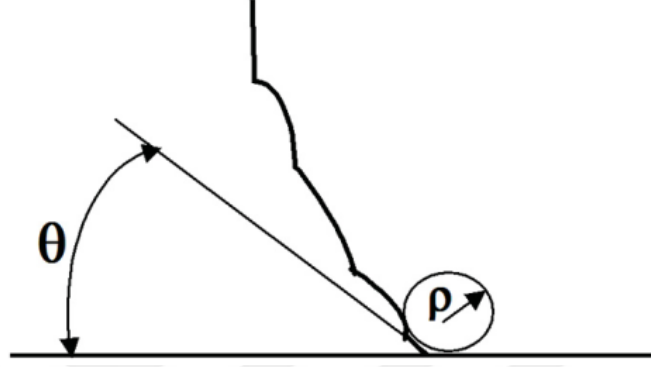
A2 metodu olarak tanımlanmış ilk ölçüm yöntemi, 1 mesafesindeki teğet çemberin ölçüm yöntemidir. Standart, Şekil 73'te gösterilen örnek üzerinden bu ölçüm yöntemini $l=0.5\text{mm}$ örneği üzerinden açıklamıştır.



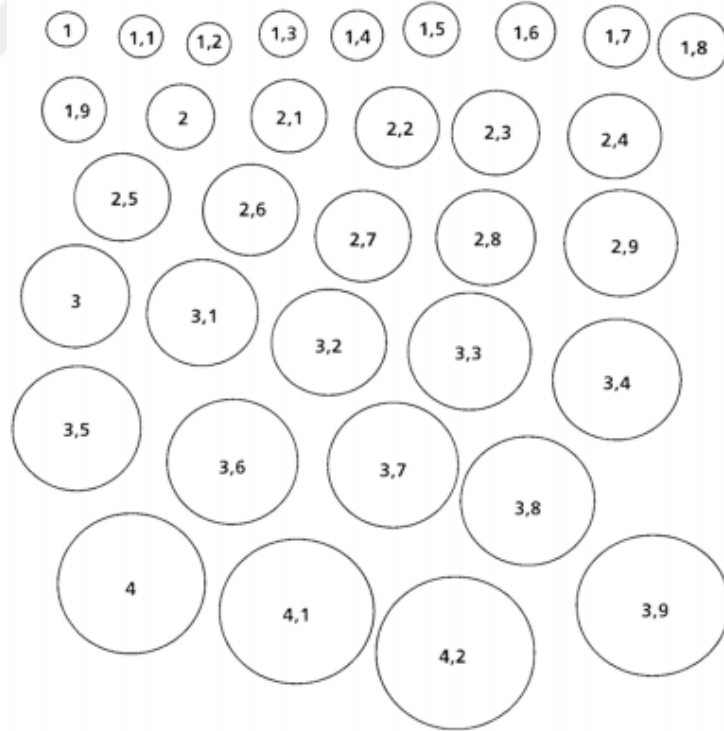
Şekil 73. ISO/TR 14345 A2 ölçüm metodu

A3 metodu ise Şekil 74'te gösterilen kaynak ucu bölgesi üzerine saydam kâğıt üzerine çizilmiş Şekil 75'te gösterilen farklı çaplardaki dairelerin üst üste getirilerek kaynak ucu yarıçapının belirlenmesi metodudur. Kaynak ucu geometrisine uyan en küçük

daire ρ değeri olarak tanımlanmaktadır. Kaynak profil yüzeyi çoğunlukla pürüzlü bir yüzeyden oluşmaktadır. Bu sebepten dairelerin temas işlemi zora sokabilmektedir. Bu sebepten standart, kaynak ve plaka yüzeyine en az üç noktadan temas eden daire ile minimum yarıçapın tespiti belirtmektedir. Ayrıca dairenin kaynak ucuna teğet hale geldiği noktada temas açısını(θ) tanımlamaktadır.



Şekil 74. ISO/TR 14345 A3 ölçüm metodu



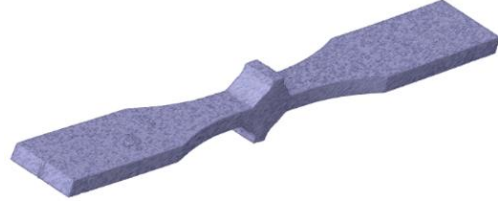
Şekil 75. Kaynak ucu yarıçapını ölçmek için boyutlandırılmış daireler

Standardın, A2 metodunda sadece örnekleme yapması ve A3 metodunda “en az üç noktadan temas eden daire” tanımında noktaların hangi yüzeye kaçar adet temas edeceği hususunda yeterli açıklama yapmaması kaynak ucu yarıçapının ölçümünü zor sokmaktadır.

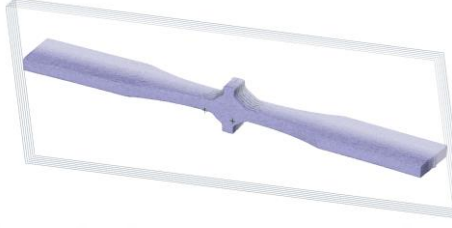
Schubnell ve arkadaşları 2020’de yapmış oldukları çalışma neticesinde optik olarak ölçülen 3 boyutlu verilerden geometrik parametreleri türetmek için beş farklı değerlendirme yöntemi sunmuştur. Yöntemler; eğrilik yöntemi, optimizasyon yöntemi, değerlendirme yöntemi, yarı-otomatik analiz yöntemi ve manuel ölçüm yöntemi olarak adlandırılmıştır. Sunulan bu değerlendirme yöntemlerinin ortak noktası 3 boyutlu verilerin tekli 2 boyutlu kesitlere dönüştürülmesi ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi üzerinedir. Çalışmada beş farklı ölçüm yöntemi ve dört farklı optik ölçüm sistemi ile, sekiz farklı kaynaklı birleşimin ölçümlerini gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, kaynak ucu yarıçapının değerlendirilmesinin ölçüm sisteminin çözünürlüğü ile sınırlı olduğu belirtilmiştir. Eğrilik yöntemi olarak adlandırılan yöntemin, kaynak ucu yarıçapının belirlenmesi için nispeten basit ve güvenilir bir yöntem olabileceği belirtilmiştir (Schubnell, Jung, Le, Farajian, Braun, Ehlers, & Baumgartner, 2020). Eğrilik metodu, geometrik parametrelerin değerlendirilmesi için öncelikle birleşimin optik veya lazer tarayıcı sistemle taranarak nokta bulutunun elde edilmesi, sonrasında nokta bulutundan kaynak yönüne dik düzlemler kesilerek bu düzlemdeki kaynak profili üzerinden ölçümlerin yapılmasını kapsayan bir yöntemdir (Schubnell, Jung, Le, Farajian, Braun, Ehlers, & Baumgartner, 2020; Anthes, Köttgen, & Seeger, 1993; Rainer, 1978; Berge, 1985). Bu kapsamda farklı kaynak nüfuziyet değerine sahip onar adet numunenin 3 boyutlu optik tarama cihazıyla (yaklaşık 40 mikron hassasiyetle) tarama işlemleri gerçekleştirilerek STL dosyaları elde edilmiştir. Eğrilik metodu kullanılarak kaynak profilinde kaynak ucu bölgesindeki minimum yarıçap belirlenmiş ve bu değerler her bir numunenin her bir kesiti için tabloda sunulmuştur. Kaynak ucu yarıçap değerlerinin bulunması ile ilgili süreç Şekil 76’da gösterilmiştir;



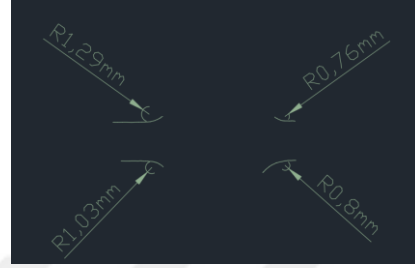
(a)



(b)



(c)



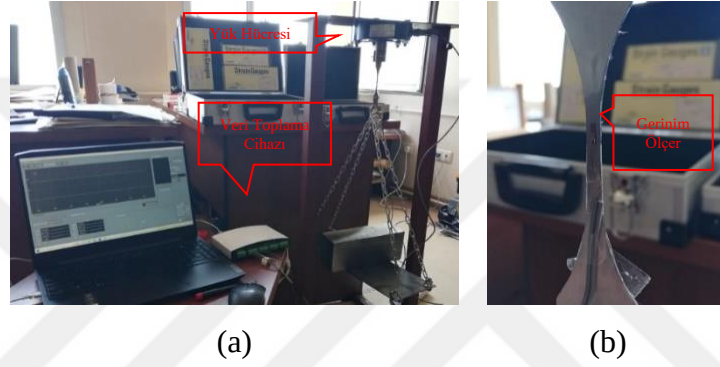
(d)

Şekil 76. Üç boyutlu tarama ile elde edilen nokta bulutu üzerinden kaynak ucu yarıçap ölçümü (a) Kaynaklı numunelerin 3 boyutlu tarama cihazı ile taranması, (b) Tarama sonucu elde edilen nokta bulutu modeli, (c) 1 mm aralıklarla kaynak yönüne dik yüzey atama, (d) Her bir enine kesit kaynak profili üzerinde yarıçap belirleme

2.3.7. Kaynaklı Numune Gerinim Ölçümü ve Doğrulama Testi

Kaynaklı numunelerin ileriki dönemlerde yapılacak olan yapısal hot-spot gerilme analizleri için gerinim ölçümleri öncesi bazı doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yorulma cihazına ilaveten veri toplama sistemi için kullanılan yük hücresi ve veri toplama sistemi KTÜ BAP 08-8765 projesi kapsamında alınmıştır. Veri toplama sistemi, 24 bit ADC, %0.005 FS lineerliğe ve maksimum 1 KHz örnekleme frekansına sahiptir. 4 adet universal analog girişine sahip veri toplama sistemine 3 adet gerinimölçer ve 1 adet yük hücresi bağlanabildiği gibi 4 adet gerinimölçer aynı anda bağlanıp veri toplanabilmektedir. Yük hücresi dinamik ve statik yüklemeleri ölçebilen, 111 kN dinamik yük kapasiteli, %0.05'ten daha düşük hassasiyete sahip yorulma sınıfı yük hücresidir. Doğrulama çalışması 0.8 mm kalınlığındaki çelik malzemeden imal edilmiş çekme çubuğu üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 77). Numune sırasıyla 147 N ve 294 N'luk kuvvetlere denk gelen yüklemelere maruz bırakılmıştır. Uygulanan yükler düzenekte mevcut olan yük hücresi ile veri toplama sistemi üzerinden ölçülmüştür. Kuvvet etkisi sonucu numunelerde

oluşan gerinim değerleri numune üzerine konumlandırılmış gerinim ölçer vasıtasıyla veri toplama sisteminden elde edilmiştir. Bu değerler daha sonra teorik hesap ve Ansys programında gerçekleştirilen analiz sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Tablo 30’da teorik hesap, analiz sonucu elde edilen değerler ve veri toplama sisteminden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Numuneye uygulanan 147 N ve 294 N değerleri veri toplama sistemiyle sırasıyla 163 N ve 321 N değerlerinde ölçülmüştür. Teorik hesap sonucu elde edilen 229 μm ve 459 μm değerleri veri toplama sistemiyle sırasıyla 221 μm ve 443 μm olarak ölçülmüştür.



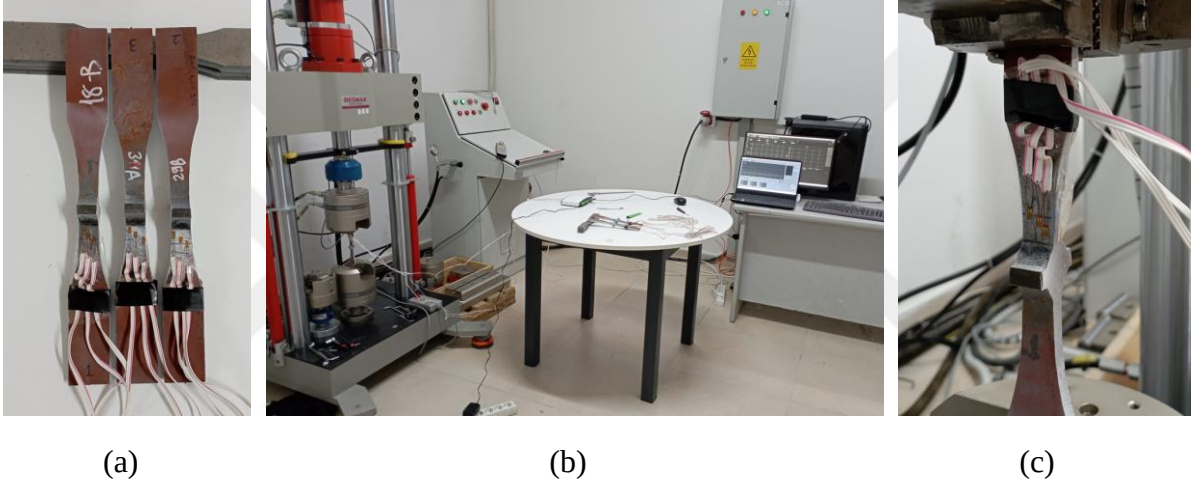
Şekil 77. Gerinim ölçüm deney düzeneği (a) Deney düzeneği, (b) Gerinim ölçer

Deney düzeneğinden elde edilen kuvvet değerleri yaklaşık % 10.8 ve % 9.1 değerinde sapma göstermiştir. Gerinim ölçerlerden elde edilen gerinim değerleri ise yaklaşık % 3.49 ve % 3.48 değerinde sapma göstermiştir. Bu ilk doğrulama testleri çok düşük kuvvet değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Yorulma yük hücresi 111 kN kapasiteye sahip bir yük hücresidir. Doğrulama deneyi için seçilen değerler çok düşük değerler olduğundan sapmaların % 10 mertebelerinde olması doğal karşılanabilmektedir. Numune üzerinden elde edilen gerinim değerleri ise yaklaşık % 3.5 civarında sapma göstermiştir. Bu kapsamda yapısal hot-spot gerilme analizlerinde kullanılacak olan veri toplama sisteminin kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Yapısal hot-spot gerilme analizleri için farklı kaynak nüfuziyetine sahip birer adet numune Şekil 78’de gösterildiği gibi gerinim ölçümlerine tabi tutulmuştur. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip birer adet numunenin hot-spot gerilme değerlerinin belirlenmesi için standardın belirttiği sayıda ve konumda gerinim ölçerler numunelere konumlandırılmış ve gerinim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 30. Test düzeneği ölçüm ve analiz sonuçları

Doğrulama çalışması;	Test girdileri			Sonuçlar
	Kuvvet (N)	Kesit alanı (mm ²)	Elastite modülü (N/mm ²)	Gerinim (μ/m)
Teorik hesap	147			229
(Birinci ve ikinci yükleme)	294			459
Cihazdan alınan ölçüm değerleri	163*	3.2	200000	221*
(Birinci ve ikinci yükleme)	321*			443*

*Cihazdan alınan veriler



Şekil 78. Kaynaklı numune gerinim ölçümleri ve sistemi (a) Gerinim ölçümüne tabi tutulan numuneler, (b) Yorulma test cihazı ve veri toplama düzeneği, (c) Cihaza bağlı numune görünümü

2.3.8. Kaynaklı Numune Yorulma Testi

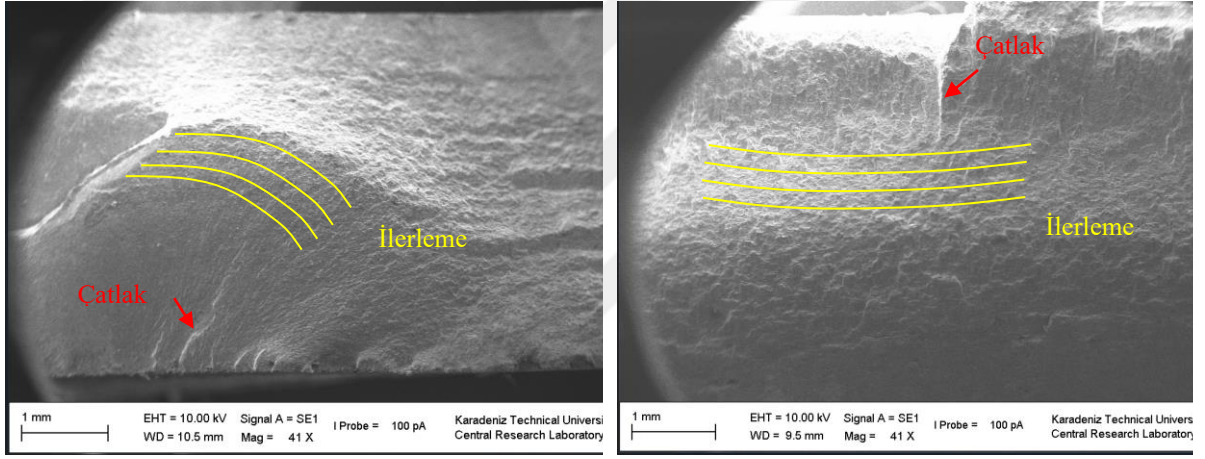
Farklı kaynak nüfuziyetine sahip onar adet kaynaklı numune yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yorulma testi ASTM E 466 (2021) standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yorulma testi, ISO/TR14345 (2012), BS 7608 (2015), UKE tavsiyeleri ve ISO 1099 (2017) standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları yorulma cihazı kapasitesi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Yorulma testleri kuvvet kontrollü gerçekleştirilmiştir. Test dalga formu, sabit genlikli ve sinüzoidal olacak şekilde seçilmiştir. Numuneye uygulanan kuvvet, her enine kesitin merkezinden geçen

uzunlamasına eksen boyuncadır. Kaynak nüfuziyeti, kaynak ucu yarıçapı değerlerinin yorulma dayanımı üzerine olan etkilerini görebilme adına yorulma testlerinin iki farklı genlik değeri üzerinden gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Kaynaklı numunelerden elde edilen akma mukavemeti değerinin %70'ini geçmeyecek şekilde gerilme değerleri belirlenmiş, çalışma tam değişken tekrarlı yükleme ($R=-1$) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin yorulma testlerinde uygulanan kuvvet değerleri, kaynaklı numune çekme testi sonuçları ve kaynaklı numune çekme ve yorulma testi sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Kaynaklı numunelerin testlerinde öncelikli amaç 2 farklı gerilme değeri ile beşer adet numunede yorulma testi gerçekleştirmektir. Lakin kopma gerçekleşmiş ilk dört test sonrası tekrar sayılarının aşırı dağılım göstermemesi sebebiyle bu iki farklı gerilme değeri ile dörder adet numune teste tabi tutulmuştur. Belirlenen bu iki gerilme kaynaklı numunelerin yorulma test sonuçlarından elde edilmiştir. Bu değerler belirlenirken su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş ve eğilme önleyici aparat ile testleri gerçekleştirilen kaynaklı numunelerin S-N eğrisi dikkate alınmıştır. İki milyon tekrar üzerinde kopma gerçekleşmemiş numunelerin maruz kaldığı gerilme (269.9 N/mm^2) değeri kaynaklı numunelere ilk uygulanan değerdir. Ayrıca, bu gerilme değeri kaynaklı numunelerin akma mukavemetinin % 20'sine denk gelmektedir. Bu kapsamda kaynaklı numunelere uygulanacak olan ikinci gerilme değeri kaynaklı numunelerin %20'sine denk 168 N/mm^2 değeri olarak belirlenmiştir. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip dörder adet numune bu iki farklı gerilme değerinde yorulma testine maruz bırakıldıktan sonra birer adet numune farklı gerilme değerlerinde yorulma testine tabi tutulmuştur. KN 1 kaynaklı numuneye uygulanan yaklaşık 404 N/mm^2 'lik gerilme sonucu numunenin 5×10^3 tekrardan daha düşük değerlerde koptuğu tespit edilmiştir. Bu sebepten diğer numuneler kaynaklı numunelerin akma mukavemetinin %10'una tekabül eden gerilme değerlerinde yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.9. Kırılma Yüzeyi İnceleme

Kırılma yüzeyi incelemesi çoğunlukla statik veya dinamik yük altında çalışan parçaların kopmaları sonrası kesit yüzeylerinin makro ve mikro büyütmelemlerle incelemesini kapsamaktadır. Yüzey incelemesi sonucu malzeme ve/veya yapının gevrek-sünek kırılma durumunun değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Bunun haricinde dinamik veya tekrarlı bir yüklemeye maruz kalan yapılarda, uygulanan bu yükler neticesinde kırılma ve/veya kopma

gerçekleşmişse hasarın ne tip bir kırılmaya işaret ettiği kırılma yüzeyi incelemesi ile de belirlenebilmektedir. Bu kapsamda kaynaklı ve kaynaklı numunelerden farklı gerilme genlik değerinde yorulma testi sonucu kırılması/kopması gerçekleşmiş birer adet numune kırılma yüzeyi incelemesine tabi tutulmuştur. İncelemeler hem makro hem de mikro düzeyde yapılmıştır. Makro incelemeler optik mikroskop altında, mikro incelemeler ise taramalı elektron mikroskop (SEM) altında gerçekleştirilmiştir. SEM’den alınan görüntülerle çatlak başlangıç bölgesi ve ani kırılma bölgeleri gösterilmiştir (Şekil 79). Çatlak başlangıç bölgesi öncelikle 35X-50X aralığında büyütmeyle ardından 750X ile 2000X büyütmeyle incelenmiştir. Bal peteği yapısını anımsatan ani kırılma bölgelerinden 1000X büyütmede görüntüler elde edilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 79. Kaynaklı ve kaynaklı numune kırılma yüzeyi görüntüleri (a) Kaynaklı numune kırılma yüzeyi görüntüsü, (b) Kaynaklı numune kırılma yüzeyi görüntüsü

2.4. Kaynak İşlemleri

Plakaların kaynak işlemleri MAG gazaltı kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Farklı kaynak nüfuziyetleri elde edilmesi adına plakalar 3 farklı kaynak parametresi ile kaynaklanmıştır. Amperin kaynak profilinde nüfuziyeti etkilemesi, voltajın da kaynak profilinde dikişi genişliğini etkilemesi üzerine ön parametre çalışması yapılarak 3 farklı numunenin kaynaklanması için gereken ideal kaynak parametreleri tespit edilmiştir. Kaynak parametreleri her bir plaka için Tablo 31’de verilmiştir.

Tablo 31. Kaynak parametreleri

Kaynaklı parça no	Paso sayısı	Kaynak Yöntemi	Tel çapı (mm)	Akım (I)	Voltaj (V)	İlerleme Hızı (mm/sn)	Termal Katsayı	Isı Girdisi (kJ/mm)
1	1	135	1.2	170-185	24-24.5	4.82	0.80	0.68-0.75
	2					5.06	0.80	0.64-0.72
	3					5.13	0.80	0.64-0.71
	4					5.19	0.80	0.63-0.70
2	1			210-230	25.5-26	5.06	0.80	0.85-0.94
	2					5.71	0.80	0.75-0.84
	3					5.80	0.80	0.74-0.83
	4					5.63	0.80	0.76-0.85
3	1			250-270	26.5-27	7.14	0.80	0.74-0.82
	2					7.41	0.80	0.72-0.79
	3					7.27	0.80	0.73-0.80
	4					7.55	0.80	0.70-0.77

Kaynak işlemleri ile ilgili gerçekleştirilen tüm süreçler EN ISO 15614-1 (2019) standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kaynak öncesi, sırası ve sonrasında gerçekleştirilen izlemeler, kontroller, tahribatsız ve tahribatlı testler bu standardın atıfta bulunduğu ilgili standartlar kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işlemi için tel çapı 1.2 mm olarak seçilmiştir. Kaynak teli minimum 420 N/mm² akma mukavemetine sahip alaşımsız kaynak telidir. Kaynak teli ile ilgili kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 32’de verilmiştir. Zırh sacı akma mukavemeti 1250 N/mm² değerlerinde TMC’ten üretilmiş çeliklerdir. Akma mukavemeti zırh sacı akma mukavemeti değerlerine yakın olan ilave malzemeler çoğunlukla kaplama ve dolgu kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu durumda kaynak bölgesi birleşimi yeterli sünekliliği sağlayamama durumu söz konusu olabilmektedir. Bu sebepten birleşim kaynakları için genellikle sertlik ve akma mukavemeti daha düşük, yüzde uzaması ana metale oranla daha yüksek değerlere sahip kaynak teli kullanılmaktadır. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklere ilaveten östenitik paslanmaz çelikler de birleşim tipi kaynaklı yapılarda tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada yük taşımayan ÇTTB tipte kaynaklı birleşim tercih edilmiştir. Yük taşıyan kaynaklı birleşimlerde nüfuziyet artışı ile çekme ve yorulma dayanımında artış söz konusudur. Bu durum yük taşımayan bağlantılarda belli değildir. Kaynak nüfuziyetinin artışı ana metal bölgesini hacimsel olarak azaltmaya sebebiyet vereceğinden nüfuziyet artışıyla yorulma dayanımının nasıl değişeceğinin deneysel olarak belirlenmesi

hedeflenmiştir. Ayrıca kaynak dikişi yük taşımadığı için kaynak teli seçimi yüzde uzama dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 32. Kaynak teli kimyasal ve mekanik özellikleri

TS EN ISO 14341-A G3Si1					
Kimyasal Kompozisyon	C	Si	Mn	P	S
	0.08	0.85	1.45	< 0.010	<
Mekanik Özellikler	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Çentik Darbe Enerjisi, (J) ISO-V/- 30°C,	Uzama L ₀ =5d ₀ (%)	
	Min.420	500-640	Min.47J	Min.22	

Kaynak işlemi sırasında kullanılan koruyucu gazlar, saf veya karışım gazı olabilmektedir. Koruyucu gaz seçimi kaynak dikişi profili, kaynak kalitesi ve mukavemeti için önem arz etmektedir. Ayrıca koruyucu gazın karışım gazı olması durumunda kullanılan koruyucu gazın cinsi ve yüzdesi kaynak nüfuziyetinde önemli etki göstermektedir. Bu kapsamda MAG kaynak işlemi için koruyucu gaz ISO 14175 (2008) standardı kapsamında M25 karışım gazı olarak seçilmiştir. Karışım gazı muhteviyatı Tablo 33'te verilmiştir.

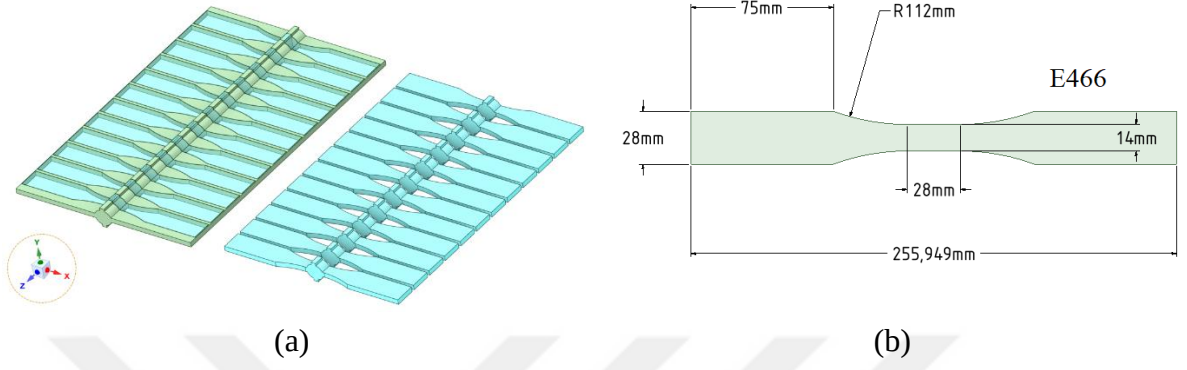
Tablo 33. Koruyucu gaz bileşimi

Koruyucu gaz grubu	CO ₂	O ₂	Ar
M25	5<CO ₂ <15	3<O ₂ <10	Ana muhteva

2.4.1. Kaynaklı Numunelerin Oluşturulması

Kaynaklı numune boyutları ASTM E 466 (2021) ve UKE'nin tavsiye ettiği kılavuz ve yorulma test cihazının kapasitesi dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil 80). Kaynak işlemi öncesi kaynak bölgeleri zımparalanarak plakalar üzerindeki astar tabaka alınmıştır. Kaynak işlemi sonrası numuneler açık ortamda soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sonrası gerçekleştirilen tahribatsız muayene testlerine binaen kaynaklı parçalar su jeti ile kesilerek kaynaklı numuneler çıkartılmıştır. Su jeti kesimde ısı girdisi olmaması bu kesim

yönteminin tercih sebebi olmuştur. Kesim sırasında ısı girdisinin kesim yüzeylerinde yapısal dönüşümleri tetikleme ve yüzeysel sertlik değerlerinde değişikliğe sebep olma ihtimali söz konusudur. Bu sebepten kesim işleminde su jeti yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 80. Kaynaklı parça kesim şeması ve kaynaklı numune ebatları (a) Kaynaklı parçadan kaynaklı numune çıkartma, (b) Kaynaklı numune ebatları

3. BULGULAR

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Her bir deneysel çalışma sonucu elde edilen bulgular aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

3.1. Plakalara Uygulanan Testlerden Elde Edilen Bulgular

Deney öncesi deney malzemesinin doğrulanması önem arz eden bir konudur. Zira deney malzemesinin minimum gereksinimleri sağlayamaması deney sonuçlarının sağlıklı değerlendirilememesi ile sonuçlanacaktır. Bu sebepten deneylere başlamadan önce malzeme doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Kimyasal Analiz Bileşimi

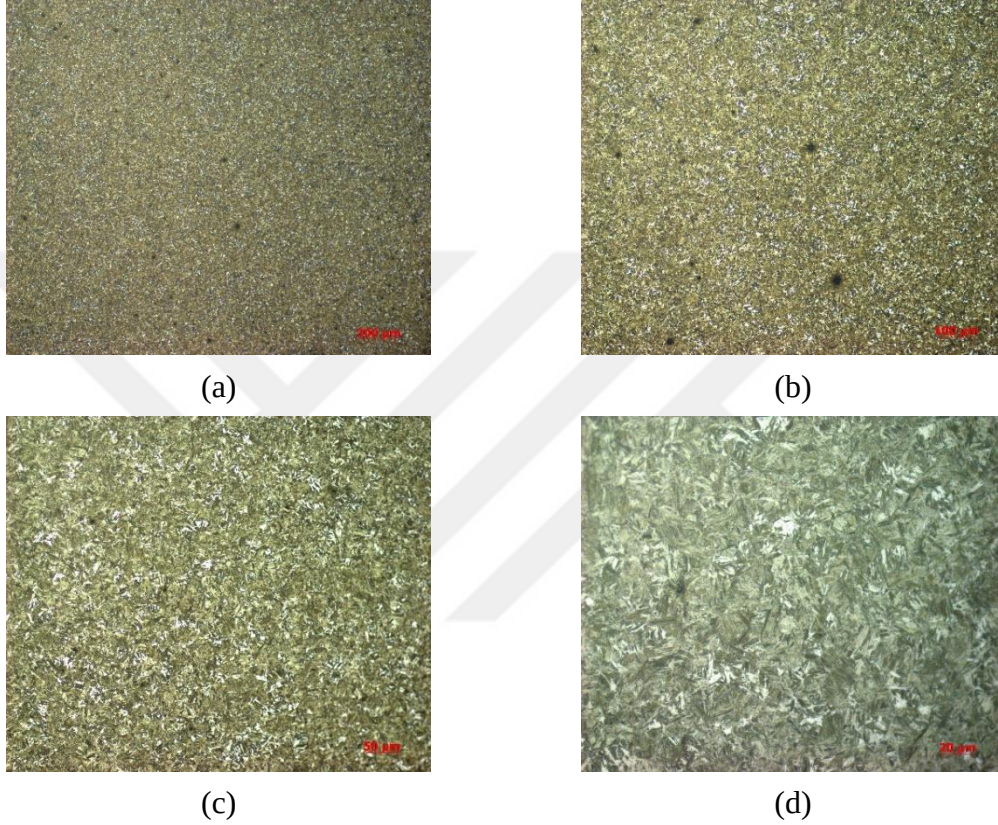
Kimyasal analiz sonuçları Tablo 34'te verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları hem MIL-DTL-46100E (2008) standardı hem de zırh sacı üretici firmanın vermiş olduğu ürün kataloğundaki sınırların içerisinde yer almaktadır. Karbon eşdeğeri hesaplamalarında EN 1011-2 (2001) standardı dikkate alınmıştır. Elde edilen kimyasal analiz testi sonuçlarına göre test malzemesinin karbon eşdeğeri 0.63'tür. Bu değerlere sahip malzemelerin kaynak işlemleri için özel önlemlerin alınması gerekebilmektedir. Lakin bu çalışmada seçilen birleşim tipinde kaynak dikişlerinin birbirine çok yakındır. Bir sonraki paso bir önceki pasoya temper etkisi oluşturduğundan bu çalışma kapsamında herhangi bir özel önlem almaya gerek kalmamıştır.

Tablo 34. Deney malzemesi kimyasal analiz sonuçları

Alaşım Elementi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Ölçüm sonucu	0.269	0.510	0.980	0.030	0.001	0.600	0.400	0.242	0.002

3.1.2. Metalografi Testinden Elde Edilen Bulgular

Dağlama sonrası gerçekleştirilen incelemeler neticesinde Şekil 81’de kaynaklız plakadan alınmış malzeme iç yapısının görüntüleri farklı büyütme oranlarında verilmiştir. 50X büyütme oranındaki Şekil 81-d resminde martenzitik yapı net olarak görölmektedir.



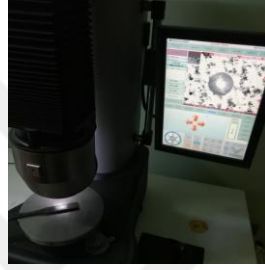
Şekil 81. Malzeme iç yapı görüntüleri (a) 5X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (b) 10X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (c) 20X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (d) 50X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü

3.1.3. Sertlik Testinden Elde Edilen Bulgular

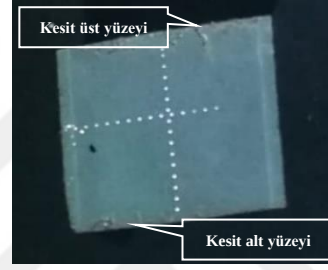
Plaka üzerinden ve kesitten alınmış sertlik değerleri Tablo 35 ve Şekil 82’de verilmiştir. Değerler hem MIL-DTL-46100E (2008) standardı hem de zırh sacı üretici firmanın vermiş olduğu ürün kataloğundaki sınırların içerisinde yer almaktadır. Kesit yüzeyi ve kesit orta bölgelerindeki sertlik değerleri malzemenin tüm kesiti boyunca su verme ve temperleme işleminin ideal olarak gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Tablo 35. Plakaların Brinell ve Vickers sertlik değerleri

Plaka no				Brinell Sertlik Değeri (HBW)										
				Sertlik Değeri1			Sertlik Değeri2			Sertlik Değeri3			Ortalama	
Plaka no1				490			494			492			492	
Plaka no2				494			495			490			493	
Plaka no3				496			491			489			492	
Vickers Sertlik Değeri (Hv 1kg)														
Kesit üst yüzey bölgesi				Kesit orta yüzey bölgesi				Kesit alt yüzey bölgesi				Ortalama		
532	516	502	537	497	520	513	520	511	495	518	528	545	518	



(a)



(b)

Şekil 82. Sertlik alınan bölgeler (a) Brinell sertlik ölçümü (b) Vickers sertlik ölçümü

3.1.4. Ultrasonik Muayeneden Elde Edilen Bulgular

Ultrasonik muayene sonucu plakalarda herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır. Kontrol süreçleri ve kontrol sonuçlarıyla ilgili görseller Şekil 83'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 83. Plakaların laminasyon kontrolü ve sonuçları (a) 50 mm mesafe aralığında arka duvar yankısı ve DGS eğrisi, (b) 25 mm mesafe aralığında tarama sonuçları

3.1.5. Çekme Testinden Elde Edilen Bulgular

3 adet kaynaklı çekme çubuğundan elde edilen değerler Tablo 36’da verilmiştir. Malzeme belirgin akma vermemekle birlikte değerlerin zırh sacı üretici firmanın vermiş olduğu ürün kataloğundaki sınırların içinde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 36. Çekme testi sonuçları

Kaynaklı numune no	Çekme Testi Sonuçları		
	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama L ₀ =5d ₀ (%)
Kaynaklı numune 1	1365	1780	10.5
Kaynaklı numune 1	1338	1745	10.4
Kaynaklı numune 1	1345	1760	10.4

3.1.6. Yorulma Testinden Elde Edilen Bulgular

Yorulma testleri öncelikle lazer kesim yöntemiyle elde edilmiş numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde akma mukavemeti 900 MPa’dan fazla olan malzemelerin yorulma testlerinde seçilen üst kuvvet değerleri genellikle malzeme akma değerinin % 60’larına denk geldiği görülmektedir (Ulewicz, Novy, Mazur, & Szataniak, 2014; Ulewicz, Szataniak, & Novy, 2014; Ulewicz, Szataniak, & Novy, 2014). Bu çalışmada yorulma eğrisi için seçilen ilk değerler akma gerilmesinin % 90’ı ve %70’ine denk gelen kuvvetler olmuştur. Bu değerlerde gerçekleştirilen testler sonucu numuneler 10³ tekrar sayısından düşük değerlerde kopmuştur. Bu kapsamda yorulma eğrisi için seçilen kuvvet değerleri akma gerilmesinin % 50, %40, %30 %20 ve %10’una tekabül edecek şekilde belirlenmiştir. Isı girdisini düşük tutabilme adına numuneler lazer kesim yöntemiyle çıkartılmıştır. Numunelerin yorulma testleri sırasında eğilme önleyici aparat kullanılmamıştır. Fakat akma gerilmesinin %50’sine denk gelen kuvvetle gerçekleştirilen testlerde 2 adet numune eğilme önleyici aparatla teste tabi tutulmuştur. Standart ve dokümanlar ikincil eğilme etkisinin dikkate alınmasını vurgulamakta ve gerekli görüldüğü durumlarda bir düzeltme katsayısının kullanılmasına işaret etmektedir. Akma gerilmesinin %50’sine denk gelen kuvvetle gerçekleştirilen testlerde eğilme önleyici aparat kullanımı ile

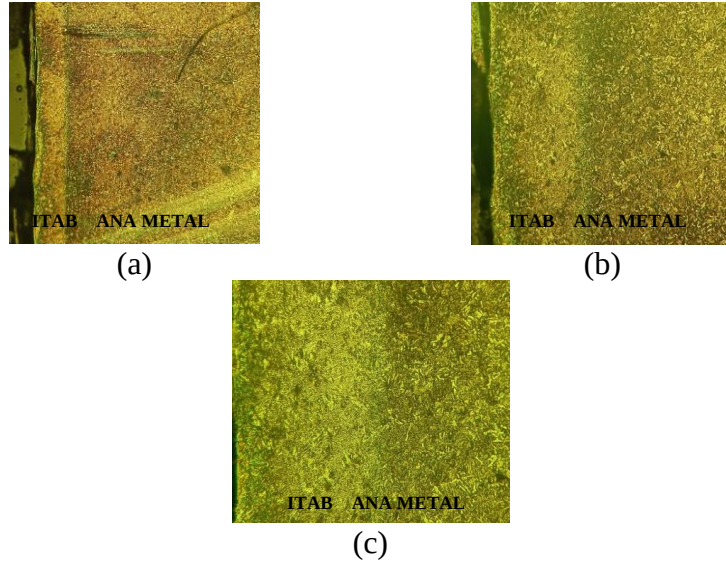
tekrar sayısının %30 kadar artış gösterdiği tespit edilmiştir. Uygulanan kuvvet değerleri düştükçe tekrar sayısındaki yükselişin çok daha arttığı tespit edilmiştir. Eğilme önleyici aparat standartların tavsiyesi gereği numuneyle arasında politetrafloretilen malzeme ile numunenin cıvatalı bağlantı yardımıyla sıkılarak ikincil eğilme gerilmelerinin oluşmasını önleme amaçlıdır (şekil 61-b).

Her ne kadar oksigaz ya da plazma kesim yöntemlerine nazaran lazer kesim yönteminin ısı girdisi çok daha düşük olsa da kesim yüzeyinde yapısal dönüşüme sebebiyet vermektedir. Bilhassa TMC malzemelerde bu dönüşüme daha da dikkat edilmesi gerekmektedir. Lazer kesim yüzeyi incelendiğinde bölgenin bir kaynaklı yapı gibi davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Kesim yöntemi etkisini de görebilme adına kaynaklı numunelerin yorulma testleri için su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş numunelerin de yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneylerine başlamadan önce yapılan doğrulama çalışmalarında bilhassa yüksek kuvvetlerde numunelerde eğilme tespit edilmiştir. Bu sebepten su jeti kesim numunelerinin yorulma testleri hem eğilme önleyici aparatlı hem de aparatsız şekilde gerçekleştirilmiştir. ISO TR 14345 (2012), BS 7608 (2015) vb. yorulma testi ile ilgili yayımlanmış standart ve kılavuzlar deney sırasında oluşan bu ikincil eğilme gerilmenin dikkate alınmasını önemle vurgulamaktadır. Bunun için kılavuz ilave gerilme büyütme faktörünün uygulanması gerektiğini de belirtmiştir. Bu kapsamda su jeti kesim numunelerinin yorulma testleri hem eğilme önleyici aparatlı hem de aparatsız şekilde gerçekleştirilmiştir. BS ISO 1099 (2017) eğilme önleyici aparat ile ilgili bilgiler sunmuştur. Standartın vermiş olduğu öneriler dikkate alınarak eğilme önleyici aparatı imal edilmiştir. Lazer kesimle elde edilmiş kaynaklı numunelerin yorulma testi sonuçları Tablo 37’de verilmiştir. Akma gerilmesinin %50’sine denk gelen kuvvetlerde eğilme önleyici aparat kullanılması sonucu ikincil gerilmelerin önlenmesi pek sağlanamamıştır. Fakat test sırasında uygulanan kuvvet değerinin düşmesi ile aynı kuvvet değerinde eğilme önleyici aparat kullanılan ve kullanılmayan numunelerin tekrar sayısındaki fark %30 değerinin çok daha üstündedir. Bu kapsamda düşük kuvvet değerlerinde gerçekleştirilen testlerde eğilme önleyici aparatın ikincil eğilme gerilmesinin oluşmasını daha iyi engellediği sonucuna varılmıştır. Lazer kesim, haddelenmiş sacların kesimi için sıklıkla tercih edilen bir kesim yöntemidir. Oksijen ve plazma kesime oranla çok daha dar bir ısı etki bölgesi oluştursa da yapılan yüzey incelemelerinde ısı etkileri sebebiyle malzeme iç yapısında değişimler gözlemlenebilmektedir.

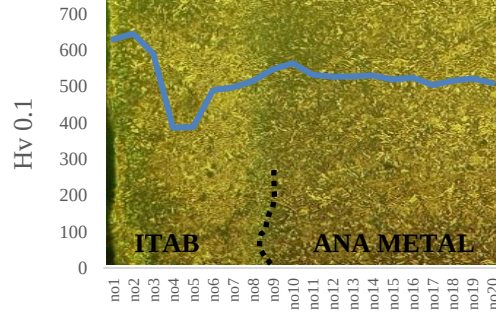
Tablo 37. Lazer kesim kaynaklı numune yorulma testi sonuçları

Numune tipi	Uygulanan kuvvet (kN)	Kesitteki gerilme (N/mm ²)	Kesitte elde edilen gerilme malzeme akma mukavemetinin	Test frekansı (Hz)	Tekrar sayısı	Eğilme önleyici aparat	Numune durumu	Sonuç
Kaynaklı numune (t:4.2mm, w:10mm, l ₀ :20mm)	27.5	674.7	%50'si	5	23049	Yok	Lazer kesim	Koptu
	27.5	674.7	%50'si		19000	Yok		Koptu
	27.5	674.7	%50'si		28540	Var		Koptu
	27.5	674.7	%50'si		26451	Var		Koptu
	22.0	539.7	%40'ı		47049	Yok		Koptu
	22.0	539.7	%40'ı		52009	Yok		Koptu
	22.0	539.7	%40'ı		51049	Yok		Koptu
	16.5	404.8	%30'u		99549	Yok		Koptu
	16.5	404.8	%30'u		55549	Yok		Koptu
	16.5	404.8	%30'u		100549	Yok		Koptu
	10.9	264.5	%20'si		338560	Yok		Koptu
	10.9	264.5	%20'si		277549	Yok		Koptu
	10.9	264.5	%20'si		322049	Yok		Koptu
	5.5	135.0	%10'u		2758064	Yok		Kopmadı
	5.5	135.0	%10'u		2125149	Yok		Kopmadı

Şekil 84 lazer kesim sonrası kesim yüzeyindeki yapı değişimini ortaya koymaktadır. Ayrıca yapılan sertlik ölçümü sonucu sertlik değerlerinde öncelikle artış, sonrasında malzeme sertliğinden daha düşük değerlere sertlik azalışı ve ısı etki bölgesinden uzaklaştıkça malzeme sertliğine doğru bir artış tespit edilmiştir (Şekil 85). Sertlik testi (Hv 0.1) kesit kenarından başlanıp 0.2mm aralıklarla yapılmıştır.



Şekil 84. Lazer kesim sonrası iç yapı görüntüsü (a) 5X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (b) 10X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü, (c) 20X büyütmede elde edilen iç yapı görüntüsü



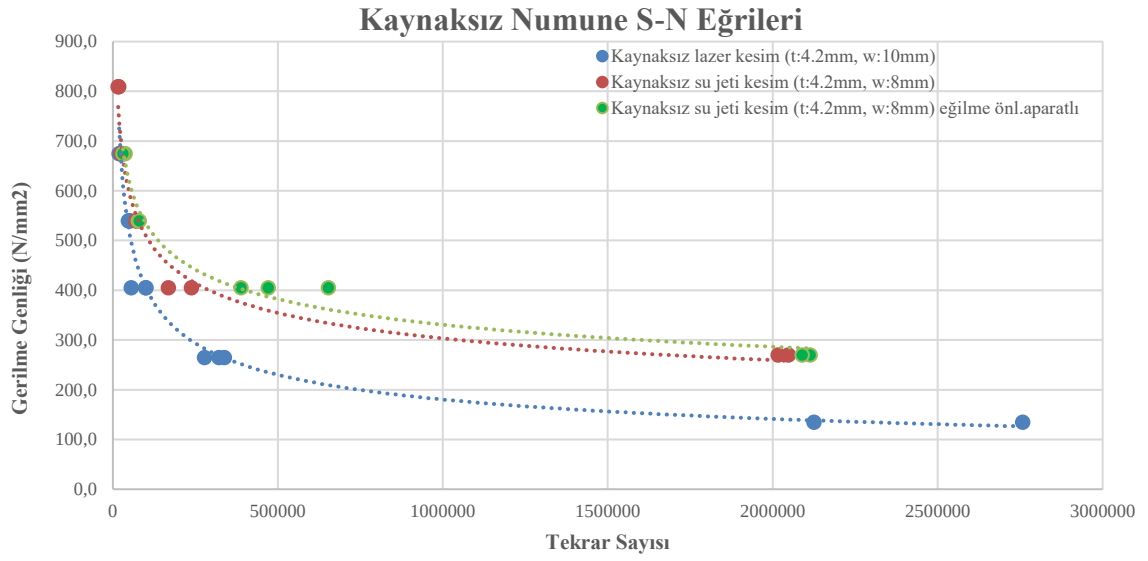
Şekil 85. Lazer kesim yüzeyi Vickers sertlik testi sonuçları

Lazer kesim yöntemiyle elde edilmiş kaynaklı numunelerin yorulma testleri sonrası su jeti yöntemiyle kesilmiş numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler eğilme önleyici aparatsız ve aparatlı olarak yürütülmüştür. Burada ikincil eğilme gerilmesinin etkisinin incelenmesi ve bu etkinin S-N eğrisi ile ortaya konması hedeflenmiştir. Tablo 38’de kaynaklı numunelerin eğilme önleyici aparatsız ve aparatlı yorulma test sonuçları mevcuttur.

Tablo 38. Su jeti kesim kaynaklı numune yorulma testi sonuçları

Numune tipi	Uygulanan kuvvet (kN)	Kesitteki gerilme (N/mm ²)	Kesitte elde edilen gerilme malzeme akma mukavemetinin	Test frekansı (Hz)	Tekrar sayısı	Eğilme önleyici aparat	Numune durumu	Sonuç
Kaynaklı numune (t:4.2mm, w:8mm, l _o :10mm)	26.8	809.0	%60'ı	5	18049	Yok	Su jeti kesim	Koptu
	26.8	809.0	%60'ı		16049			Koptu
	22.4	674.7	%50'si		25049			Koptu
	22.4	674.7	%50'si		28149			Koptu
	17.9	539.7	%40'ı		74049			Koptu
	17.9	539.7	%40'ı		69149			Koptu
	13.4	404.8	%30'u		238049			Koptu
	13.4	404.8	%30'u		168049			Koptu
	9.0	269.9	%20'si		2048113			Kopmadı
	9.0	269.9	%20'si		2016449			Kopmadı
Kaynaklı numune (t:4.2mm, w:8mm, l _o :10mm)	22.4	674.7	%50'si	5	37049	Var	Su jeti kesim	Koptu
	22.4	674.7	%50'si		30549			Koptu
	17.9	539.7	%40'ı		77049			Koptu
	17.9	539.7	%40'ı		80049			Koptu
	13.4	404.8	%30'u		470598			Koptu
	13.4	404.8	%30'u		389049			Koptu
	13.4	404.8	%30'u		653549			Koptu
	9.0	269.9	%20'si		2114049			Kopmadı
	9.0	269.9	%20'si		2089149			Kopmadı

Tablo 37 ve 38 incelendiğinde kesim yöntemi ve ikincil eğilme gerilmesinin yorulma ömrüne etkisi net bir şekilde görülmektedir. Kırılan numunelerin yüzeyi incelendiğinde tüm numunelerin kesim yüzeyi olmayan yüzeyden kırılmaya başladığı görülmektedir. Lazer yöntemi ile kesilmiş numunelerin yorulma dayanımlarına bakıldığında su jeti kesim numunelerinden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Yorulma dayanımındaki bu düşüşün sebebi kuvvetle ihtimal kesim yüzeyinde ısı etkisi sonucu oluşan yapısal dönüşümdür. Şekil 86’da lazer kesim, eğilme önleyici aparatsız su jeti kesim ve eğilme önleyici aparatlı su jeti kesim numunelerinin mukayesesi verilmiştir.

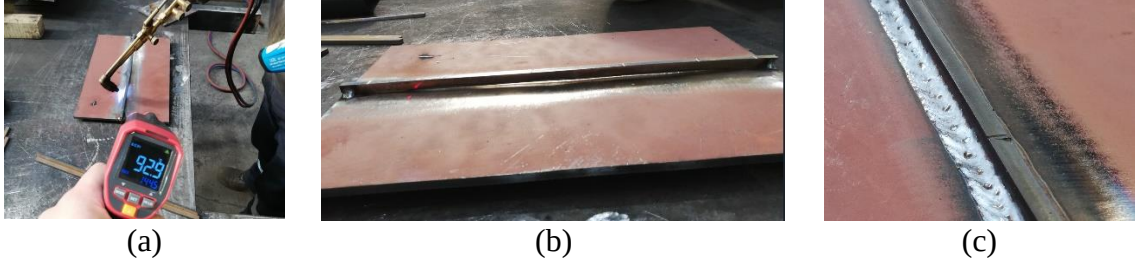


Şekil 86. Kaynaksız numune S-N eğrileri

3.2. Kaynaklı Parçalara Uygulanan Testlerden Elde Edilen Bulgular

3.2.1. Kaynaklı Parça Görsel Muayenesinden Elde Edilen Bulgular

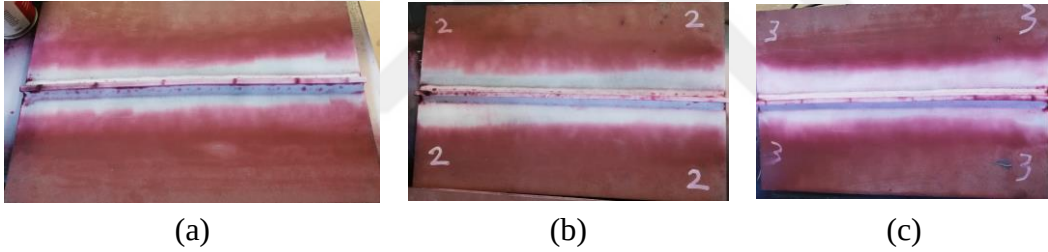
Görsel muayene EN ISO 17637 (2017) standardı kapsamında gerçekleştirilmiş olup süreksizlik değerlendirilmesi EN ISO 5817 (2023) standardı B kalite sınıfına göre gerçekleştirilmiştir (Şekil 87). Kaynak dikişlerinde herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.



Şekil 87. Kaynaklı parça görsel muayenesi (a) Kaynak öncesi ön ısıtma, (b) Kaynak öncesi hizalama ve çarpılma kontrolleri, (c) Kaynak sonrası kaynak dikişi kontrolleri

3.2.2. Kaynaklı Parça Penetrant Muayenesinden Elde Edilen Bulgular

Kaynaklı parçaların uç kısımları başlama ve bitiş bölgeleri içerdiğinden değerlendirmeye alınmamıştır. Muayene sonucu kaynaklı parçaların kaynak dikişleri ve ITAB bölgelerinde herhangi bir belirtiyeye rastlanmamıştır (Şekil 88).



Şekil 88. Kaynaklı parça penetrant muayene sonuçları (a) Kaynaklı parça no 1 penetrant muayene sonucu, (b) Kaynaklı parça no 2 penetrant muayene sonucu, (c) Kaynaklı parça no 3 penetrant muayene sonucu

3.2.3. Kaynaklı Parça Ultrasonik Muayenesinden Elde Edilen Bulgular

Bu muayenede amaç varsa kaynak kökündeki yetersiz nüfuziyetlerin tespit edilmesidir. Yetersiz ergime veya diğer süreksizlik tiplerinin incelemesi yapılmamıştır. Kaynak parametresi en düşük olan 1 numaralı kaynaklı parçada yetersiz nüfuziyet kaynak dikişlerinin belirli bölgelerinde tespit edilmiştir.

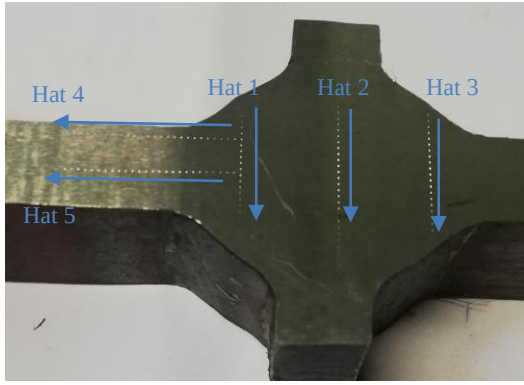
3.3. Kaynaklı Numunelere Uygulanan Testlerden Elde Edilen Bulgular

Kaynaklı parçalardan su-jeti kesim yöntemiyle çıkartılan kaynaklı numuneler yorulma testleri öncesi bazı testlere tabi tutulmuştur. Kesim sonrası yüzeyde çentik etkisi olmaması adına numunelerin yüzeyleri zımparalanmıştır. Kaynaklı numuneler sertlik testi, çekme testi, mikro-makro inceleme, kaynak nüfuziyeti testi, kaynak ucu yarıçap ölçümleri, gerinim ölçümleri ve doğrulama testleri, yorulma testleri ve son olarak kırılma yüzeyi incelemesine tabi tutulmuştur.

3.3.1. Kaynaklı Numune Sertlik Testinden Elde Edilen Bulgular

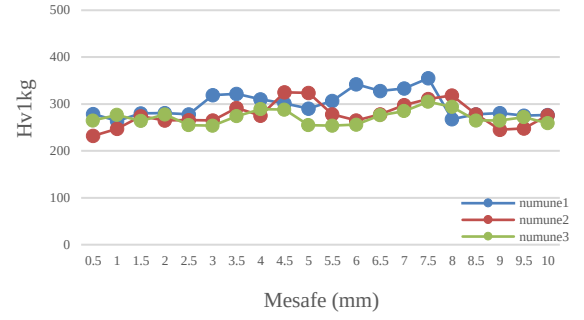
Farklı kaynak nüfuziyetine sahip birer adet kaynaklı numune sertlik testine tabi tutulmuştur. Sertlik testi ile ITAB bölgesindeki sertlik değişimleri ve numunelerin ana malzeme sertlik değerine kaynak dikişinden ne kadar uzakta ulaştığının tespiti için gerçekleştirilmiştir. Birleşim tipi çok pasolu olduğundan bir sonraki atılan kaynak dikişi bir önceki kaynak dikişinin ITAB bölgesinde temper etkisi oluşturmaktadır. Bu kapsamda sertlik değerlerinin bilhassa numunenin tam orta kesitinde nasıl bir değişim göstereceğini gözlemlemek hedeflenmiştir. Sertlik değerleri Şekil 89’da sertlik hatları dikkate alınarak ve Şekil 90’da her bir numune için renk skalası halinde verilmiştir. Sertlik hattı açısından numunelerin sertlik değerlerini incelediğimizde;

- Hat 1 ve Hat 3 değerleri, kaynak metali, ITAB, orta kesit, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden alınmıştır. Numune 3’ün bilhassa orta kesit bölgesindeki sertlik düşüşü en fazladır.
- Hat 2 dikkate alındığında numune 2 ve numune 3’teki düşüş en fazladır.
- Hat 4 ve Hat 5’e bakıldığında ITAB bölgesinde sertlik düşüşünün yine numune 2 ve numune 3’te en fazla olduğu görülmektedir. Kaynak metalinden uzaklaştıkça numune 1 ve numune 2’nin 500 Hv değerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Numune 3’ün daha uzak mesafelerde ana metal sertlik değerine ulaştığı tespit edilmiştir.



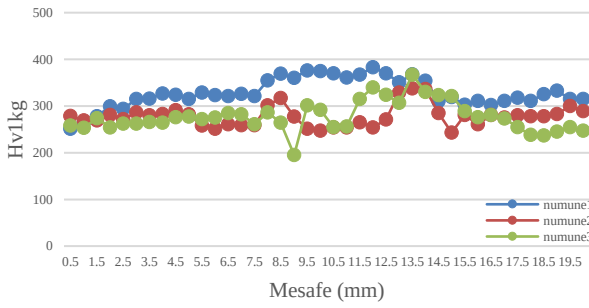
Sertlik hatları

Hat1



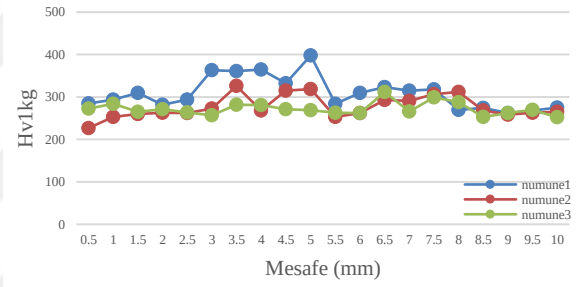
(a)

Hat2



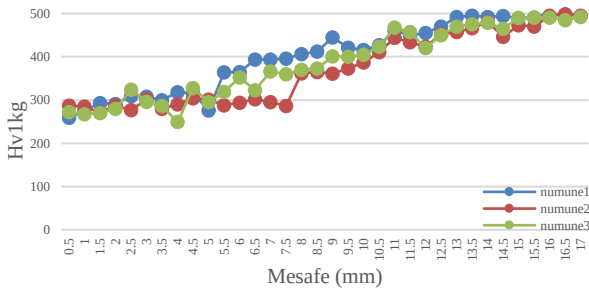
(b)

Hat 3



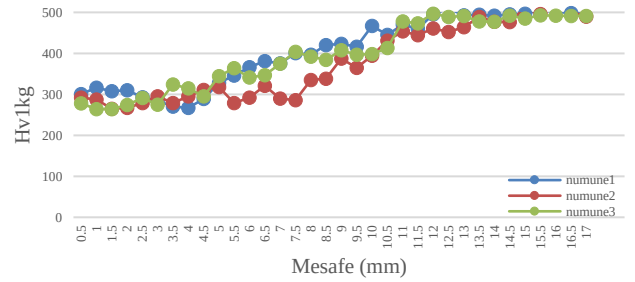
(c)

Hat4



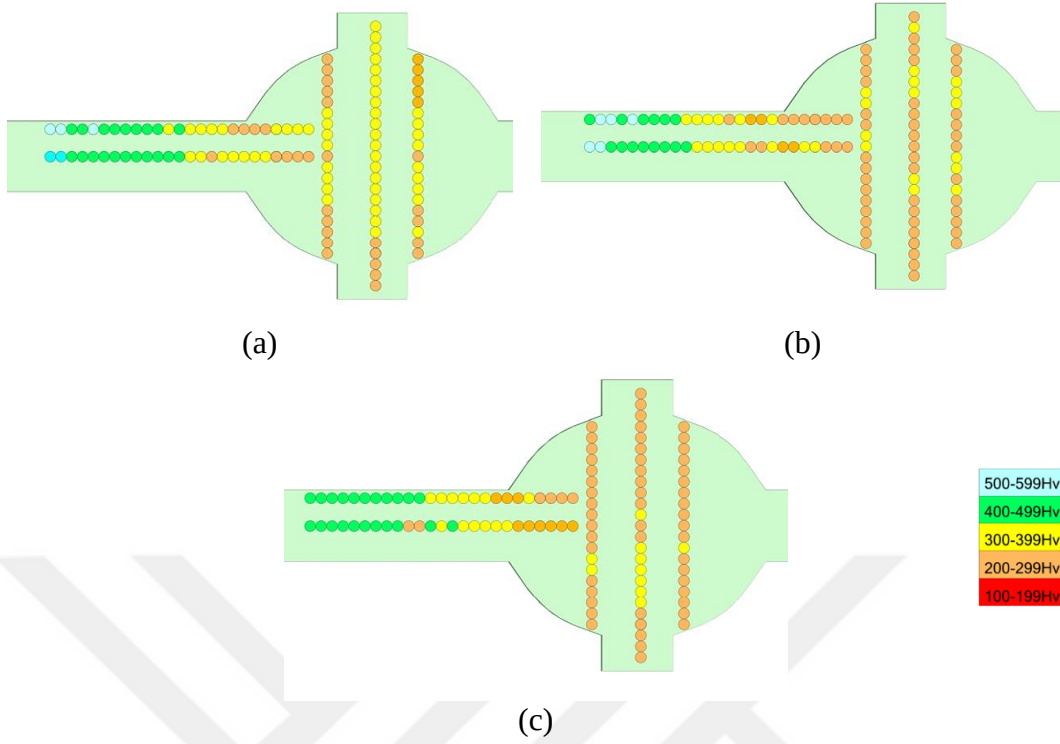
(d)

Hat 5

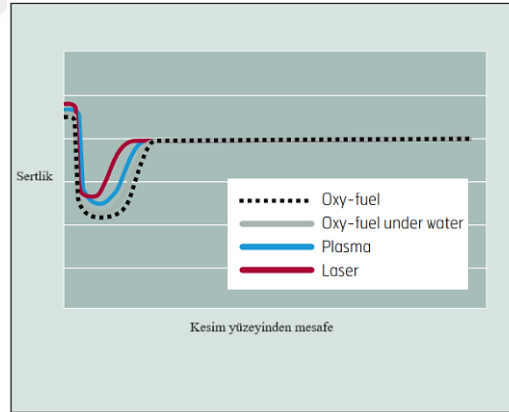


(e)

Şekil 89. Tarama hatlarına göre sertlik değerleri (a) Hat1 sertlik dağılımı, (b) Hat2 sertlik dağılımı, (c) Hat3 sertlik dağılımı, (d) Hat4 sertlik dağılımı, (e) Hat5 sertlik dağılımı



Şekil 90. Numunelere göre sertlik değerleri (a) Numune1 sertlik dağılımı, (b) Numune2 sertlik dağılımı, (c) Numune3 sertlik dağılımı



Şekil 91. Hardox ve Weldom'un farklı kesme yöntemleriyle termal kesimi sonrasında ITAB'daki sertlik profilleri (URL-5, 2015)

Kaynaklı birleşimin dört pasolu olması ve bu kaynak dikişlerinin birbirine çok yakın konumda olması sebebiyle ilk yapılan kaynak bir sonraki yapılan kaynağın temperleme etkisine maruz kalmaktadır. 0.5 mm aralıklarla sertlik taraması yapılmasının nedeni kaynak erime çizgisi ITAB bölgesinde kaynak sonrası oluşabilecek temperlenmemiş martenzitik ya da beynitik yapıyı tespit edebilmektir. Lakin erime çizgisi kenarı ITAB bölgesinde kaynak sonrası 350 Hv değerini aşan sertlik değeri tespit edilmemiştir.

3.3.2. Kaynaklı Numune Çekme Testinden Elde Edilen Bulgular

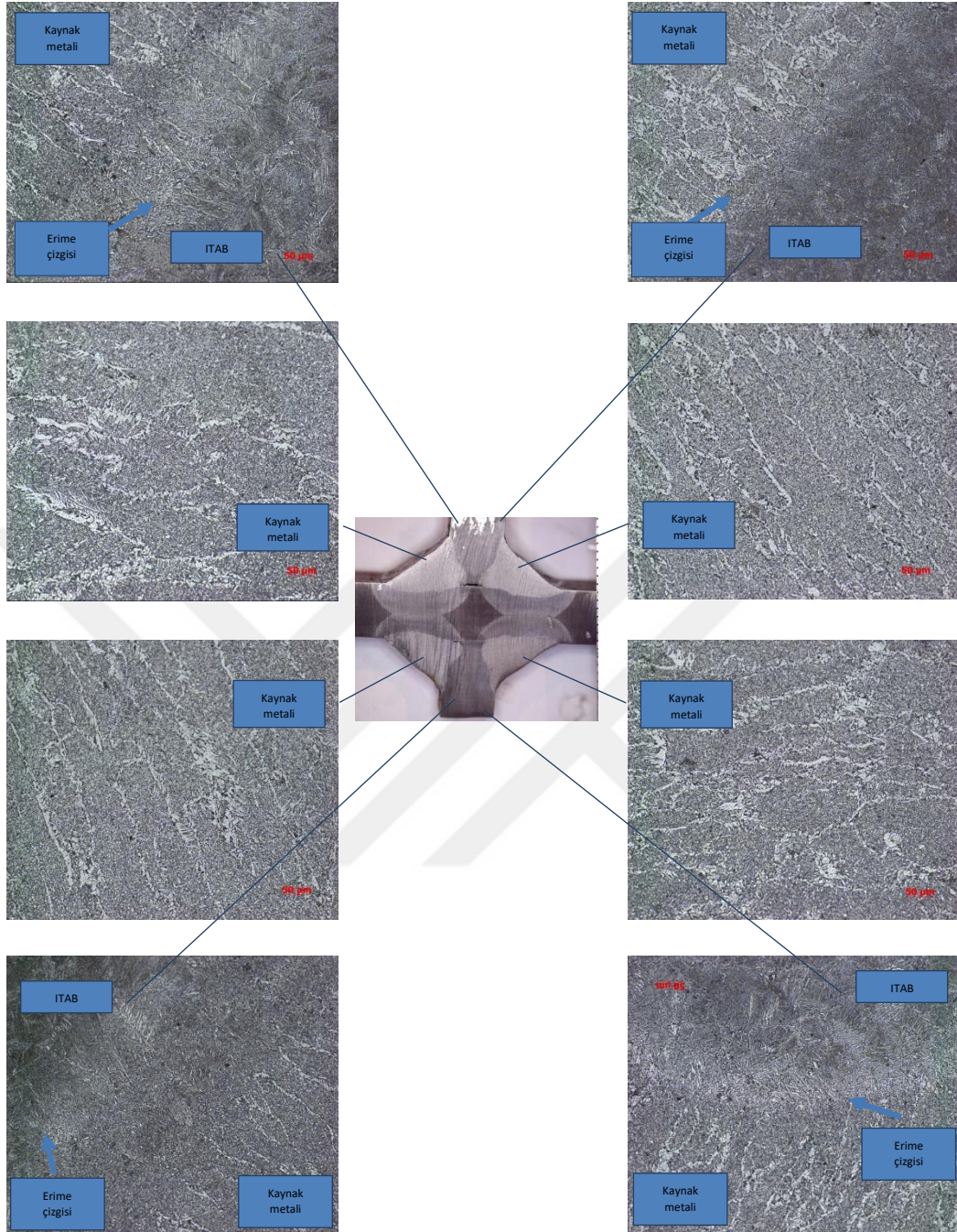
Kaynaklı numunelerin çekme testindeki hedef sonuçların hem kaynaklı numunelerle kıyaslanması hem de yorulma testinde kaynaklı numunelere uygulanacak kuvvet değerlerinin belirlenmesine yol göstermesidir. Bu kapsamda kaynaklı numunelere uygulanan çekme testi sonucu elde edilen değerler Tablo 39’da verilmiştir. Kaynaklı numunelerin akma mukavemeti kaynaklı numunelerle mukayese edildiğinde %37’ye yakın bir kaybın olduğu görülmektedir. Her ne kadar numuneler yük taşımayan ÇTTB tipte olsa da kaynak işleminin birleşimin mekanik özelliklerine olan etkisi bariz görülmektedir.

Tablo 39. Kaynaklı numune çekme testi sonuçları

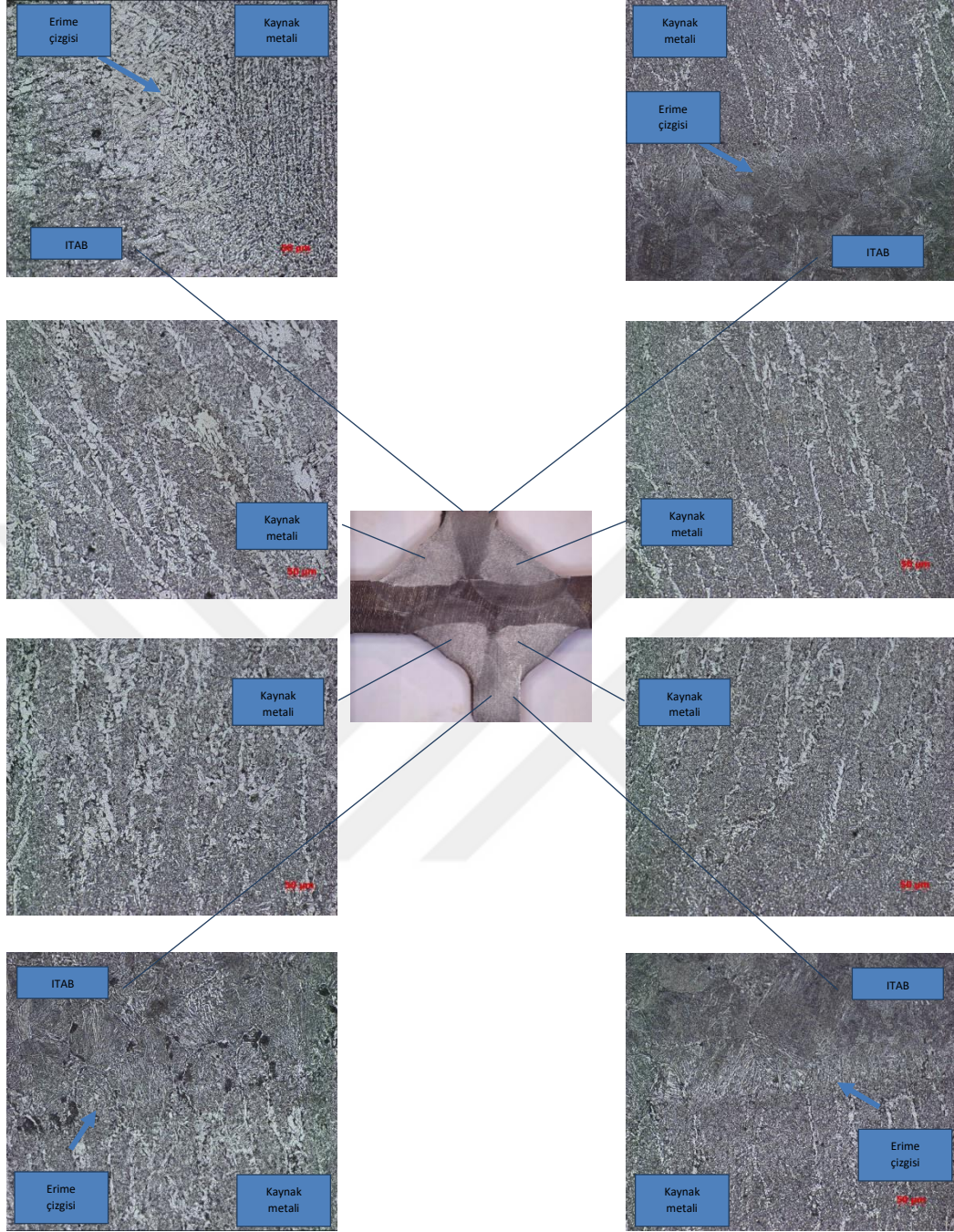
Kaynaklı numune no (KN)	Çekme Test Sonuçları		
	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)
KN 1	862	917	18.6
KN 1	800	999	19.3
KN 2	714	864	20.8
KN 2	858	969	19.0
KN 3	860	898	18.4
KN 3	943	967	19.3

3.3.3. Kaynaklı Numune Mikro Testinden Elde Edilen Bulgular

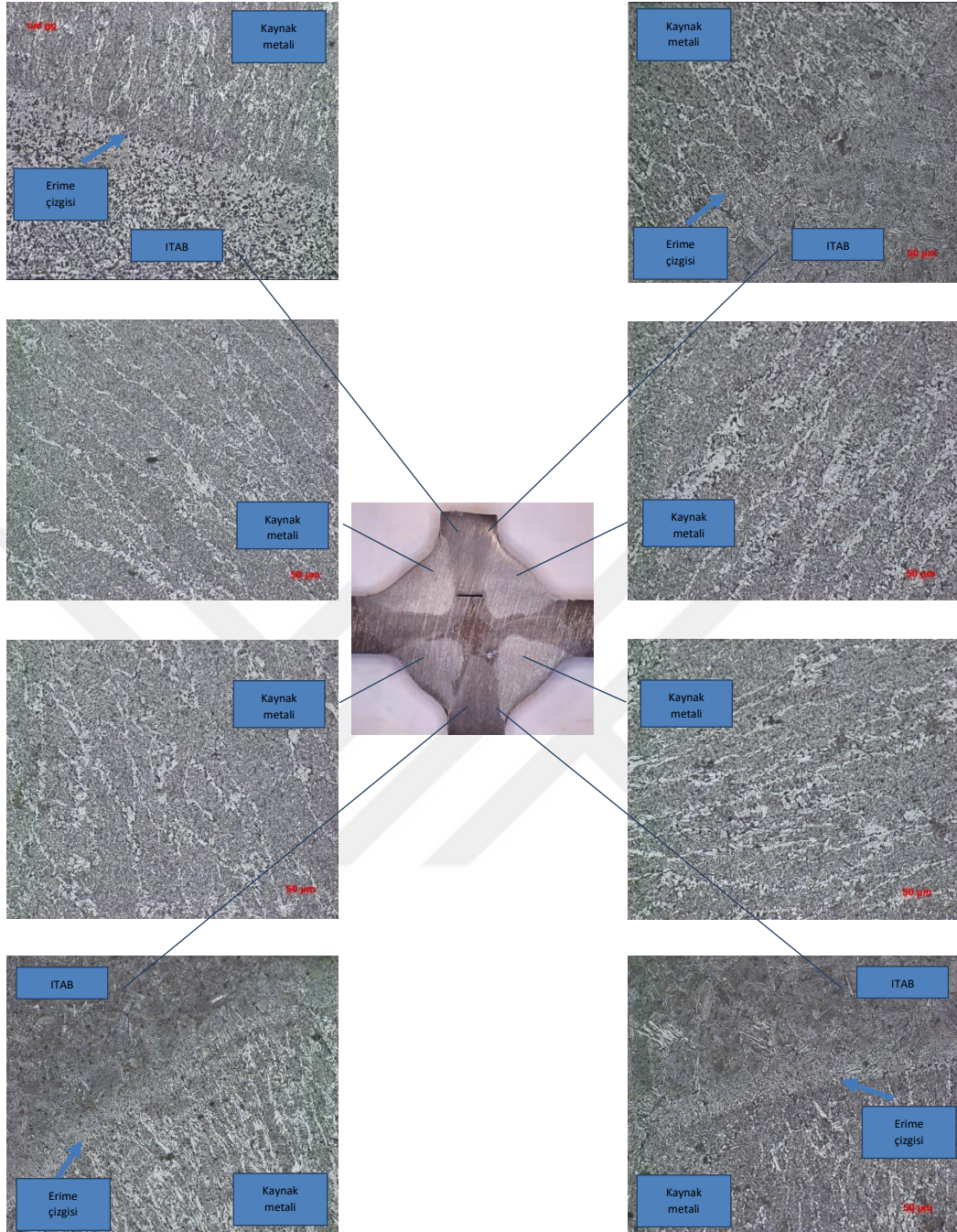
Her bir plakanın kaynağında ısı girdisinin homojen olduğu varsayılarak farklı kaynak nüfuziyetine sahip birer adet numunenin mikro incelemesi gerçekleştirilmiştir. Mikro inceleme ile ITAB ve kaynak metalindeki yapının incelenmesi hedeflenmiştir. Ark kaynaklı birleştirmelerde kaynak havuzu 3000⁰C’lere maruz kalırken ITAB bölgesi 1200⁰C’lerden başlayan ve giderek azalan ısı etkilere maruz kalmaktadır. Mikro yapı inceleme her bir kaynaklı numunenin dört adet kaynak dikişine, bu kaynak dikişlerinin ITAB bölgelerine ve kaynaklı birleşimin orta kesit bölgelerine uygulanmıştır. Şekil 92-94 farklı kaynak nüfuziyetine sahip kaynaklı numunelerin mikroyapı görüntülerini göstermektedir.



Şekil 92. KN 1 kaynaklı numunenin mikroyapı sonuçları



Şekil 93. KN 2 kaynaklı numunenin mikroyapı sonuçları

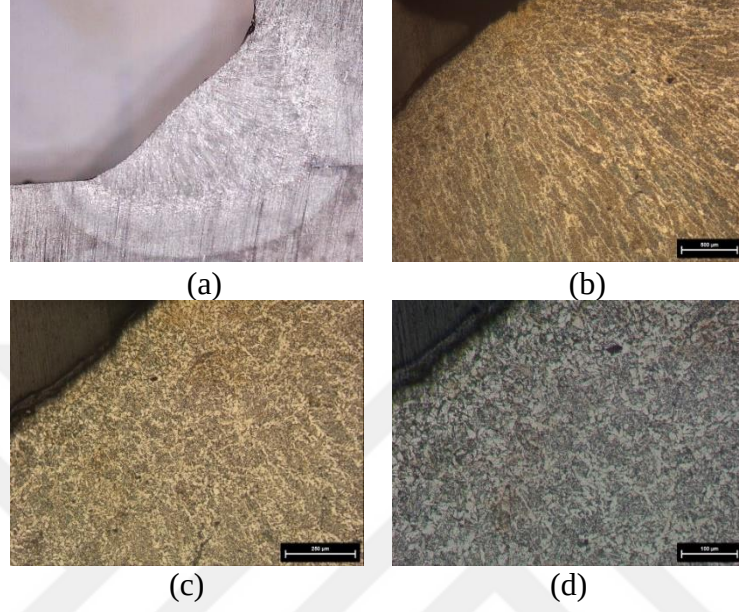


Şekil 94. KN 3 kaynaklı numunenin mikroyapı sonuçları

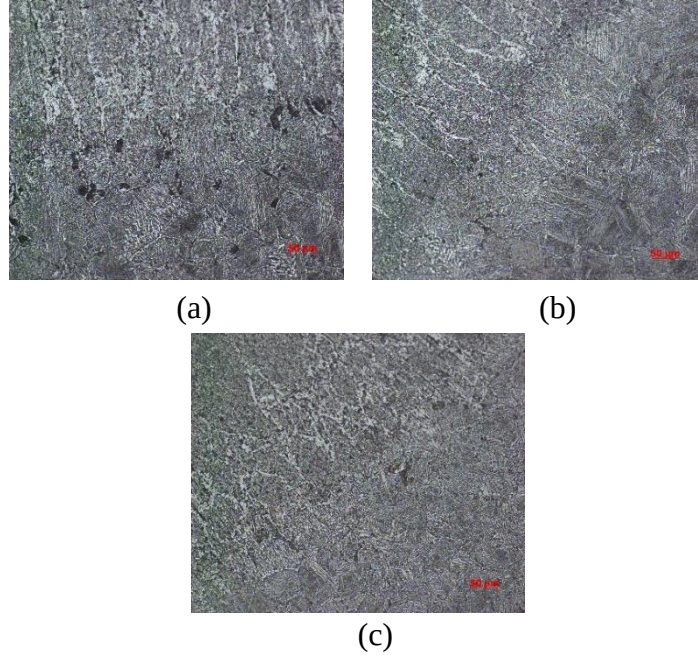
Mikroyapı inceleme sonucu;

- Kaynak metali yapısının dentritik yapıda olduğu tespit edilmiştir. Kaynak kepinde bu yapı çok daha bariz görülmektedir (Şekil 95).
- Numunelerin hepsinin kaynak dikişi ITAB bölgesinde tane irileşmesi tespit edilmiştir. Numunelerin ısı girdisi birbirine yakın olduğundan her bir numunedeki irileşme benzer yapı özelliği sunmuştur (Şekil 96).

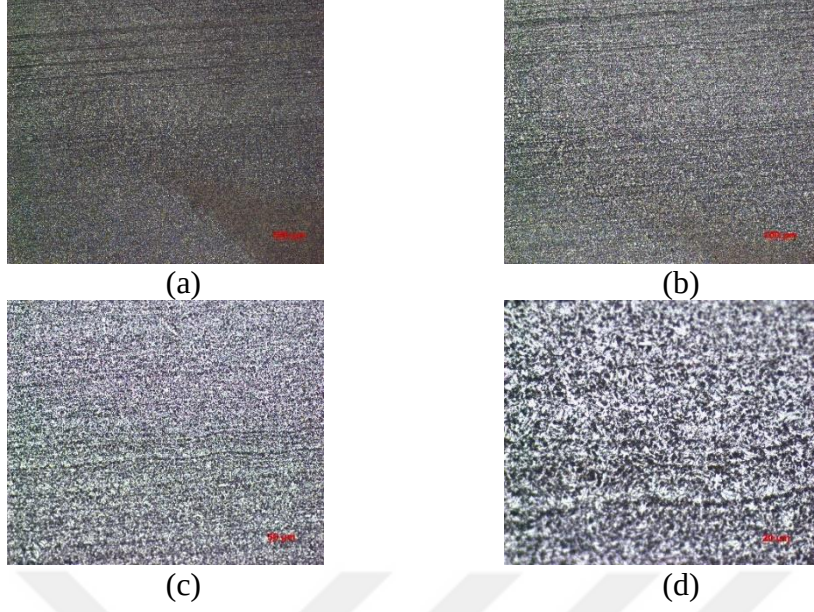
- Kaynak orta kesit bölgesi plakalara uygulanan 4 adet kaynak dikişi ısıl etkisine maruz kalmıştır. Bu ısıl etkiler sonucu orta kesit bölgesinde yapının ferritik-perlitik yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir (Şekil 97).



Şekil 95. Kaynak metali makro-mikro yapı görüntüsü (a) Kaynak metali kesit görüntüsü, (b) Kaynak metali 10X büyütme sonucu kesit görüntüsü, (c) Kaynak metali 20X büyütme sonucu kesit görüntüsü, (d) Kaynak metali 40X büyütme sonucu kesit görüntüsü



Şekil 96. Kaynaklı numune ITAB bölgesi 20X büyütme görüntüleri (a) KN 1, (b) KN 2, (c) KN 3,



Şekil 97. Kaynaklı numune orta kesit görüntüleri (a) 5 X büyütme, (b) 10 X büyütme, (c) 20 X büyütme, (d) 40 X büyütme

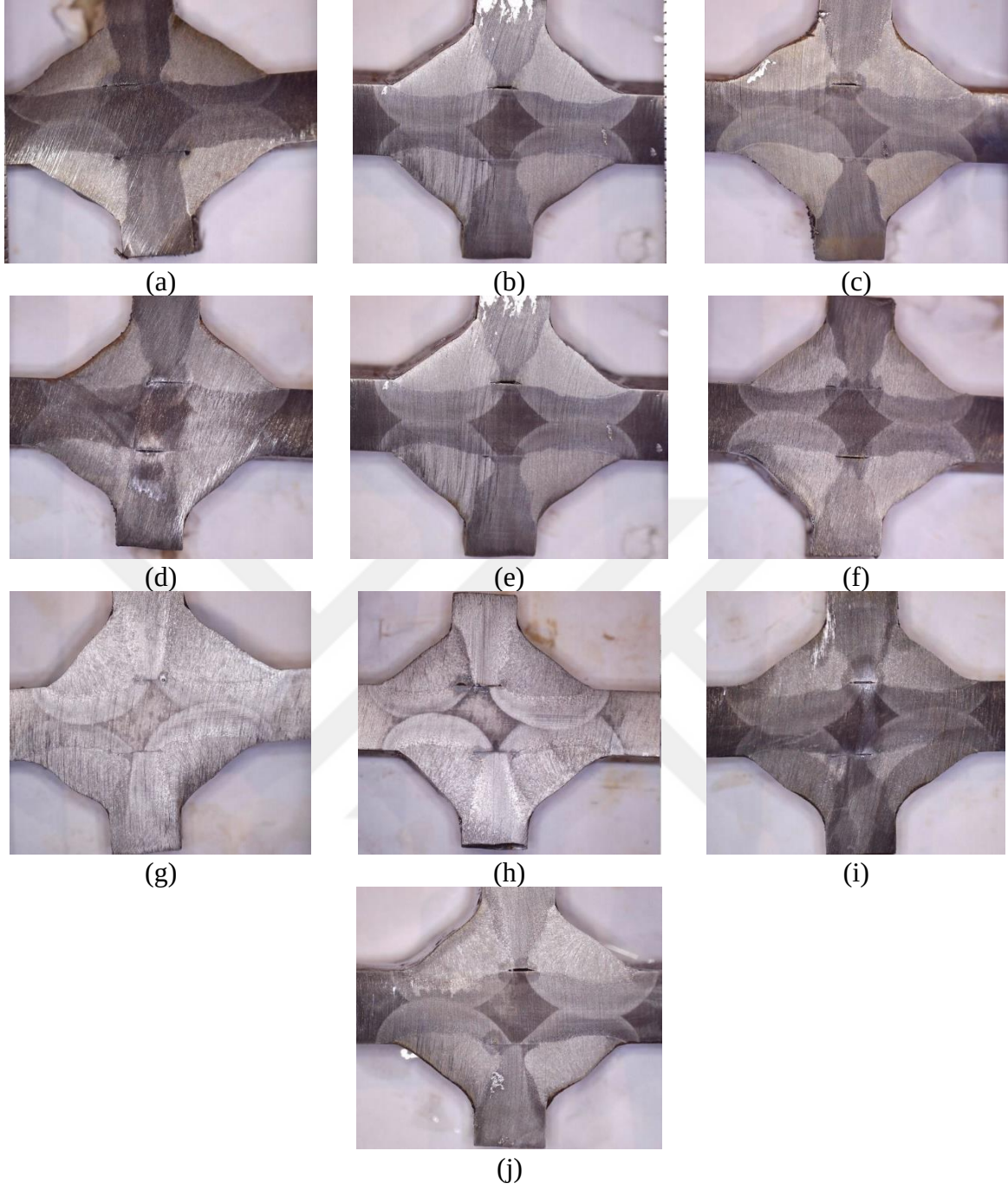
3.3.4. Kaynaklı Numune Makro Testinden Elde Edilen Bulgular

Süreksizlik sonuçları her bir kaynaklı numunenin kaynak dikişleri için Tablo 40'ta verilmiştir. Kaynaklı numuneler yük taşımayan cinsten olduğundan makro incelemede sadece yetersiz ergime ve yetersiz nüfuziyet süreksizliklerine yoğunlaşmıştır. Hem görsel muayene hem de makro inceleme sonucu kaynaklı numunelerde yanma oluşuna rastlanmamıştır (Şekil 98-100). Yorulma dayanımı için en kritik sayılabilecek süreksizlik tipleri yetersiz ergime ve yetersiz nüfuziyet olduğundan Tablo 40 bu iki süreksizlik için hazırlanmıştır. Onar adet kaynaklı numunenin kırk adet kaynak dikişi incelendiğinde;

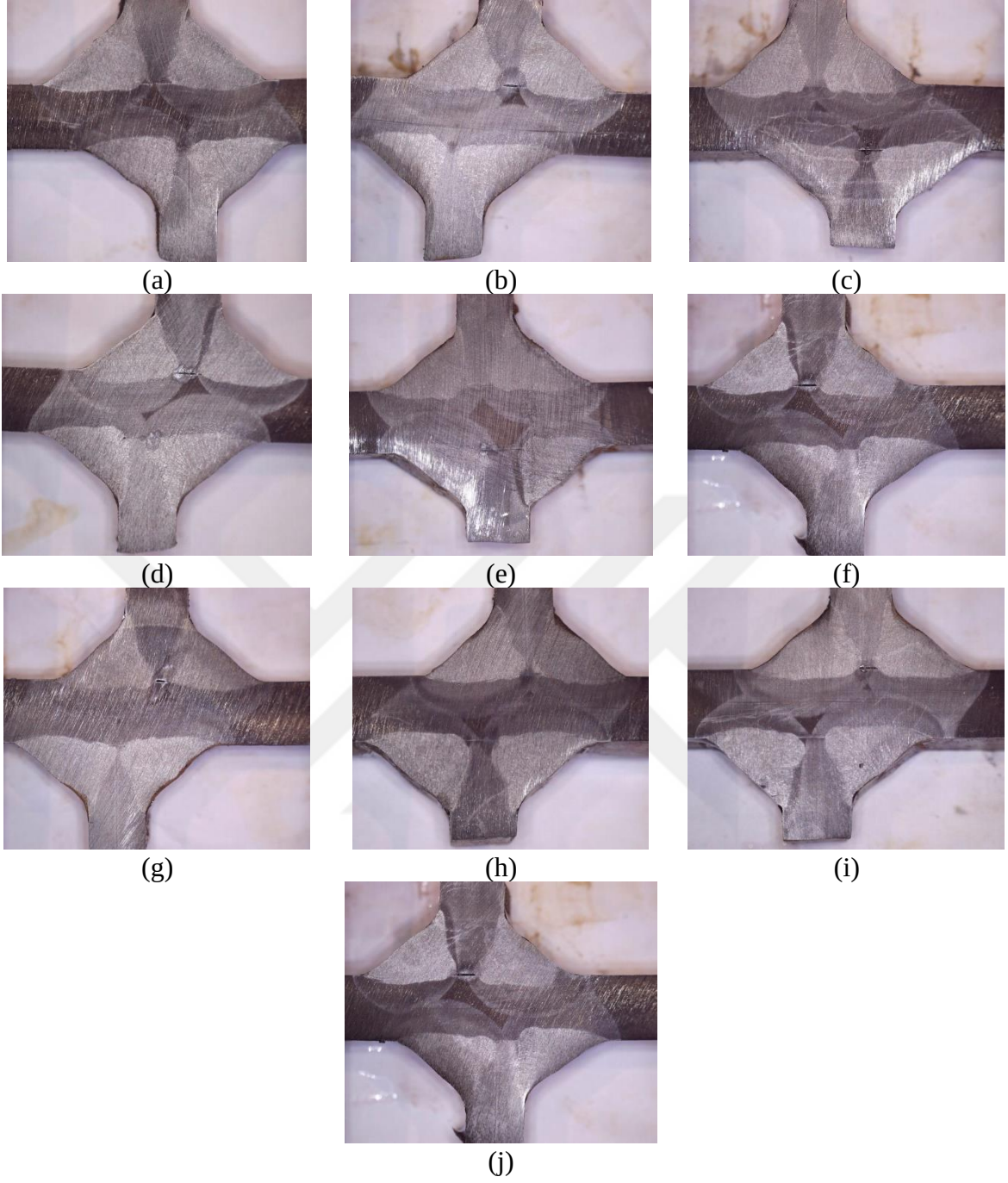
- 1 numaralı kaynaklı numunelerin 35 adet kaynağında yetersiz nüfuziyet, 5 adet kaynağında yetersiz ergime,
- 2 numaralı kaynaklı numunelerin 8 adet kaynağında yetersiz nüfuziyet,
- 3 numaralı kaynaklı numunelerin 2 adet kaynağında yetersiz nüfuziyet, tespit edilmiştir.

Tablo 40. Kaynaklı numunelerin makro inceleme sonuçları

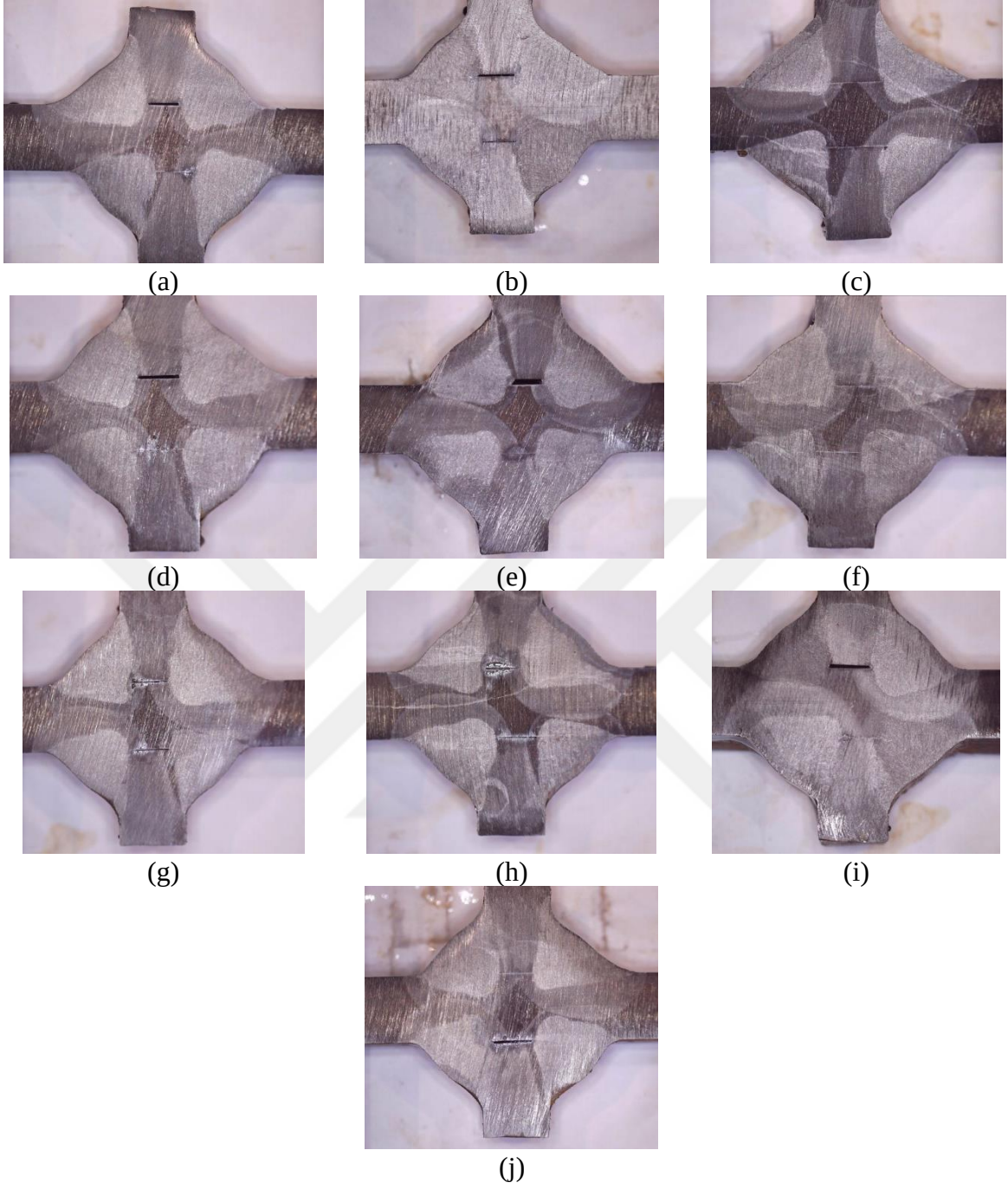
Kaynaklı numune no	Kaynak numarası	Yetersiz nüfuziyet	Yetersiz ergime	Kaynaklı numune no	Kaynak numarası	Yetersiz nüfuziyet	Yetersiz ergime	Kaynaklı numune no	Kaynak numarası	Yetersiz nüfuziyet	Yetersiz ergime
KN 1.1	A	Var	Var	KN 2.1	A	Yok	Yok	KN 3.1	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.2	A	Var	Yok	KN 2.2	A	Yok	Yok	KN 3.2	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Yok	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.3	A	Var	Yok	KN 2.3	A	Yok	Yok	KN 3.3	A	Yok	Yok
	B	Var	Var		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Yok	Yok		C	Var	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Yok		D	Var	Yok		D	Var	Yok
KN 1.4	A	Var	Yok	KN 2.4	A	Yok	Yok	KN 3.4	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Var	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Var		D	Var	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.5	A	Var	Yok	KN 2.5	A	Yok	Yok	KN 3.5	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Var	Yok		C	Yok	Yok
	D	Yok	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.6	A	Var	Var	KN 2.6	A	Var	Yok	KN 3.6	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Yok	Yok		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.7	A	Var	Yok	KN 2.7	A	Yok	Yok	KN 3.7	A	Var	Yok
	B	Yok	Yok		B	Var	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.8	A	Var	Var	KN 2.8	A	Yok	Yok	KN 3.8	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Var	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Yok	Var		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.9	A	Yok	Yok	KN 2.9	A	Yok	Yok	KN 3.9	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Var		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok
KN 1.10	A	Var	Yok	KN 2.10	A	Var	Yok	KN 3.10	A	Yok	Yok
	B	Var	Yok		B	Yok	Yok		B	Yok	Yok
	C	Var	Yok		C	Yok	Yok		C	Yok	Yok
	D	Var	Yok		D	Yok	Yok		D	Yok	Yok



Şekil 98. KN 1 makro muayene görüntüleri (a) KN 1-1, (b) KN 1-2, (c) KN 1-3, (d) KN 1-4, (e) KN 1-5, (f) KN 1-6, (g) KN 1-7, (h) KN 1-8, (i) KN 1-9, (j) KN 1-10



Şekil 99. KN 2 makro muayene görüntüleri (a) KN 2-1, (b) KN 2-2, (c) KN 2-3, (d) KN 2-4, (e) KN 2-5, (f) KN 2-6, (g) KN 2-7, (h) KN 2-8, (i) KN 2-9, (j) KN 2-10



Şekil 100. KN 3 makro muayene görüntüleri (a) KN 3-1, (b) KN 3-2, (c) KN 3-3, (d) KN 3-4, (e) KN 3-5, (f) KN 3-6, (g) KN 3-7, (h) KN 3-8, (i) KN 3-9, (j) KN 3-10

3.3.5. Kaynaklı Numune Kaynak Nüfuziyet Testinden Elde Edilen Bulgular

Farklı kaynak nüfuziyetine sahip onar adet kaynaklı numunenin her bir kaynak dikişi kaynak nüfuziyet ölçümlerine tabi tutulmuştur. Ölçümler hem uzunluk cinsinden hem de alan cinsinden gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Tablo 41-43'te verilmiştir.

Tablo 41. KN 1 numunelerin kaynak nüfuziyeti ölçüm sonuçları

Kaynaklı numune no	Kaynak	Uzunluk cinsinden ölçümler			Alan cinsinden ölçümler			Uzunluk cinsinden ölçümdeki sapma
		Maksimum ergime ya da nüfuziyet (FOP) (mm)	Malzeme kalınlığı (mm)	FOP / malzeme kalınlığı	FOP alanı (mm ²)	Toplam alan (TA) (mm ²)	FOP alanı/ TA	
KN 1.1	A	0.38	6.58	5.9	1.29	50.04	2.6	127.1
	B	0.77	6.58	11.7	4.90	59.68	8.2	42.3
	C	0.80	6.58	12.2	4.72	54.22	8.7	39.7
	D	0.80	6.58	12.2	4.29	58.85	7.3	67.8
KN 1.2	A	0.34	6.54	5.2	1.21	52.52	2.3	126.6
	B	0.74	6.54	11.4	4.61	59.91	7.7	47.2
	C	0.95	6.54	14.5	5.59	55.75	10.0	44.8
	D	0.74	6.54	11.4	4.10	58.26	7.0	62.3
KN 1.3	A	0.88	6.52	13.5	5.32	62.18	8.5	58.8
	B	0.93	6.52	14.3	6.06	64.25	9.4	53.0
	C	1.21	6.52	18.6	7.79	65.98	11.8	57.0
	D	0.94	6.52	14.5	5.29	56.244	9.4	54.3
KN 1.4	A	1.17	6.67	17.6	4.92	56.575	8.7	102.0
	B	0.69	6.67	10.4	3.85	56.996	6.8	53.7
	C	0.92	6.67	13.8	5.94	63.565	9.3	47.9
	D	0.69	6.67	10.4	4.17	62.349	6.7	55.8
KN 1.5	A	0.89	6.67	13.5	6.12	61.482	10.0	35.2
	B	1.08	6.67	16.2	6.28	66.529	9.4	71.7
	C	0.95	6.67	14.2	4.84	63.147	7.7	85.4
	D	1.01	6.67	15.2	6.27	58.799	10.7	42.6
KN 1.6	A	0.72	6.80	10.7	3.11	60.634	5.1	108.0
	B	0.77	6.80	11.3	4.49	64.549	7.0	62.9
	C	0.86	6.80	12.8	5.25	69.926	7.5	69.9
	D	0.97	6.80	14.3	5.83	67.689	8.6	66.2
KN 1.7	A	1.03	6.64	15.5	6.26	56.68	11.1	40.3
	B	0.80	6.64	12.2	6.06	67.834	8.9	36.3
	C	0.95	6.64	14.3	5.30	59.23	9.0	59.7
	D	0.92	6.64	13.9	6.15	59.96	10.2	35.8
KN 1.8	A	0.74	6.66	11.2	3.85	65.46	5.9	88.7
	B	0.95	6.66	14.3	6.67	63.39	10.6	35.2
	C	0.60	6.66	9.1	2.77	52.34	5.3	72.4
	D	1.00	6.66	15.1	4.97	61.89	8.0	89.0
KN 1.9	A	1.13	6.70	16.9	7.78	70.42	11.1	52.5
	B	1.00	6.70	15.0	6.15	67.54	9.1	64.3
	C	0.60	6.70	9.0	3.11	65.88	4.8	87.8
	D	1.03	6.70	15.4	6.34	65.24	9.8	57.3
KN 1.10	A	0.86	6.72	12.8	4.95	64.55	7.7	65.2
	B	1.13	6.72	16.9	6.29	66.57	9.3	80.8
	C	1.06	6.72	15.8	6.65	63.08	10.6	49.0
	D	0.74	6.72	11.1	4.01	54.61	7.4	48.9

Tablo 42. KN 2 numunelerin kaynak nüfuziyeti ölçüm sonuçları

Kaynaklı numune no	Kaynak	Uzunluk cinsinden ölçümler			Alan cinsinden ölçümler			Alan cinsinden ölçümdeki sapma
		Maksimum ergime ya da nüfuziyet (FOP) (mm)	Malzeme kalınlığı (mm)	FOP / malzeme kalınlığı	FOP alanı (mm ²)	Toplam alan (TA) (mm ²)	FOP alanı/ TA	
KN 2.1	A	0.78	6.66	11.8	6.24	68.70	9.1	29.5
	B	0.83	6.66	12.6	4.60	63.22	7.3	72.6
	C	1.59	6.66	23.9	1.07	66.10	16.8	42.9
	D	1.11	6.66	16.7	8.23	71.69	11.5	45.4
KN 2.2	A	1.11	6.62	16.9	7.26	65.52	11.1	52.2
	B	1.08	6.62	16.4	6.67	61.70	10.8	51.5
	C	1.14	6.62	17.3	7.76	58.24	13.3	29.7
	D	0.89	6.62	13.5	5.58	67.10	8.3	62.8
KN 2.3	A	1.16	6.57	17.8	6.55	58.51	11.2	58.8
	B	0.87	6.57	13.3	6.06	63.02	9.6	38.5
	C	0.91	6.57	13.9	5.67	69.40	8.2	69.6
	D	0.86	6.57	13.2	6.01	68.18	8.8	49.0
KN 2.4	A	1.30	6.56	19.9	8.56	66.16	13.0	53.4
	B	0.98	6.56	15.0	6.72	65.29	10.3	45.1
	C	1.08	6.56	16.4	6.34	58.51	10.8	51.6
	D	0.92	6.56	14.1	5.63	64.61	8.7	61.4
KN 2.5	A	1.38	6.63	20.8	7.61	66.83	11.4	82.7
	B	0.77	6.63	11.6	4.96	71.11	7.0	66.8
	C	0.93	6.63	14.1	6.51	64.77	10.1	40.7
	D	1.11	6.63	16.8	8.14	62.89	12.9	30.1
KN 2.6	A	0.90	6.66	13.5	5.26	62.09	8.5	59.6
	B	1.12	6.66	16.8	9.05	70.87	12.8	31.6
	C	0.84	6.66	12.7	6.29	68.17	9.2	37.6
	D	1.53	6.66	23.0	9.37	62.51	15.0	53.3
KN 2.7	A	1.09	6.70	16.4	7.50	72.84	10.3	59.1
	B	0.98	6.70	14.8	6.23	65.65	9.5	55.4
	C	0.93	6.70	13.9	5.87	71.46	8.2	69.6
	D	0.89	6.70	13.3	6.47	63.79	10.1	31.3
KN 2.8	A	0.77	6.67	11.5	5.47	63.31	8.6	33.5
	B	0.89	6.67	13.4	5.43	62.11	8.7	52.7
	C	1.02	6.67	15.4	8.47	68.00	12.5	23.4
	D	0.94	6.67	14.2	6.86	67.42	10.2	39.3
KN 2.9	A	0.96	6.63	14.6	7.21	68.38	10.5	38.0
	B	0.76	6.63	11.5	5.74	61.95	9.3	23.8
	C	0.97	6.63	14.7	6.25	60.80	10.3	43.4
	D	1.38	6.63	20.9	10.36	71.13	14.6	43.5
KN 2.10	A	1.03	6.75	15.3	6.01	63.12	9.5	60.6
	B	1.10	6.75	16.3	9.14	72.46	12.6	29.4
	C	0.85	6.75	12.7	5.60	65.64	8.5	48.3
	D	1.49	6.75	22.0	10.18	62.69	16.3	35.7

Tablo 43. KN 3 numunelerin kaynak nüfuziyeti ölçüm sonuçları

Kaynaklı numune no	Kaynak	Uzunluk cinsinden ölçümler			Alan cinsinden ölçümler			
		Maksimum ergime ya da nüfuziyet (FOP) (mm)	Malzeme kalınlığı (mm)	FOP / malzeme kalınlığı	FOP alanı (mm ²)	Toplam alan (TA) (mm ²)	FOP alanı/ TA	Alan cinsinden ölçümdeki sapma
KN 3.1	A	2.09	6.64	31.6	15.65	69.45	22.5	40.1
	B	2.44	6.64	36.8	13.82	57.17	24.2	52.3
	C	1.90	6.64	28.7	10.52	56.03	18.8	53.0
	D	2.55	6.64	38.5	13.73	59.37	23.1	66.2
KN 3.2	A	2.50	6.66	37.5	13.77	52.71	26.1	43.6
	B	1.76	6.66	26.5	13.09	67.70	19.3	37.1
	C	2.55	6.66	38.3	13.84	57.84	23.9	60.2
	D	1.89	6.66	28.4	10.83	56.91	19.0	49.0
KN 3.3	A	1.16	6.53	17.8	5.66	64.04	8.8	101.9
	B	2.25	6.53	34.5	12.31	59.54	20.7	66.6
	C	1.84	6.53	28.2	9.82	57.40	17.1	64.9
	D	1.27	6.53	19.5	5.63	52.66	10.7	82.7
KN 3.4	A	2.55	6.71	38.1	14.50	56.49	25.7	48.2
	B	2.36	6.71	35.2	15.74	74.01	21.3	65.6
	C	2.23	6.71	33.2	14.02	56.77	24.7	34.5
	D	2.06	6.71	30.8	11.69	55.60	21.0	46.2
KN 3.5	A	1.95	6.65	29.4	11.21	56.19	20.0	47.2
	B	2.20	6.65	33.1	13.70	61.11	22.4	47.5
	C	2.33	6.65	35.1	15.31	62.32	24.6	42.8
	D	2.44	6.65	36.7	16.07	68.70	23.4	57.0
KN 3.6	A	2.09	6.76	30.9	15.98	70.84	22.6	37.0
	B	2.50	6.76	37.0	14.03	62.03	22.6	63.4
	C	2.25	6.76	33.3	12.38	59.52	20.8	60.1
	D	2.47	6.76	36.5	15.40	63.25	24.4	50.1
KN 3.7	A	2.02	6.73	30.1	11.56	56.63	20.4	47.4
	B	2.52	6.73	37.4	17.50	80.27	21.8	71.4
	C	2.19	6.73	32.5	13.48	56.19	24.0	35.5
	D	1.99	6.73	29.5	10.01	56.23	17.8	66.0
KN 3.8	A	2.39	6.63	36.1	12.82	57.87	22.2	63.0
	B	1.98	6.63	29.9	15.72	68.12	23.1	29.6
	C	1.82	6.63	27.5	10.96	63.03	17.4	57.8
	D	1.68	6.63	25.4	8.77	55.87	15.7	61.9
KN 3.9	A	1.77	6.60	26.9	9.99	56.98	17.5	53.5
	B	2.63	6.60	39.9	14.82	56.01	26.5	50.7
	C	2.02	6.60	30.6	16.30	62.20	26.2	16.9
	D	1.84	6.60	28.0	12.08	53.79	22.5	24.4
KN 3.10	A	2.31	6.70	34.6	13.52	58.53	23.1	49.6
	B	1.66	6.70	24.8	11.57	70.76	16.4	51.6
	C	2.69	6.70	40.2	14.78	56.54	26.1	54.0
	D	2.48	6.70	37.0	14.02	57.96	24.2	52.9

Sonuçlar incelendiğinde amper değerinin artışı ile kaynak nüfuziyet değerlerinde artış tespit edilmiştir. Her ne kadar farklı kaynak nüfuziyetine sahip kaynaklı numunelerin ısı girdi değerleri birbirine yakın olsa da nüfuziyeti etkileyen en önemli parametrenin amper olduğu görülmektedir. Uzunluk cinsinden ölçülen, homojen nüfuziyet dağılımı göstermeyen kaynak dikişlerinde nüfuziyet oranlarındaki sapma alan cinsinden ölçüme

göre yüzde 127'lere kadar çıkabilmektedir. Bu durum bize uzunluk cinsinden yapılan ölçümlerde sapmaların ne kadar yüksek çıkabileceğini de göstermektedir. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip kaynaklı numunelerin A, B, C ve D kaynak dikişlerindeki kaynak nüfuziyeti ortalama değerleri Tablo 44'te verilmiştir. Uzunluk cinsinden değerlendirildiğinde KN 1, KN 2 ve KN 3 kaynaklı numunelerin tüm kaynak dikişlerinin kaynak nüfuziyet ortalaması sırasıyla % 12.7, %15.6 ve %31.9'dur. Alan cinsinden değerlendirildiğinde ise KN 1, KN 2 ve KN 3 kaynaklı numunelerin tüm kaynak dikişlerinin kaynak nüfuziyet ortalaması sırasıyla %8.2, %10.9 ve %21.4'tür. Alan cinsinden yapılan ölçümler çok daha doğru sonuçlar verdiği için, yorulma dayanımı – kaynak nüfuziyeti değerlendirmesi yapılırken alan cinsinden elde edilmiş nüfuziyet değerleri dikkate alınmıştır.

Tablo 44. Kaynak dikişlerine göre kaynak nüfuziyet ortalaması

Ölçüm cinsi	Kaynak numune no	A kaynaklarının nüfuziyet ortalaması	B kaynaklarının nüfuziyet ortalaması	C kaynaklarının nüfuziyet ortalaması	D kaynaklarının nüfuziyet ortalaması	Tüm kaynakların nüfuziyet ortalaması
Uzunluk cinsinden	KN 1	12.3	13.4	11.9	13.4	12.7
	KN 2	15.8	14.2	15.5	16.8	15.6
	KN 3	31.3	32.4	32.8	31.0	31.9
Alan cinsinden	KN 1	7.3	8.6	8.5	8.5	8.2
	KN 2	11.2	9.8	10.8	11.6	10.9
	KN 3	20.9	21.8	22.4	20.4	21.4

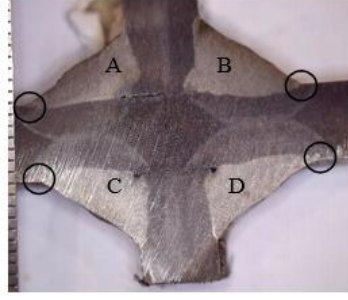
3.3.6. Kaynaklı Numune Kaynak Ucu Yarıçap Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular

Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımını etkileyen en önemli parametrelerin başında kaynak ucu yarıçapı ve kontak açısı değeri gelmektedir. Yarıçapın küçülmesiyle kaynak ucu bölgesinde gerilme konsantrasyonlarının artışı yorulma dayanımını azaltıcı etki gösterecektir. Bu sebepten kaynaklı birleşimlerin tasarımında bu geometrik parametreler de dikkate alınmalıdır. Yorulma testine tabi tutulacak olan farklı kaynak nüfuziyetine sahip onar adet kaynaklı numunenin kaynak ucu yarıçap ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerdeki amaç yorulma test sonuçlarının kaynak ucu yarıçap değerleri ile ilişkilendirilmesidir. Bu kapsamda kaynak ucu yarıçap ölçümleri Bölüm 2.4.6'da

açıklandığı gibi gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişlerinin diğer kısımlarında kalan kaynak ucu bölgesinin test sonuçlarına etkisi olmadığından ölçüme tabi tutulmamıştır. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip onar adet kaynaklı numunenin kaynak ucu yarıçap değerleri Tablo 45'te verilmiştir. Yarıçap değerleri Şekil 101'de gösterilen kaynak ucu bölgelerinden ölçülmüştür.

Tablo 45. Kaynaklı numunelerin kaynak ucu yarıçap değerleri

Kaynaklı numune no	Kaynak numarası	Kaynak ucu yarıçap (mm)	Kaynaklı numune no	Kaynak numarası	Kaynak ucu yarıçap (mm)	Kaynaklı numune no	Kaynak numarası	Kaynak ucu yarıçap (mm)
KN 1.1	A	0.64	KN 2.1	A	0.46	KN 3.1	A	1.04
	B	0.75		B	1.79		B	1.96
	C	2.18		C	1.38		C	0.91
	D	0.84		D	1.28		D	1.71
KN 1.2	A	1.29	KN 2.2	A	0.86	KN 3.2	A	1.49
	B	0.76		B	1.54		B	2.54
	C	1.03		C	2.79		C	1.15
	D	0.80		D	2.10		D	1.83
KN 1.3	A	1.70	KN 2.3	A	0.84	KN 3.3	A	1.17
	B	1.25		B	2.63		B	0.98
	C	2.40		C	0.47		C	1.14
	D	0.80		D	2.27		D	1.18
KN 1.4	A	0.89	KN 2.4	A	1.24	KN 3.4	A	1.33
	B	1.70		B	0.47		B	0.75
	C	1.69		C	0.56		C	2.00
	D	2.22		D	1.34		D	2.79
KN 1.5	A	1.14	KN 2.5	A	1.04	KN 3.5	A	1.14
	B	0.95		B	0.89		B	1.86
	C	1.97		C	1.11		C	2.05
	D	1.65		D	1.28		D	1.93
KN 1.6	A	1.28	KN 2.6	A	1.59	KN 3.6	A	1.75
	B	1.20		B	0.98		B	1.26
	C	1.87		C	2.14		C	0.96
	D	0.53		D	0.85		D	1.07
KN 1.7	A	0.92	KN 2.7	A	1.52	KN 3.7	A	1.07
	B	2.08		B	1.53		B	0.96
	C	0.77		C	1.23		C	1.06
	D	2.16		D	1.31		D	1.27
KN 1.8	A	1.53	KN 2.8	A	1.82	KN 3.8	A	0.62
	B	2.10		B	1.39		B	1.88
	C	1.20		C	2.58		C	1.16
	D	1.12		D	1.09		D	1.41
KN 1.9	A	1.23	KN 2.9	A	0.58	KN 3.9	A	0.99
	B	1.90		B	1.38		B	0.94
	C	1.00		C	2.36		C	1.91
	D	0.86		D	0.45		D	1.80
KN 1.10	A	1.69	KN 2.10	A	1.14	KN 3.10	A	1.93
	B	2.41		B	1.56		B	1.20
	C	1.03		C	1.37		C	0.89
	D	1.29		D	1.42		D	0.91



Şekil 101. Kaynak ucu yarıçap ölçüm bölgeleri

120 adet kaynak ucu yarıçap ölçümü sonucu en küçük değerin 0.45mm en büyük ölçümün ise 2.79mm olduğu tespit edilmiştir. 120 adet kaynak ucu yarıçap ölçümünün ortalama değeri 1.38mm'dir. KN 1, KN 2 ve KN 3 kaynaklı numunelerin yarıçap ortalamaları sırasıyla 1.37mm, 1.37mm ve 1.40mm'dir. Farklı kaynak nüfuziyetine sahip numunelerin A, B, C ve D kaynak dikişleri yarıçap ölçüm ortalama değerleri Tablo 46'da verilmiştir.

Tablo 46. A, B, C, D kaynak dikişi yarıçap ölçüm ortalama değerleri

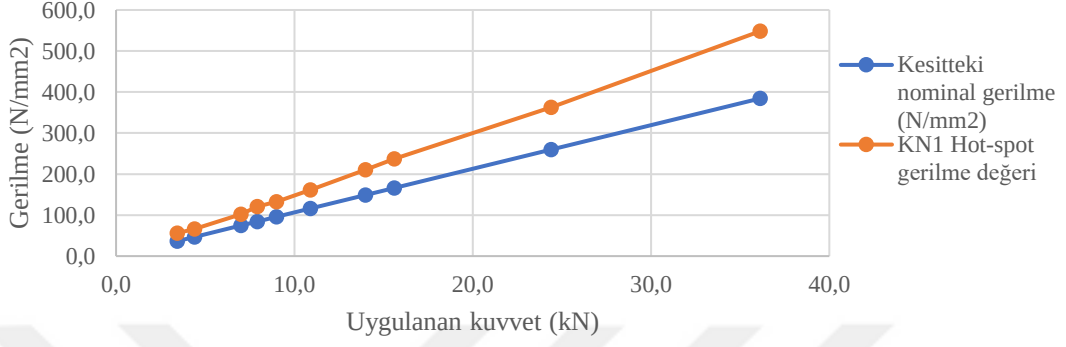
KN 1		KN 2		KN 3	
A	1.23	A	1.11	A	1.25
B	1.51	B	1.42	B	1.43
C	1.51	C	1.60	C	1.32
D	1.23	D	1.34	D	1.59

3.3.7. Kaynaklı Numune Gerinim Ölçümü ve Doğrulama Testinden Elde Edilen Bulgular

Kaynaklı numunelerin yapısal hot-spot gerilme analizlerinin yapılabilmesi için farklı kaynak nüfuziyetine sahip birer adet kaynaklı numune gerinim ölçümlerine tabi tutulmuştur. Her bir numune için elde edilen hot-spot gerilme değerleri ve ilgili kuvvete karşılık gelen nominal gerilme değerleri Şekil 102-104'te verilmiştir. Hot-spot gerilmenin nominal gerilmeden yüksek olması beklenmektedir. KN 1 ve KN 2 numunelerinde hot-spot gerilme değerleri nominal gerilme değerlerinden fazla olmasına rağmen KN 3 numunesinde değerler birbirine çok yakındır. KN 3 numunesi nüfuziyeti en fazla ve

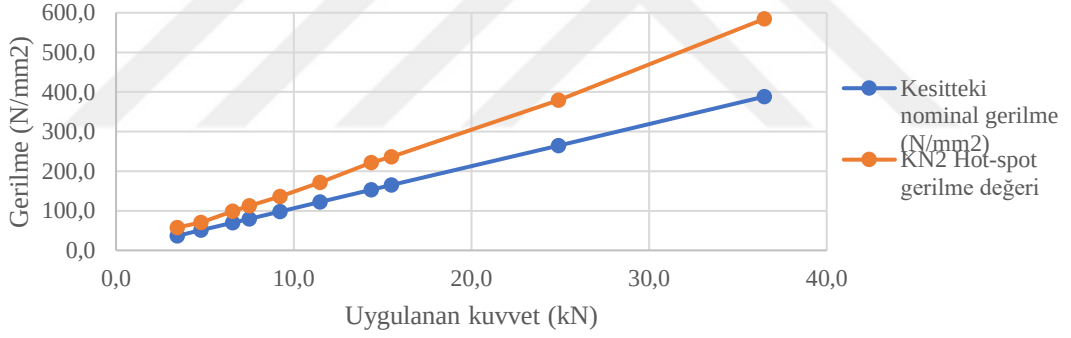
bununla birlikte sertlik değeri diğer numunelere nazaran çok daha düşük değerlerde olan numunedir.

Nominal - Hot-spot Gerilme Eğrisi



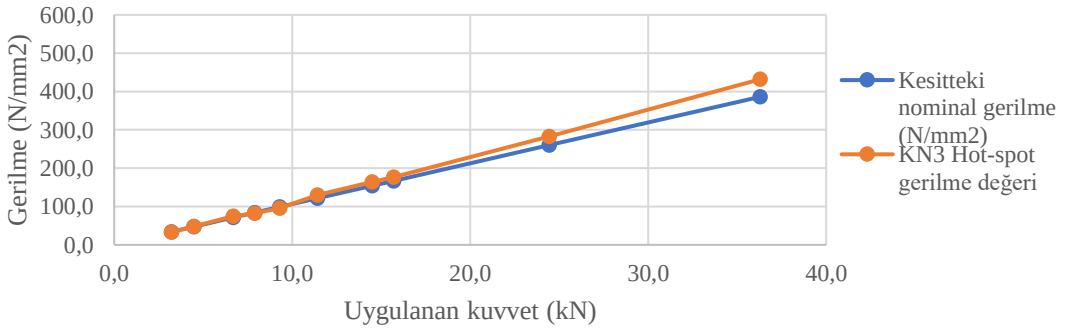
Şekil 102. KN 1 numune nominal – hot-spot gerilme değerleri

Nominal - Hot-spot Gerilme Eğrisi



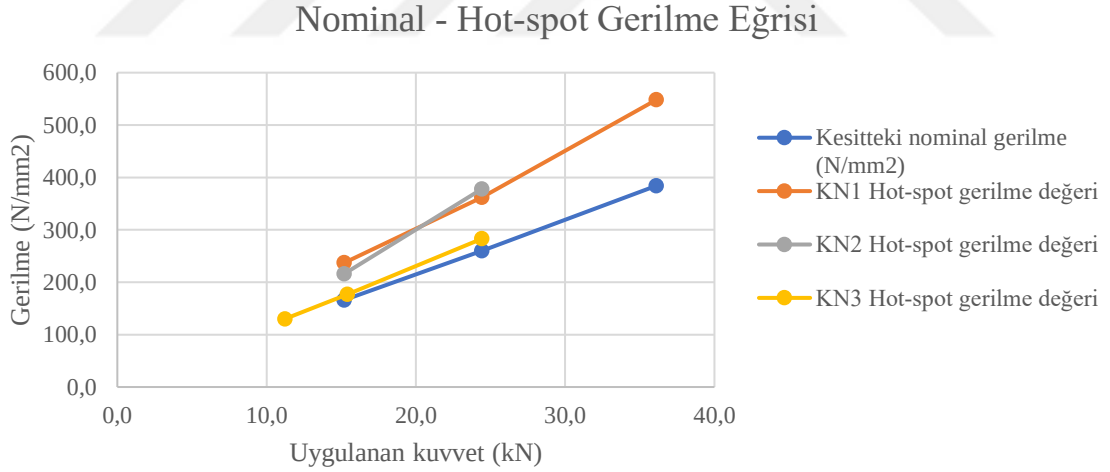
Şekil 103. KN 2 numune nominal – hot-spot gerilme değerleri

Nominal - Hot-spot Gerilme Eğrisi



Şekil 104. KN 3 numune nominal – hot-spot gerilme değerleri

Kaynaklı numunelere uygulanacak olan yorulma testlerinde numunelerin hangi kuvvet değerlerinde teste tabi tutulacağı kaynaksız numunelerin yorulma test sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Su jeti yöntemiyle kesilmiş ve eğilme önleyici aparatlı gerçekleştirilmiş testler sonucu, 2 milyon tekrar sonunda kopma gerçekleşmemiş numunelere uygulanan kuvvet değeri ve kesitte oluşan gerilme değerinin akma mukavemetinin yüzdesel olarak karşılığına denk gelen değerler dikkate alınmıştır (269.9 N/mm² ve kaynaklı numunenin de %20'sine denk gelen gerilme değeri). Yorulma testlerinin bu iki farklı değerde beşer adet numuneye uygulanarak kaynak ucu yarıçap değerlerinin yorulma dayanımına olan etkisinin incelenmesi hedeflenmişti. Lakin kaynaklı numunelere uygulanan testler sonucu tekrar sayılarında çok fazla sapma olmaması sebebiyle dörder adet numune bu iki gerilme değerinde teste tabi tutulmuş geri kalan numuneler farklı gerilmelere denk gelen kuvvetlerle teste tabi tutulmuştur. Yorulma testinde numunelere uygulanan kuvvet, kuvvete karşılık gelen nominal gerilme ve gerinim ölçümleri sonucu ekstrapolasyon yöntemiyle elde edilen hot-spot gerilme değerleri Şekil 105'te verilmiştir.



Şekil 105. Kaynaklı numuneler nominal - hot-spot gerilme değerleri

Kopma gerçekleşmemiş kaynaklı numunelere uygulanan gerilme değerini de dahil ettiğimizde KN 1 ve KN 3 kaynaklı numuneler 4 farklı gerilmeye, KN 2 ise 3 farklı gerilme değerinde yorulma testine tabi tutulmuştur.

3.3.8. Kaynaklı Numune Yorulma Testinden Elde Edilen Bulgular

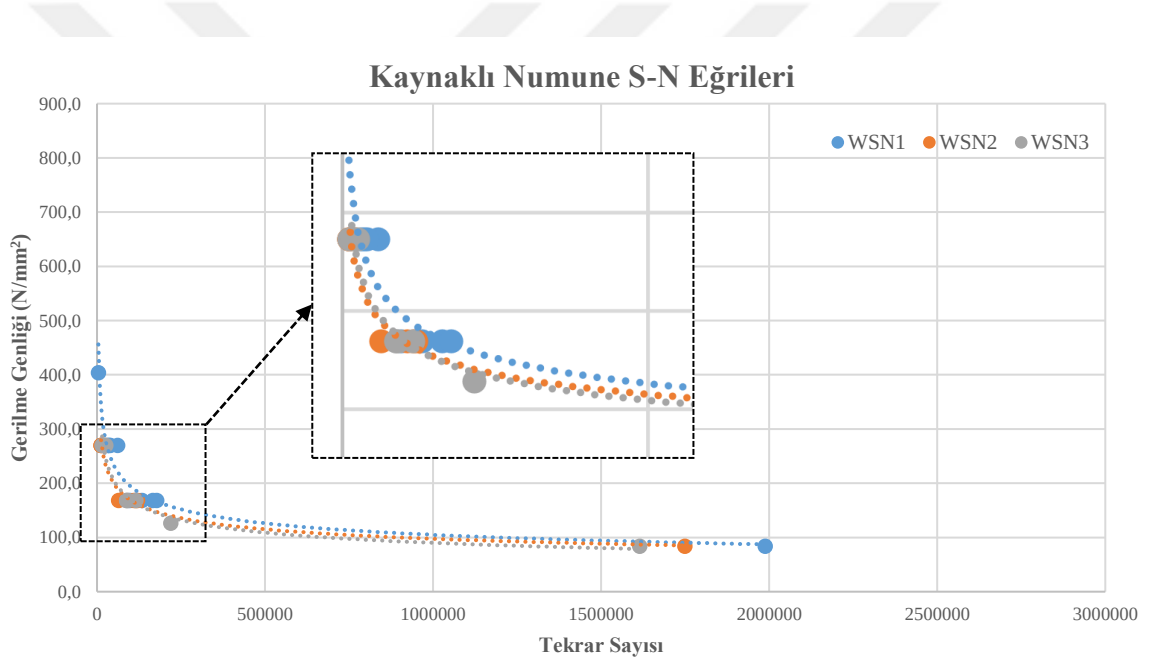
Farklı kaynak nüfuziyetine sahip onar adet kaynaklı numune yorulma testine tabi tutulmuştur. Kaynaklı numunelerin yorulma testi sonuçları sırasıyla Tablo 47’de verilmiştir.

Tablo 47. Kaynaklı numunelerin yorulma testi sonuçları

Numune tipi	Uygulanan kuvvet (kN)	Kesitteki gerilme (N/mm ²)	(Kesitte elde edilen gerilme / malzeme akma mukavemeti) x 100	Test frekansı (Hz)	Tekrar sayısı	Eğilme önleyici aparat	Numune durumu	Sonuç
KN 1	37.1	404.0	48.1	5	4049	Yok	Su jeti kesim	Koptu
	25.0	270.0	32.1		62049			Koptu
	25.1	270.0	32.1		36049			Koptu
	24.2	270.0	32.1		31049			Koptu
	24.4	270.0	32.1		40049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		134049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		98049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		166049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		178049			Koptu
KN 2	7.6	84.0	10.0	5	1988098	Yok	Su jeti kesim	Kopmadı
	24.4	270.0	32.1		12049			Koptu
	24.1	270.0	32.1		12049			Koptu
	24.1	270.0	32.1		14049			Koptu
	24.4	270.0	32.1		22049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		64049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		110049			Koptu
	15.0	168.0	20.0		116049			Koptu
	15.0	168.0	20.0		121049			Koptu
KN 3	7.5	84.0	10.0	5	1749049	Yok	Su jeti kesim	Kopmadı
	24.4	270.0	32.1		23049			Koptu
	24.4	270.0	32.1		15049			Koptu
	24.4	270.0	32.1		26049			Koptu
	24.4	270.0	32.1		20049			Koptu
	15.4	168.0	20.0		116049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		88049			Koptu
	15.2	168.0	20.0		88049			Koptu
	15.0	168.0	20.0		92049			Koptu
	11.2	126.0	15.0		220049			Koptu
	7.5	84.0	10.0		1615098			Kopmadı

KN 1, KN 2 ve KN 3 kaynaklı numunelerin 270 N/mm² gerilme genliğinde kopma sonucu elde edilen tekrar sayıları sırasıyla 42299, 15049 ve 21049’dur. Ayrıca 168 N/mm² gerilme genliğinde kopma sonucu elde edilen tekrar sayıları sırasıyla 144049, 102799, 96049’dur. Yüksek gerilme değerlerinde gerçekleşen testlerde eğilme etkisi çok daha fazladır. Kaynaksız numunelerin yorulma testinde bu durum yapılan doğrulama çalışmaları sırasında tespit edilmiştir. Eğilme önleyici aparat kullanımı standardın tavsiyesi üzerine aparat ile numune arasına teflon malzeme koyarak gerçekleştirilebilmektedir. Teflonsuz yapılan testlerde numunelerin çene tutucu bölgesinden kırıldığı tespit edilmiştir. Yüksek

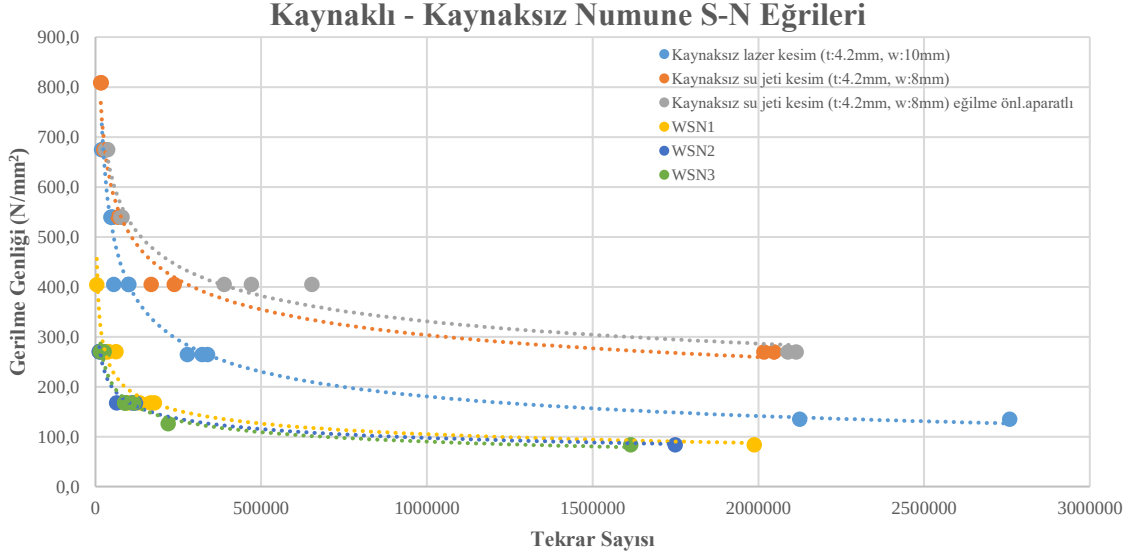
gerilme değerlerinde yapılan testlerde eğilme önleyici aparat kullanımı eğilme etkisini tam olarak önleyememektedir. Bu sebepten kaynaklı numunelerde yüksek gerilme değerlerinde gerçekleştirilen testlerde tekrar sayısı birbirine yakın çıkmakta, düşük gerilme değerlerinde gerçekleştirilen testlerde aparatın etkisi ile tekrar sayılarında saçılma artmaktadır. Kaynaklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen bu testler eğilme önleyici aparatsız gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki çalışmada, eğilme etkisi, kopma gerçekleşmemiş farklı kaynak nüfuziyetine sahip numunelerin dört kesitine konumlandırılacak gerinim ölçerle ölçülerek bir eğilme katsayısı çıkartılmaya çalışılacaktır. Eğilme önleyici aparatsız gerçekleştirilen yorulma testi sonucu yaklaşık 4 farklı gerilme genlik değeri ile elde edilen kaynaklı numune S-N eğrileri Şekil 106’da verilmiştir.



Şekil 106. Kaynaklı numune S-N eğrileri

Yük taşıyan kaynaklı birleşimlerde kaynak nüfuziyetinin artışı çekme dayanımını artıracak gibi yorulma dayanımını da artırıcı etki gösterecektir. Lakin yük taşımayan kaynaklı birleşimlerde bu durumun değerlendirmesinin testler üzerinden yapılması daha sağlıklı olmaktadır. Yorulma testine tabi tutulmuş kaynaklı numunelerde nüfuziyetin artışı ile yorulma dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuç sadece bu malzeme ve bu nüfuziyet değerleri için geçerlidir. Farklı bir malzemede kaynak nüfuziyetinin yorulma dayanıma etkisinin ne olacağı yine deneysel olarak belirlenmelidir. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerin yorulma dayanımları değerlendirildiğinde kaynaklı numunelerin yorulma

dayanımlarının kaynaklılara oranla çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı ve kaynaklı numunelerin S-N eğrileri Şekil 107’de verilmiştir.



Şekil 107. Kaynaklı-kaynaklı numune S-N eğrileri

Yapılan yorulma testleri neticesinde;

Kaynaklı numunelerin yorulma testi sonucu;

- Lazer kesim yöntemiyle kesilmiş numunelerin yorulma dayanımının en düşük olduğu tespit edilmiştir. Lazer kesim yöntemiyle kesilmiş numunelerin yüzeyinde kaynak prosesine benzer ITAB süreci tespit edilmiştir.
- Eğilme önleyici aparatlı numunelerin yorulma dayanımlarının aparatsızlara oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklı numunelerin yorulma testi sonucu;

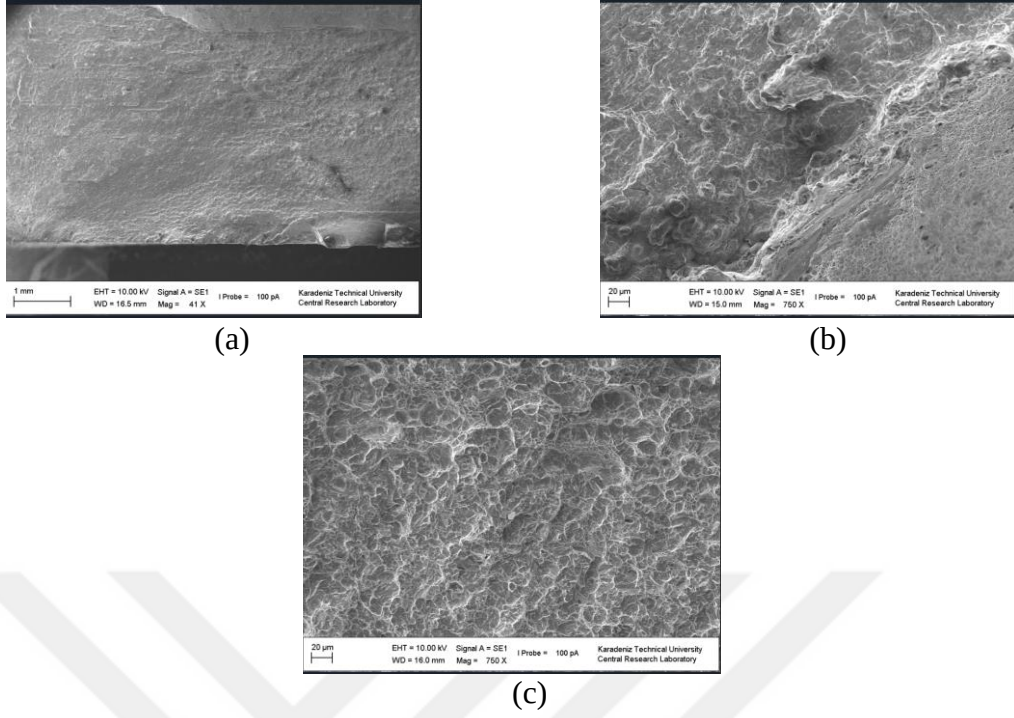
- Kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının kaynaklı numunelere oranla çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Kaynak nüfuziyeti en düşük olan KN 1 numunelerinin (yetersiz ergime ve yetersiz nüfuziyet oranı çok daha fazla olmasına rağmen) yorulma dayanımının en yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- TMC malzemeden imal edilmiş yük taşımayan kaynaklı birleşimlerde kaynak nüfuziyetinin artışı ile yorulma dayanımının düştüğü tespit edilmiştir.

3.3.9. Kırılma Yüzeyi İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

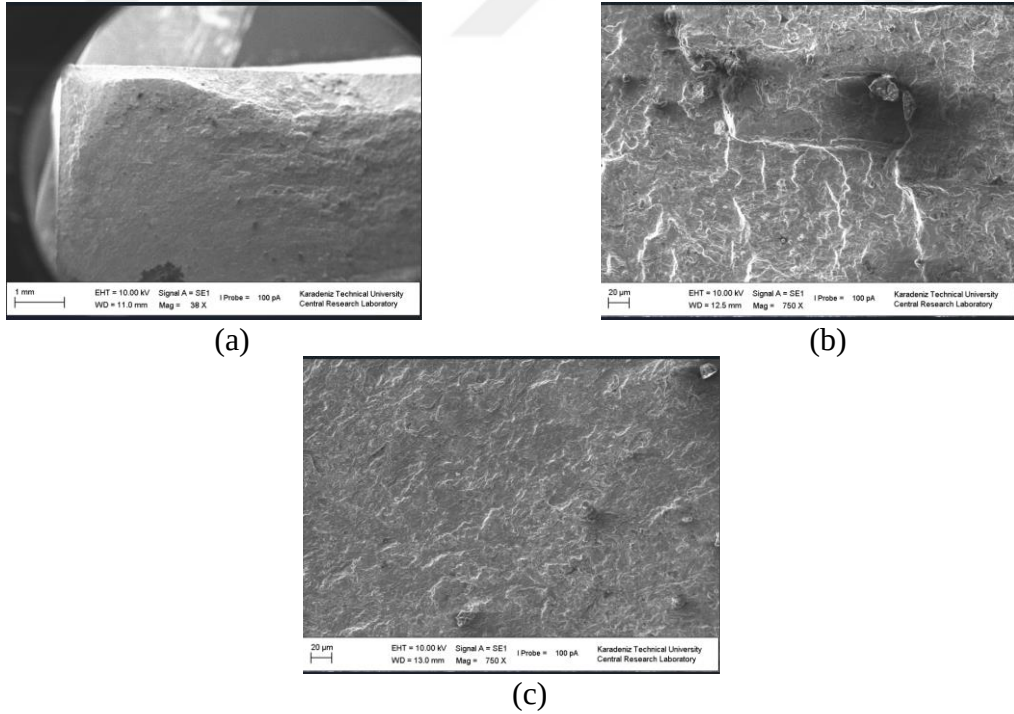
Kırılma yüzeyi incelemesi Tablo 48’de verilen kırılması/kopması gerçekleşmiş numunelerden ilgili gerilme değerindeki birer adet numuneye uygulanmıştır. Kaynaksız numunelerden birinci grup numuneler lazer kesim sonucu elde edilmiş numunelerdir. İkinci grup numuneler su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş numuneler olup üçüncü grup numuneler ise yine su jeti kesim yöntemiyle kesilmiş olup test sırasında eğilme önleyici aparat kullanılan test numuneleridir. Numunelerin kırılma yüzey görüntüleri öncelikle 35X-50X aralığında büyütme ile ardından 750X ila 2000X büyütme ile incelenmiştir. Her bir numunenin kırılma yüzey görüntüleri Şekil 108-122’de verilmiştir.

Tablo 48. Yüzey incelemesine tabi tutulan kaynaklı kaynaklı numuneler

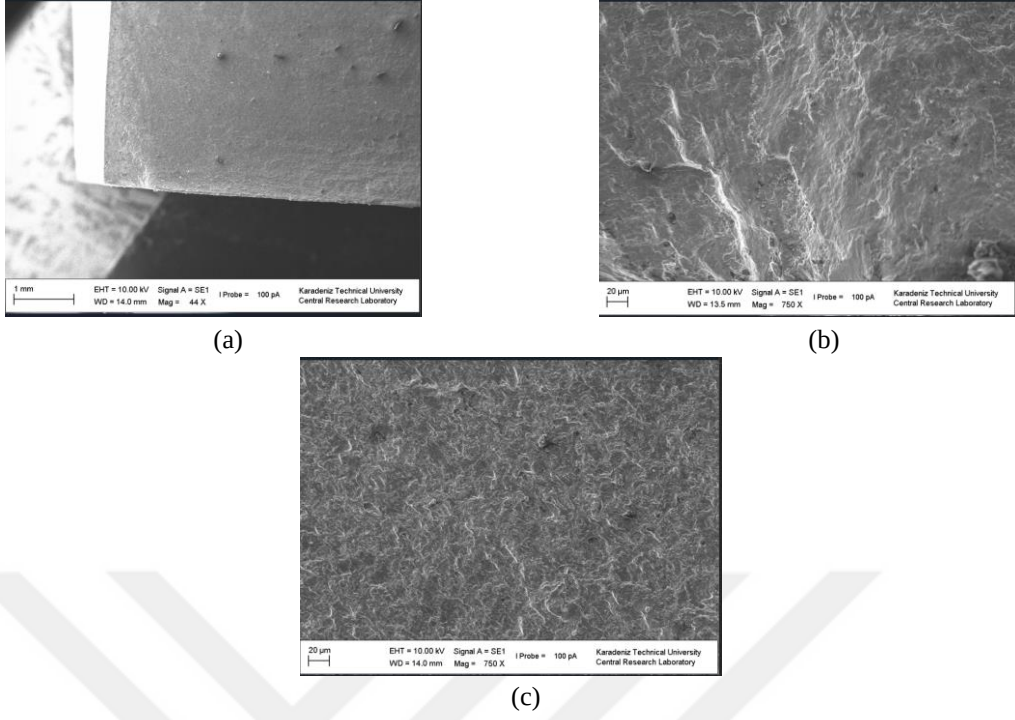
Numune tipi	Uygulanan kuvvet (kN)	Kesitteki gerilme (N/mm ²)	(Kesitte elde edilen gerilme / malzeme akma mukavemeti) x 100	Test frekansı	Tekrar sayısı	Eğilme önleyici aparat	Numune durumu	Sonuç
Ksiz 1.3	27.5	674.7	%50'si	5	23049	Yok	Lazer kesim	Koptu
Ksiz 1.6	22.0	539.7	%40'ı		47049			
Ksiz 1.9	16.5	404.8	%30'u		99549			
Ksiz 1.11	10.9	264.5	%20'si		338560			
Ksiz 2.1	26.8	809.0	%60'ı	5	18049	Yok	Su jeti kesim	Koptu
Ksiz 2.4	22.4	674.7	%50'si		28149			
Ksiz 3.1	22.4	674.7	%50'si	5	37049	Var	Su jeti kesim	Koptu
Ksiz 3.4	17.9	539.7	%40'ı		77049			
Ksiz 3.7	13.4	404.8	%30'u		470598			
KN 1.1	25.1	270.0	%30'u	5	36049	Yok	Su jeti kesim	Koptu
KN 1.6	15.2	168.0	%20'si		166049			
KN 2.1	24.4	270.0	%30'u		12049			
KN 2.7	15.2	168.0	%20'si		110049			
KN 3.1	24.4	270.0	%30'u		23049			
KN 3.7	15.2	168.0	%20'si		88049			



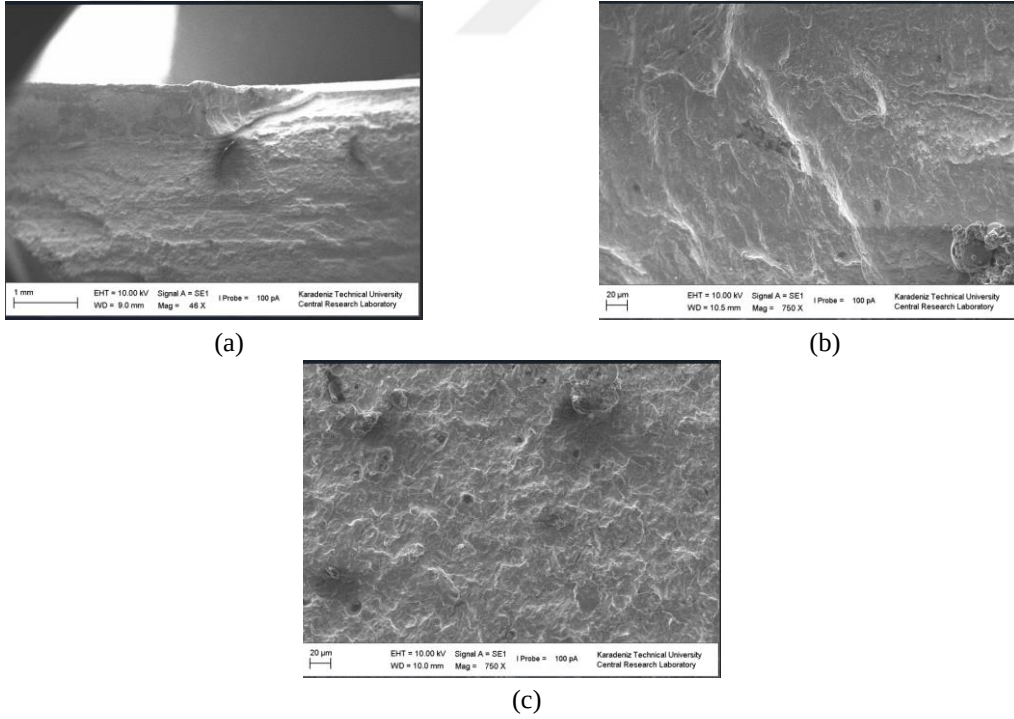
Şekil 108. Kaynaksız numune 1.3 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



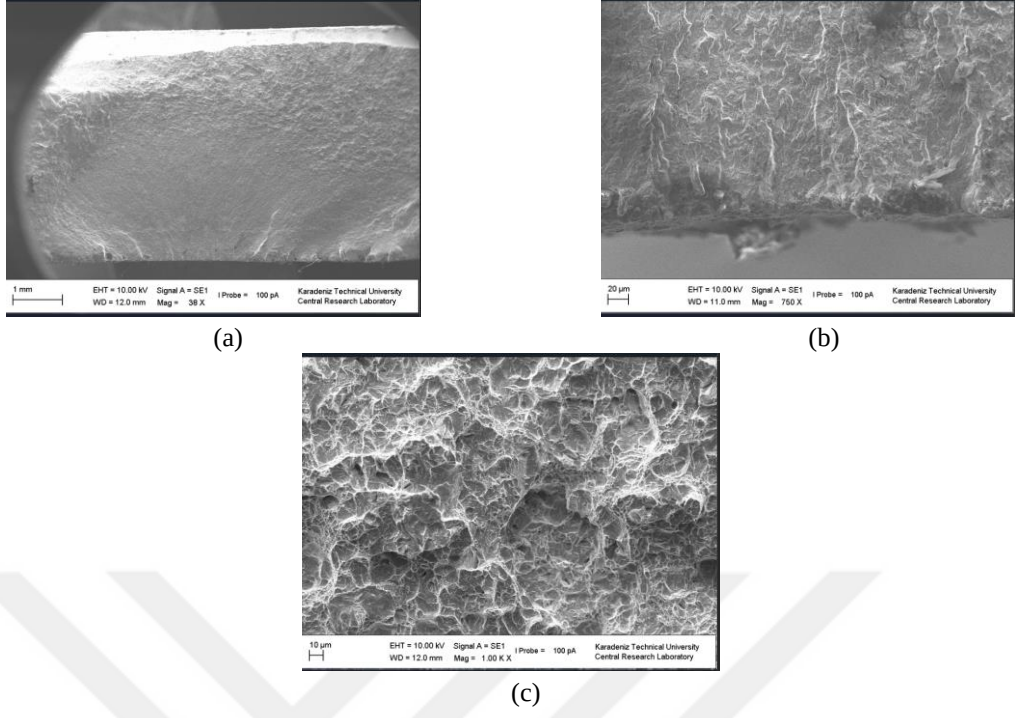
Şekil 109. Kaynaksız numune 1.6 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



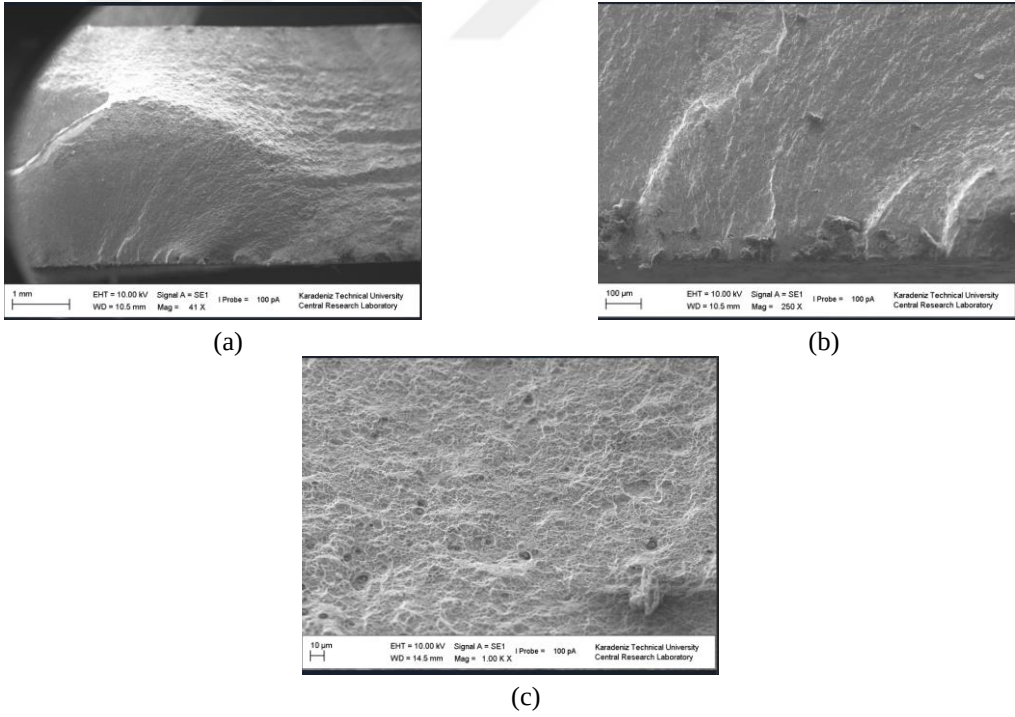
Şekil 110. Kaynaksız numune 1.9 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



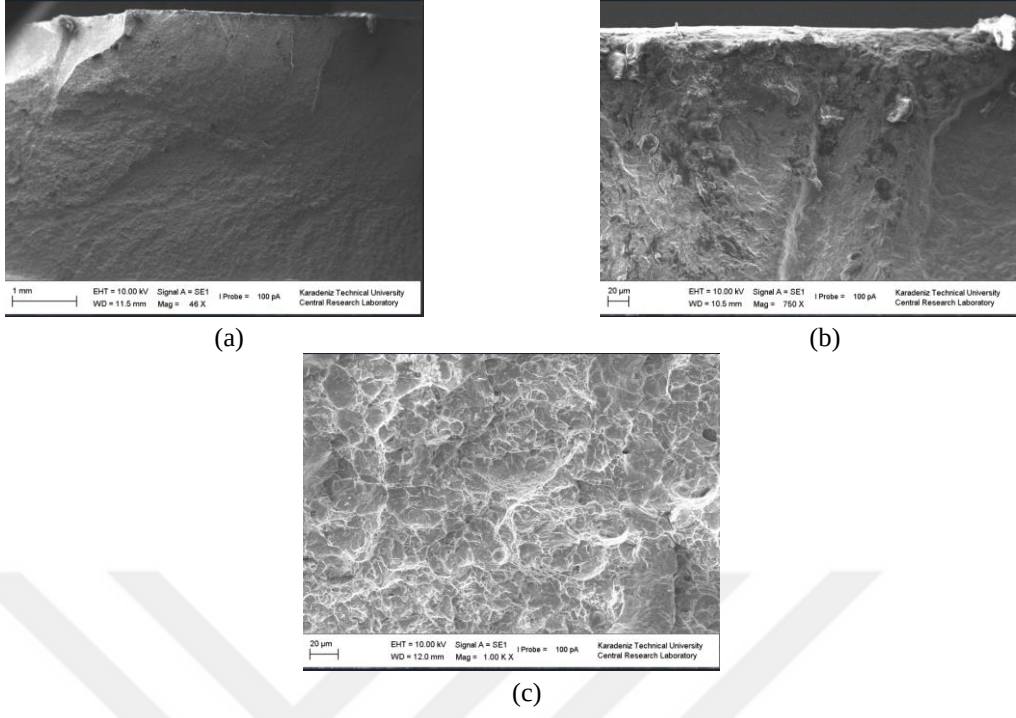
Şekil 111. Kaynaksız numune 1.11 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



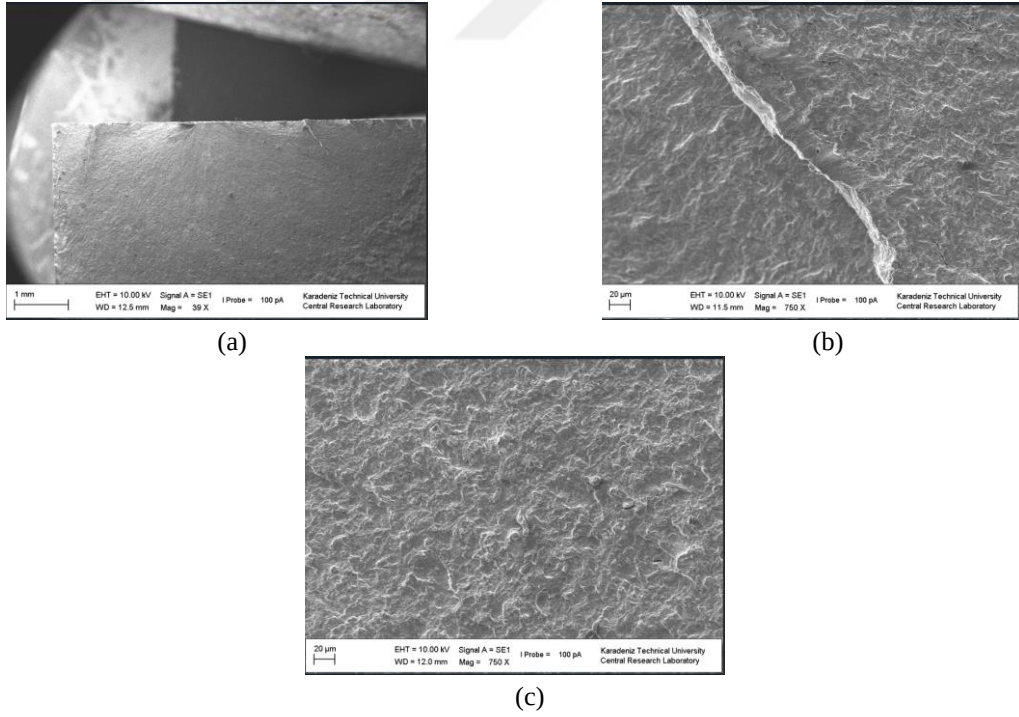
Şekil 112. Kaynaksız numune 2.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



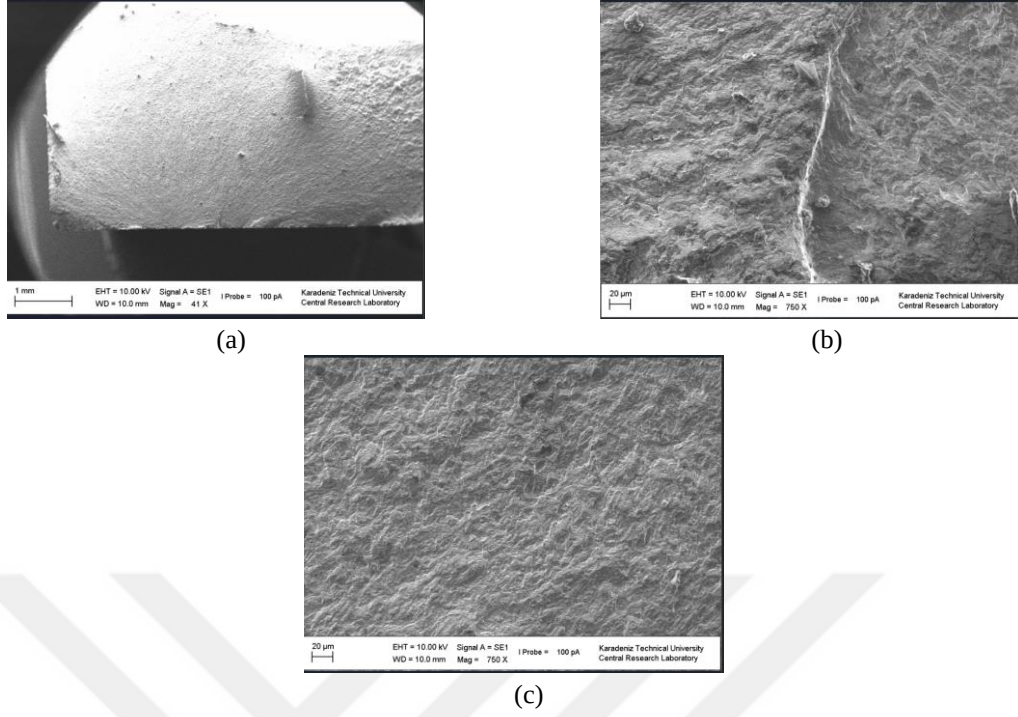
Şekil 113. Kaynaksız numune 2.4 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



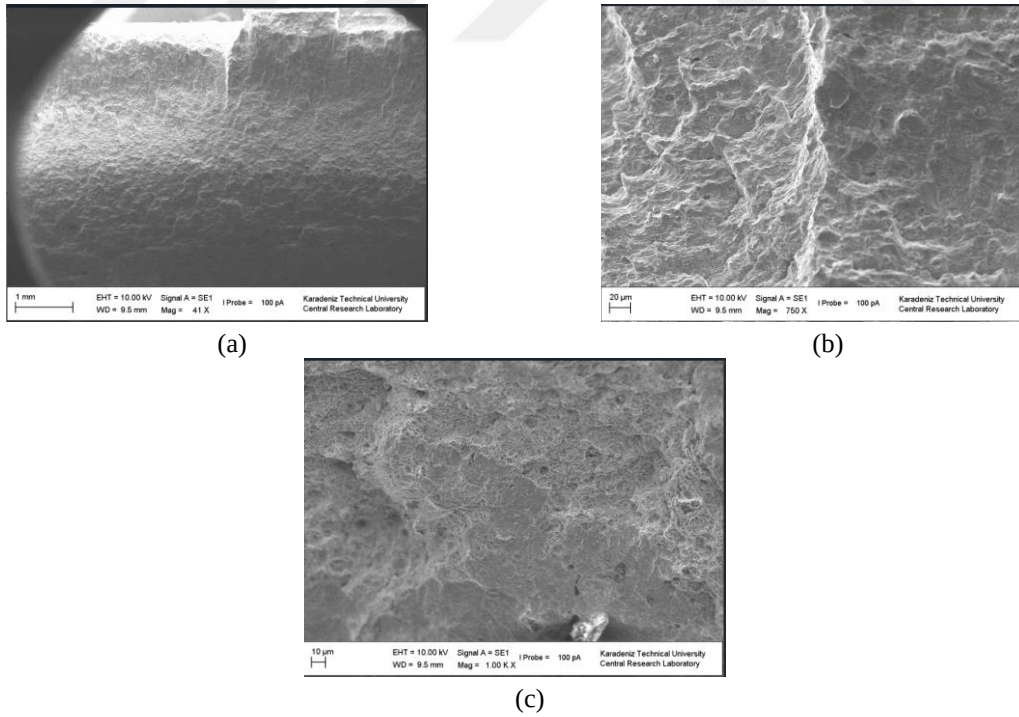
Şekil 114. Kaynaksız numune 3.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



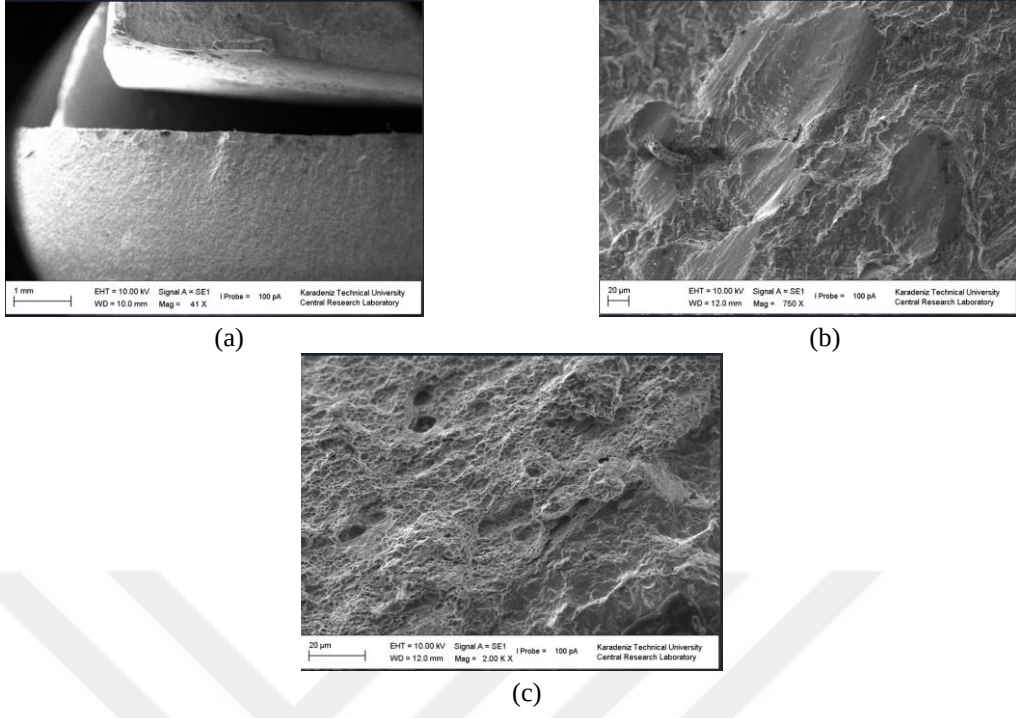
Şekil 115. Kaynaksız numune 3.4 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



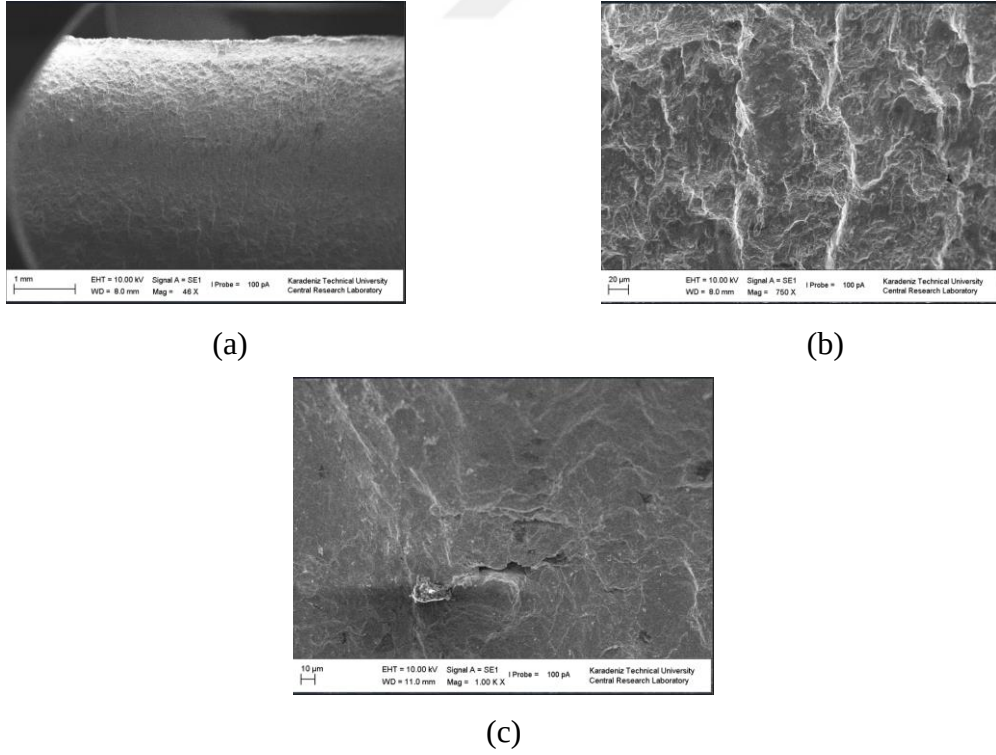
Şekil 116. Kaynaksız numune 3.7 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



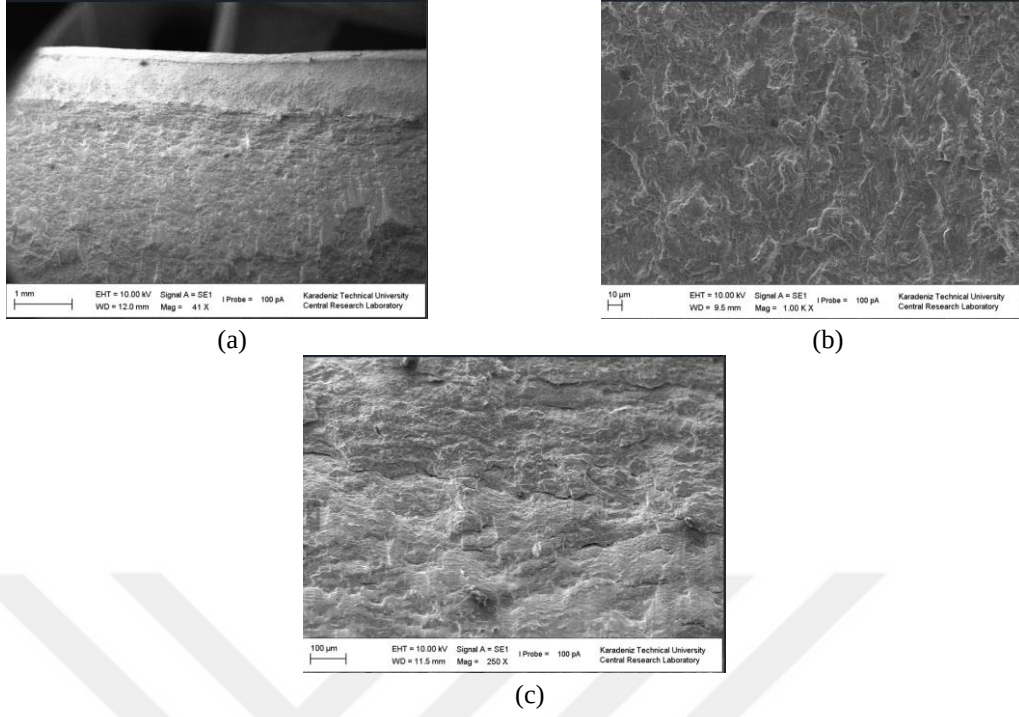
Şekil 117. Kaynaklı numune KN 1.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



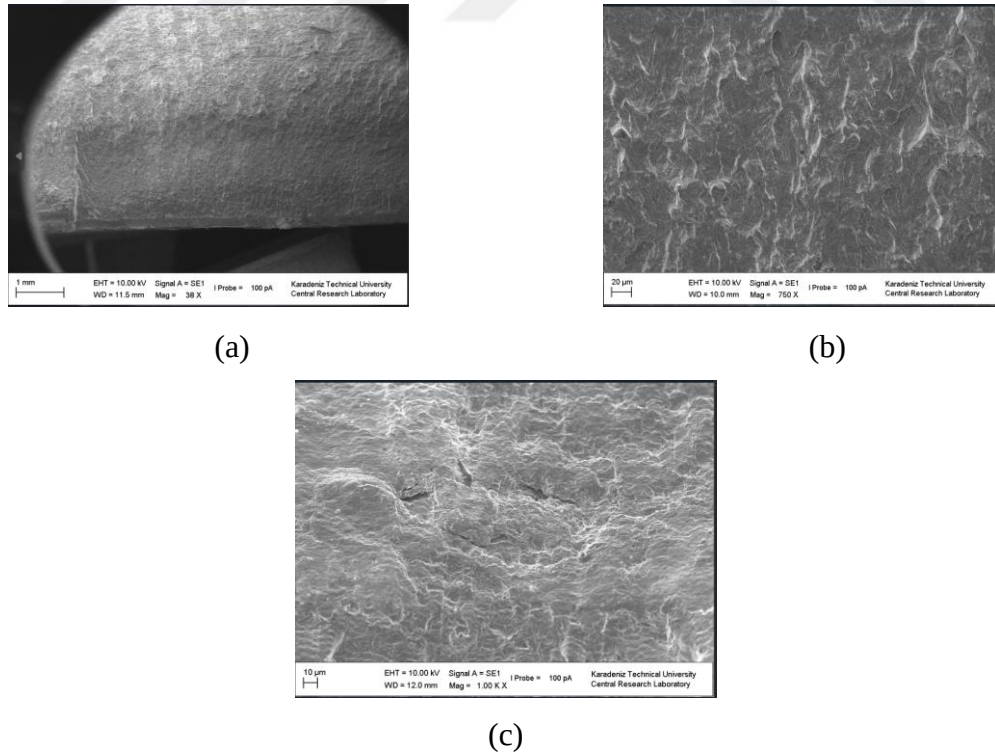
Şekil 118. Kaynaklı numune KN 1.6 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



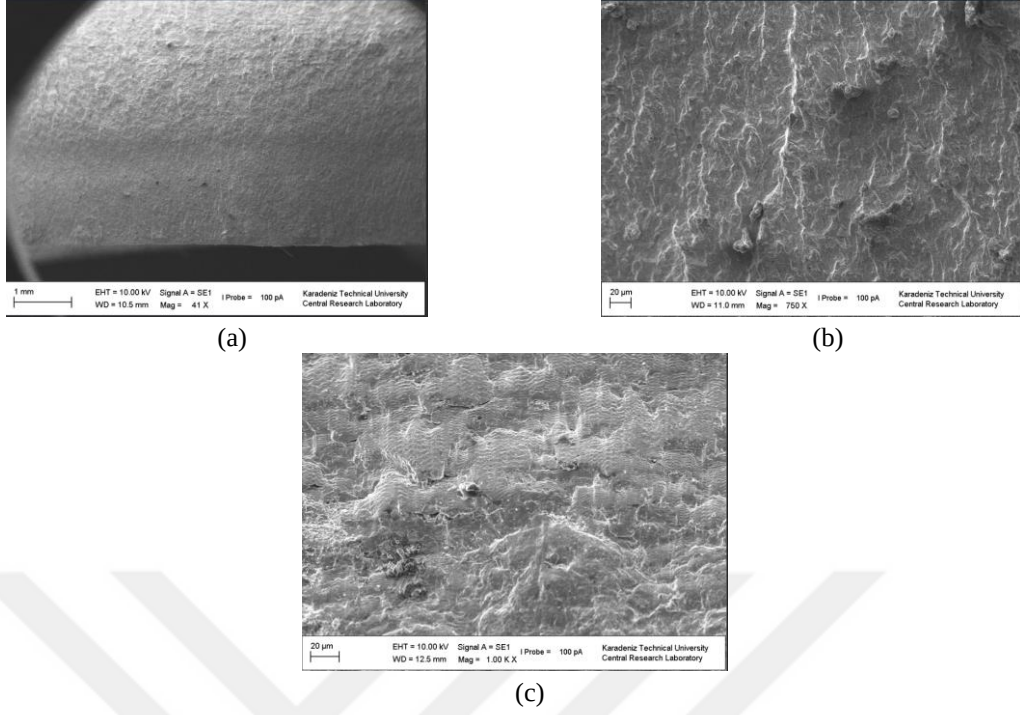
Şekil 119. Kaynaklı numune KN 2.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



Şekil 120. Kaynaklı numune KN 2.7 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü

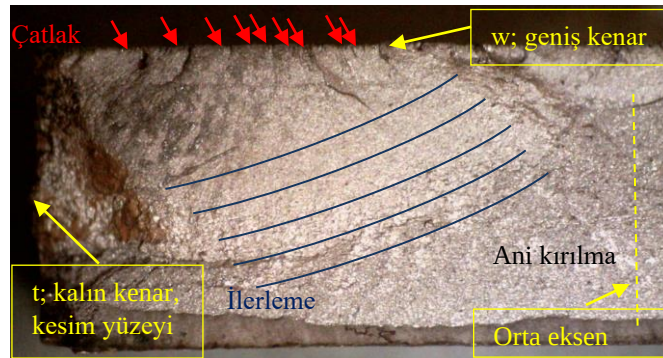


Şekil 121. Kaynaklı numune KN 3.1 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü



Şekil 122. Kaynaklı numune KN 3.7 kırılma görüntüleri (a) 35X-50X büyütme görüntüsü, (b) Çatlak bölgesi yüksek büyütme görüntüsü, (c) Ani kırılma bölgesi yüksek büyütme görüntüsü

Kaynaksız numunelerin çatlak başlangıç bölgesi incelendiğinde çatlakların hemen hepsinin kesim yüzeyi olmayan yani yorulma numunesi geniş kenarı (w) yüzeyinden ve kesim yüzeyine yakın bölgelerden başladığı tespit edilmiştir. Numuneler incelendiğinde kırılma yüzeylerinde makro ve mikro çatlakların olduğu tespit edilmiştir. Lazer kesim yöntemiyle elde edilen numunelerde makro çatlak sayısı su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş numunelere oranla daha az olduğu gözlemlenmiştir. Su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş eğilme önleyici aparatlı ve aparatsız numunelerde Şekil 123'te gösterildiği gibi çok sayıda makro çatlak sonucu kopmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 123. Yorulma numunesi kırılmış yüzey görüntüsü

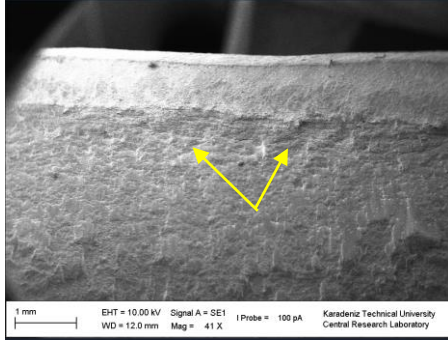
Lazer kesim sonucu yüzeyde kaynak prosesine benzer ısı işlem etkileri sebebiyle kesim sonrası sertlik artışı tespit edilmiştir. Bu sertlik artışı ilgili bölgede temperlenmemiş martenzitik ve/veya beynitik dönüşüme işaret etmektedir. Bu da lazer kesim numunelerinin yorulma değerlerindeki düşüşü kuvvetle ihtimal açıklamaktadır. Lazer ve su jeti kesim yüzeylerinin pürüzlülük ölçümü yapılmış ve değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 124). Üç farklı numuneden yaklaşık beşer adet yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınmıştır. Her ne kadar su jeti kesim numunelerinin yüzey görüntüsü çok daha pürüzsüz gibi görünse de ölçüm sonuçlarına bakıldığında su jeti kesim numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ortalama değerinin 2 mikron, lazer kesim numunelerinin ise 3 mikron olduğu tespit edilmiştir. Su jetiyle kesilmiş numunelerin pürüzlülük değerinin lazer kesime yakın olması kesim sırasında kullanılan aşındırıcı partiküllerin boyutlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüzey kalitesinin yorulma dayanımına etkisi ilgili standartlarda tanımlanmış ve numune ve/veya parçaların sahip olması gereken yüzey kalitesi ilgili standartlarda belirtilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde; kırılmaların tamamı geniş kenar bölgesinde (yani kesim yüzeyi olmayan yüzeyde) gerçekleştiğinden bu çalışma özelinde kesim yüzey kalitesinin numune yorulma dayanımlarına herhangi bir etkisi olmadığını söyleyebiliriz. Bu kapsamda çatlakların geniş kenar yüzeyinden başlaması lazer kesim sonucu elde edilmiş numunelerin yorulma dayanımlarının lazer kesim sırasında oluşan ısı etkisi sonucu düştüğü yorumunu yapabiliriz.



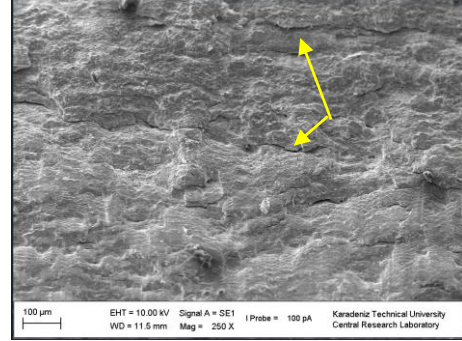
Şekil 124. Kaynaksız numunelerin kesim yüzeyi pürüzlülük ölçümü

Kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde tespit edilen çatlakların hemen hepsi kaynaksız numunelerde olduğu gibi geniş kenar yüzeyinden başlamıştır. Kaynaksız numunelerin aksine bu numunelerde çok daha düşük sayıda makro çatlak tespit

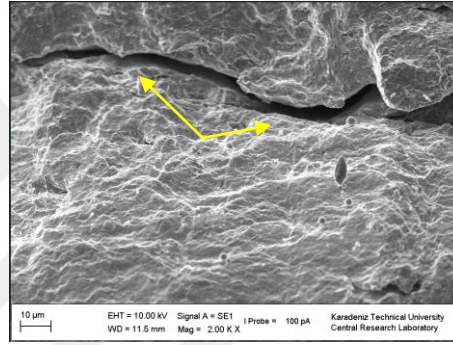
edilmiştir. Yorulma izleri kaynaklı numunelere oranla kaynaklı numunelerde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 125).



(a)



(b)



(c)

Şekil 125. Kaynaklı numune kırılma yüzeyi yorulma izleri (a) 35X-50X büyütme, (b) 250X büyütme, (c) 2000X büyütme

4. SONUÇLAR

- Plakalara uygulanan tahribatlı ve tahribatsız testler sonucu test malzemesinin hem üretici firma kataloğundaki değerleri hem de ilgili standarttaki değerleri sağladığı tespit edilmiştir.
- Kaynaksız numunelerde; yorulma dayanımı en yüksek olan numuneler eğilme önleyici aparatlı su jeti kesim yöntemiyle kesilmiş numunelerdir. Yorulma dayanımı en düşük olan numuneler lazer kesim yöntemiyle kesilmiş numunelerdir.
- Kaynaklı parçalara uygulanan görsel ve penetrant muayene sonucu yüzeye açık süreksizlik ve belirtiye rastlanmamıştır. Ultrasonik muayene sonucu 1 numaralı kaynaklı parçada yetersiz nüfuziyeti işaret eden bulgular elde edilmiştir.
- Kaynaklı numunelere uygulanan sertlik testi sonucu 3 numaralı kaynaklı numunenin bilhassa orta kesit bölgesindeki sertlik düşüşünün en fazla olduğu belirlenmiştir. Sertlik hattı 4 ve hat 5'e bakıldığında ITAB bölgesinde sertlik düşüşü yine kaynaklı numune 2 ve numune 3'te en fazla olduğu saptanmıştır. Kaynak metalinden uzaklaştıkça kaynaklı numune 1 ve numune 2'nin 500 Hv değerinin üzerine çıktığı saptanmıştır. Tüm numunelerin ITAB bölgesinde kaynak sonrası UKE'nin kritik sertlik değeri olarak belirlediği 350 Hv değerini aşan sertlik değeri tespit edilmemiştir.
- Kaynaklı numunelerin akma mukavemeti kaynaksız numunelerle mukayese edildiğinde %37'ye yakın bir kaybın olduğu belirlenmiştir.
- Mikroyapı incelemesi sonucu kaynak metali yapısının dentritik yapıda olduğu ve numunelerin hepsinin kaynak dikişi ITAB bölgesinde tane irileşmesi gözlemlenmiştir.
- Farklı kaynak nüfuziyetine sahip 10'ar adet kaynaklı numunenin 40 adet kaynak dikişi incelendiğinde; 1 numaralı kaynaklı numunelerin 35 adet kaynağında yetersiz nüfuziyet, 5 adet kaynağında yetersiz ergime, 2 numaralı kaynaklı numunelerin 8 adet kaynağında yetersiz nüfuziyet, 3 numaralı kaynaklı numunelerin 2 adet kaynağında yetersiz nüfuziyet tespit edilmiştir.
- Kaynak nüfuziyet oranı uzunluk cinsinden değerlendirildiğinde kaynaklı numune 1, 2 ve 3'ün tüm kaynak dikişlerinin kaynak nüfuziyet ortalaması sırasıyla % 12.7,

%15.6 ve %31.9 ölçülmüştür. Alan cinsinden değerlendirildiğinde ise kaynak nüfuziyet ortalamaları sırasıyla %8.2, %10.9 ve %21.4 olarak ölçülmüştür.

- 120 adet kaynak ucu yarıçap ölçümü sonucu en küçük değerin 0.45mm en büyük ölçümün ise 2.79mm olduğu saptanmıştır. 120 adet kaynak ucu yarıçap ölçümünün ortalama değerinin 1.38mm olduğu belirlenmiştir. Kaynaklı numune 1, 2 ve 3'ün yarıçap ortalamalarının sırasıyla 1.37mm, 1.37mm ve 1.40mm olduğu tespit edilmiştir.
- Kaynaklı numune 1 ve 2'nin hot-spot gerilme değerlerinin nominal gerilme değerlerinden fazla olmasına rağmen kaynaklı numune 3'te bu değerlerin birbirine yakın olduğu saptanmıştır.
- Kaynak nüfuziyeti en düşük olan 1 numaralı kaynaklı numunelerin en yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Kaynak nüfuziyetinin artışıyla birlikte yorulma dayanımının düştüğü yapılan test çalışmaları sonucu bu malzeme ve birleşim tipi için tespit edilmiştir.
- Kaynaksız numunelerin çatlak başlangıç bölgesi incelendiğinde çatlakların hemen hepsinin kesim yüzeyi olmayan yani yorulma numunesi geniş kenarı yüzeyinden ve kesim yüzeyine yakın bölgelerden başladığı gözlemlenmiştir.
- Lazer kesim yöntemiyle elde edilen numunelerde makro çatlak sayısı su jeti kesim yöntemiyle elde edilmiş numunelere oranla daha az olduğu tespit edilmiştir.
- Kaynaksız numunelerin aksine kaynaklı numunelerde çok daha düşük sayıda makro çatlak gözlemlenmiştir. Yorulma izleri kaynaksız numunelere oranla kaynaklı numunelerde daha belirgin olduğu saptanmıştır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde bazı öneriler aşağıda sunulmuştur;

- Bilhassa temperlenmiş martenzitik çelikten (TMÇ) imal edilecek kaynaklı yapıların kaynak prosesi optimizasyon çalışmalarında yorulma testlerinin de gerçekleştirilerek kaynak tasarım süreçlerinde dikkate alınması gerekebilir.
- Dinamik yüke maruz kalacak bir yapı söz konusu olacaksa lazer ya da su jeti kesim yöntemlerindeki parametrelerin optimizasyonu gerekebilir.
- Kaynak nüfuziyet ölçümleri uzunluk cinsi yerine alan cinsinden değerlendirilebilir. Bu çok daha doğru değerlendirme imkânı yapmayı sağlayabilir.
- Tek veya çok pasolu kaynak işlemi görecektir olan kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının iyileştirilmesi için gerekli önlemlerin alınması gerekebilir.
- Bu çalışma özelinde kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi için etkin çentik gerilme yaklaşımı kullanılacaksa kaynak ucu ve kaynak kökü modellemesinde simgesel yarıçap 1.4 mm olarak alınabilir.
- Akma mukavemeti 960 N/mm^2 'den fazla olan malzemelerin hot-spot gerilme analizleri için gerinim ölçümleriyle birlikte yorulma deneyleri yapılarak Uluslararası Kaynak Enstitüsünün yayımlamış olduğu yorulma direnci S-N eğrilerine alternatif olarak S-N eğrisi sunulabilir. Bu kapsamda sürekli yorulma testi yapma ihtiyacı ortadan kalkabilir.
- Kaynaklı yapıların yorulma analizlerinde kaynak nüfuziyeti de dikkate alınarak analizlerin yapılması daha sağlıklı sonuçların elde edilmesine imkân sağlayabilir.

6. KAYNAKLAR

- AASHTO. (1994). *Standard Specifications for Highway Bridges*. America: LRFD.
- Chen, L., & Shapiro, S. (1995). An alternative test for normality based on normalized spacings. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 53(3-4), 269-287.
- Albert, W. A. J. (1837). Über Treibseile am Harz. *Archiv für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Huttenkunde*, 10(215), 82-86.
- Anthes, R. J., Köttgen, V. B., & Seeger, T. (1993). Kerbformzahlen von Stumpfstoßen und Doppel-T-Stößen. *Schweißen und Schneiden*, 45(12), 685-688.
- API. (1993). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. *RP2A*. Washington: American Petroleum Institute.
- ASM. (1993). Welding, Brazing and Soldering, Volume 6. *ASM Handbook*. ASM International.
- ASTM, (2011). Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling. *ASME BPVC Section II*. Amerika: American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM. (2017). Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. *ASTM E3*. America: American Society for Testing Materials.
- ASTM. (2021). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. *ASTM E 466*. America: American Society for Testing Materials.
- ASTM. (2021). Standard Test Methods and Practices for Chemical Analysis of Steel Products. *ASTM A 751*. America: American Society for Testing Materials.
- ASTM. (2023). Standard Guide for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. *ASTM E 739*. America: American Society for Testing Materials.
- ASTM. (2023). Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. *ASTM E10*. America: American Society for Testing Materials.
- Aygül, M. (2013). *Fatigue Evaluation of Welded Details—Using The Finite Element Method*. Chalmers Tekniska Högskola, Doktor Tezi, İsveç.
- AWS. (1996). Structural Welding Code – Steel. *ANSI/AWS D.1*. Miami: American Welding Society.
- AWS. (2009). Standard Welding Terms and Definitions Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying. *AWS A3.0M/A3.0:2010*. America: American Welding Society.

- AWS. (2010). Bridge Welding Code. *AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2010*. America: American Welding Society.
- AWS. (2020). Structural Welding Code — Steel. *AWS D1.1/D1.1M:2020*. America: American Welding Society.
- Bannantine, J. A., Comer, J. J., & Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. New York: Englewood Cliffs.
- Braithwaite, F. (1854). On The Fatigue and Consequent Fracture of Metals. *In Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 54(13), 463-467.
- Berge, S. (1985). On the Effect of Plate Thickness in Fatigue of Welds. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(2), 423-435.
- Brandt, U., Lawrence, F. V., & Sonsino, C. M. (2001). Fatigue Crack Initiation and Growth in Almg4. 5Mn Butt Weldments. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24(2), 117-126.
- BSI. (1993). Code of Practice: Fatigue Design and Assessment of Steel Structures. *BS7608*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1980). *Steel, Concrete and Composite Bridges, Code of Practice for Fatigue*. London: British Standards Institution.
- BSI. (1992). Structural Use of Aluminium: Code of Practice for Design. *BS8118*. London: British Standards Institution.
- Callister W. D. (2015). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. Ankara: Nobel Yayınevi
- Chen, Y., Shen, Z. Y., Zheng, Q., & Chen, C. (2001). Experimental Study on the Performance of Single Weld Joints in H-Shaped Steel Members. *International Journal of Steel Structures*, 1(3), 201-211.
- Coffin, L. (1954, January). The Problem of Thermal Stress Fatigue in Austenitic Steels at Elevated Temperatures. In Symposium on Effect of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperatures. ASTM International.
- Coffin Jr, L. F. (1954). A Study of The Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 76(6), 931-949.
- Devries, P. H., Ruth, K. T., & Dennies, D. P. (2010). Counting on Fatigue: Striations and Their Measure. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 10(2), 120-137.
- DNV. (2016). Fatigue Design of Offshore Structures; Technical Report. *DNVGL-RP-C203*. Oslo: Det Norske Veritas.
- Dowling, N. E., Kampe, S. L., & Kral, M. V. (1999). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. Amerika: Pearson Education

- Mcgreevy, & Socie. (1999). Competing Roles of Microstructure and Flaw Size. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 22(6), 495-508.
- Dung, C. V., Sasaki, E., Tajima, K., & Suzuki, T. (2015). Investigations On the Effect of Weld Penetration on Fatigue Strength of Rib-to-Deck Welded Joints in Orthotropic Steel Decks. *International Journal of Steel Structures*, 15(1), 299-310.
- ECCS. (1992). European Recommendations for Aluminium Alloy Structures - Fatigue Design. Brussels: European Convention for Constructional Steelwork.
- EN. (2000). Ultrasonic Testing of Steel Flat Product of Thickness Equal or Greater Than 6 mm. *EN ISO 10160*. Madrid: European Norms.
- EN. (2001). Recommendations for Welding of Metallic Materials - Part 2. *EN ISO 1011-2*. Madrid: European Norms.
- EN. (2002). Welding - Multilingual Terms for Welded Joints with Illustrations. *EN ISO 17659 :2002*. Madrid: European Norms.
- EN. (2007). Welding and Allied Processes - Classification of Geometric Imperfections in Metallic Materials - Part 1. *EN ISO 6520-1*. Madrid: European Norms
- EN. (2010). Recommendations for Welding of Metallic Materials - Part 1. *EN ISO 1011-1*. Madrid: European Norms.
- EN. (2015). Destructive Tests on Welds in Metallic Materials Tensile Test on Cruciform and Lapped Joints. *ISO 9018*. Madrid: European Norms.
- EN. (2015). Non-Destructive Testing of Welds Penetrant Testing Acceptance Levels. *EN ISO 23277*. Madrid: European Norms.
- EN. (2016). Destructive Tests on Welds in Metallic Materials Hardness Testing Part 2. *EN ISO 9015-2*. Madrid: European Norms.
- EN. (2017). Non-Destructive Testing of Welds - Visual Testing of Fusion-Welded Joints. *EN ISO 17637*. Madrid: European Norms.
- EN. (2018). Metallic Materials - Vickers Hardness Test - Part 1. *EN ISO 6507-1*. Madrid: European Norms.
- EN. (2018). Non-Destructive Testing of Welds Ultrasonic Testing Techniques, Testing Levels, and Assessment. *EN ISO 17640*. Madrid: European Norms.
- EN. (2019). Execution of Steel Structures and Aluminium Structures - Part 2. *EN 1090-2:2019*. Madrid: European Norms.
- EN. (2019). Specification and Qualification of Welding Procedures for Metallic Materials. Welding Procedure Test Arc and Gas Welding of Steels and Arc Welding of Nickel and Nickel Alloys. *EN ISO 15614-1*. Madrid: European Norms.

- EN. (2021). Non-Destructive Testing - Penetrant Testing - Part 1: General Principles. *EN ISO 3452-1*. Madrid: European Norms.
- EN. (2022). Destructive Tests on Welds in Metallic Materials Macroscopic and Microscopic Examination of Welds. *EN ISO 17639*. Madrid: European Norms.
- Eurocode 3. (1992). Design of Steel Structures. *prENV 1993*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Eurocode 9. (1996). Design of Aluminium Alloy Structures, Part 2: Structures Susceptible to Fatigue. *prENV 1999*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Fatemi, A., & Yang, L. (1998). Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials. *International Journal of Fatigue*, 20(1), 9-34.
- Fisher, J. W. (1984). *Fatigue and Fracture in Steel Bridges*. Washington: National Academies.
- Folias, E. S. (1965). An Axial Crack in a Pressurized Cylindrical Shell. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1(2), 104-113.
- Frank, K. H. (1972). *The Fatigue Strength of Fillet Welded Connections*. Amerika: Lehigh University.
- Frank, K. H., & Fisher, J. W. (1979). Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints. *Journal of the Structural Division*, 105(9), 1727-1740.
- Fricke, W. (2003). Fatigue Analysis of Welded Joints: State of Development. *Marine Structures*, 16(3), 185-200.
- Fricke, W. (2012). IIW Recommendations for the Fatigue Assessment of Welded Structures by Notch Stress Analysis. Londra: Woodhead Publishing.
- Fricke, W., & Petershagen, H. (1992). *Detail Design of Welded Ship Structures Based on Hot-Spot Stresses*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Gerber, W. Z. (1874). Calculation of the Allowable Stresses in Iron Structures. *Z. Bayer Archit Ing Ver*, 6(6), 101-110.
- Ginzburg, V. B., & Ballas, R. (2000). *Flat Rolling Fundamentals*. New York: CRC Yayinevi.
- Goodman, J. (1899). *Journal of Mechanics Applied to Engineering, 1st Edition*. New York: Longmans Yayinevi.
- Graham, G. M., & Ume, I. C. (1997). Automated System for Laser Ultrasonic Sensing of Weld Penetration. *Mechatronics*, 7(8), 711-721.
- Gurney, T. R. (1979). *Fatigue of Welded Structures*. London: Cambridge University Press.

- Haibach, E. (1970). *Modifizierte Lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit Fortschreitender Schädigung*. Almany: Darmstadt
- Haibach, E. (1971). The Allowable Stresses Under Variable Amplitude Loading of Welded Joints. *In Proc. Conf. Fatigue Welded Structures*, 2, 328-339.
- Haigh, B. P., Experiments on the Fatigue of Brasses, *Journal of the Institute of Metals*, 18(1), 55–86.
- Handbook, F. (1985). *Offshore Steel Structures*. Tapir: Trondheim.
- Hanji, T., Tateishi, K., Ohashi, Y., & Shimizu, M. (2020). Effect of Weld Penetration on Low-Cycle Fatigue Strength of Load-Carrying Cruciform Joints. *Welding in the World*, 64, 327-334.
- Hardt, D. E., & Katz, J. M. (1984). Ultrasonic Measurement of Weld Penetration. *Welding Journal*, 63(9), 273-281.
- He, L., Akebono, H., Sugeta, A., & Hayashi, Y. (2020). Cumulative Fatigue Damage of Stress Below the Fatigue Limit in Weldment Steel Under Block Loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(7), 1419-1432.
- Hectors, K., & De Waele, W. (2021). Cumulative Damage and Life Prediction Models for High-Cycle Fatigue of Metals: A Review. *Metals*, 11(2), 204.
- Hobbacher, A. (1993). Stress Intensity Factors of Welded Joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 46(2), 173-182.
- Hobbacher, A. (1996). *Fatigue Design of Welded Joints and Components: Recommendations of IIW Joint Working Group XIII-XV*. England: Woodhead Publishing.
- Hobbacher, A. (2016). *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints And Components (Vol. 47)*. Londra: Springer International Publishing.
- Hobbacher, A., & Kassner, M. (2012). On Relation Between Fatigue Properties of Welded Joints, Quality Criteria and Groups in ISO 5817. *Welding in the World*, 56, 153-169.
- Hollister, S. C., Garcia, J., Cuykendall, T. R., & Cornell Univ Ithaca Ny. (1947). *Fatigue Tests of Ship Welds*. New York: Cornell University.
- Hou, C. Y., & Lawrence, F. V. (1996). Crack Closure in Weldments. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 19(6), 683-693.
- Hou, C. Y., & Charng, J. J. (1997). Models for the Estimation of Weldment Fatigue Crack Initiation Life. *International Journal of Fatigue*, 19(7), 537-541.
- Howard E. (1975). *Metals Handbook: Failure Analysis and Prevention*, vol. 10, 8th edition. Amerika: ASM Handbook Committee

- Huther, M., & Lieurade, H. P. (1997). Application of the Hot Spot Stress Method. In IIW International Conference, s. 332-400. New York.
- IIW. (2008). Recommendations For Fatigue Design of Welded Joints and Components. International Institute of Welding.
- Ishigami, A., Roy, M. J., Walsh, J. N., & Withers, P. J. (2017). The Effect of the Weld Fusion Zone Shape on Residual Stress in Submerged Arc Welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 3451-3464.
- ISO. (2008). Welding Consumables Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes. *ISO 14175*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2012). Fatigue Testing of Welded Components Guidance. *ISO/TR 14345*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2017). Metallic Materials Fatigue Testing Axial Force-Controlled Method. *ISO 1099*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2019). Metallic Materials Tensile Testing Part 1. *ISO 6892-1:2019*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2019). Welding and Allied Processes - Symbolic Representation on Drawings Welded Joints. *ISO 2553:2019*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2023). Fusion-Welded Joints in Steel, Nickel, Titanium and Their Alloys - Quality Levels for Imperfections. *ISO 5817*. International Organization for Standardization.
- Jonsson, B., Dobmann, G., Hobbacher, A. F., Kassner, M., Marquis, G., Jonsson, B., & Marquis, G. (2016). IIW Fatigue Assessment Procedures. *IIW Guidelines on Weld Quality in Relationship to Fatigue Strength*, 2(1), 11-18.
- Juvinall, R. C. (1967). *Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength*. New York: Englewood Cliffs.
- Kainuma, S., Mori, T., & Ichimaya, M. (2001). Evaluation Method for Fatigue Failure Modes in Load-Carrying Fillet Welded Cruciform Joints. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2001(668), 313-318.
- Kasugai T. & Fujita M. (1999). *Atlas of CCT Diagrams for Welding*. Japonya: National Research Institute for Metals
- Karakaş, Ö., Gülsöz, A., & Sonsino, C. M. (2009). Kaynaklı Birleştirmelerin Yorulma Dayanımı Değerlendirmelerinde Yapısal Zorlama Yöntemi. *Engineer & the Machinery Magazine*, 50(597), 3-11.
- Kita, A. (2005). *Measurement of Weld Penetration Depth Using Non-Contact Ultrasound Methods*. Gürcistan: Georgia Institute of Technology.

- Kuguel, R. (1961). A Relation Between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume. *In proc. ASTM*, 61(1), 732-748.
- Lancaster, J.F. (1999). *Metallurgy of Welding - Sixth Edition*. Amerika: Abington Publishing
- Langlais, T. E., & Vogel, J. H. (1996). Overcoming Limitations of the Conventional Strain-Life Fatigue Damage Model. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 117(1), 103–108.
- Lawrence, F. V., Dimitrakis, S. D., & Chen, N. (1997). The Fatigue Resistance of Automotive Weldments. *In Proceedings of the International Conference on Performance of Dynamically Loaded Welded Structure*, s. 254-264. New York.
- Lawrence, F. V., Mattos, R. J., Higashida, Y., & Burk, J. D. (1978). Estimating the Fatigue Crack Initiation Life of Welds. *Astm Stp*, 648(1), 134-158.
- Lee, Y. B., Chung, J. K., & Park, S. H. (2011). Patterns and Characteristics of Fatigue Failure in Cruciform Fillet Weld Joint. *Journal of Welding and Joining*, 29(4), 67-72.
- Lee, Y. L. (2005). *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*. Amsterdam: Elsevier.
- Macdonald, K. (2011). *Fracture and Fatigue of Welded Joints And Structures*. Londra: lsevier.
- Maddox, S. J. (1975). An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints. *International Journal of Fracture*, 11(1), 221-243.
- Maddox, S. J. (1990). *Stress Intensity Factors for Welded Toe Cracks*. Portsmouth: Paper Presented at Damage.
- Maddox, S. J. (2001). Recommended Hot-Spot Stress Design SN Curves for Fatigue Assessment of Fpsos. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, s. 185-198. Teksas.
- Maddox, S. J. (2011). *Fatigue Design Rules for Welded Structures*. In *Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures*. Amerika: Woodhead Publishing.
- Maddox, S. J. (2014). *Fatigue Strength of Welded Structures*. England: Woodhead publishing.
- Maddox, S. J. (1982). *Influence of Tensile Residual Stresses on the Fatigue Behavior of Welded Joints in Steel*. Amerika: ASTM International.
- Maddox, S. J. (1985). Improving the Fatigue Strength of Welded Joints By Peening. *Metal construction*, 17(4), 220-224.

- Manson, S. S. (1953). *Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress* (Vol. 2933). Amerika: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Manson, S. S., & Halford, G. R. (1981). Practical Implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage Curve Approach for Treating Cumulative Fatigue Damage. *International Journal of Fracture*, 17, 169-192.
- Mansour, R., Zhu, J., Edgren, M., & Barsoum, Z. (2019). A Probabilistic Model of Weld Penetration Depth Based on Process Parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1-4), 499-514.
- Marshall, P. W. (2013). *Design of Welded Tubular Connections: Basis and Use of AWS Code Provisions* (Vol. 37). Amsterdam: Elsevier.
- Matthiesen, R. B., Harris, L. A., & NEWMARK, N. (1953). *The Fatigue Properties of Weld Metal. Department of Civil Engineering*. Amerika: University of Illinois.
- Milella, P. P. (2012). *Fatigue and Corrosion in Metals*. Roma: Springer Science & Business Media.
- Miner, M. A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 67, 159-164
- Modarres, M., Amiri, M., & Jackson, C. (2017). *Probabilistic Physics of Failure Approach to Reliability: Modeling, Accelerated Testing, Prognosis and Reliability Assessment*. Almany: Wiley.
- Morin, A. J. (1853). Leçons de Mécanique Pratique: *Résistance des Matériaux*, 53(4), 35-48.
- Morrow, J. (1965). Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals. In Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity. *ASTM International*, 2(1), 45–86.
- Morrow, J. (1968). *Fatigue Design Handbook, Advances in Engineering, Volume 4*. Detroit: SAE Transactions
- Mostafa, N. B., & Khajavi, M. N. (2006). Optimization of Welding Parameters for Weld Penetration in FCAW. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16(1-2), 132-138.
- Murakami Y. (1987). *Stress Intensity Factors Handbook* Oxford: Pergamon Press
- Murakami, Y., & Nagata, J. (2002). Effects of Small Defects on Fatigue Properties of Materials, Mechanism of Ultralong Life Fatigue and Applications to Fatigue Design of Car Components. *SAE Technical Paper*, 2(1), 89-96.
- Munse, W. H. (1965). *Fatigue of Welded Steel Structures*. Washington: National Academies

- Murtaza, G., & Akid, R. (1995). Modelling Short Fatigue Crack Growth in A Heat-Treated Low-Alloy Steel. *International Journal of Fatigue*, 17(3), 207-214.
- Nagamoto, R., Matoba, M., Kawasaki, T., Inoue, K., Hori, T., Iino, N., & Fukuoka, T. (1991). Model Fatigue Test Result of Welded Structural Element and Proposal for Fatigue Design Procedure. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1991(170), 723-735.
- Nakayasu, H., & Kodama, S. (1987). Statistical S-N Testing Method with 14 Specimens: JSME Standard Method for Determination of S-N Curves. *Statistical Research on Fatigue and Fracture*, 2(1), 59-69.
- NAS. (2008). Detail Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness. *MIL-DTL-46100E*. Washington: National Aerospace Standards.
- NATO. (2004). Procedures for Evaluating the Protection Levels of Logistic and Light Armoured Vehicles for Ke and Artillery Threats. *STANAG 4569*. North Atlantic Treaty Organization.
- Neuber, H. (1946). *Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Stress Calculation (Vol. 74)*. Amerika: JW Edwards.
- Newman Jr, J. C., & Raju, I. S. (1980). Stress-Intensity Factors for Internal Surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 102(1), 342-346.
- Newman Jr, J. C., & Raju, I. S. (1981). An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack. *Engineering Fracture Mechanics*, 15(1-2), 185-192.
- Newman Jr, J. C., & Raju, I. S. (1981). Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies. In *ASTM Natl. Symp. on Fracture Mech.*, s. 1238-1265. Amerika.
- Nguyen, T. N., & Wahab, M. A. (1998). The Effect of Weld Geometry and Residual Stresses on the Fatigue of Welded Joints Under Combined Loading. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3), 201-208.
- Niemi, E. (Ed.). (1995). *Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components*. Amerika: Woodhead Publishing.
- Niemi E. (1995). *Recommendations Concerning Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components*. Cambridge: Abington Publishers.
- Niemi, E., Fricke, W., & Maddox, S. J. (2006). *Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach*. Londra: Woodhead Publishing.
- Niemi, E., Fricke, W., & Maddox, S. J. (2018). *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components*. Londra: Springer

- Nihei, K., Inamura, F., & Koe, S. (1997). Study on Hot Spot Stress for Fatigue Strength Assessment of Fillet Welded Structure. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, s. 557-564. Amerika.
- Nordmark, G. E., Stallmeyer, J. E., & Munse, W. H. (1955). Fatigue and Static Properties of Welded Joints in Low Alloy Structural Steels. *Civil Engineering Studies*, 90(1), 81-92.
- Odebiyi, O. S., Adedayo, S. M., Tunji, L. A., & Onuorah, M. O. (2019). A Review of Weldability of Carbon Steel in Arc-Based Welding Processes. *Cogent Engineering*, 6(1), 160-180.
- ODTÜ KTM (2010). ODTÜ Kaynak Mühendisliği Eğitimi Ders Notları. Ankara: ODTÜ Kaynak Teknoloji Merkezi.
- Offshore Installations. (1995). Guidance on Design, Construction and Certification. London: UK Health and Safety Executive.
- OH, B. (1910). The Exponential Law of Endurance Tests. In *Proc Am Soc Test Mater*, 10(1), 625-630.
- Ohta, A., Maeda, Y., Mawari, T., Nishijima, S., & Nakamura, H. (1986). Fatigue Strength Evaluation of Welded Joints Containing High Tensile Residual Stresses. *International Journal of Fatigue*, 8(3), 147-150.
- Olivier, R., & Ritter, W. (1979). Catalogue of SN Curves of Welded Joints in Structural Steels. Düsseldorf: DVS-Verlag.
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Transaction of the ASME, J. Basic Engng*, 2(1), 528-535.
- Peterson, R. E. (1950). Relation Between Stress Analysis and Fatigue of Metals. *Proc. SESA*, 11(2), 199-206.
- Peterson, R. E. (1959). Analytical Approach to Stress Concentration Effects in Aircraft Materials. In *Proceedings of the US Air Force-WADC Symposium on Fatigue of Metals*, s. 11-13. Amerika.
- Prats-Montalbán, J. M., de Juan, A., & Ferrer, A. (2011). Multivariate Image Analysis: A Review with Applications. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107(1), 1-23.
- Radaj, D. (1990). Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Radaj, D. (1996). Review of Fatigue Strength Assessment of Nonwelded and Welded Structures Based on Local Parameters. *International Journal of Fatigue*, 18(3), 153-170.
- Radaj, D., Sonsino, C. M., & Fricke, W. (2006). Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches. Londra: Woodhead Publishing.

- Radaj, D., & Vormwald, M. (2013). *Advanced Methods of Fatigue Assessment*. Berlin: Springer.
- Rainer, G. (1978). *Errechnen von Spannungen in Schweißverbindungen mit der Methode der Finiten Elemente*. Technical University of Darmstadt, Doktora Tezi, Almanya.
- Rankine, W. J. M. (1843). On The Causes of The Unexpected Breakage of The Journals of Railway Axles; and on The Means of Preventing Such Accidents By Observing The Law of Continuity in Their Construction. In *Minutes of The Proceedings of The Institution of Civil Engineers*, 1843(2), 105-107.
- Rice, R. C., & Rungta, R. (1987). Fatigue Analysis of a Rail Subjected to Controlled Service Conditions. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 10(3), 213-221.
- Rogge, M. D. (2009). *In-process Sensing of Weld Penetration Depth Using Non-Contact Laser Ultrasound System*. Gürcistan: Georgia Institute of Technology.
- Russell, H. W., Grover, H. J., & Jackson, L. R. (1943). *Fatigue Characteristics of Spot-welded 24S-T Aluminum Alloy*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Saeed, G., & Zhang, Y. M. (2007). Weld Pool Surface Depth Measurement Using A Calibrated Camera and Structured Light. *Measurement Science and Technology*, 18(8), 2570.
- Schijve, J. (2008). *Fatigue of Structures and Materials*, 2nd Edition. Hollanda: Springer
- Schoenborn, S., Kaufmann, H., Sonsino, C. M., & Heim, R. (2015). Cumulative Damage of High-Strength Cast Iron Alloys for Automotive Applications. *Procedia Engineering*, 101, 440-449.
- Schubnell, J., Jung, M., Le, C. H., Farajian, M., Braun, M., Ehlers, S., & Baumgartner, J. (2020). Influence of the Optical Measurement Technique and Evaluation Approach on the Determination of Local Weld Geometry Parameters for Different Weld Types. *Welding in the World*, 64(2), 301-316.
- Schütz, W. (1996). A History of Fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2), 263-300.
- Scott Martin, W., & Wirsching, P. H. (1991). Fatigue Crack Initiation—Propagation Reliability Model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 3(1), 1-18.
- Siebel, E. (1955). Ungleichformige Spannung-sverteilung bei Schwingender Beanspruchung. *VDIZ*, 97(5), 121-126.
- Sim, H. B., Uang, C. M., & Sikorsky, C. (2009). Effects of Fabrication Procedures on Fatigue Resistance of Welded Joints in Steel Orthotropic Decks. *Journal of Bridge Engineering*, 14(5), 366-373.
- Smith, K. (1970). A Stress-Strain Function for The Fatigue of Metals. *Journal of Materials*, 5, 767-778.

- Smith, R. (1990). The Versailles Railway Accident of 1842 and the First Research into Metal Fatigue, *Fatigue*, 190(90), 2033-2041.
- Soderberg, C. R. (1930). Factor of Safety and Working Stress. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 52(2), 13-21.
- Sonsino, C. M. (1995). Multiaxial Fatigue of Welded Joints under in-Phase and out-of-Phase Local Strains and Stresses. *International Journal of Fatigue*, 17(1), 55-70.
- Sonsino, C. M. (2007). Fatigue Testing Under Variable Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue*, 29(6), 1080-1089.
- Sonsino, C. M., Łagoda, T., & Demofonti, G. (2004). Damage Accumulation Under Variable Amplitude Loading of Welded Medium and High-Strength Steels. *International Journal of Fatigue*, 26(5), 487-495.
- Spraragen, W., Claussen, G. E., Warner, W. L., & Watertown Arsenal Labs Ma. (1936). Fatigue Strength of Welded Joints and Fatigue Strength of Welded Joints: A Review of the Literature, 10(1), 25-36.
- Testin, R. A., & Yung, J. Y. (1987). Predicting The Fatigue Resistance of Steel Weldments. *Weld J Res Suppl*, 66(4), 93-102.
- Tryon, R. G., & Dey, A. (2003). Reliability-Based Model for Fatigue Notch Effect. *SAE Technical Paper*, 462(1), 156-179.
- TSE. (2021). Pencere, Kapı, Panjur, Kepenk - Mermi Direnci - Özellikler ve Sınıflandırma. EN 1522. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE. (2022). Çelik Yapıların Tasarımı - Bölüm 1-1. EN 1993-1-1. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tülbentçi K. (1990). Mıg-Mag Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı
- Ulewicz, R., Novy, F., Mazur, M., & Szataniak, P. (2014). Fatigue Properties of the HSLA Steel in High and Ultra-High Cycle Region. *Production Engineering Archives*, 4(3), 18-21.
- Ulewicz, R., Szataniak, P., & Novy, F. (2014). Fatigue Properties of Wear Resistant Martensitic Steel. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, s. 784-789. Polonya
- Ulewicz, R., & Nový, F. (2017). Fatigue Resistance and Influence of Cutting Technology on the Mechanical Properties of Modern Steels Used in The Automotive Industry. *Procedia Engineering*, 192(1), 899-904.
- URL-1. (2000). <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/fatigue-design-rules-for-welded-structures-january-2000> adresinden alınmıştır.

- URL-2.(2023). https://www.miilux.fi/wp-content/uploads/2013/03/miilux_protection_datasheet_2012_web.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2023). <https://viaducttrading.com/products/heat-treatment-consoles/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2023). <https://migal.co/en/service/welding-calculators/cooling-rate-t8/5-calculator/explanations-cooling-rate-t8/5> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2015). <https://www.australiansteel.com.au/wp/wp-content/uploads/2015/09/Cutting-of-Hardox-Wear-Plate.pdf> adresinden alınmıştır.
- Uwer, D., & Degenkolbe, J. (1975). Temperaturzyklen beim Lichtbogenschweißen: Einfluss des Waermebehandlungszustandes und der Chemischen Zusammensetzung von Staehlen auf die Abkuehlzeit. *Schweißen und Schneiden*, 27, 303-306.
- Uzunali, U. Y., & Cuvalci, H. (2015). The Effects of Post Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties of Tempered Martensite and High Strength Steel Welded Joints. *Advances in Structural Engineering and Mechanics*, s. 1315-1333. Korea.
- Uzunali, U. Y., Çuvalcı, H., & Atmaca, B. (2019). The Effect of Depth of Fusion on the Behavior of Steel Welded Joints. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37(3), 941-952.
- Van Wingerde, A. M., Packer, J. A., & Wardenier, J. (1995). Criteria for the Fatigue Assessment of Hollow Structural Section Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 35(1), 71-115.
- Volvo. (2014). Weld Class System for Fusion Welding. Volvo STD 181-0001. AB Volvo group.
- Von Waldegg, E. H. (1870). *Handbuch für Speciale Eisenbahn-Technik: Bd. der Eisenbahn-Wagenbau in Seinem Ganzen Umfange*. Leipzig: W. Engelmann.
- Walcher, J., Gray, D., & Manson, S. S. (1979). Aspects of Cumulative Fatigue Damage Analysis of Cold End Rotating Structures. *AIAA Paper*, 79(5), 1178-1190.
- Weixing, Y. (1993). Stress Field Intensity Approach for Predicting Fatigue Life. *International Journal of Fatigue*, 15(3), 243-246.
- Weman, K. (2011). *Welding Processes Handbook*. England: Woodhead Publishing.
- Williams, C. R., Lee, Y. L., & Rilly, J. T. (2003). A Practical Method for Statistical Analysis of Strain–Life Fatigue Data. *International Journal of Fatigue*, 25(5), 427-436.

- Williams, H. E., Ottosen, H., Lawrence, F. V., & Munse, W. H. (1970). The Effects of Weld Geometry on the Fatigue Behavior of Welded Connections. Amerika: University of Illinois.
- Wirsching, P. H. (1983). Statistical Summaries of Fatigue Data for Design Purposes. NASA, 3697.
- Wilson, J. S., & Haigh, B. P. (1923). Stresses in Bridges. Engineering, 116(411-3), 446-448.
- Wilson, W. M., & Munse, W. H. (1949). Fatigue Strength of Various Details Used for the Repair of Bridge Members. University of Illinois. Engineering Experiment Station, 382(1), 35-44.
- Wilson, W. M., & Wilder, A. B. (1939). Fatigue Tests of Butt Welds in Structural Steel Plates. University of Illinois. Engineering Experiment Station, 310(1), 68-96.
- Wojsyk, K., & Kudła, K. (2019). The Rational Use of Fillet Welds and Butt-Fillet Welds in Welded Structures. Welding Technology Review, 91(6), 7-13.
- Wöhler, A. (1870). Ueber die Festigkeits-Versuche mit Eisen Und Stahl. Münih: Godfrey Lowell Cabot Science Library.
- Wöhler, A. (1870). Über die Festigkeitsversuche Mit Eisen und Stahl. Auf Anordnung des Ministers für Handel, Gewerbe U. Öffentl. Arbeiten, Grafen Itzenblitz, Angestellt. Berlin: Ernst Und Korn.
- Yamada, K., & Hirt, M. A. (1982). Fatigue Crack Propagation from Fillet Weld Toes. Journal of the Structural Division, 108(7), 1526-1540.
- Yang, L., & Ume, I. C. (2017). Measurement of Weld Penetration Depths in Thin Structures Using Transmission Coefficients of Laser-Generated Lamb Waves and Neural Network. Ultrasonics, 78, 96-109.
- Yung, J. Y., & Lawrence, F. V. (1985). Analytical and Graphical Aids for the Fatigue Design of Weldments. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 8(3), 223-241.
- Yurioka, M. (1990). Weldability of Modern High Strength Steels. In First United States--Japan Symposium on Advances in Welding Metallurgy, 79-100. San Francisco.

ÖZGEÇMİŞ

Lise eğitimini Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2002-2003 öğretim yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde eğitime başladı. 2008 yılında bu bölümden mezun oldu. 2008-2016 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2010 yılında Uluslararası Kaynak Mühendisliği eğitimini tamamladı. 2008-2021 yılları arasında penetrant ve ultrasonik muayenede Seviye 3, görsel, manyetik ve radyografik muayenede seviye 2 eğitimlerini tamamladı. 2011-2014 yılları arasında özel bir savunma sanayi şirketinde tüm araç grupları kaynak mühendisi ve zırhlı araç kaynak kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başladı. 2014 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.

SCI Makaleler;

Uzunali, U. Y., Cuvalcı, H., (2024). Effect of welding parameters on cruciform weld joints made of armor steel Materials Testing, 66(3), 364-379.

Uzunali, U. Y., Cuvalcı, H., Atmaca, B., Demir, S., & Özkaya, S., (2022). Mechanical properties of quenched and tempered steel welds. Materials Testing, 64(11), 1662-1674.

ESCI Makaleler;

Uzunali, U. Y., & Cuvalcı, H. (2023). Review of the Definition of Weld Penetration, Depth of Fusion and Throat Thickness on Fillet Welds. Gazi University Journal of Science, 1-1.

Uzunali, U. Y., Cuvalcı, H., & Atmaca, B. (2019). The effect of depth of fusion on the behavior of steel welded joints. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 37(3), 941-952.

Uzunali, U. Y., & Cuvalcı, H. (2015). The effects of post weld heat treatment on the mechanical properties of tempered martensite and high strength steel welded joints. Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15), Incheon, Korea.