

Farklı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yapı Çeliğinin Yorulma Dayanımının Deneysel
Olarak İncelenmesi

Mertcan Demir

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Haziran 2023

Experimental Investigation of Fatigue Strength of Structural Steel Joined by Different
Welding Methods

Mertcan Demir

MASTER OF SCIENCE THESIS

June 2023

Farklı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yapı Çeliğinin Yorulma Dayanımının Deneysel
Olarak İncelenmesi

Mertcan Demir

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon-İmalat Bilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman:

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT

Haziran 2023

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mertcan Demir'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Farklı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yapı Çeliğinin Yorulma Dayanımının Deneysel Olarak İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SERT

İkinci Danışman :-

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Gökçe AY

Üye:

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet Erşahan
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Abdullah Sert danışmanlığında hazırlamış olduğum “Farklı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilen Yapı Çeliğinin Yorulma Dayanımının Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 19/06/2023

Mertcan DEMİR

İmza

ÖZET

Bu çalışmada sanayide sıklıkla kullanılan ark kaynak yöntemlerinden; metal aktif gaz, tungsten inert gaz ve elektrik ark kaynağı metotlarıyla farklı kök aralığı parametreleriyle birleştirilen S355J2 yapı çeliğinin yorulma dayanımları arasındaki farkların deneysel olarak incelenmesi ve bir bağlantı kurulması hedeflenmiştir.

Bu amaçla üç farklı kaynak tipi ve üç farklı kaynak yöntemiyle kaynaklanan dokuz çeşit numune ve kaynaklı numuneler, dönel eğmeli yorulma cihazı aracılığıyla test edilerek, kaynak yöntemleri ve parametreler birbirleriyle mukayese edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda aynı parametrelerde birleştirilen numunelerin yorulma dayanımları incelendiğinde MAG kaynak yöntemi diğer iki yönteme göre ortalamada daha yüksek yorulma dayanımı değerlerini vermiştir. İncelenen üç farklı kaynak yönteminin de kendi içinde avantaj ve dezavantajları bulunsada yorulma gerilmelerine maruz kalacak yapı veya makine parçalarında MAG kaynak yönteminin kullanılması yapılan deneysel çalışmalara göre daha iyi bir yorulma performansı sağladığı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: S355, kaynaklı imalat, yorulma, yorulma ömrü

SUMMARY

In this study, it was aimed to experimentally investigate the differences between the fatigue strengths of S355J2 structural steel joined by metal active gas, tungsten inert gas and electric arc welding methods with different root gap parameters and to establish a connection.

For this purpose, nine kinds of specimens welded by three different welding types and three different welding methods and non-welded specimens were tested by means of a rotational bending fatigue device and the welding methods and parameters were compared with each other.

As a result of the studies, when the fatigue strengths of the specimens joined at the same parameters were examined, the MAG welding method gave higher fatigue strength values on average than the other two methods. Although the three different welding methods examined in this study have their own advantages and disadvantages, the use of MAG welding method in structural or machine parts that will be exposed to fatigue stresses will provide a better fatigue life according to the experimental studies.

Keywords: S355, welding, fatigue, fatigue life

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve oluşmasında benden desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan değerli hocam Sayın Dr. Abdullah SERT'e çok teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca bana olan katkıları, yönlendirme ve desteklerinden dolayı çalışma arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana olan inancını hiç kaybetmeyen, beni her zaman motive eden arkadaşım Aleyna Hoşbakar'a desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Her durumda yanımda olan, bana her zaman desteğini hissettiren Ece Ergökten'e teşekkür ederim.

Son olarak, her koşulda bana destek olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve her zaman yanımda olan aileme minnetimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Kaynak ve Başlıca Kaynak Yöntemleri.....	2
2.2. Elektrik Ark Kaynağı	3
2.2.1. Elektrik ark kaynağının avantajları	4
2.2.2. Elektrik ark kaynağının dezavantajları	4
2.3. Gazaltı Kaynağı	4
2.3.1. TIG kaynağı.....	5
2.3.1.1. <u>TIG kaynağının avantajları</u>	7
2.3.1.2. <u>TIG kaynağının dezavantajları</u>	8
2.3.2. MIG/MAG kaynağı	8
2.3.2.1. <u>MIG/MAG kaynağının avantajları</u>	10
2.3.2.2. <u>MIG/MAG kaynağının dezavantajları</u>	10
2.4. Kaynaklı Bağlantı Şekilleri	11
2.4.1. Kaynak pozisyonları	12

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.4.2. Kaynak kalitesini etkileyen faktörler.....	13
2.4.3. Kaynak hataları.....	14
2.4.3.1. <u>Başlıca kaynak hataları ve nedenleri</u>	14
2.4.4. Kaynak hatalarının önlenmesi	19
2.4.4.1. <u>Uygun birleştirme tasarımı seçimi</u>	19
2.4.4.2. <u>Düşük hidrojenli sarf malzemesi kullanımı</u>	20
2.4.4.3. <u>Kaynak öncesi ve sonrası ısıtıl işlem</u>	21
2.4.4.4. <u>Kaynak metali ve ana malzemenin dayanımlarının eşleşmesi</u>	22
2.4.4.5. <u>Uygun sarf malzemesinin depolanma koşulları ve kullanım prosedürleri</u> .	22
2.4.4.6. <u>Uygun kaynakçı eğitiminin sağlanması</u>	22
2.5 Yorulmanın Tanımı	23
2.5.1. Yorulmayla ilgili temel kavramlar	24
2.5.2. Tanımlar ve semboller	25
2.5.3. Gerilme türleri	27
2.5.3.1. <u>Alternatif gerilme</u>	27
2.5.3.2. <u>Tekrarlı gerilme durumu</u>	28
2.5.3.3. <u>Tam değişken gerilme durumu</u>	28
2.5.4. Düşük ve yüksek çevrimli yorulma	29
2.5.5. Yorulma analizi yaklaşımları.....	30
2.5.5.1. <u>Gerilme – ömür (s-n) metodu</u>	30
2.5.5.2. <u>Gerinim – ömür metodu</u>	33
2.5.5.3. <u>Kırılma mekaniği metodu</u>	35
2.5.6. Uygulamada kullanılan yorulma analizi metotları	37
2.5.6.1. <u>Smith diyagramı</u>	37
2.5.6.2. <u>Soderberg diyagramı</u>	40
2.5.6.3. <u>Goodman ve Gerber diyagramı</u>	41
2.5.6.4. <u>Haigh diyagramı</u>	42
2.5.7. Yorulmaya etki eden faktörler	44

İÇİNDEKİLER

Sayfa

2.5.8. Yorulma hasarı	45
2.6. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma.....	47
2.6.1. Kaynaklı bağlantıların mukavemeti	48
2.6.1.1. <u>Kaynak dikiş faktörü (v1)</u>	48
2.6.1.2. <u>Kaynak kalite faktörü (v2)</u>	50
2.6.1.3. <u>Gerilme faktörü (v3)</u>	51
2.6.3. Kaynaklı yapılarda yorulma analizi yaklaşımları.....	54
2.6.3.1. <u>Nominal gerilme yaklaşımı</u>	54
2.6.3.2. <u>Hot spot gerilme yöntemi</u>	56
2.6.3.3. <u>Etkin çentik gerilme yöntemi</u>	58
2.7 Literatürde Yapılmış Benzer Çalışmalar	60
3. MATERYAL VE YÖNTEM	63
3.1. DeneySEL Çalışmalar	63
3.1.1. Kullanılan kaynak makineleri.....	65
3.1.2. Kullanılan sarf malzemeler.....	68
3.1.3. Deney düzeneği	70
3.2. Kaynak Prosedürleri	71
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	78
4.1. Yorulma Deneyleri ve Sonuçları	102
4.2. Mikro Sertlik Ölçümleri	78
4.3. Makro ve Mikro İncelemeler.....	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	1066

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kaynak yöntemleri (Anık 1991).....	3
2.2. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi (Anonim)	4
2.3. TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi (Topcu 2019)	6
2.4. TIG kaynak donanım şeması (Gedik Kaynak Tekniği El Kitabı)	7
2.5. Mag kaynak yönteminde ark bölgesi (Tülbentçi,1998; Kaluç, 2004)	9
2.6. MIG/MAG kaynak donanım şeması (Tülbentçi,1998; Kaluç, 2004).....	9
2.7. Temel kaynaklı bağlantı şekilleri (Anonim).....	11
2.8. Temel kaynak dikiş şekilleri ve sembolleri (Asm handbook vol 6, 1993)	11
2.9. Plakalar için kaynak pozisyonları (Asm handbook vol 6, 1993).....	12
2.10. Borular için çeşitli kaynak pozisyonları (Asm handbook vol 6, 1993).....	13
2.11. Sıçranı hataları (Askaynak, 2007)	14
2.12. Yetersiz ergime hatası (Askaynak, 2007).....	15
2.13. Gözenek Hatası (Askaynak, 2007)	16
2.14. Yanma oluğu (Askaynak, 2007).....	16
2.15. Kaynaklı imalatla distorsiyonlar ve gerginlikler (Askaynak, 2007).....	17
2.16. Boyuna çatlaklar (Askaynak, 2007)	18
2.17. Enine çatlaklar (Askaynak, 2007)	18
2.18. Kaynaklı birleştirme tasarımı parametreleri (Askaynak, 2007)	20
2.19. Hidrojen çatlağı (Askaynak, 2007).....	21
2.20. Örnek yorulma hasarı	23
2.21. Gerilme – zaman grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011).....	26
2.22. Alternatif gerilme grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011).....	28
2.23. Tekrarlı gerilme grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)	28
2.24. Tam değişken gerilme grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)	29
2.25. Wöhler eğrisi (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)	31
2.26. Bazı malzemeler için S-N diyagramı örneği (Callister, W.D., Rethwisch, D.G, 2015)	32
2.27. Çeşitli yorulma kriterleri diyagramı (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011).....	33
2.28. Yorulma hasarı aşamaları (Özmen D. 2007)	36
2.29. Kayma bantlarının oluşturduğu girinti ve çıkıntılar (Çimen 2012).....	36
2.30. Çatlak başlangıcı için farklı merkezler (Çimen 2012).....	37
2.31. Wöhler diyagramının Smith diyagramına uyarlanması (Ekberg A. 2007).....	39
2.32. Smith'e göre sürekli mukavemet diyagramı (Ekberg A. 2007).....	40
2.33. Soderberg diyagramı (Ekberg A. 2007)	41
2.34. Goodman ve Gerber eğrileri (Ekberg A. 2007).....	42
2.35. Goodman diyagramının basma ve çekme durumu (Ekberg A. 2007)	42
2.36. Haigh diyagramı (Ekberg A. 2007)	43
2.37. Yükleme göre yorulma hasarları (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)	46
2.38. Alın kaynakları için dikiş faktörü (Curgül İ, 2005).....	49
2.39. Köşe kaynakları için dikiş faktörü (Curgül İ, 2005).....	49
2.40. Köşe kaynakları için dikiş faktörü (Curgül İ, 2005).....	49
2.41. 15085-5 Standardı kaynak denetim sınıfları ve açıklamaları (TS EN 15085-5)	50
2.42. Çelik ve alüminyum alaşımları için gerilme faktörleri (Curgül İ, 2005).....	51
2.43. IIW Kaynaklı bağlantı eğrisi (H. Neuber 1985).....	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil	Sayfa
2.44. IIW kaynaklı bağlantılarda FAT değerleri (IIW Handbook).....	53
2.45. Kaynak üzerinde oluşan gerilmelerin gösterimi (Curgül İ, 2005).....	55
2.46. Kaynak ucuna olan mesafe – yüzeyde oluşan gerilme grafiği (DVS 1612).....	56
2.47. Kaynak ucuna olan mesafe – yüzeyde oluşan gerilme grafiği (Curgül İ, 2005)	57
2.48. Kaynaklı bağlantılarda oluşabilecek hasar türleri (Hobbacher A.F. 2016)	57
2.49. Kaynak uç noktalarının gösterimi (Saini 2016).....	58
2.50. Kabuk ve katı elemanların örnek modellemesi (Saini 2016)	58
2.51. Kaynaklı yapılarda gerilme yaklaşımları (Al-Emrani, Aygül 2014).....	59
2.52. Çentik gerilimi gösterimi (Al-Emrani, Aygül 2014).....	59
2.53. Çelikler ve alüminyum için çentik gerilmesine göre FAT değerleri.(IIW).....	60
2.54. Farklı karışım gazlarının yorulma dayanımı etkileri(Şık 2004)	61
2.55. Çekme dayanımı ile yorulma dayanımı arasındaki ilişki(Pang 2013).....	62
3.1. Yorulma testine tabi tutulan parça geometrisi.....	64
3.2. Kaynaklı birleştirme geometrileri.....	64
3.3. Fronius TPS 500i kaynak makinesi (fronius.com)	66
3.4. Kolarc TX 400W Pulse kaynak makinesi (kolarc.com)	67
3.5. Magmaweld monostick 200i kaynak makinesi (magnaweld.com)	68
3.6. ISO 2560-A E 42 0 RR 1 2 kaynak elektrotuna ait özellikler (gedik.com.tr)	69
3.7. ISO 14341-A G3Si1GEKA SG2 kaynak teline ait özellikler (gedik.com.tr).....	69
3.8. ISO 636-A W3Si1 tel elektroda ait özellikler (gedik.com.tr)	69
3.9. Hi-Tech HKM 19 dönel eğmeli yorulma cihazı.....	70
3.10. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü (Özden 2020).....	70
3.11. ISO 9692-2 standardına göre numunelerin kaynak ağzı hazırlığı	71
3.12. Elektrik ark kaynağı 0 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri.....	72
3.13. Elektrik ark kaynağı 1 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri.....	72
3.14. Elektrik ark kaynağı 2 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri.....	73
3.15. MAG yöntemi 0 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri.....	73
3.16. MAG yöntemi 1 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri.....	73
3.17. MAG yöntemi 2 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri.....	74
3.18. TIG yöntemi 0 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri	74
3.19. TIG yöntemi 1 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri	74
3.20. TIG yöntemi 2 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri	75
3.21. Metalografik numune hazırlama cihazları: a) görüntü analizörü, b) kesme cihazı, c) parlatma ve zımparalama cihazı, d) kalıplama cihazı.....	76
3.22. Sertlik Ölçüm Cihazı	77
3.23. Mikro sertlik ölçümlerinin yapılış düzeni	77
4.1. 0 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı.....	78
4.2. 0 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesi kaynak metali mikro yapısı	78
4.3. 1 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı.....	79
4.4. 1 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesi kaynak metali mikro yapısı	79
4.5. 2 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6. 2 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesi kaynak metali mikro yapısı	80
4.7. Elektrik ark kaynağı yöntemi grubu makro yapı görüntüleri: a) 0 mm boşluk b) 1 mm boşluk, c) 2 mm boşluk	81
4.8. 0 mm boşluklu MAG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı	82
4.9. 0 mm boşluklu MAG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı.....	82
4.10. 1 mm boşluklu MAG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı	83
4.11. 1 mm boşluklu MAG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı.....	83
4.12. 2 mm boşluklu MAG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı	84
4.13. 2 mm boşluklu MAG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı.....	84
4.14. MAG yöntemi grubu makro yapı görüntüleri: a) 0 mm boşluk b) 1 mm boşluk, c) 2 mm boşluk	85
4.15. 0 mm boşluklu TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı	86
4.16. 0 mm boşluklu TIG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı	86
4.17. 1 mm boşluklu TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı	87
4.18. 1 mm boşluklu TIG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı	87
4.19. 2 mm boşluklu TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı	88
4.20. 2mm boşluklu TIG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı	88
4.21. TIG yöntemi grubu makro yapı görüntüleri: a) 0 mm boşluk b) 1 mm boşluk, c) 2 mm boşluk	89
4.22. Yatay eksen de sertlik değ erleri.....	95
4.23. Dikey eksen de sertlik değ erleri	95
4.24. Dikey eksen de 0mm kö k boş luğ u için sertlik değ erleri	96
4.25. Dikey eksen de 1mm kö k boş luğ u için sertlik değ erleri	96
4.26 Dikey eksen de 2mm kö k boş luğ u için sertlik değ erleri	97
4.27. Dikey eksen de elektrik ark kaynağı için kö k boş luğ una göre sertlik değ erleri.....	97
4.28. Dikey eksen de MAG yöntemi için sertlik kö k boş luğ una göre değ erleri	98
4.29. Dikey eksen de TIG yöntemi için sertlik kö k boş luğ una göre değ erleri	98
4.30. Yatay eksen de 0mm kö k boş luğ u için sertlik değ erleri.....	99
4.31. Yatay eksen de 1mm kö k boş luğ u için sertlik değ erleri.....	99
4.32. Yatay eksen de 2mm kö k boş luğ u için sertlik değ erleri.....	100
4.33. Dikey eksen de elektrik ark kaynağı için kö k boş luğ una göre sertlik değ erleri.....	100
4.34. Dikey eksen de mag yöntemi için kö k boş luğ una göre sertlik değ erleri.....	101
4.35. Dikey eksen de tı g yöntemi için kö k boş luğ una göre sertlik değ erleri	101
4.36. Farklı kaynak yöntemleri ve tiplerine göre yorulma dö ngü leri.....	103
4.37. Farklı kaynak yöntemleri ve tiplerine göre ortalama yorulma dö ngü leri.....	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

3.1. S355J2 Çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Hasçelik).....	65
3.2. Fronius TPS 500i kaynak makinesine ait teknik özellikler (fronius.com)	66
3.3. Kolarc tx 400w pulse kaynak makinesine ait teknik özellikler (kolarc.com)	67
3.4. Monostick 200i kaynak makinesine ait teknik özellikler (magma weld.com).....	68
4.1. Kaynaksız numune için sertlik ölçümleri	91
4.2. 0mm kök boşluğu için sertlik ölçümleri	92
4.3. 1mm kök boşluğu için sertlik ölçümleri	93
4.4. 2mm kök boşluğu için sertlik ölçümleri	94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Amper
V	Volt
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre
MPa	Megapaskal
HV	Vickers Sertlik Değeri
HRC	Rockwell Sertlik Değeri
F	Kuvvet
N	Newton
σ_{max}	Maksimum Gerilme
σ_{min}	Minimum Gerilme
σ_m	Ortalama Gerilme
σ_a	Gerilme Genliği
σ_r	Gerilme Aralığı
R	Gerilme Oranı
Ni	Nikel
Cr	Krom
V	Vanadyum
S	Kükürt
P	Fosfor
Mn	Mangan
Si	Silisyum
C	Karbon
Fe	Demir
E	Young modülü (Elastisite modülü)
AC/DC	Alternatif akım/doğru akım

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar****Açıklama**

ITAB	Isının tesiri altındaki bölge
AWS	Amerikan kaynak topluluğu
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
IIW	Uluslararası Kaynak Enstitüsü
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
MAG	Metal Aktif Gaz Kaynak Yöntemi
MIG	Metal Inert Gaz Kaynak Yöntemi
TIG	Tungsten Inert Gaz Kaynak Yöntemi
ISO	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
DVS	Alman Kaynak Cemiyeti

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Kaynaklı bağlantılar 19. Yüzyıldan günümüze kadar makine imalatı, gemi, demiryolu ve inşaat gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Konstrüksiyonların oluşturulmasında kullanılan bu yöntem iki veya daha fazla parçanın atomik seviyede bir araya getirilmesi işlemidir. Parçalar ısı ve/veya basınç yardımıyla birleştirilirken birçok faktör kaynak kalitesini, bununla beraber kaynak mukavemetini etkilemektedir.

Kaynak bağlantısının mukavemeti genel olarak; bağlantının kalitesine ve tasarımına bağlıdır. Konstrüksiyonlar basit bir ürün olabileceği gibi kritik ve hayati önem taşıyan bir makine veya yapı olabilir. Günümüzde pek çok yapı ve makinede görülen hasarlar kaynaklı bağlantılar sebebiyle oluşmaktadır. Özellikle değişken yükler altında çalışan yapılarda görülen bu hasarlar literatürde ‘yorulma hasarı’ olarak adlandırılmaktadır.

Yorulma hasarı; makine parçalarında tekrarlı yükler uygulanması sonucunda malzemede çatlak oluşması, çatlağın ilerlemesi ve kalıcı deformasyon ile sonuçlanan hasar şeklidir. Uygulanan bu yükler genellikle malzemenin akma dayanımının altında olmasına rağmen makine arızalarının büyük çoğunluğunu yorulma hasarı oluşturmaktadır.

Kaynaklı bağlantılarda imalat şekli bağlantının yorulma dayanımında büyük rol oynamaktadır. Buna karşın literatürde bu konuyla ilgili yeterli sayıda deneysel çalışma bulunmamakla birlikte, kaynak parametreleriyle ilgili spesifik sonuçlara ulaşmak mümkün değildir.

Bu çalışmada değişken yüklerin uygulanmasına müsait bir deney düzeneği yardımıyla farklı kaynak tasarımları ve yöntemlerinin S355J2 çeliğinin yorulma ömrü üzerine etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak ve Başlıca Kaynak Yöntemleri

Günümüzde endüstride en yaygın birleştirme yöntemlerinden birisi kaynak işlemidir. Kaynaklanmış parçaların emniyetinin sağlanması, yapıların güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Yaygınca kullanılan bu yöntem; parçaların basınç, ısı ya da ikisini birlikte kullanarak, ilave malzeme kullanmayarak veya kullanarak yapılan birleştirme işlemidir. Bu işlem sırasında kaynak bölgesi ergimiş duruma getirilmektedir.

Kaynak dikişinin tam bir bağlantı sağlaması için kaynak metali ile esas metal arasındaki birleşmenin tüm bağlantı boyunca sürekli olması gerekmektedir. Aynı zamanda bu bağlantının sürekliliği, kaynak mukavemetinin tam olması için büyük önem taşımaktadır. Tüm kaynak yöntemlerinde uygun bir birleştirme için parça kalınlığına uygun ve kontrol altında tutulabilen bir ısı girdisi ihtiyacı doğmaktadır. Isı girdisi, soğuma hızını dolayısıyla da kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını şekillendireceği için oldukça önemli bir parametredir. Örneğin kaynak bölgesine fazla ısının sevk edilmesi, ısı tesiri altındaki bölgenin büyümesine, distorsiyonların artmasına, kaynak metalinin tokluğunun azalmasına, tane irileşmesine, çekme ve gerilme dayanımlarının azalmasına sebep olacağından başarısız bir kaynak dikişi elde edilmesine sebep olur.

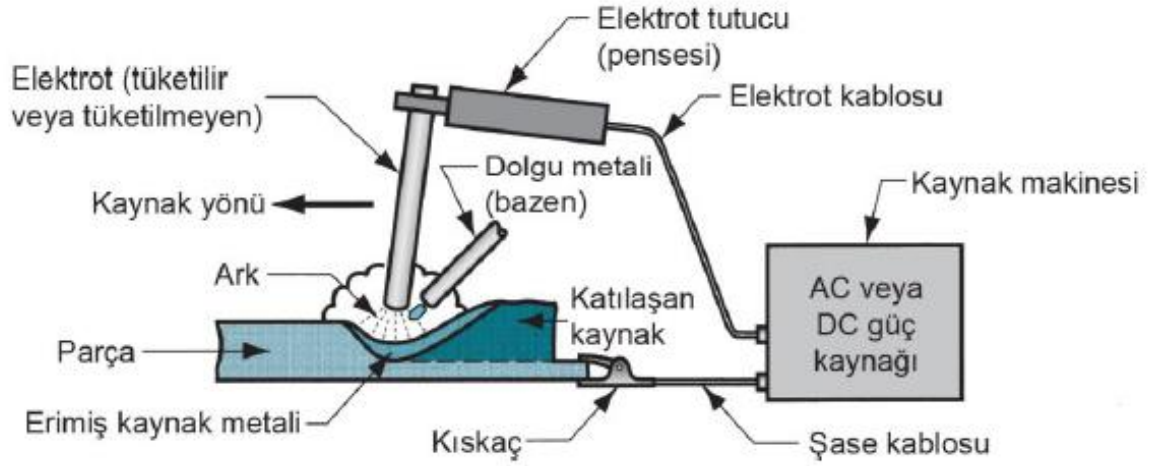
Başlıca kaynak yöntemlerinden (bkz şekil 2.1) ark kaynağı yöntemleri ısı girdisinin kontrolü ve uygulamanın kolaylığı açısından endüstride çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında yapılacak deneysel çalışmalarda da ark kaynağı yöntemleri kullanılacaktır.



Şekil 2.1. Kaynak yöntemleri (Anık 1991)

2.2. Elektrik Ark Kaynağı

Şekil 2.1’de de belirtildiği gibi pek çok farklı ark kaynağı yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerde genel olarak birleştirilmek istenen parçalar elektrik arkı ile ergitilerek birleştirilmektedir. Bu yöntemler içerisinde; MIG/MAG ve TIG kaynakları ve türevleri endüstride gaz altı kaynağı olarak adlandırılmakta ve en yaygın ark kaynağı yöntemlerinin başında gelmektedirler. Aynı zamanda bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalar da elektrik ark kaynağı yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.2’de elektrik ark kaynağının temel şematik gösterimi verilmiştir. Görüldüğü üzere tükenen bazense tükenmeyen bir elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark yardımıyla birleşme bölgesinde bir ergime oluşur. Gaz altı kaynak yöntemlerinde bahsi geçen bu ark görünürdür aynı zamanda buna açık ark kaynağı da denilir.



Şekil 2.2. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi (Anonim)

2.2.1. Elektrik ark kaynağının avantajları

- Açık ve kapalı alanlarda uygulanabilir.
- Diğer yöntemler ile ulaşılamayan dar ve sınırlı alanlarda ve her pozisyonda kaynak yapmak mümkündür.
- Kaynak ekipmanları hafif ve taşınabilmelidir.
- Çoğu malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleriyle eşleşen örtülü elektrod türü mevcuttur.

2.2.2. Elektrik ark kaynağının dezavantajları

- Metal yığılma hızı ve verimliliği pek çok ark kaynak yönteminden düşüktür. Elektrotlar belli boylarda kesik çubuklar şeklindedir, bu nedenle her elektrod tükendiğinde kaynağı durdurmak gerekir.
- Pasolar arasında kaynak metali üstünde oluşan cüruf ve kalıntıların temizlenmesi gerektirir.

2.3. Gazaltı Kaynağı

“Kaynak bölgesinin bir gaz ortamı yardımıyla korunduğu, ark kaynağı türü "gazaltı

ark kaynağı" olarak tanımlanır. Koruyucu gazla kaynak olarak da bilinen bu kaynak metodu "Alexander" metodu 1926 yılında ortaya çıkmıştır. Bu metotta kaynak alanı metanol gazı ile korunmaktaydı. Devamında tekrar 1926 senesinde kaynak bölgesinin hidrojen gazıyla korunduğu, "ark atom" ve 1928'de oksii-asetilen aleviyle korunan "Arcogen" usulleri geliştirilmiştir.'' (Anık, 1991).

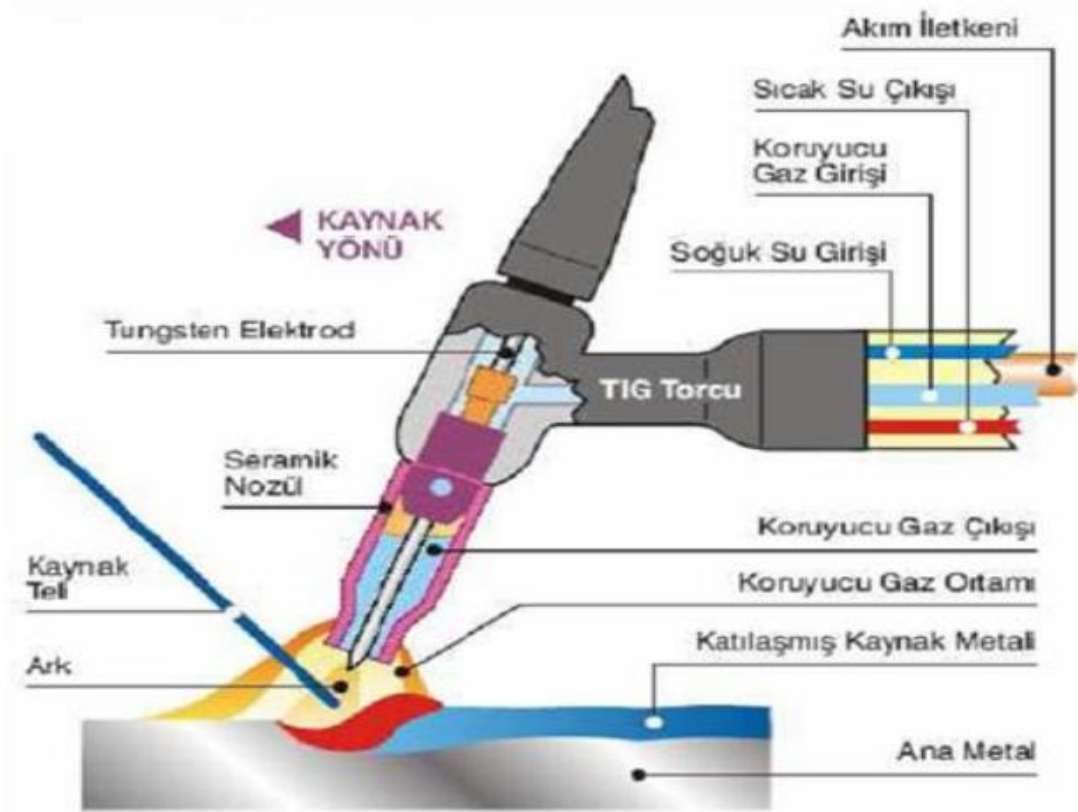
1930'lu yıllarda geliştirilen bu metot çoğu metal ve alaşımların kaynağında kullanılabilir. Aynı zamanda diğer ark kaynak yöntemlerine kıyasla daha verimli ve ekonomik bir yöntem olduğu için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Gazaltı kaynak yönteminde argon, karbondioksit ve helyum koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır. Kaynatılacak malzemelerin niteliklerine ve istenen sonuçlara göre bu karışım oranları değişebilmektedir.

2.3.1. TIG kaynağı

TIG kaynağı (Tungsten Inert Gas) yöntemi ilk olarak 1940'lı yıllarda kullanılmıştır. Bu yöntemde; kaynak arkı erimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşmakta ve kaynak banyosu argon veya helyum atmosferi içinde korunmaktadır. Soy gaz bir koruyucu atmosfer ortamı sayesinde oksidasyon ve diğer istenmeyen etkiler önlenmektedir. Bu kaynak yönteminde bazı durumlar dışında ilave bir metale (tel) ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.3'de TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

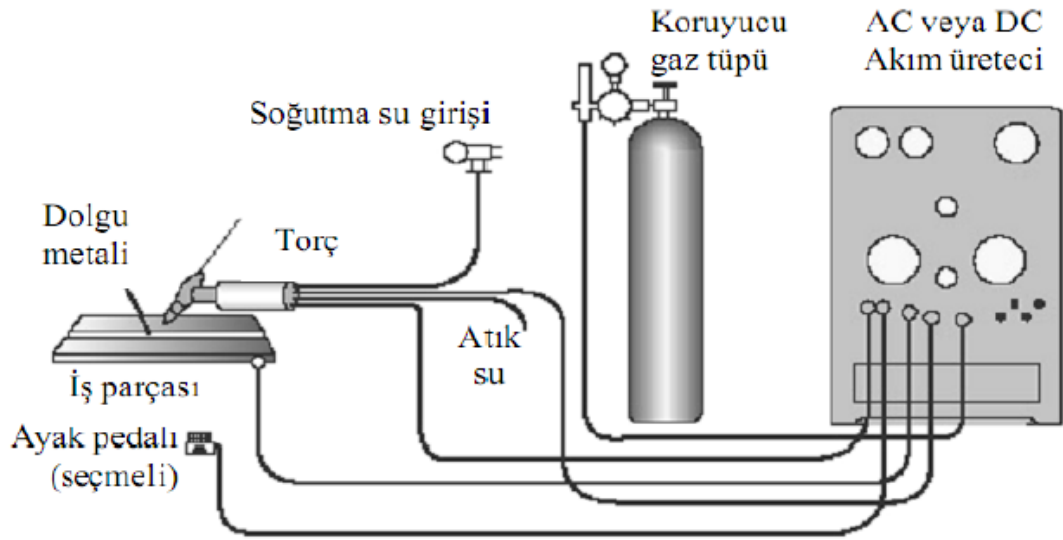
Günümüzde bu yöntem için çoğunlukla koruyucu gaz olarak argon veya argon helyum karışımları kullanılırken, daha önceden sadece helyum gazı kullanılıyordu. TIG kaynağında kullanılan elektrotlar saf tungsten, toryum ve/veya zirkonyum alaşımlı olarak kullanılmaktadır. Tungsten elektrotlar toz halindeki tungstenin yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesiyle elde edilir. Alaşımlandırılmış elektrotlar, sinterleme işlemi esnasında %1-4 arasında toryumoksit verilerek tüm kesite eşit bir şekilde yayılmasıyla oluşur. Toryumoksit dışında, zirkonyum, seryum, lantan alaşımlı elektrotlar da üretilmektedir.



Şekil 2.3. TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi (Topcu 2019)

Tig kaynak yöntemi kaynakçı tarafından kullanımı basit bir yöntem olup, eritme kaynağına oldukça benzemektedir. Bu yöntem havacılık, otomotiv, demiryolu vb. çok geniş uygulama alanına sahiptir. Bazı durumlarda erimeyen elektrot kullanımında ilave metale gerek olmadan da birleştirme yapılabilir. TIG kaynağı iyi bir nüfuziyet sağladığından endüstride kök dikişlerinin yapılmasında ve kaynak tamir işlerinde sıkça kullanılmaktadır.

Prensip olarak her kalınlık ve pozisyonda uygulamaya müsait olsa da özellikle kalın parçalarda uzun süreli işlemler gerektirdiğinden ekonomik olmamakta ve tercih edilmemektedir. Bu sebeple 6-8 mm'den kalın parçalarda önerilmemekle birlikte bu yöntemle daha kaliteli ve sağlam bağlantılar oluşturulabilmektedir. Şekil 2.4'te TIG kaynak donanım şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. TIG kaynak donanım şeması (Gedik Kaynak Tekniği El Kitabı)

2.3.1.1. TIG kaynağının avantajları

- Kaynak dikişleri genellikle kaynaktan sonra olduğu gibi kullanılır.
- Paslanmaz çelikler, alüminyum, magnezyum, ısıya dayanıklı dökme demirler, titanyum, nikel vb. tüm metal ve alaşımlarında kullanılmaya uygundur.
- Tungsten elektrotla dikişte çok az bir karbür ayrışması meydana gelir.
- Tig yöntemiyle yapılan kaynaklarda mukavemet ve görüntü bakımından mükemmel dikişler elde edilir.
- Yatay, dik ve tavan pozisyonları gibi her çeşit birleştirme şekli uygulanabilir.
- Kaynak torcu hafif olduğu için rahat bir çalışma ortamı sağlar.
- Bu yöntemle ayrı cins metal ve alaşımları kaynatmak mümkündür.
- Küçük bir alanın ısıtılması ve ısıнын sürekli transferi nedeniyle çarpılmalar diğer yöntemlere göre daha az olmaktadır.
- Kaynak dikişi üzerinde cüruf yoktur.

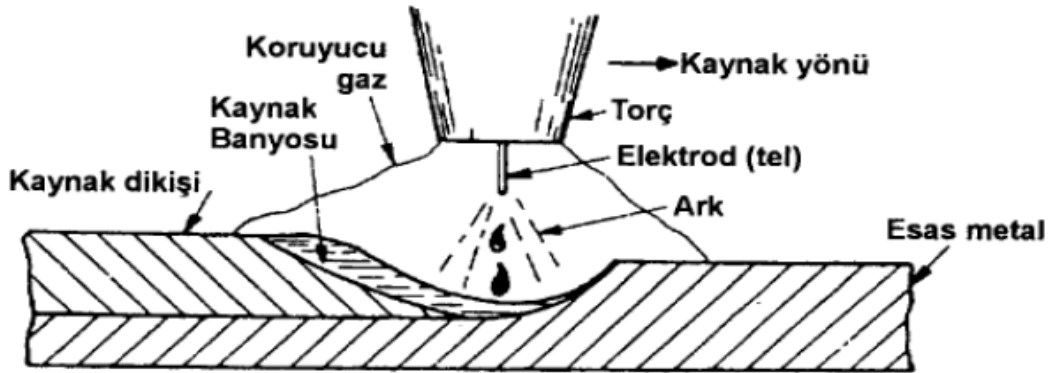
2.3.1.2. TIG kaynağının dezavantajları

- TIG kaynak yönteminde metal yağma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşük olduğundan operasyon hızı düşüktür. Bu sebeple işçilik sürelerini arttırmaktadır.
- Kalın kesitli malzemelerin kaynağında malzeme ve zaman sarfiyatı sebebiyle ekonomik bir yöntem değildir.
- Koruyucu gaz gereksinimi.
- Kirliliğe karşı hassastır, bu sebeple iyi bir yüzey temizliği gerektirir.
- Açık havada kullanıma uygun değildir.
- Oluşan kimyasal yapı düzeltilemez.

2.3.2. MIG/MAG kaynağı

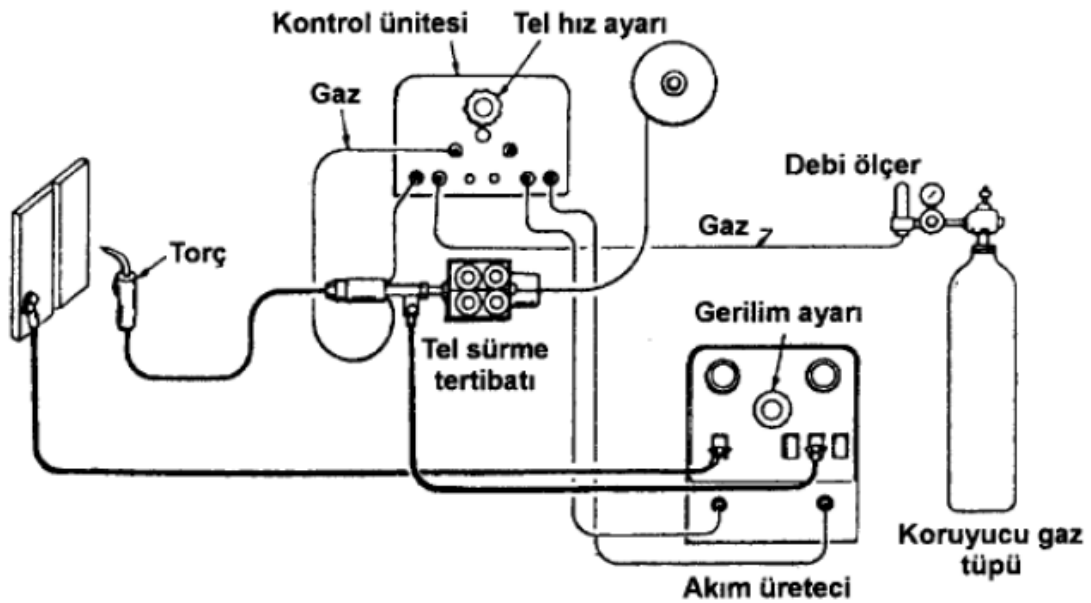
MIG (Metal inert gaz) ve MAG (Metal aktif gaz) kaynak yöntemleri birbirlerine çok benzer olmakla birlikte aralarındaki fark; Mig yönteminde soy gaz atmosferi altında kaynak yapılırken, Mag yönteminde ise aktif gaz atmosferi altında kaynak yapılmasıdır.

MIG kaynak yöntemi 1948 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem önce alüminyum ve alaşımlarında daha sonrada karbon çelikleri, yüksek alaşımlı çelikler gibi uygulamaları olmuştur. MIG kaynağı genel olarak argon veya helyum atmosferi altında yapılmaktadır. TIG yönteminden ayrılması arkın, kaynak banyosuna otomatik olarak gelen ilave metal ile iş parçası arasında oluşmasıyla olur (bkz şekil 2.5).



Şekil 2.5. Mag kaynak yönteminde ark bölgesi (Tülbentçi,1998; Kaluç, 2004)

MAG kaynak yönteminin MIG yönteminden tek farkı ise sadece kullanılan gazdır. Karbondioksit atmosferi altında yapılan MAG kaynağı yönteminde de aynı donanım kullanılmaktadır. Argon gazının maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda karbondioksitin iyi bir alternatif olduğu yapılan araştırmalar sonucunda görülmüştür. Alüminyum-magnezyum gibi toprak alkali metallerin ametaller ile kolayca reaksiyona girmesinden dolayı bu metallerin kaynağında karbondioksitin koruyucu gaz olarak kullanılması uygun değildir. Buna karşın karbon çeliklerinin kaynağında kullanılması uygun olduğundan endüstride pek çok alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.6’te MIG/MAG yöntemlerinin donanım şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.6. MIG/MAG kaynak donanım şeması (Tülbentçi,1998; Kaluç, 2004)

2.3.2.1. MIG/MAG kaynağının avantajları

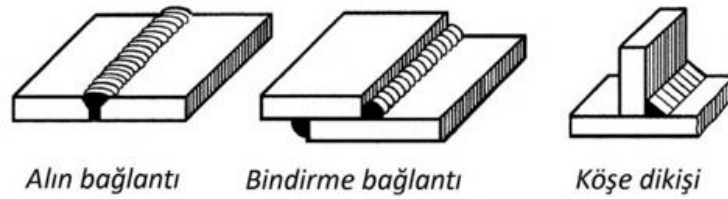
- Ticari metal ve alaşımların tümünün kaynağında kullanılabilir.
- Elektrik ark kaynağında karşılaşılan sınırlı uzunlukta elektrot kullanma problemi yoktur.
- Kaynak her pozisyonda yapılabilir.
- Metal yığma hızı oldukça yüksektir. Bu sebeple işçilik süresinde azalmaya sebep olur.
- Sürekli elektrot beslemesi ve yüksek metal yığma hızı sayesinde, kaynak hızları elektrik ark kaynağına kıyasla daha yüksektir.
- Elektrot beslemesinin sürekli olması sebebiyle durmadan, kesintisiz bir şekilde uzun kaynak dikişleri çekilebilir.

2.3.2.2. MIG/MAG kaynağının dezavantajları

- Cihaz donanımı nispeten pahalı, karmaşık ve taşınması zordur. Bu yüzden ilk yatırım ve bakım maliyetleri kıyasla daha yüksektir.
- Kaynak torcunun elektrik ark kaynağı pensesinden daha büyük olması nedeniyle ve kaynak metalinin koruyucu gazla etkin bir şekilde korunması amacıyla torcun bağlantıya yaklaşık 10 ila 20mm arasında değişen yakın bir mesafeden tutulması gerektiği için, bu yöntemin ulaşılması güç olan yerlerde kullanılması pek mümkün değildir.
- Kaynak banyosunu çepeçevre saran koruyucu gaz, hava akımlarından korunmalıdır. Bu nedenle, kaynak alanının etrafı hava akımına karşı koruma altına alınmadıkça, yöntemin açık alanlarda kullanılması mümkün değildir.
- Göreceli olarak, çalışma anında yüksek şiddette ısı yayılması ve ark yoğunluğu nedeniyle, bazı kaynakçılar bu yöntemi kullanmaktan kaçınabilir.

2.4. Kaynaklı Bağlantı Şekilleri

Pek çok farklı kaynaklı bağlantı şekli veya başka bir tabirle dikiş şekli olsa da en temelde üç çeşit bağlantı şekli vardır. Bunlar Şekil 2.7’de gösterildiği gibi; alın bağlantı, bindirme bağlantı ve köşe dikişi şeklindedir. Kaynak dikişleri konstrüksiyonun gereksinimlerine göre seçilmektedir. Şekil 2.8’de kaynak dikiş türleri ve sembolleri verilmiştir.



Şekil 2.7. Temel kaynaklı bağlantı şekilleri (Anonim)

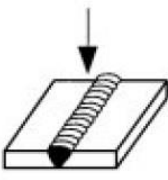
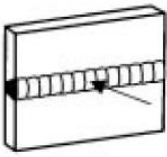
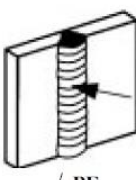
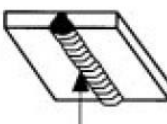
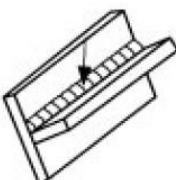
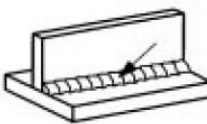
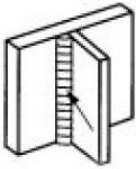
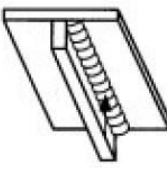
No	İsim	Dikiş Şekli	Sembol	No	İsim	Dikiş Şekli	Sembol
1	I-Dikişi			8	Kökü Takviyeli V-Dikişi		∇
2	V-Dikişi		V	9	Çift Boğaz Dikişi		▷
3	Boğaz kaynağı		△	10	Üstü Düz V-Dikişi		∇
4	Düz Kenar Kaynak Dikişi			11	Üstü Bombeli Çift V-Dikişi X-Dikişi		∞
5	Çift V-Dikişi X-Dikişi		X	12	İç Bükey Boğaz Kaynak Dikişi		▷
6	Çift HV Dikişi K Dikişi		K	13	Üstü Düz, Kökü Takviyeli, V-Dikişi		∇
7	Çift U-Dikişi		X	14	Her İki Yüzü Bombeli I-Dikişi		∩

Şekil 2.8. Temel kaynak dikiş şekilleri ve sembolleri (Asm handbook vol 6, 1993)

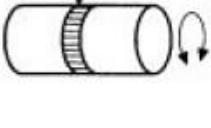
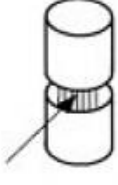
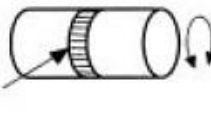
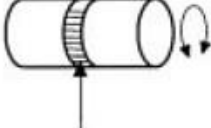
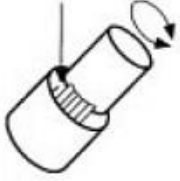
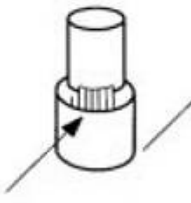
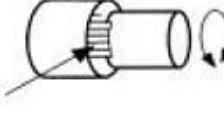
2.4.1. Kaynak pozisyonları

Kaynaklı bağlantılarda kaynağın yapıldığı pozisyon, kaynak dikişinin ve bağlantının kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı zamanda uygun pozisyonda yapılmayan kaynaklar kaynaklı bağlantının mukavemetini de etkileyebileceğinden güvenlik açısından problemler yaratabilirler. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da plakalar ve borular için kaynak pozisyonlarının sınıflandırılmaları gösterilmiştir.

- PA: Yatay ve oluk pozisyonu
- PB: Yatay köşe pozisyonu
- PC: Korniş pozisyonu
- PD: Tavan köşe pozisyonu
- PE: Tavan pozisyonu (baş üstü pozisyon)
- PF: Aşağıdan yukarı pozisyonu
- PG: Yukarıdan aşağı pozisyonu

Kaynak dikişi	Düz	Yatay	Düşey	Tavan
Küt Kaynak Dikişi	 1G / PA	 2G / PC	 3G / PF PG	 4G / PE
Köşe Kaynak Dikişi	 1F / PA	 2F / PB	 3F / PF PG	 4F / PE

Şekil 2.9. Plakalar için kaynak pozisyonları (Asm handbook vol 6, 1993)

Kaynak dikişi	Düz	Yatay	Düşey	Tavan
Küt Kaynak Dikişi	 1G / PA	 2G / PC	 3G / PF	 4G / PE
Köşe Kaynak Dikişi	 1F / PA	 2F / PC	 * 3F / PF (AWS 4F,F)	 * 4F / PE (AWS 4F,F)

Şekil 2.10. Borular için çeşitli kaynak pozisyonları (Asm handbook vol 6, 1993)

2.4.2. Kaynak kalitesini etkileyen faktörler

Kaynaklı bağlantılarda yapılan kaynağın kalitesini etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) tarafından tanımlanmış standartlarda kaynaklanacak malzeme ve kaynak metotlarına göre pek çok tavsiye bulunmaktadır. Genel olarak kaynak kalitesini etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir.

1. Malzeme: Seçilen malzemenin kaynaklanabilme kabiliyeti yeterli seviyede olmalıdır.
2. Hazırlık: Kaynak tekniğine uygun çalışma, kaynak ağzı açılması gerekliyse ön ısıtma vb.
3. Kaynak metodu: Malzemeye ve kalınlığına uygun metot seçimi.
4. Kaynak malzemesi: Uygun elektrot, dolgu teli vb.
5. Personel: Eğitimli, tecrübeli, sertifikalı.
6. Kontrol: Uygun bir tahribatsız veya tahribatlı muayene metodu ile kontrol

2.4.3. Kaynak hataları

Elektrik ark kaynağı yöntemlerinde uygulamada karşılaşılan hataların büyük çoğunluğu kaynağa başlama ve bitirme bölgelerinde oluşmaktadır. Başlangıç bölgesinde genellikle iş parçasının delinmesi veya uç noktanın yanmaması için kaynakçılar yeterli dolgu oluşmadan ilerlemeye başlarlar ve böylelikle yetersiz ergime ve yetersiz nüfuziyet problemleri ortaya çıkar.

Bu sebeple özellikle alın kaynaklarında daha sonradan kesilip atılmak üzere başla-bitir parçaları eklenmekte ve bu olumsuz etkiler minimize edilmektedir. Kaynak sonunda yapılan krater hataları ise kaynak başında yapılan hatalar gibi yeterli dolgu metali yığılmamasından kaynaklanan mukavemet eksikliğidir.

2.4.3.1. Başlıca kaynak hataları ve nedenleri

Sıçramalar:

Sıçramalar veya başka bir deyişle sıçrantılar kaynak esnasında birleştirilen iş parçalarının yüzeylerine yapışan küçük boyutlu parçacıkların oluşturduğu hatalardır (bkz Şekil 2.11). Bu hata iş parçası yüzey kalitesini düşürmekte ve kaynaklanan ürünün görselliğini ve fonksiyonelliğini bozabilmektedir. Başlıca sebepleri aşağıdaki gibidir;

- Ark üflemesi
- Yüksek akım
- Yüksek ark boyu
- Elektrodun paslı veya çatlak olması.
- Temiz bir yüzey olmaması

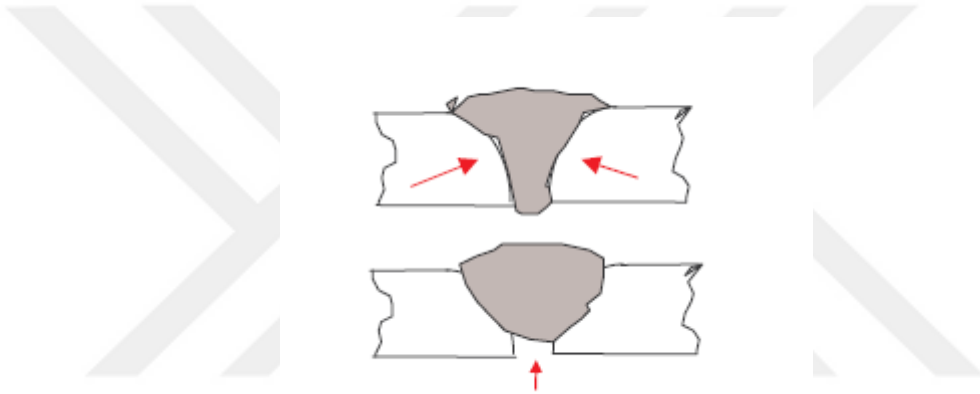


Şekil 2.11. Sıçrantı hataları (Askaynak, 2007)

Yetersiz ergime ve yetersiz nüfuziyet:

Yetersiz nüfuziyet ve ergime sıkça karşılaşılan bir problem olmakla birlikte yapının mukavemetini önemli seviyede etkilemekte bu sebeple emniyet problemleri ortaya çıkarabilmektedir (bkz Şekil 2.12.). Başlıca sebepleri aşağıdaki gibidir;

- Yüksek kaynak ilerleme hızı
- Düşük akım
- Kaynak ağzının açısının dar olması
- Kök boşluğunun (parçalar arası mesafe) uygun olmaması
- Büyük elektrod çapı seçimi

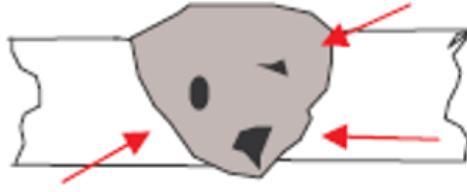


Şekil 2.12. Yetersiz ergime hatası (Askaynak, 2007)

Gözenekler:

Gözenek hatası ürünün çalışma süresi boyunca oluşan boşluklarda çatlak oluşmasını ve bu çatlakların ilerleyerek iş parçasının en nihayetinde kırılmasına sebep olabilir (bkz Şekil 2.13.) Mukavemet ve ürünün yorulma dayanımı açısından çok kritik olan bu hatanın başlıca sebepleri;

- Kısa ark boyu ile çalışma
- Kaynak metalini hızlı soğutma
- Kaynak edilen ana metalde fiziksel ve yapısal kirlilik (boya, yağ, pas vb.) (kükürt, fosfor vb. fazlalıklar)
- Eski, rutubetli, çekirdeği paslı kalitesiz kaynak elektrodu kullanılması
- Çapaklı, keskin kenarlı veya sivri kesitli yüzeye kaynak yapılması
- Gaz ayarının düzgün yapılmaması

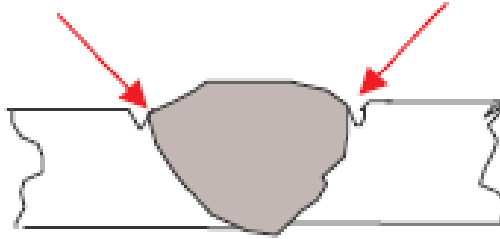


Şekil 2.13. Gözenek Hatası (Askaynak, 2007)

Yanma oluğu (Kenar kanıkları):

Yanma olukları birleştirilen parça üzerindeki kuvvet geçişlerini olumsuz yönde etkileyerek çentik etkisine sebep olmaktadır (bkz Şekil 2.14.). Başlıca sebepleri;

- Elektrod hareketinin yanlış oluşu
- Büyük çaplı elektrod kullanımı
- Fazla akım şiddeti ile çalışma
- Dolgu ve ana malzemenin aşırı ısınmasına sebep olabilecek etkenler.



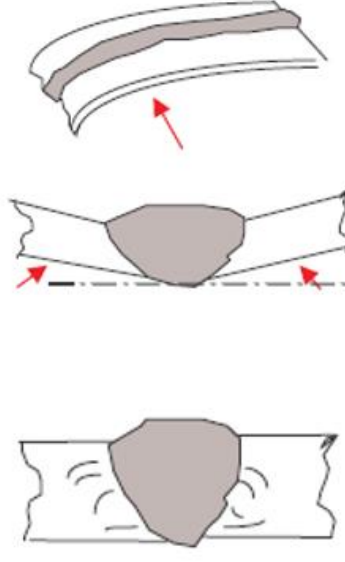
Şekil 2.14. Yanma oluğu (Askaynak, 2007)

Distorsiyonlar, çarpılmalar ve gerginlikler:

Kaynak işlemi sonrasında ısı etkisiyle oluşan artık gerilmeler birleştirilen parçaların formlarının bozulmasına, bükülmelere ve çarpılmalara sebebiyet vermektedir (bkz Şekil 2.15.). Kaynaklı imalatta geometrik olarak istenilen şeklin elde edilmesinin önündeki en büyük engeldir. Başlıca sebepleri;

- Parçaların yanlış bağlanması veya puntalanması
- Yeterli fiştir, aparat kullanımının olmaması
- Yapıya uygun olmayan kaynak ağız tasarımı
- Kaynak bölgesinin, diğer yerlere göre fazla ısınması
- Yanlış kaynak sırası

- Parçanın gerektiğinden sıkı bağlanarak kaynaklanması
- Paso sayısının fazlalığı



Şekil 2.15.Kaynaklı imalatta distorsiyonlar ve gerginlikler (Askaynak, 2007)

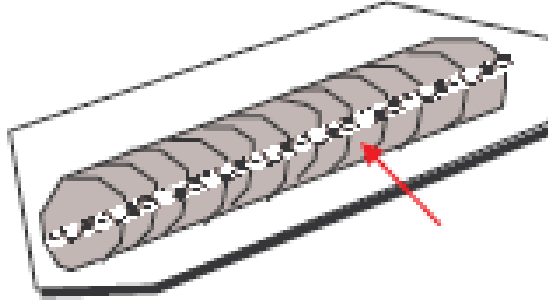
Kaynaklı imalatta Distorsiyonlar ve çarpılmaların önüne geçilmesinin en etkili yolu fikstür kullanımıdır. Ancak kullanılan fikstürlerde gereğinden fazla yüklerde parçanın sıkıştırılması geometrik olarak istenilen sonuçları getirirse de kaynaklı bağlantı çevresinde artık gerilmelerin oluşmasına sebep olmakta ve konstrüksiyonun hassasiyetine göre ekstra bir ısıtma işlem gereksinimini beraberinde getirebilmektedir. Bu yüzden kaynaklı imalatta fikstürlerin kullanımı ve oluşacak artık gerilmeler yapının kritikliğine göre değerlendirilmelidir.

Boyuna çatlaklar:

Kaynak dikişi boyunca gözlemlenen boyuna çatlaklar taşlama ve kaynak tamiri ile düzeltilmelidir, aksi takdirde oluşacak çentik etkisi sebebiyle kaynak dikişi normalden çok daha düşük yükler altında çatlayabilir (bkz Şekil 2.16). Başlıca sebepleri;

- Parça kalınlığı ile kaynak dikişinin kalınlığının dengesiz olması
- Hatalı (genellikle küçük) kaynak ağzı seçilmesi
- Kaynak elektrodunun, ana metal ile uyumsuzluğu veya çalışacak ortamdaki mukavemetleri karşılayamaması

- İş parçasının çok sıkı olarak bağlanarak kaynak yapılması
- Hızlı soğuma

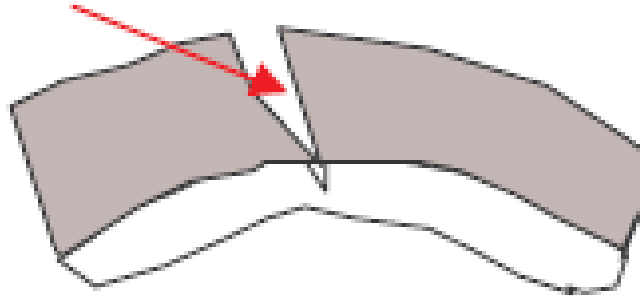


Şekil 2.16. Boyuna çatlaklar (Askaynak, 2007)

Enine çatlaklar/ kırılmalar:

Kaynaklı imalatta enine çatlaklar genellikle kaynak dikişinin zayıflığından dolayı oluşmaktadır (bkz Şekil 2.17). Boyuna çatlaklar da olduğu gibi konstrüksiyonun mukavemetini önemli derecede etkilemekte ve ömrünü düşürmektedir. Başlıca sebepleri;

- Elektrodun, ana malzeme ile uyumsuz olması
- Isı dağılımının homojen olmayışı.
- ITAB alanı ve komşu bölgelerin kontrolsüz soğuma sebebiyle sertleşmesi
- Yapı gereksiniminden daha az pasolu veya daha ince kaynak dikişlerinin yapılması



Şekil 2.17. Enine çatlaklar (Askaynak, 2007)

Yukarıda belirtilen pek çok hata kaynaklı yapının mukavemetini, yorulma ömrünü çalışma verimliliğini etkilemektedir. Kaynaklı imalat yapılmadan önce gerekli ön hazırlıkların planlanması, uygun parametrelerin seçilmesi bu tip hataların önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Eğitimli kaynakçı ve tecrübeli kaynak gözetim personelleri endüstride kaynaklı imalatta pek çok hatanın yaşanmadan önüne geçilmesini sağlayacağı gibi verimi ve kaliteyi de arttıracaktır.

2.4.4. Kaynak hatalarının önlenmesi

Çeşitli yollarla oluşan kaynak hataları, genellikle kaynak operasyonu esnasında dikkatsizlik veya operatör hataları yüzünden ortaya çıkabilir. Çoğu durumda bu hatalar özel malzemelerin kaynağında veya birleştirme yöntemleri için gerekli eğitimin eksikliğinden dolayı oluşmaktadır. Sıcak veya soğuk çatlama, yetersiz nüfuziyet, cüruf kalıntıları veya bindirme gibi problemler, imalatın aksamasına ve hatalı parçaların tamirata veya yeniden üretimi sebebiyle zaman ve maliyet kayıplarına sebep olmaktadır. Kaynak hatası sebebiyle reddedilen iş parçaları firma için üretkenliği, karlılığı olumsuz etkileyecek ve de firmanın güvenirliliğini de riske atacaktır.

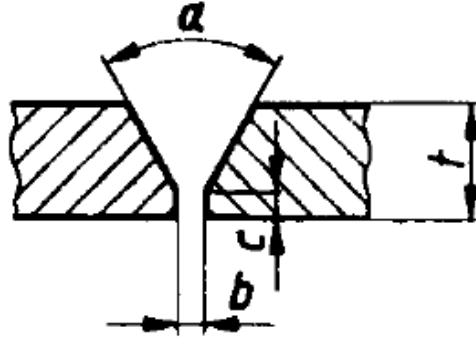
Buna karşın kaynak hatalarının önlenmesi için bazı temel önlemler bulunmaktadır. Bu hazırlık ve önlemler, gereksiz masrafların azaltılması üretkenliğin ve verimliliğin artmasını sağlayacaktır.

2.4.4.1. Uygun birleştirme tasarımı seçimi

Kaynaklı bağlantılarda birleştirilen parçaların kalınlığına, birleştirme cinsine göre uygun kaynak ağzı ve birleştirme parametrelerinde kaynaklanması büyük önem taşımaktadır. Bununla ilgili tavsiyeler ISO 9692 standart serisinde ISO 9692-2 standardında verilmiştir. Bu standartlarda parça kalınlıklarına göre oluşturulması gereken kaynak ağzı açısı, kök aralığı ve yüksekliği, altlık kullanımı gibi parametrelerle ilgili tavsiyelere ulaşılabilir.

Uygun kaynak ağzı tasarımıyla nüfuziyet, yeterli paso adedi, soğuk birleşme vb. pek

çok kaynak hatasından kaçınmak mümkündür.

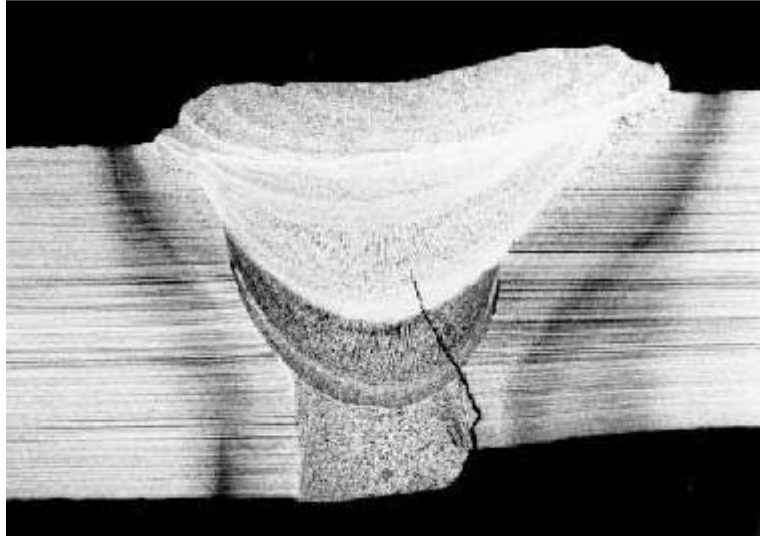


Şekil 2.18. Kaynaklı birleştirme tasarımı parametreleri (Askaynak, 2007)

Şekil 2.18’te gösterilen V alını kaynağı birleştirme örneğinde b: kök aralığı c: kök yüksekliği t: parça kalınlığını a ise kaynak ağzı açısını tanımlamaktadır. Birleştirilecek parça kalınlığına göre tavsiye edilen değerler ISO 9692-2 standardında verilmiştir.

2.4.4.2. Düşük hidrojenli sarf malzemesi kullanımı

Feritik çeliklerin kaynaklanmasında hidrojen miktarı düşük sarf malzemelerin kullanılması, soğuk çatlama yani hidrojen sebebiyle çatlamların önlenmesinde fayda sağlamaktadır. Endüstride hidrojen çatlakları olarak da adlandırılan bu problem, kaynak bölgesi soğuduktan günler sonra bile gerçekleşebilir. Kaynak bölgesi boyunca gerilen ana malzemede kalan artık gerilim kaynakta bulunan hidrojen sonucu ortaya çıkar. Özellikle kalın malzemeler, yüksek gerilimli kaynak bölgeleri oluşturmaya daha meyilli olup yüksek soğuma oranları elde edilmesinden dolayı kaynak hatası oluşumuna daha yatkındır. Yüksek dayanımlı çelikler ve kalınlığı fazla olan malzemelerde bu hataya özellikle dikkat edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.19’de örnek bir hidrojen çatlak görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.19. Hidrojen çatlağı (Askaynak, 2007)

2.4.4.3. Kaynak öncesi ve sonrası ısıt işlemleri

Yüksek dayanımlı, yüksek alaşımlı ve yüksek karbon oranlı çelikler, çatlama kaynaklı kaynak hatalarına karşı daha duyarlıdır. Bu malzemelerin sünelik değerlerinin az olması ana metal ve kaynak metali üzerinde kaynak işlemi bittikten sonra soğuma sürecinde artık gerilmelerin oluşmasına sebep olur. Isı tesiri altındaki bölgede hızlı soğuma sırasında martenzit oluşumuna da yatkındır. Martenzit oluşumu tane yapısında hidrojenlerin yerleşebileceği alanlar oluşturur ve ani çatlamalara sebebiyet verir.

Bu tip malzemelerin kaynağı öncesinde parçaların uygun süre boyunca ve tavsiye edilen sıcaklıkta kaynak prosedürlerine uygun olarak ısıt işleme tabii tutulması ve ısıtının eşit olarak dağılımının sağlanması gereklidir. Bu şekilde yapılan ön ısıtma sonucunda malzemenin ani soğumasının önüne geçilir ve ısı tesiri altındaki bölgede perlitik tane yapısı oluşumunu sağlar. Perlitik tane yapısı daha sünelik olduğundan malzeme üzerindeki büzülme gerilimini sınırlandırır ve martenzitik yapı oluşumunu azaltır.

Benzer olarak kaynak işlemi sonrasında da ısıt işlem uygulanabilir. Bu sayede kaynak sonrası oluşabilecek artık gerilmeler azaltılarak, çözünmüş hidrojen kaynaktan uzaklaştırılarak soğuk çatlamanın önüne geçilir.

2.4.4.4. Kaynak metali ve ana malzemenin dayanımlarının eşleşmesi

İdeal ilave metal malzemesinin dayanımının seçilmesi, kaynak hatası oluşumu riskini en aza indirir. Çoğu uygulama için kaynak metali ve ana malzemenin akma ve çekme dayanımlarının eşlenmesi gerekmektedir. Dayanım dereceleri, mümkün olduğunca birbirine yakın olmalı ve tasarım gereksinimlerine uymalıdır. Düşük dayanımlı bir malzeme ile yüksek dayanımlı bir malzemenin kaynağında, sarf malzemenin dayanımı düşük dayanımlı malzemenin dayanımına yakın seçilmelidir. Böylece malzemenin kırılabilirliği azalır ve çatlama riski önemli ölçüde düşer.

2.4.4.5. Uygun sarf malzemesinin depolanma koşulları ve kullanım prosedürleri

Sarf malzemenin depolanma koşulları; nem, toz, örtü dökülmesi veya yağdan kaçınmak için ideal bir ortam yaratmalıdır. Sarf malzemesi kullanım öncesine kadar kuru bir alanda paketlenmiş bir şekilde bekletilmeli dış ortamdan izole edilmelidir. Depolama alanının sıcaklığı, kaynak yapılacak ortamın sıcaklığına eşit olması, sıcaklık farkı sebebiyle oluşabilecek yoğunlaşma ve sarf malzemenin nem almasının önüne geçecektir. Aynı zamanda sarf malzemenin hidrojenle korunmasını da sağlayacaktır.

2.4.4.6. Uygun kaynakçı eğitiminin sağlanması

Kaynak hatalarının büyük çoğunluğu operatör hataları sebebiyle oluşmaktadır. Bu kapsamda kaynak operatörlerinin eğitimi ve deneyimli olması kaynak hatalarının önüne geçilmesinde alınabilecek önlemlerin başında gelmektedir. Kaynak operatörleri her zaman kaynak mühendisleri tarafından oluşturulmuş kaynak prosedürlerini (WPS) takip etmelidir. Kaynak prosedürleri, kenar yanığı (undercut), cüruf kalıntıları, porozite (boşluklu yapı), gibi yaygın kaynak kusurlarının önüne geçer. Kaynak prosedürlerinde kaynak operatörünün uyması gereken ön ısıtma, kullanılacak elektrod, kaynak pozisyonu, amper ve voltaj değerleri gibi takip edilmesi gereken parametreler bulunmaktadır.

2.5. Yorulmanın Tanımı

Yorulma; makine parçalarında tekrarlı yükler uygulanması sonucunda malzemede çatlak oluşması, çatlağın ilerlemesi ve kalıcı deformasyon ile sonuçlanan hasar şeklidir. Uygulanan bu yükler genellikle malzemenin akma dayanımının altında olmasına rağmen makine arızalarının büyük çoğunluğunu yorulma hasarı oluşturmaktadır.

Malzeme içerisinde oluşan mikro boyutlardaki çatlaklar, değişken zorlanmalar sonucunda zamanla ilerleyerek büyürler ve bu şekilde nihai yorulma hasarı oluşur. Yorulma hasarı çoğunlukla metalik malzemelerde gözlemlenmektedir. Makine elemanlarındaki süreksizlikler, pimler, yuvalar çentik etkisi yaratan unsurlar yorulma hasarının hızlanmasına olanak tanımaktadır. Şekil 2.20’de örnek bir yorulma hasarına ait görsel verilmiştir.

Ürünlerin tasarım aşamasında maruz kalacağı gerilmelere göre uygun bir geometride tasarlanması ve uygun malzeme tayini yorulma hasarı ve ürün ömrü açısından çok kritiktir. Parçanın maruz kalacağı yüklerin çok iyi bir şekilde hesaplanması, kesitlerin ve geometrinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda günümüzde bilgisayar destekli analiz programlarının yadsınamaz bir faydası vardır. Çok kısa sürelerde yapılan bilgisayar destekli hesaplamalar optimum parça geometrisi ve malzeme seçiminde mühendislere ve tasarımcılara yardımcı olsa da uygulamada çeşitli faktörler yorulma hasarlarına sebep olmaktadır.



Şekil 2.20. Örnek yorulma hasarı

2.5.1. Yorulmayla ilgili temel kavramlar

Yorulma hasarları tekrar eden gerilmeler ve bunların oluşturduğu plastik deformasyonlar sonucunda oluşmaktadır. Gerilmelerin uygulandığı malzemenin akma dayanımından çok daha düşük değerlerde yorulma hasarı gerçekleşebilir. Yorulma hasarları mikroskobik düzeyde başlayan çatlakların ilerlemesiyle kimi zaman birkaç çevrimden sonra kimi zamansa milyonlarca çevrimden sonra oluşabilir.

Lokal düzeyde plastik deformasyonun olduğu noktalar, yorulma kopmalarının başladığı yerlerdir. Keskin köşeler, dış açılan yerler, korozyona uğrayan yerler, delikler gibi gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde yorulma hasarı oluşması mümkündür.

Bölgesel plastik deformasyon sonucunda, bölge çok küçükse o bölgede gerinim sertleşmesi oluşabilir ve deformasyon oluşumu durabilir. Fakat deformasyon bundan büyükse bölge sünekliğini kaybederek çevrimsel yükler altında yorulma kopması meydana gelir.

Başlangıçta oluşan mikro çatlaklar, çatlak ilerledikçe parçanın kesit alanı azaldığı için oluşan gerilmeyi artırır. Böylece parça maruz kaldığı gerilime mukavemet gösteremez ve çatlak büyür ve en sonunda yorulma kopması gerçekleşir.

Makine ve konstrüksiyon tasarımlarında malzemelerin yorulma davranışlarının tahmin edilmesi modern mühendislik açısından son derece önemlidir. Makine parçalarında oluşan hasarların büyük çoğunluğunun yorulmadan kaynak olduğuna inanılmaktadır. Prototip aşamasında pek çok yorulma analizleri yapılır ve ürünlerin çevrim ömürleri başka bir deyişle yorulma ömürleri anlaşılmaya çalışılır.

Yorulmayla ilgili dört önemli özellik;

1. Sürekli olması
2. Bölgesel bir alanda gerçekleşmesi
3. Çatlak ilerlemesi
4. Çatlak veya çatlakların giderek büyümesi ve kırılmanın gerçekleşmesi

2.5.2. Tanımlar ve semboller

Yorulma olayında gerilme zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple yorulma deneyinde oluşan gerilme-zaman grafiği (Şekil 2.21) incelendiğinde bazı terimler ortaya çıkmaktadır.

Çevrim (cycle): Gerilme – zaman eğrisinde periyodik olarak tekrarlanan en küçük bölümüdür.

Çevrim Sayısı (N): Deney sırasında herhangi bir durumda uygulanan periyod sayısı.

Maksimum Gerilme (σ_{max}): Gerilme periyodundaki en büyük gerilme.

Minimum Gerilme (σ_{min}): Gerilme periyodundaki en küçük gerilme.

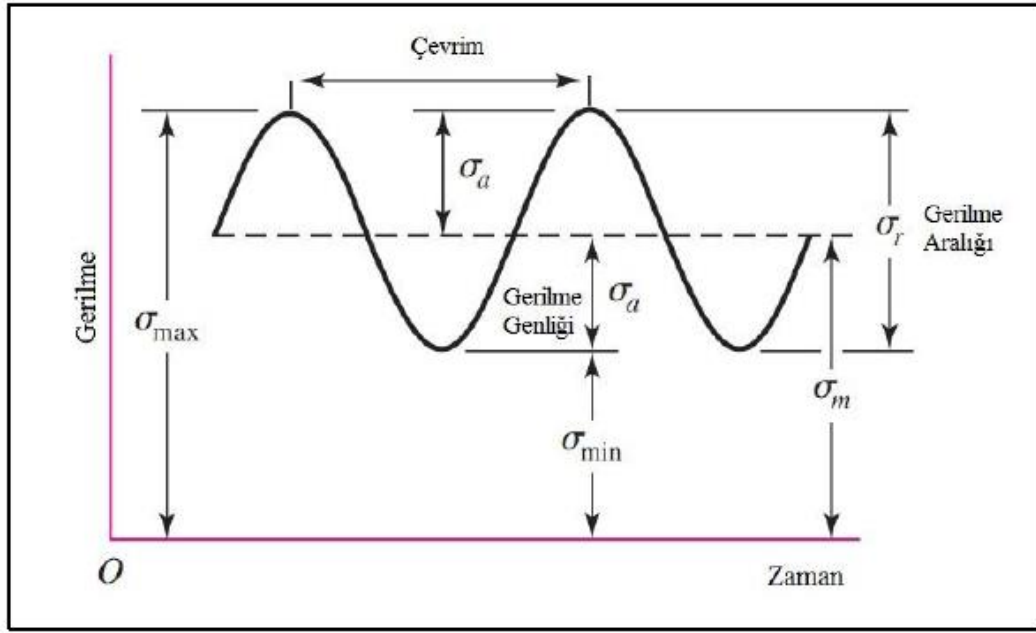
Ortalama Gerilme(σ_m): Gerilme periyodundaki en büyük ve en küçük gerilmenin aritmetik ortalaması.

Gerilme Genliği(σ_a): Gerilme periyodundaki en büyük ve en küçük gerilmenin farkının ortalaması.

Gerilme Aralığı(σ_r): Maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki fark.

Gerilme Oranı(R): Minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı.

Genlik Oranı (A): Gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranı.



Şekil 2.21. Gerilme – zaman grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.5)$$

Yukarıda belirtilen formüllerle ortalama gerilme, gerilme genliği, minimum gerilmenin maksimuma oranı, gerilme aralığı ve genliğinin ortalama gerilmeye oranları hesaplanabilir.

2.5.3. Gerilme türleri

Bir yapı veya makine üzerinde meydana gelen gerilmeler temel olarak ikiye ayrılır. Bunlar statik ve dinamik yükleme olarak adlandırılmaktadır. Statik yükleme durumunda malzeme üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğü ve yönü sabitken dinamik yükleme durumlarında bunlar değişkendir, bu sebeple değişken yükleme olarak da adlandırılırlar.

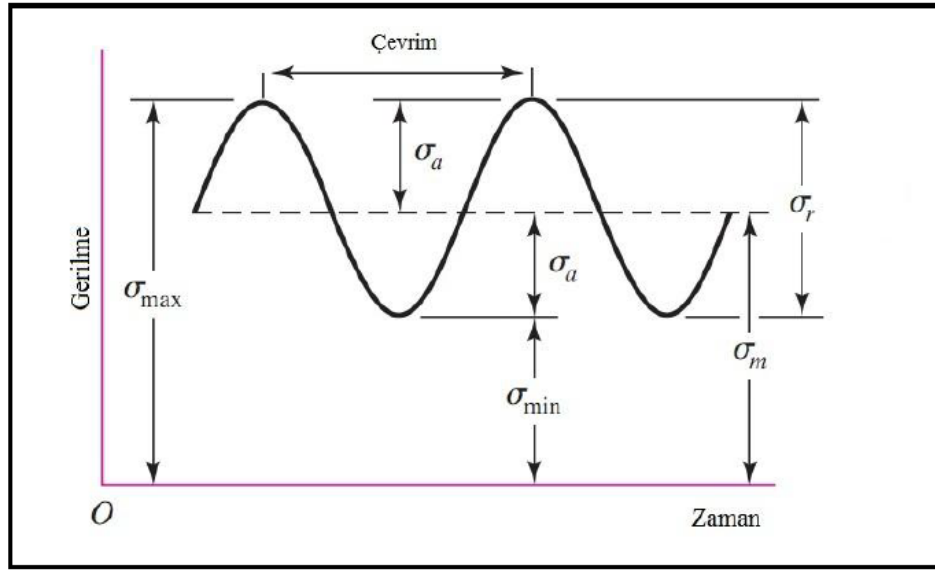
Statik gerilme durumunda parçaya etkiyen kuvvet veya moment dolayısıyla parça kesitinde oluşan gerilmeler zamana göre sabit veya göz ardı edilecek kadar az değişkenlik gösterir.

Değişken gerilme durumunda ise etkiyen kuvvet veya moment etkisiyle parçanın kesitinde meydana gelen gerilmeler zamana göre değişkendir.

Değişken gerilme durumları da kendi içinde üç temel başlık altında incelenmektedir.

2.5.3.1. Alternatif gerilme

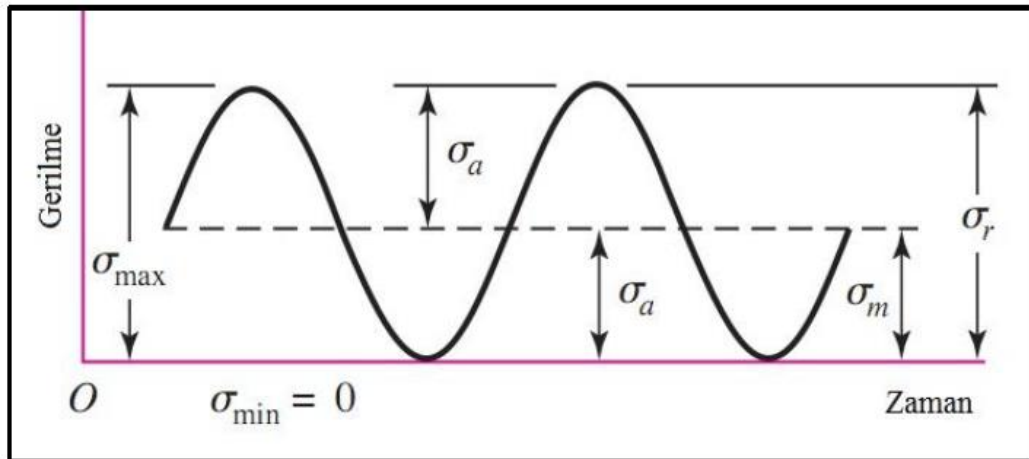
Alternatif gerilme halinde gerilme zamana bağlı olarak değişmektedir ve ortalama gerilme sıfırdan farklı olup, gerilme genliğinden büyüktür. Alternatif gerilme aynı zamanda sinüzoidal dalgalanan gerilme olarak da adlandırılır. Şekil 2.22’de alternatif gerilme grafiği verilmiştir.



Şekil 2.22. Alternatif gerilme grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

2.5.3.2. Tekrarlı gerilme durumu

Tekrarlı gerilme durumu titreşimli gerilme olarak da adlandırılmaktadır. Bu gerilme türünde gerilme genliği ortalama gerilmeye eşittir. Alt gerilme sıfıra eşittir. Bu sebeple $R=0$ 'dır. Tekrarlı gerilme durumuna ait grafik Şekil 2.23'de verilmiştir.

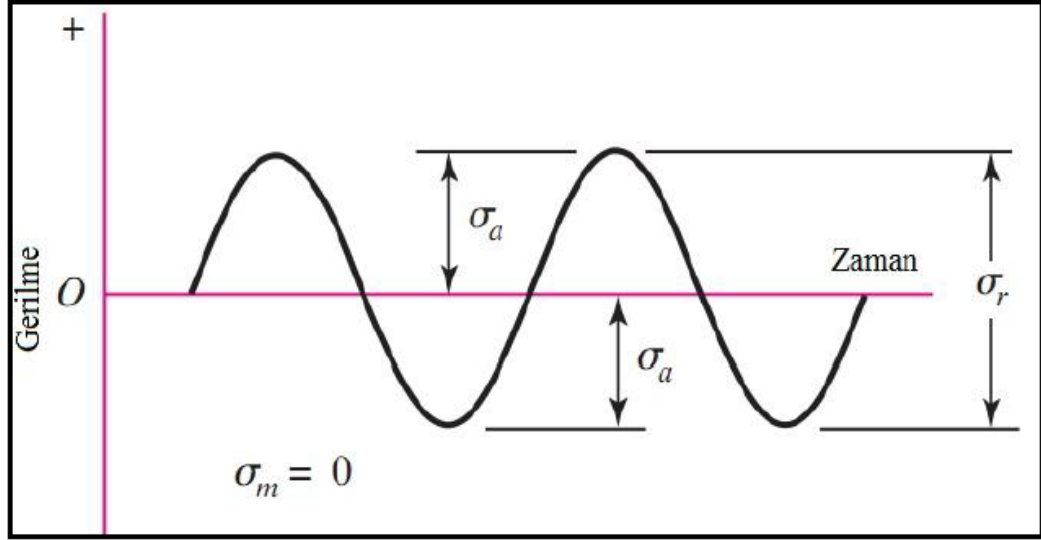


Şekil 2.23. Tekrarlı gerilme grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

2.5.3.3. Tam değişken gerilme durumu

Tam değişken gerilme durumunda ortalama gerilme her zaman sıfıra eşittir. Gerilme

değerleri eşit fakat ters işaretlidir ve bu iki sınır arasında değişmektedir. Genliğin maksimum değeri üst ve alt gerilmelere eşittir ve $R = -1$ 'dir. Ortalama gerilmenin sıfıra eşit olduğu bu duruma örnek olarak dönen bir akstaki gerilmeler örnek verilebilir. ($\sigma_m = 0$) . Şekil 2.24'te tam değişken gerilme durumuna ait grafik verilmiştir.



Şekil 2.24. Tam değişken gerilme grafiği (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

2.5.4. Düşük ve yüksek çevrimli yorulma

Artıp azalan veya tekrarlanan gerilmeler altında malzemelerde meydana gelen değişimler yorulma terimiyle ifade etmektedir. Bu tür gerilmeler sonucunda oluşan kırılmalar için yorulma veya yorulma hasarı tabirleri kullanılmaktadır. Malzemenin kırılmasına sebep olan bu mekanizma uygulanan yük veya gerilmenin döngü sayısına bağlıdır. Benzer şekilde kırılma mekaniği de ilerleyen bir süreç şeklinde oluşmaktadır. Kırılma literatürde genel olarak gevrek kırılma ve sünek kırılma olarak ikiye ayrılmaktadır. Gevrek kırılma görece daha ani oluşmakta, sünek kırılma ise daha belirgin ve yavaş bir şekilde oluşmakta ve söz konusu malzemenin karakteristiğine bağlıdır.

Literatürde yorulma çevrim bakımından iki farklı türde ele alınmaktadır. Bunlar düşük çevrimli (low cycle fatigue) ve yüksek çevrimli (high cycle fatigue) olarak

incelenmektedir. Düşük çevrimli yorulma malzemenin akma dayanımının üzerinde oluşan gerilmelerden dolayı meydana gelmektedir. Bu tip yorulmalarda ömür 10^4 çevrimden daha düşük olmaktadır. Bazı kaynaklarda çevrim sayısı 10^5 olarak alınmaktadır.

Yüksek çevrimli yorulma malzemenin akma dayanımının altında gerçekleşen gerilmelerden dolayı oluşur ve daha uzun çevrim sayılarına sahiptir. Bu çevrim sayıları genellikle 10^4 'ten büyük olmaktadır. Örnek olarak dönen veya titreşen miller, akslar gibi elemanlar örnek gösterilebilir.

2.5.5. Yorulma analizi yaklaşımları

Temelde üç çeşit yorulma analizi yaklaşımı mevcuttur.

Bunlar;

- Gerilme-Ömür Metodu (Stress-Life Method)
- Gerinim-Ömür Metodu (Strain-Life Method)
- Kırılma Mekanikliği Yaklaşımı (Fracture Mechanics) şeklindedir.

2.5.5.1. Gerilme – ömür (s-n) metodu

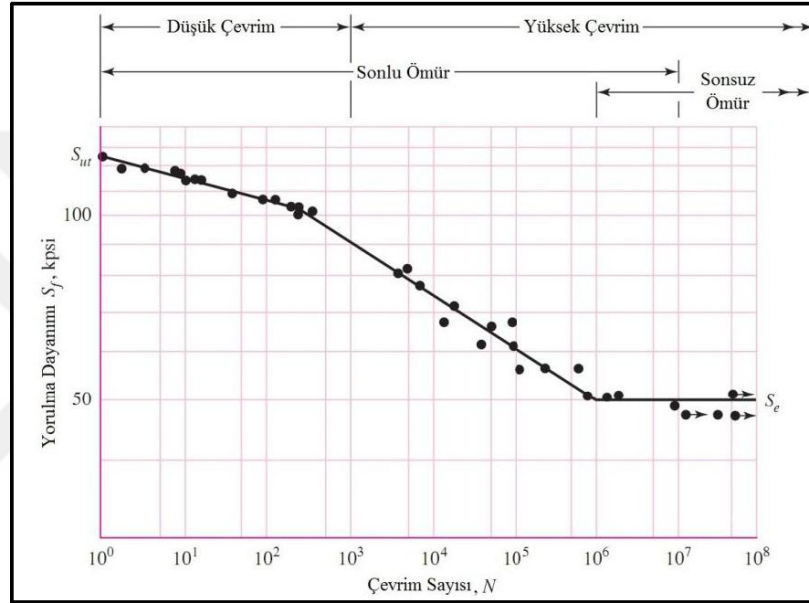
Temelini Wöhler'in oluşturduğu gerilme genliği-çevrim diyagramlarının oluşturduğu bu yöntem metalik malzemelerin yorulma ömürlerinin hesabında kullanılan ilk yöntemdir. Tasarımcılar tarafından dizayn aşamasında sıklıkla kullanılır.

1842 yılında Alman demiryolu mühendisi August Wöhler bir tren kazasını incelerken Wöhler eğrisi adı verilen bir eğriyi geliştirmiştir. Lokomotif aksı düşük gerilmeler altında çalışmasına rağmen yüksek çevrim sayıları yüzünden kırılmıştır. Wöhler asklarda oluşan gerilmenin genliği ile çevrim sayısı arasında bir S-N eğrisi elde etmiştir.

Belli bir çevrim sayısı için parçada oluşan tam değişken gerilmeler malzemedeki hasar oluşturursa, malzemenin o gerilme değeri için çevrim sayısına yorulma dayanımı veya ömrü denir. Çeliklerde, malzemenin yorulma hasarı gerçekleşmeden maruz kalabileceği maksimum gerilme genliği değeri o malzemenin dayanım limiti (endurance strength) olarak

tanımlanmıştır. Dayanım limitinin sembolü olarak S_n olarak ifade edilmektedir. Bu dayanım limiti bir test sonucunda elde edilmiş ise S_n' sembolü kullanılmaktadır. Çelikler için genellikle log-log koordinat sistemi kullanılır ve böylece lineer çizgi ortaya çıkar.

Gerilme çevrim eğrisindeki çizginin düz olduğu alan çelik malzemelerde 10^6 ile 10^7 çevrim arasına denk gelmektedir. Uygulamada çelik ve metalik malzemelerde 10^6 çevrime denk gelen gerilme genliği değerlerinden daha yüksek yük uygulanmaz. Dayanım limit değeri %4 - %9 aralığında nominal değerden sapabilir.



Şekil 2.25. Wöhler eğrisi (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

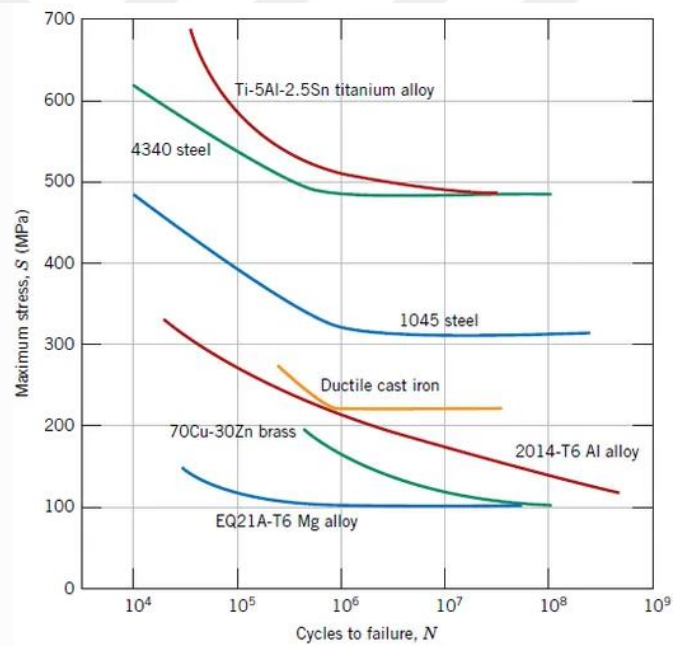
Wöhler yönteminde parça veya malzeme; şekil, yüzeyinin kalitesi açısından birebir aynı olan numuneler üzerinde farklı ve kesintisiz yüklemelerde test edilerek kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayıları tespit edilir. (Şekil 2.25).

Yorulma testleri kesintiye uğrarsa hasarsız deney parçalarında toparlanma denilen olay görülür ve aralıksız yük uygulanan testlerden daha yüksek yorulma dayanımı elde edilir. Yüzeyinde çentik bulunan deney parçalarının yapısında ise toparlanma olayı etkisi görülmez.

Bu yöntemde, bir deney dizisinde bütün parçalar için alt gerilme veya ortalama gerilme sabit tutulmak kaydıyla her bir deney için farklı gerilme genliği tayin edilir. İlk parça üst gerilme genlikle akma sınırına yakın gelen değerlerde yüklenir. Sonraki parçalardaysa kademeli azalan zorlamalar uygulanır. Yapılan deney dizisi sonunda uygulanan gerilme

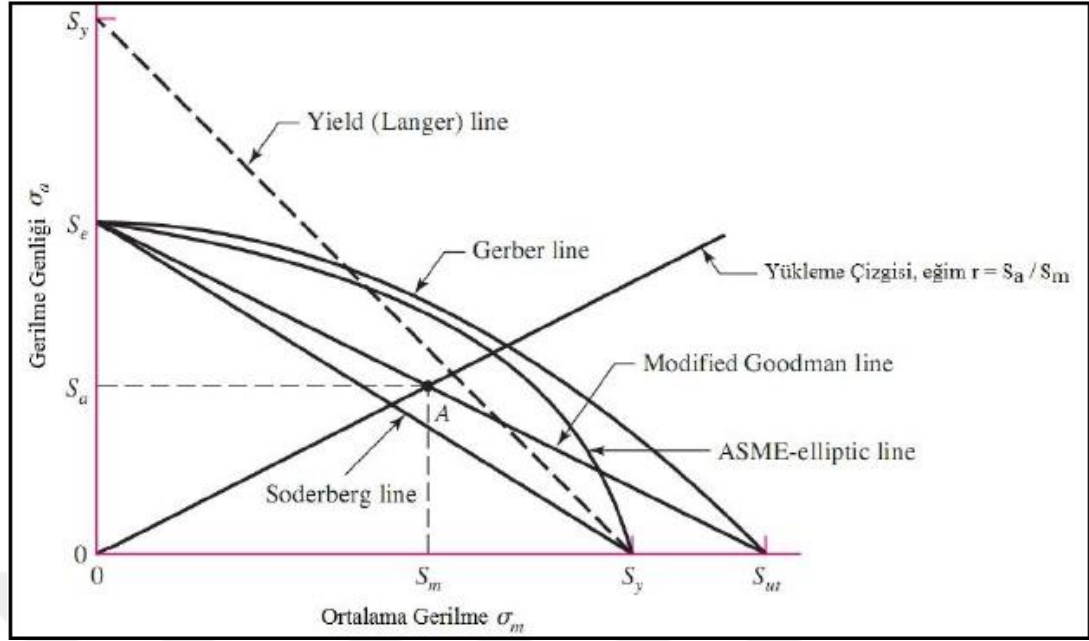
genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile Wöhler eğrisi elde edilir. Ortalama gerilmenin veya alt gerilmenin her bir değeri için ayrı bir eğri bulunmalıdır.

Yorulma dayanımı sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görüldüğü dayanım olarak kabul edilir. Uygulamada genellikle yorulma dayanımı kopma dayanımının 0.3 veya 0.5 katı olarak değerlendirilir. Eğrinin eğimine bağlı olarak belli bir çevrim sayısından sonra sonsuz çevrim kabulü yapılır. Sonsuz ömür bölgesine kadar olan bölüme ise sürekli yorulma veya sonlu ömür bölgesi denir. Ayrıca yorulma dayanımı gerilme genliğinde uygulanan yüklerin kesin olarak hasara dönüşmesi, yüklemenin büyüklüğü ve yüklemeye ait çevrim sayısına bağlıdır. Şekil 2.26'da S-N diyagramı örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.26. Bazı malzemeler için S-N diyagramı örneği (Callister, W.D., Rethwisch, D.G, 2015)

Çeşitli bilim insanlarının geliştirdiği yorulma yöntemleri mevcuttur. Bunlardan: Gerber, Goodman, Soderberg ve Marrow yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.27'de çeşitli yorulma kriterlerine ait gösterimler verilmiştir.



Şekil 2.27. Çeşitli yorulma kriterleri diyagramı (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

2.5.5.2. Gerinim – ömür metodu

20. yüzyılın ortalarında geliştirilen bu yöntem malzemelerin hassas veya kritik bölgelerinde oluşan gerinim veya deformasyonlar sebebiyle oluşan tepkilerin gözlenmesine dayalıdır. Temel yorulma ömrü tespit metotlarından biridir.

Bu yöntem parça üzerindeki gerilmelerin ve de gerinimlerin belirlenmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca konstrüksiyondaki elastik gerilmeler, çentik, kaynak gibi diğer gerilme yığılmalarının yüksek olduğu yerlerde bölgesel çevrimsel plastik deformasyonun oluşmasına sebebiyet verebilir. Bölgesel şekil değiştirme yöntemi laboratuvar ortamında aynı çevrimsel gerilmelere göre düzenlenmiş parçalardaki çatlak meydana gelişi ve yayılmasına dayalı ömür tespitinde sık kullanılır. Elastik malzemelerde gerinim değerleri, gerilme genliği-çevrim arasındaki ilişki Basquin eşitliği ile tanımlanır.

Burada:

- $\Delta\sigma/2$: Gerçek gerilme genliği, (true stres amplitude)
- $\Delta\epsilon/2$: Gerçek elastik gerinim genliği, (true elastic strain amplitude)
- $2N_f$: Tekrarlı yorulma çevrim sayısı (cyclic reversals to failure)
- σ'_f : Yorulma mukavemeti katsayısı (fatigue strength coefficient)
- b : Yorulma mukavemeti üssü (fatigue strength exponent)

Coffin ve Manson plastik malzemelerdeki genlik değerini aşağıdaki formülle tanımlar.(2.6)

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.6)$$

$\Delta\epsilon_p /2$: Plastik gerinim genliği (plastic strain amplitude)

ϵ'_f : Yorulma mukavemeti katsayısı (fatigue strength coefficient)

c : Yorulma süneklik üssü (fatigue ductility exponent)

Bu gerinim genliklerinin değişimleri arasında bir bağlantı kurarak, yorulma ömründeki elastik-plastik gerinim değişimlerinin toplamı aşağıdaki formül ile bulunabilir.(2.7)

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.7)$$

Ortalama gerinimin etkileri yorulma ömrünün tahmin edilmesinde ihmal edilebilir. Buna karşın ortalama gerilme değeri belirgin bir etkiye sahiptir. Morrow, gerinim-ömür eşitliğinin ortalama gerilme değerine etkisini belirlemek için denklemdeki elastik terimlerde düzeltmeler yapmıştır.

σ_0 : ortalama gerilme değeri (mean stress)

Buradan ortalama gerilme değerinin şekil değiştirmeye etkisi (2.8);

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_0}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.8)$$

Smith, Topper ve Watson'ın geliştirdiği ortalama gerilmelerin etkisini belirlemek

için kurulan denklem.(2.9)

$$\sigma_{\text{Max}} \frac{\Delta E}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (2.9)$$

Bu eşitlikten:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_0 \quad (2.10)$$

Maksimum gerilme eşitliğini veren sonuç çıkarılır.

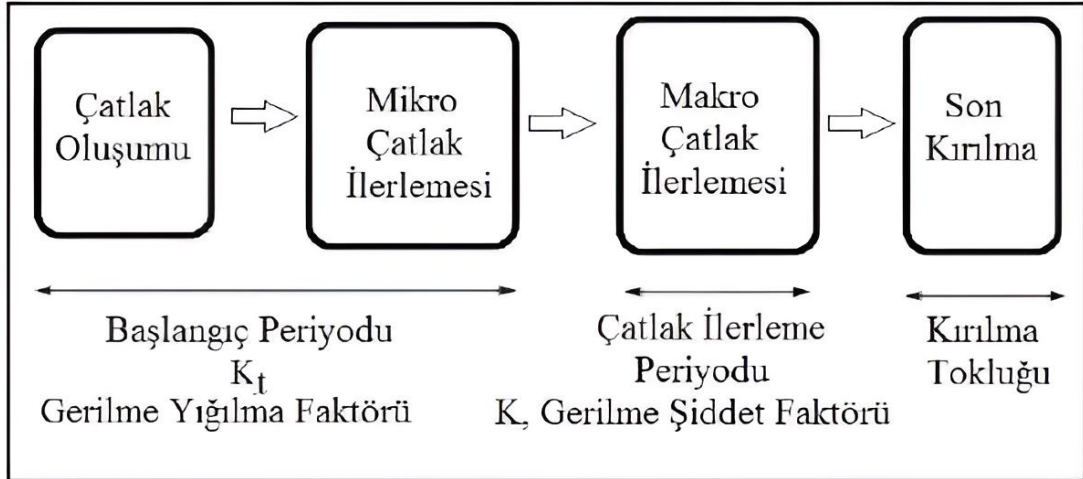
2.5.5.3. Kırılma mekaniği metodu

Yorulma veya yorulma hasarı temel olarak aşağıdaki aşamalarda oluşmaktadır.

- Çatlağın oluşması ve başlangıcı (crack initiation)
- Oluşan çatlağın ilerlemesi (crack propagation)
- İncelen kesitin kırılması (fracture)

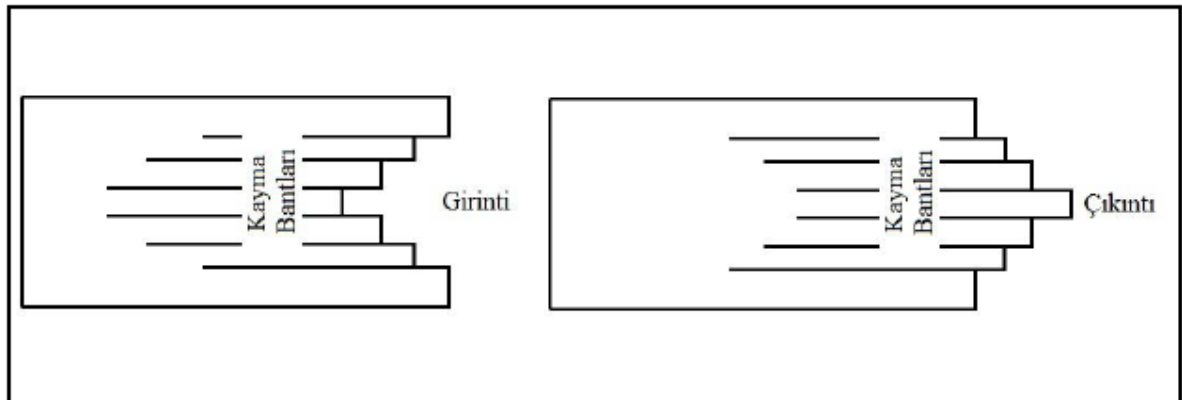
Şeklinde ilerlemektedir.

Yorulma hasarının ilk aşamasında gerilme yığılma faktörü (Kt) önemli etki göstermektedir. Gerilme yığılma faktörü zorlanan parçanın geometrisine, yük geçişlerine göre değişkenlik göstermektedir. En büyük bölgesel gerilmenin nominal gerilmeye oranı şeklinde de ifade edilebilir. Şekil 2.28’de yorulma hasarının aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.28. Yorulma hasarı aşamaları (Özmen D. 2007)

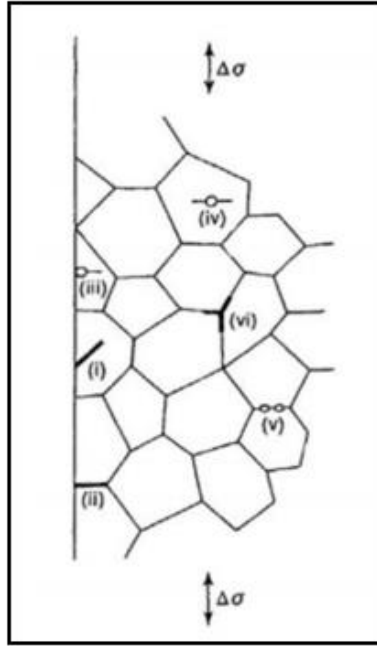
Yorulma hasarını başlatan çatlaklar genellikle malzemenin iç yapısında bulunan kusurlardan veya malzeme yüzeyindeki düzensizlikler, çentikler etrafında oluşan deformasyonların şiddetli olduğu bölgelerde lokal olarak başlamakta ve ilerlemektedir. Zorlanmaya maruz kalan parçalar üzerindeki çatlak, çentik, boşluk, ani kesit değişimleri civarında oluşan gerilmeler dış gerilmelere kıyasla büyük değerdedir. Bu gerilmeler sebebiyle yapı içinde plastik deformasyonlar meydana gelir. Metal bir parçada maruz kalınan elastik sınır altındaki yükler nedeniyle mikro yapı içerisindeki kusurlar (dislokasyonlar) bölgesel olarak hareket eder ve Şekil 2.28’da gösterilen kayma bantları oluşur. Bu bantların oluşumu sonucunda yüzeyde beliren çıkıntılar ve girintiler gerilme yığılmasına neden olur. Mikro çatlaklar büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar.



Şekil 2.29. Kayma bantlarının oluşturduğu girinti ve çıkıntılar (Çimen 2012)

Şekil 2.30'da ise değişik çatlak başlangıç merkezleri gösterilmektedir;

- i: Taneleri kesen
- ii: Taneler arası
- iii: Yüzeydeki kalıntı veya boşluk
- iv: Malzeme içerisindeki kalıntılar
- v: Tane sınırlarındaki boşluklar şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Çatlak başlangıcı için farklı merkezler (Çimen 2012)

2.5.6. Uygulamada kullanılan yorulma analizi metotları

Literatürde pek çok farklı yorulma analizi yaklaşımları mevcuttur. Uzun yıllardır kullanılan bu yöntemler farklı şekillerde oluşturulan diyagramlar üzerinden söz konusu malzemelerin yorulma mukavemetlerini ve ömürlerini tahmin etmekte kullanılmaktadır.

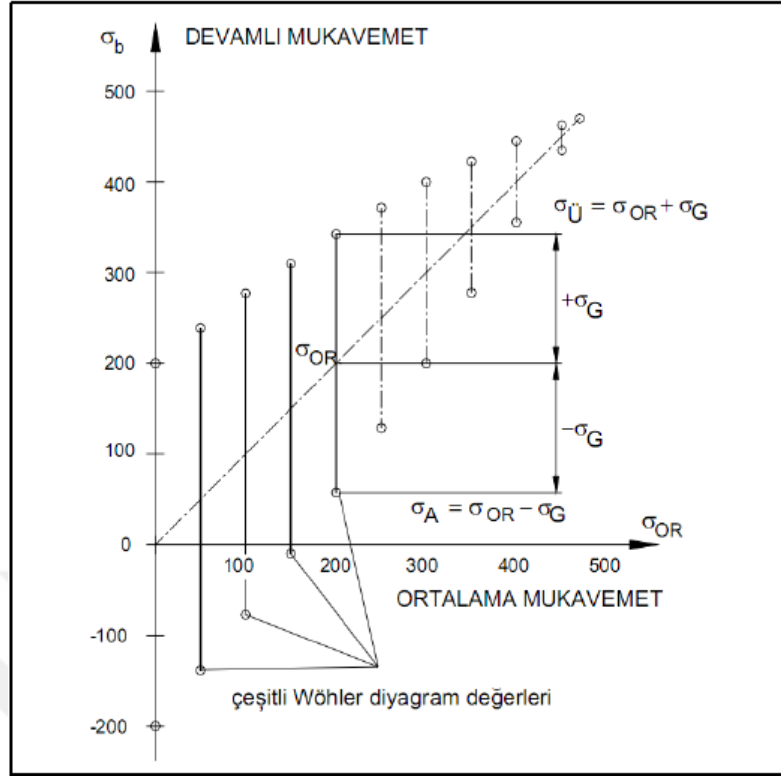
2.5.6.1. Smith diyagramı

Wöhler yönteminde tüm zorlanma durumları için ayrı ayrı testler yapılması malzemelere göre değişkenlik göstermesi ve uygulamada zorluklar doğurmaktadır. Bu

diyagramların tek bir diyagramda toplanması hedeflenerek pek çok çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan diyagramlardan bir tanesi de Smith diyagramıdır. Smith sürekli mukavemet diyagramı için bir koordinat sistemi ve bu sistemde sıfır noktasından geçen 45 derecelik bir doğru almıştır.

Sistemin x eksenini ve 45 derecelik doğru, ortalama mukavemet değeri için kullanılmaktadır. Wöhler diyagramının yapıldığı ortalama mukavemet değeri 45 derecelik doğruya işaretlenir. Örneğin $\sigma_{OR} = 50 \text{ N/mm}^2$ ile yapılmış Wöhler diyagramı ele alınacak olursa, bu diyagramdaki sürekli mukavemet değerini veren genlik mukavemet değerleri y eksenine paralel bir eksene ölçekli olarak taşınır. Daha sonra $\sigma_{OR} = 100 \text{ N/mm}^2$ ile yapılmış Wöhler diyagramı alınır ve bu diyagramdaki sürekli mukavemet değerini veren genlik mukavemet değerleri y eksenine paralel bir doğruya ölçekli olarak taşınır. Bu yöntemle çeşitli Wöhler diyagramları ele alınarak, değerler tanımlandığı gibi ortalama mukavemet ve genlik mukavemet değerleri ile diyagrama taşınırlar.

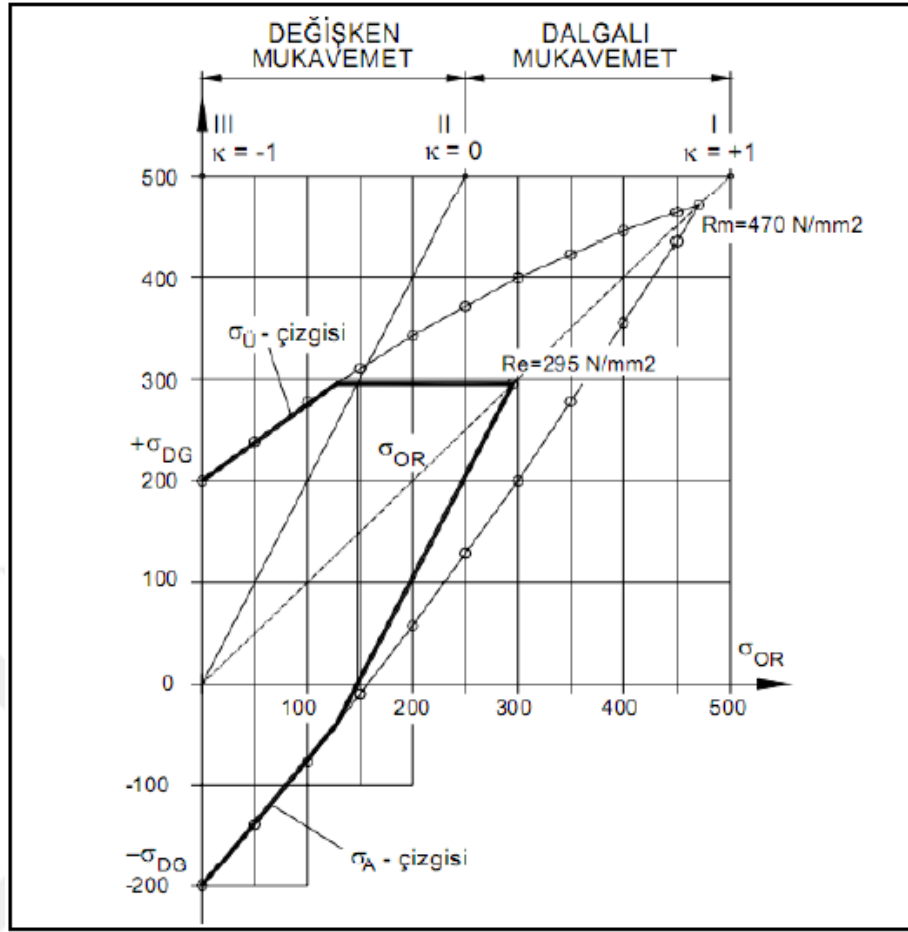
Genlik mukavemet değerleri birbirleriyle birleştirilerek σ_u ve σ_A mukavemet sınır çizgileri oluşturulur. Böylece çeşitli Wöhler diyagramı değerleri bir diyagrama taşınmış ve toparlanmıştır. Şekil 2.31’de Smith diyagramının oluşturulması gösterilmiştir.



Şekil 2.31. Wöhler diyagramının Smith diyagramına uyarlanması (Ekberg A. 2007)

Şekilde Wöhler diyagramından alınan değerlerle oluşturulan Smith diyagramı verilmiştir. Wöhler diyagramları ile taşınan değerler devamlı mukavemette tamamen kullanılamazlar.

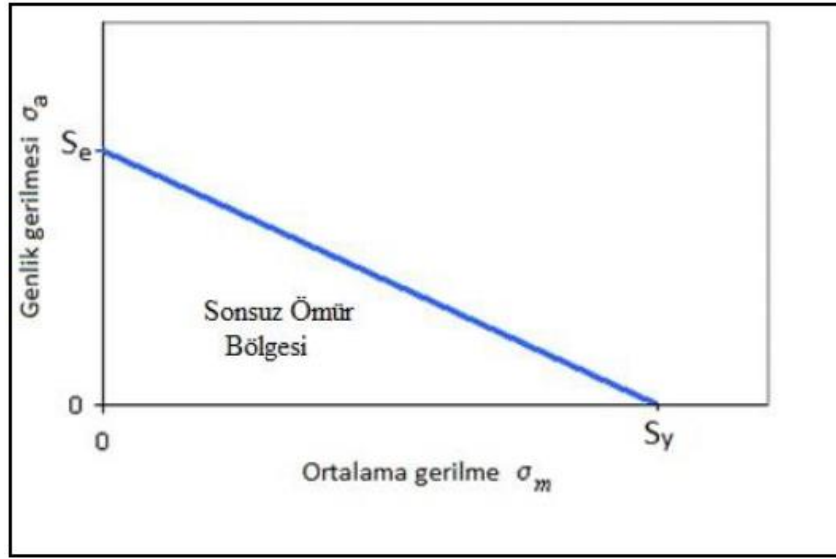
Maksimum olarak akma mukavemeti değeri taşınır ve bu mekik kesiti şeklinde olan devamlı mukavemet alanını keser. Bu kesit noktası ile y eksenindeki, yani tam dalgalı mukavemet değeri, bir doğru ile birleştirilir. Böylece pratikte kullanılacak olan üst mukavemet sınır çizgisi ortaya çıkmış olur. Bu kesit noktasının y eksenine paralel doğru üzerindeki σ_{OR} çizgisine göre simetriği alt mukavemet sınır çizgisinin katlanma noktasını verir. Daha sonra mukavemet sınır çizgisi de tamamlanır (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Smith'e göre sürekli mukavemet diyagramı (Ekberg A. 2007)

2.5.6.2. Soderberg diyagramı

Sünekliği düşük malzemeler için ise Soderberg diyagramları kullanılmaktadır. Soderberg eğrisinde ortalama gerilme değerleri statik mukavemet sınırından elde edilen mukavemet değerleri yatay eksen için kullanılır. Düşey eksen içinse tam değişken gerilme mukavemet limiti ve gerilme genliği değeri kullanılır. Şekil 2.33 'te Soderberg diyagramına göre sonsuz ömür bölgesi örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Soderberg diyagramı (Ekberg A. 2007)

Soderberg diyagramı yöntemine göre;

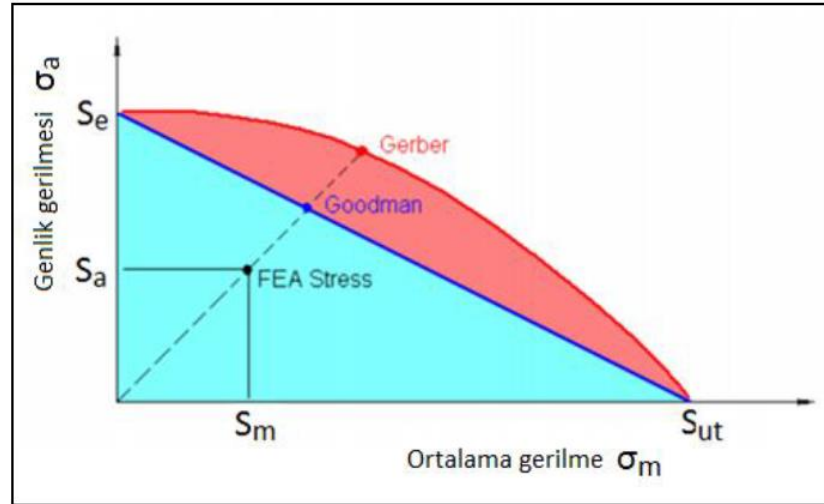
$\sigma_a = 0$ iken statik zorlanma halidir. Bu durum akma gerilmesinin olduğu durumdur.

$\sigma_m = 0$ iken ise tam değişken zorlanma halidir. Belirtilen S_e limit yorulma gerilmesidir.

2.5.6.3. Goodman ve Gerber diyagramı

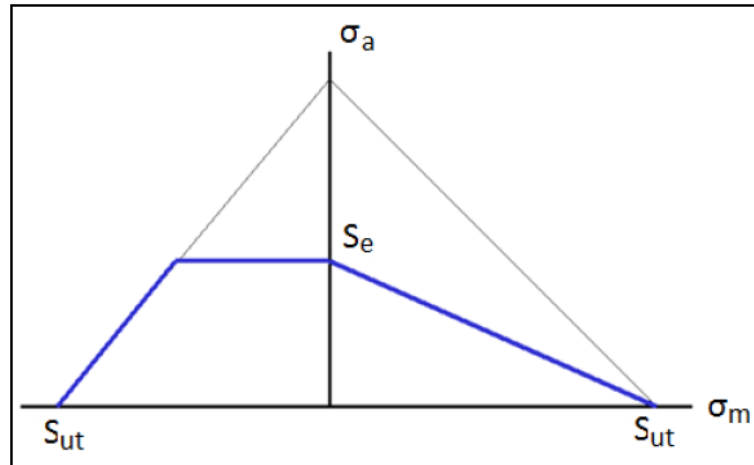
Goodman ve Gerber diyagramı çoğu malzeme türüne uygun olsa da, gevrek malzemeler için Goodman süneler içinse Gerber tercih edilmektedir. Bu diyagramlar, malzemenin kopma gerilmesi (S_{ut}) ile limit yorulma (S_e) gerilmesi kullanılarak oluşturulmaktadır.

Goodman için, hesaplanan bu iki değer arasında lineer bir çizgi çizilerek oluşturulurken, Gerber eğrisi bu değerler arasında oluşturulan parabolik bir eğri yardımıyla elde edilmektedir. Eğrinin paraboliklik derecesi söz konusu malzemeyle yapılmış deneylerin verilerine göre tayin edilmektedir. Şekil 2.34’de S_m herhangi bir düğüm noktasındaki ortalama gerilme, S_a ise gerilme genliğidir. Gerçekleştirilen hesapta bu iki gerilme değerinin kesim noktası olan kırmızı veya mavi bölge dışında kalmıyor ise gerilme makul sınırlar içerisinde.



Şekil 2.34. Goodman ve Gerber eğrileri (Ekberg A. 2007)

Bir malzeme üzerinde basma ve çekme gerilmeleri söz konusuysa Goodman diyagramı Şekil 2.35'teki gibi kullanılmaktadır. Şekilde de görülebileceği gibi ortalama gerilmenin negatif olduğu bölgede malzeme dayanımı daha yüksektir. Bunun nedeniyse gevrek malzemeler için basma dayanımının çekme dayanımından daha büyük olmasıdır.



Şekil 2.35. Goodman diyagramının basma ve çekme durumu (Ekberg A. 2007)

2.5.6.4. Haigh diyagramı

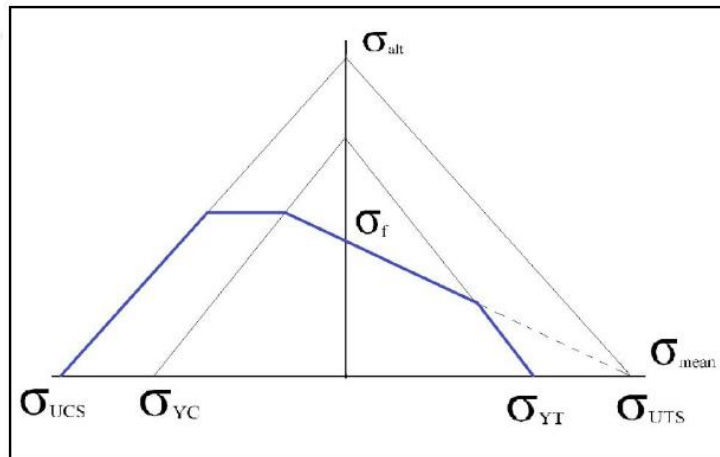
Haigh diyagramı, tüm malzemeler için çekme ve akma dayanımları kullanarak çizilen; statik gerilme hesabı sonucunda elde edilen gerilme genliği ve ortalama gerilme

değerlerinin üzerine yazılarak konstrüksiyonun emniyet payı değerinin belirlendiği diyagramdır. Bu diyagram tek eksenli gerilme durumu için geçerlidir. Kullanılan malzeme değerlerine göre referans eğri çizilir. Analizi yapılan modelin sonsuz ömürlü çıkması için modeldeki tüm düğüm noktalarındaki gerilme değerleri bu eğrinin sınırladığı alanda bulunması gereklidir. Başka bir deyişle referans eğrinin altı, söz konusu malzeme için sonsuz ömür değeridir. Hesaplanan emniyet payı değeri “1” değerine ne kadar yakınsa model yorulma açısından o kadar emniyetlidir.

Haigh diyagramı aşağıdaki dört aşama ile kullanılmaktadır.

- 1) Diyagramın çizilmesi
- 2) Diyagramın indirgenmesi
- 3) Servis yüklemelerinden elde edilen gerilmelerin diyagramda yazılması
- 4) Emniyet payının hesaplanması

Haigh diyagramı altı noktayla oluşturulur. Bu noktalar malzemenin çekme, akma gerilmesi ve yorulma süreklilik limiti değerlerine göre belirlenir. (Şekil 2.36)



Şekil 2.36. Haigh diyagramı (Ekberg A. 2007)

Haigh diyagramı oluşturulurken; öncelikle x ekseninde bulunan malzemenin maksimum çekme gerilmesi noktası başlangıç kabul edilerek, y eksenindeki limit yorulma gerilmesinden geçen bir doğru çizilir. Daha sonra bu doğru, x eksenindeki malzeme akma gerilmesi değerinden 45 derecelik bir doğruyla kesilerek, diyagramın çekme gerilmesi kısmındaki emniyetli alan küçültülür. Aynı doğru diyagramın basma kısmından (sol) x ekseninde bulunan çekme akması gerilme değerine başlangıç alınarak çizilen, doğru 45

derecelik doğruyla kesilerek buradan sonra yatay eksene paralel bir yol izler ve devamında y eksenindeki maksimum çekme gerilmesinden x eksenindeki aynı gerilme değerine uzanan doğruyla birleştirilerek x ekseninde sonlanır.

2.5.7. Yorulmaya etki eden faktörler

Yorulma sebepli hasarın meydana gelmesinde birden çok etkenin ayrı ayrı veya aynı anda etkisi söz konusudur. Uygulamada yorulma hasarlarının büyük çoğunluğu malzemedeki hatalardan değil, çentik etkisi oluşturan yüzeyler ve şekiller, montaj hataları, fazla yüklenme, bakımsızlık gibi nedenlerle oluşmaktadır.

- Gerilme Durumu: Çekme, basma, kayma gerilmeleri, gerilmelerin genlikleri, ortalama gerilme, çok eksenli gerilmenin varlığı gibi durumlar yorulma hasarında rol oynamaktadır.
- Geometri: Parçanın yükleme şartları altında, yorulma çatlaklarının başlamasına sebebiyet veren, gerilme yığılmalarını oluşturan süreksizlikler.
- Artık Gerilmeler: Kaynak, döküm gibi prosesler sonrasında oluşan artık gerilmelerin yorulma ömrünü azalmasıyla alakalı çalışmalar mevcuttur.
- Malzeme Türü: Özellikle seçilen malzemenin mukavemet değerlerine göre ürünlerin yorulma ömürleri değişkenlik göstermektedir.
- İç Kusurlar: Kaynaklı imalatta, döküm vb. işlemler sonrasında malzeme içerisinde oluşan boşluklar yorulma dayanımını olumsuz etkilemektedir.
- Mikro Yapı: Malzemelerin mikro yapısı, tane boyutları yorulma ömrüne etki etmektedir.
- Çevresel Faktörler: Korozyon, yüksek veya düşük sıcaklık, gaz ortamı gibi çevre şartları yorulma ömrünü etkilemektedir.

2.5.8. Yorulma hasarı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi yorulma hasarı tekrar eden yükler altında malzeme üzerinde oluşmaktadır. Bununla birlikte malzemelerde yorulma olayı ön çatlak durumuna ve çevrim sayılarına göre ele alınabilir.

Ele alınan malzemenin yükleme başlangıcında herhangi bir çatlak olmadığı durumda tekrarlı yüklerin etkisiyle oluşan yorulma çatlağı ilerleyerek yorulma hasarını oluşturur.

Büyük boyutlu parçalarda, özellikle de kaynak içeren; gemiler, köprüler gibi konstrüksiyonlarda üretim metotlarından dolayı yükleme öncesinde hali hazırda var olan çatlaklar tekrarlı zorlanmalar sonucunda giderek ilerleyerek yorulma hasarını meydana getirirler.

Literatürde sıkça bahsedilen uzun ömürlü yorulma (high cycle fatigue) ise zorlanmaya maruz kalan malzemenin akma dayanımından daha küçük gerilmelerin sebep olduğu yorulma türüdür. Tüm titreşen sistemler, tekerlekler, miller bu gruba örnek olarak verilebilir ve genellikle 10^4 çevrimden daha yüksek çevrim sayılarında yorulma hasarları gerçekleşir.

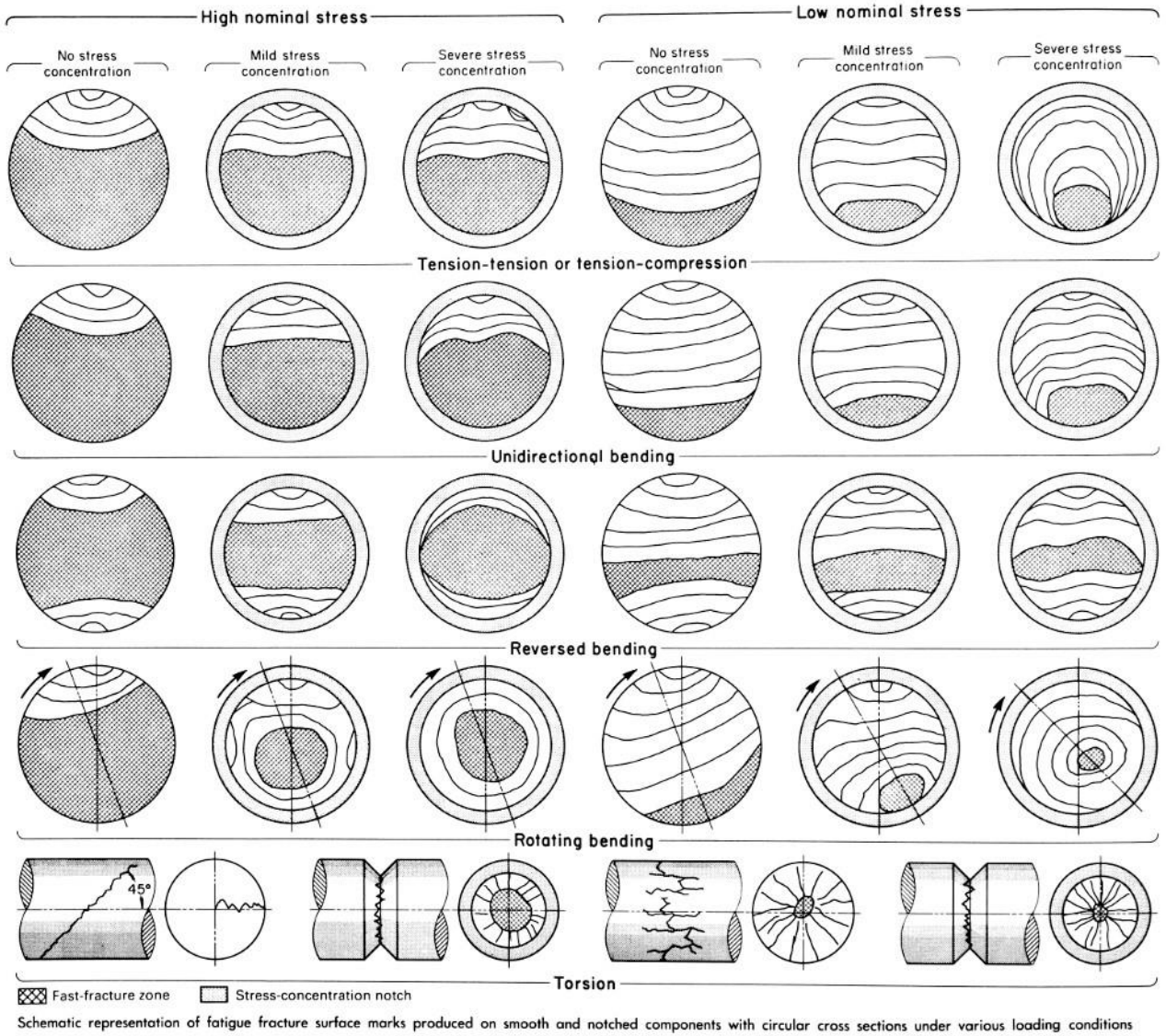
Bir başka yorulma türü olan düşük çevrimli yorulma (low cycle fatigue) ise söz konusu malzemenin akma dayanımından daha yüksek gerilmelerin sebep olduğu yorulma hasarı şeklinde tanımlanabilir. Burada ise 10^4 çevrim sayısından daha düşük yorulma ömürleri söz konusudur.

Malzemelerde yorulma olayı üç aşamada gerçekleşmektedir;

- I. aşamada malzemede çekirdeklenme adı verilen mikro seviyede çatlak oluşumu gelişir. Oluşan mikro çatlak gerilmenin en yoğun olduğu bölge veya bölgelerde meydana gelir.

II. aşamada ise oluşan mikro çatlaklar harekete geçerek, parça üzerindeki maksimum gerilmeye dik yönde ilerler ve çatlak büyümesi gerçekleşir.

III. aşamaya gelindiğinde ise II. aşamada ilerleyen çatlaklar dinamik olarak ilerleyerek yorulma kopmasına bir başka değişle yorulma hasarına neden olurlar.



Şekil 2.37. Yükleme göre yorulma hasarları (Budynas, R.G, Nisbett J.K, 2011)

Şekil 2.37’de de görüldüğü gibi nominal gerilmenin yüksek olduğu zorlanma durumlarında, yorulma hasarı oluşumunun III. aşamasında gerçekleşen ani çatlama bölgesi düşük nominal gerilme örneklerine göre daha büyük olmaktadır.

Bunun sebebi yüksek nominal gerilmeler altında mikro çatlakların çok daha hızlı ilerleyerek yorulma kopmasının gerçekleşmesidir. Aynı zamanda şekilde de verilen örneklerdeki gibi gerilme yığılmalarının seviyesine göre çatlak oluşum karakteristikleri değişmektedir.

2.6. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma

Kaynaklı bağlantılar günümüzde pek çok makine ve konstrüksiyon imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. Endüstride yaygın bir şekilde kullanılan bu yöntem beraberinde bazı riskleri de getirmektedir. Parçaların kolay bir şekilde birleştirilmesine izin veren bu yöntem, statik veya dinamik zorlanmalar karşısında yapılan kaynağın kalitesine ve uygunluğuna göre dayanım riskleri taşımaktadır.

Yüksek ısı veya basınç altında birleştirilen çeliklerde ısı tesiri altındaki bölgedeki sıcaklıklar malzemenin ergime sıcaklığının üzerinde olması, bağlantının oluştuğu bölgede ısı gerilmelere yol açmakta ve bölgenin metalürjik yapısını değiştirmektedir. Isı tesiri altında metalürjik yapısı değişen bu bölgede yorulma çatlağının başlaması ve ilerlemesi süreçleri hızlanmaktadır. Bu sebeple kaynaklı bağlantılarla birleştirilmiş malzemelerin yorulma ömürleri ana metale kıyasla her zaman daha düşük olmaktadır.

Endüstride kullanılan çeliklerin yaklaşık olarak yarısı kaynak edilebilir şekilde üretilmektedir. Dinamik yükler altında zorlanan kaynaklı yapılarda yorulma davranışı diğer örneklerde olduğu gibi yine çentik etkisi, geometrik süreksizlikler gibi etkenlere bağlı olsa da ısı tesiri altındaki bölgede oluşan metalürjik değişim sebebiyle çeşitli hatalar oluşabilmektedir. Bu sebeple kaynak kalitesi; kaynak yöntemi, amper, voltaj, koruyucu gaz ortamı, kaynak ağzı değişkenleri, kök boşluğu gibi pek çok değişkene bağlıdır. Bu çalışma içerisinde de bu parametrelerden bazıları etkileri deneysel olarak incelenecektir.

Dinamik yüklemelere maruz kalan kaynaklı yapıların yorulma ömürleri, kaynak edilen ana metalin kaynak edilebilirliğine, uygun kaynak parametrelerine, kaynak dikişinin kalitesine göre değişkenlik göstermektedir. Çoğunlukla malzemenin akma dayanımının

altında oluşan yorulma hasarları, kaynaklı yapılarda oluşabilecek hatalara karşı daha duyarlı olup yorulma çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve yorulma hasarının oluşması aşamalarını hızlandırmaktadır. Bu sebeple kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının hesaplanmasında her zaman emniyet faktörünü diğer yöntemlere göre yüksek tutmak faydalı olacaktır.

2.6.1. Kaynaklı bağlantıların mukavemeti

Kaynaklı bağlantıların mukavemet hesaplamaları yapılırken ısı tesiri altındaki bölgede oluşabilecek düzensizlikler ve hatalar sebebiyle kaynaklı bağlantının mukavemeti üç farklı faktör ele alınarak incelenmektedir. Bunlar;

- Kaynak dikiş faktörü (v_1)
- Kaynak kalite faktörü (v_2)
- Gerilme faktörü (v_3)

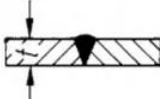
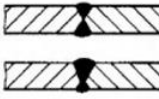
Şeklindedir.

Kaynak dikişinin mukavemeti hesaplanırken yukarıda verilen faktörlere göre aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

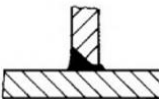
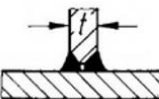
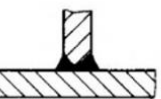
$$\sigma_{kem} = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot \sigma_{em} \quad (2.11)$$

2.6.1.1. Kaynak dikiş faktörü (v_1)

Kaynak dikiş faktörü; oluşturulan birleştirmede kaynak dikişinin türüne ve şekline göre değişmektedir. Endüstride kullanılan birleştirmelerin büyük çoğunluğunu oluşturan alın ve köşe birleştirmelere ait kaynak dikiş faktörü tabloları aşağıdadır. Statik zorlanma durumunda 1 olarak alınır. Dikiş türlerine göre dikiş faktörleri Şekil 2.38, 2.39 ve 2.40'da verilmiştir.

Alın dikişler		V-Dikişi	X-Dikişi ve kök pasolu V-Dikişi	İki tarafı da işlenmiş V-Dikişi	Kabartma dikiş
Dikiş türü					
Kaynak alanı		$t \cdot l$	$t \cdot l$	$t \cdot l$	$t \cdot l$
v_1	$\sigma_{\perp}^{1), 5)}$	0,5	0,7	0,9	0,5
	$\sigma_{\perp}^{2), 4)}$	0,7	0,8	0,9	0,8
	$\tau_{\parallel}^{3), 6)}$	0,42	0,56	0,72	0,56

Şekil 2.38. Alın kaynakları için dikiş faktörü (Curgül İ, 2005)

Köşe dikişler					
Dikiş türü					
Kaynak alanı		$a \cdot l$	$a \cdot l$	$s \cdot l$	$s \cdot l$
v_1	$\sigma_{\perp}^{1), 5)}$	0,4	0,6	0,5	0,7
	$\sigma_{\perp}^{2), 4)}$	0,6	0,7	0,68	0,8
	$\tau_{\parallel}^{3), 6)}$	0,32	0,48	0,4	0,56

Şekil 2.39. Köşe kaynakları için dikiş faktörü (Curgül İ, 2005)

Köşe dikişler		Tek taraflı			İki taraflı		
		Dışbükey	Düz	İçbükey	Dışbükey	Düz	İçbükey
Dikiş türü							
Kaynak alanı		$a \cdot l$			$2a \cdot l$		
v_1	$\sigma_{\perp}^{1), 5)}$	0,28	0,3	0,33	0,38	0,42	0,5
	$\sigma_{\perp}^{2), 4)}$	0,5	0,54	0,6	0,54	0,6	0,7
	$\tau_{\parallel}^{3), 6)}$	0,28	0,3	0,33	0,38	0,42	0,5

Şekil 2.40. Köşe kaynakları için dikiş faktörü (Curgül İ, 2005)

Kaynak bağlantısının mukavemet hesabı yapılırken yukardaki tablolara göre v1 değeri bulunmaktadır.

2.6.1.2. Kaynak kalite faktörü (v2)

Bir diğer faktör ise kaynak kalite faktörüdür. Burada kaynağın kalitesine, muayene durumuna göre yaklaşık değerler alınmaktadır. Olabilecek en iyi kaynak kalitesi için v2 faktörü; 1, orta kalitedeki kaynaklar için 0.7-0.8, düşük kalitedeki kaynaklar için ise 0.5 değeri kullanılabilir. Buradaki kaynak kalite faktörleri 15085 standardındaki CT1,CT2, CT3 gibi kaynak denetim sınıflarına göre değerlendirilecek olursa; sadece gözle kontrolü (vt) sağlanan kaynaklar için düşük kalite (0.5), manyetik parçacık(mt) veya sıvı penetrant (pt) testleri gibi yüzeysel testler gerçekleştirilen kaynaklar için 0.7-0.8, kaynak makinesinin, kaynakçının optimum koşullarda denetlendiği ve yapılan kaynağın tamamının hem mt veya pt yöntemleriyle yüzeysel olarak hem de ultrasonik (ut) veya radyografik (rt) testleriyle hacimsel olarak kontrol edildiği kaynak dikişleri için kaynak kalite faktörü 1 olarak alınabilir. Aşağıda 15085-5 standardına göre denetim sınıfları belirtilmiştir.(Şekil 2.41)

Test sınıfı	Hacimsel Testler RT veya UT	Yüzey Testleri MT veya PT	Gözle Muayene VT
CT 1	%100 ^a	% 100	% 100
CT 2	% 10 ^{a b}	% 10 ^b	% 100
CT 3	Gerekmez	Gerekmez	% 100
CT 4	Gerekmez	Gerekmez	% 100

Belirtilen yüzdeler bir kaynak dikişinin incelenmesi gereken toplam uzunluğunu ifade eder. Dolayısıyla:
 % 100: Tüm yapı elemanlarının ve tüm kaynak dikişlerinin kontrolü
 %10: Tüm yapı elemanlarındaki toplam kaynak uzunluğunun %10'u veya 10 yapı elemanından birindeki tüm kaynak uzunluğunun kontrolü.

Tablo 1'de belirtilen testler kaynaklı birleşimler için en düşük gereksinimleri belirtir. Malzemeye, tasarım veya müşteri gereksinimlerine bağlı olarak ek testler gerekebilir.

Tüm tahribatsız muayene işleri (RT, UT, MT veya PT) EN 473'e göre sertifikalı personelce yapılmalı ve raporlanmalıdır.

CT 1 ve CT 2 test sınıfları için gözle muayene, EN 473'e göre sertifikalı personel tarafından yapılmalı ve raporlanmalıdır.

CT 3 test sınıfı için gözle muayene, üretici tarafından eğitilmiş bir personel tarafından yapılmalı ve raporlanmalıdır.

CT 4 sınıfı için gözle muayene, en azından gözle muayene eğitim almış kaynakçılar tarafından yapılmalıdır. Raporlama gerekli değildir.

Şekil 2.41. 15085-5 Standardı kaynak denetim sınıfları ve açıklamaları(TS EN 15085-5)

2.6.1.3. Gerilme faktörü (v3)

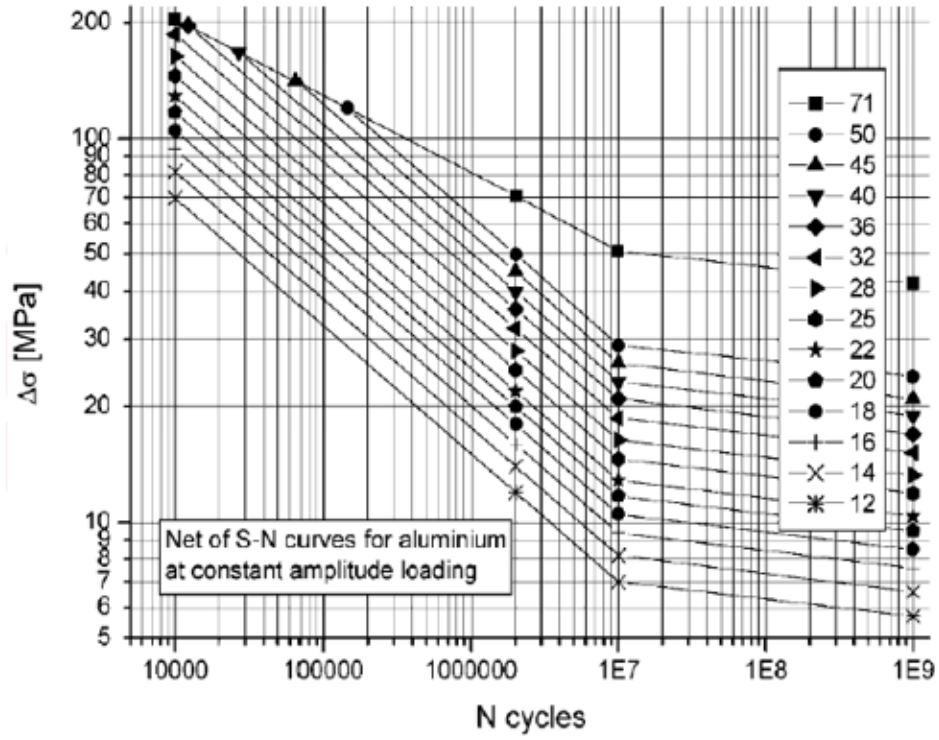
Çelikler ve alüminyum malzemelerin kaynaklı bağlantılarının mukavemet değerleri statik olarak çekme testlerine tabii tutularak tayin edildiği için yorulma hesaplarına adaptasyonu için aşağıdaki şekilde verilen tablo kullanılabilir.

Dikiş türü	Zorlanma türü	v ₃	
		Çelik	Alüminyum alaşımı
Alın	Çekme	1,0	1,0
	Basma	1,0	1,0
	Eğilme	1,0	1,0
	Kesme, burulma	0,8	0,65
Boğaz kaynağı	Herhangi	0,8	0,65

Şekil 2.42. Çelik ve alüminyum alaşımları için gerilme faktörleri (Curgül İ, 2005)

2.6.2 IIW Yorulma prosedürü

IIW (International Institute of Welding) tarafından belirlenen yönetmeliğe göre kaynaklı birleştirmelerde yorulma hesaplarının yapılabilmesi amacıyla uygulamada sık rastlanan birleşim tipleri için çeşitli yorulma kategorileri tespit edilmiştir. Yönetmelikte bu birleşim tipleri için ayrı ayrı $\log \Delta \sigma - \log N$ eğrileri tanımlanmaktadır. Her bir yorulma kategorisi 2 milyon yorulma döngüsüne karşılık gelen FAT ifadeleri ile temsil edilmektedir.



Şekil 2.43. IIW Kaynaklı bağlantı eğrisi (H. Neuber 1985)

IIW yönetmeliğinde belirtilen kaynaklı bağlantılar; akma dayanımı 960 MPa değerine kadar olan alüminyum ve çelik malzemeleri içermektedir. S-N eğrilerinde eğim $m=3$ alınmaktadır. Sonsuz ömür limiti ise $1E7$ olarak kabul edilmektedir. S-N eğrileri, % 95 olasılık oranına göre hazırlanmıştır (Şekil 2.43).

Yönetmelik içerisinde her bir kaynaklı birleştirme için belirlenen “FAT” değerleri tablolar halinde gösterilmektedir (Şekil 2.44).

No	Yapısal Detay	Tanımlama St: Çelik, Al:Alüminyum	Şartlar	FAT St [MPa]	FAT Al [MPa]
1		Alın birleştirme	Kaynaklı, Muayene yapılmış	100	40
2		Tamamen kaynaklanmış kalın kaynaklı çapraz birleştirme veya T birleştirme	Lamelar yırtılma yok	100	40
3		Yük taşımayan köşe kaynağı	Enine yüklenmiş yük taşımayan uzunlamasına dikme, Esas malzemeden daha kalın değil, Kaynaklandığı gibi	100	40
4		Destek sonu, uzunlamasına dikmenin sonu	Köşe kaynağı, kaynak çevresel veya değil, Kaynaklandığı gibi	100	40
5		Koruyucu levha sonu ve benzer birleştirmeler	Köşe kaynağı, kaynak çevresel veya değil, Kaynaklandığı gibi	100	40
6		Yük taşıyan köşe kaynaklı çapraz birleştirmeler	Köşe kaynağı, Kaynaklandığı gibi	90	36
7		Yük taşıyan köşe dikişli bindirme kaynağı	Köşe kaynağı, Kaynaklandığı gibi	90	36
8		Kısa ekli, b' birleştirmesi	Köşe kaynağı veya tam nufuziyetli kaynak, Kaynaklandığı gibi	100	40
9		Uzun ekli, b' birleştirmesi	Köşe kaynağı veya tam nufuziyetli kaynak, Kaynaklandığı gibi	90	36

Şekil 2.44. IIW kaynaklı bağlantılarda FAT değerleri (IIW Handbook)

Parça üzerindeki nominal gerilme malzeme akma dayanımının 1.5 katı yüksekliğinde olduğunda ve korozyon bir ortam veya yüksek sıcaklık durumlarında IIW yönetmeliğinin kullanılması tavsiye edilmemektedir.

Kaynak bağlantılarının yorulma mukavemetinin belirlenmesi;

- Bağlantıya etki eden kuvvetin yönüne
- Kuvvetin büyüklüğüne
- Kuvvetin tekrar sayısına

- Kuvvetin yönü dolayısıyla oluşan çekme, basma, eğilme, burulma ve kesme gerilmelerine
- Kaynak dikişinin şekline ve kalitesine bağlıdır.

Yükün tekrar sayısı, kuvvetin dinamik ya da statik olma durumu da bağlantının mukavemetinin ve yorulma ömrünün belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

2.6.3. Kaynaklı yapılarda yorulma analizi yaklaşımları

Kaynaklı yapıların yorulma hesaplamaları yapılırken, özellikle sonlu elemanlar metodunda pek çok farklı problem ortaya çıkmaktadır. Modellenen kaynaklı bağlantının hiçbir zaman gerçeğe birebir örtüşmeyeceği gibi, ısı tesiri altındaki bölgenin özellikleri ve boyutu da tam olarak kesin değildir. Buna karşın IIW yorulma prosedürü göz önünde bulundurularak çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda ve uygulamada gözlemlenen yorulma hasarları çoğunlukla kaynak dikişinin bitişiğinde ısı tesiri altındaki bölgeye çok yakın kesitlerde oluşmaktadır. Bununla birlikte kaynağın kökünden başlayarak ilerleyen çatlak örnekleri de mevcuttur. Bu gibi deneysel tecrübeler göz önünde bulundurularak geliştirilen hesaplama yöntemleri ve kullanım kapsamaları aşağıdaki gibidir.

- Nominal Gerilme Yaklaşımı: Kaynak bağlantısında öngörülen hasar kaynak dikişinin bitiminde bekleniyorsa tercih edilmektedir.
- Hot Spot Gerilme Yaklaşımı: Kaynak bağlantısında oluşması öngörülen hasar hem kaynak bitimi hem de kaynak kökünde bekleniyorsa tercih edilmektedir.
- Etkin Çentik Gerilme Yaklaşımı: Kaynakta belirgin bir başlangıç çatlağı, çentik veya bozukluk söz konusuysa kullanılmaktadır.

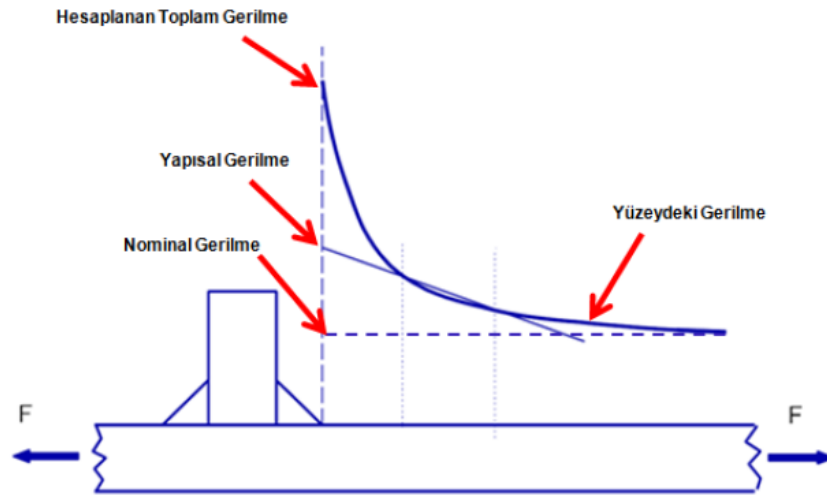
2.6.3.1. Nominal gerilme yaklaşımı

Nominal gerilme yaklaşımında kaynaklı parça üzerinde oluşan nominal gerilmenin kesit boyunca sabit olması veya doğrusal olarak değişmesi beklenir. Buna karşın bu

yöntemde geometrik olarak karmaşık bölgelerde doğru hesaplama yapmak oldukça güçtür. Aynı zamanda kaynak kalitesinin kusursuz olduğu varsayılmaktadır.

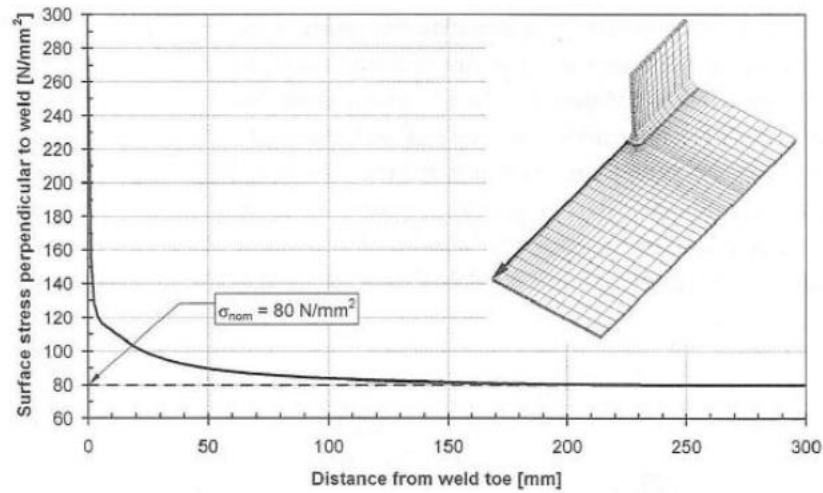
Nominal gerilme belirlenirken kaynak ucunda belirli bir mesafeye kadar oluşturulan hat üzerindeki gerilmeler incelenmekte, bu değerlerin değişiminin doğrusal olduğu bölüm dikkate alınmaktadır. Doğrusal değişen gerilme dağılımı kullanılarak nominal gerilme elde edilmektedir.

Yorulmaya karşı tasarım kitaplarında yorulma sınıfları nominal gerilmeye bağlı olarak verilmektedir. Karmaşık geometrilerde çok iyi sonuç veremeyeceğinden, bu tip örneklerde sonlu elemanlar metodu kullanmak daha avantajlı olacaktır.



Şekil 2.45. Kaynak üzerinde oluşan gerilmelerin gösterimi (Curgül İ, 2005)

Şekil 2.45’de kaynak üzerinde oluşan gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 2.46’da ise kaynak ucuna olan mesafeye göre oluşan yüzey gerilimlerinin grafiği verilmiştir.



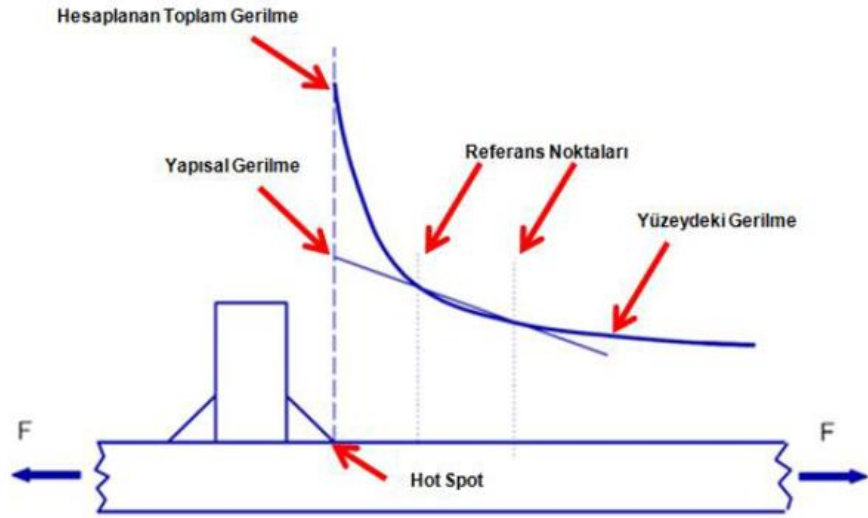
Şekil 2.46. Kaynak ucuna olan mesafe – yüzeyde oluşan gerilme grafiği (DVS 1612)

Şekilden de görüldüğü gibi kaynağın uç kısmında oluşan stres maksimuma giderken, kaynağın uç kısmından uzaklaştıkça yüzeyde oluşan gerilmeler azalmakta ve doğrusal bir hal almaktadır. Uzaklığa göre gerilmelerin doğrusal bir hal aldığı noktadaki gerilme değeri nominal gerilme olarak kabul edilmekte ve buna göre hesaplamalar yapılmaktadır.

2.6.3.2. Hot spot gerilme yöntemi

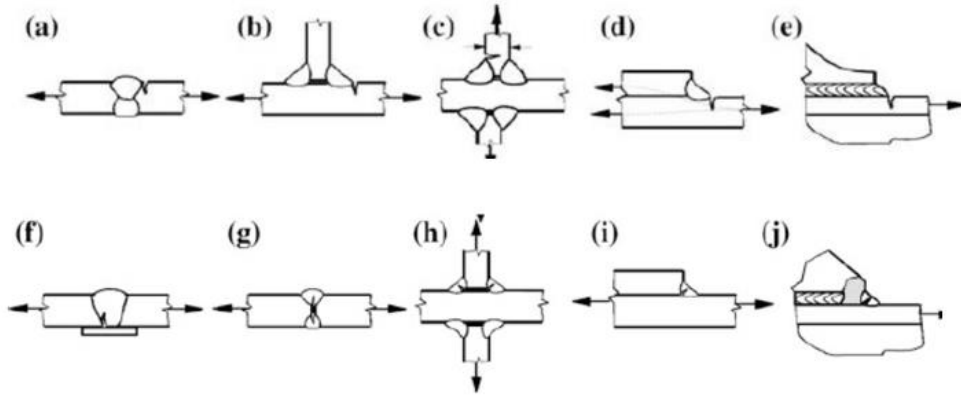
Hot spot gerilme yöntemi nominal gerilme metodunun kullanılmadığı, daha karmaşık geometrilere sahip yapılar için kullanılmaktadır. Bu yöntemde birleşim detayının geometrisinden dolayı oluşan gerilmeler hesaba dahil edilmektedir. Kaynak süreksizliklerinden ve kaynak geometrisinden kaynaklanan gerilme etkileri dikkate alınmamaktadır.

Hot spot gerilme yönteminde kaynak bölgesinden belirli bir uzaklıktan ekstrapolasyon yapılarak gerilme elde edilmektedir.



Şekil 2.47. Kaynak ucuna olan mesafe – yüzeyde oluşan gerilme grafiği (Curgül İ, 2005)

Çatlağın, kaynak bitiminde veya kök kısmında başlaması beklenen durumlarda bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır.

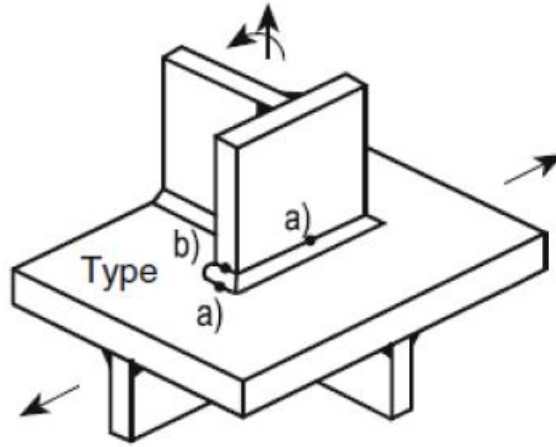


Şekil 2.48. Kaynaklı bağlantılarda oluşabilecek hasar türleri (Hobbacher A.F. 2016)

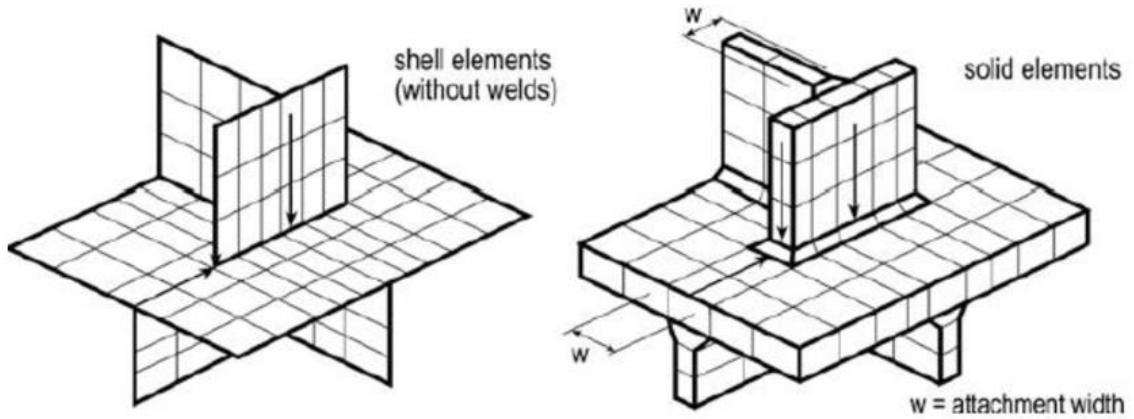
Pratik uygulamalarda ilk referans noktası kaynaklanan plaka kalınlığının 0.4 katı mesafe uzaklıkta belirlenmektedir.

Bununla birlikte kaynak yorulma hesabı yapılacak olan bölgeye göre iki farklı tip hot spot gerilme yaklaşımı söz konusudur.

- Plaka yüzeyindeki kaynak uç noktası
- Plaka kenarındaki kaynak uç noktası



Şekil 2.49. Kaynak uç noktalarının gösterimi (Saini 2016)



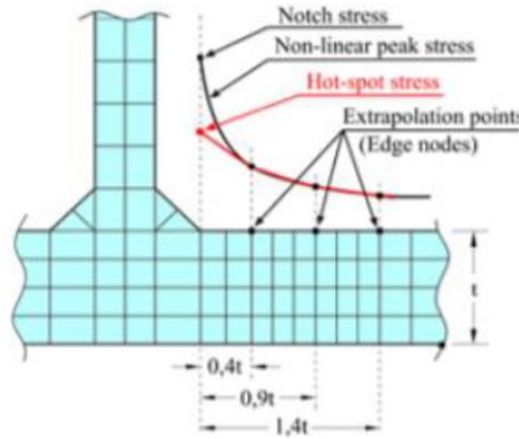
Şekil 2.50. Kabuk ve katı elemanların örnek modellenmesi (Saini 2016)

Şekil 2.49 ve 2.50'deki örneklerde gösterildiği gibi kaynaklı yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulurken kabuk elemanlar veya katı elemanlar şeklinde modellenmesi mümkündür.

2.6.3.3. Etkin çentik gerilme yöntemi

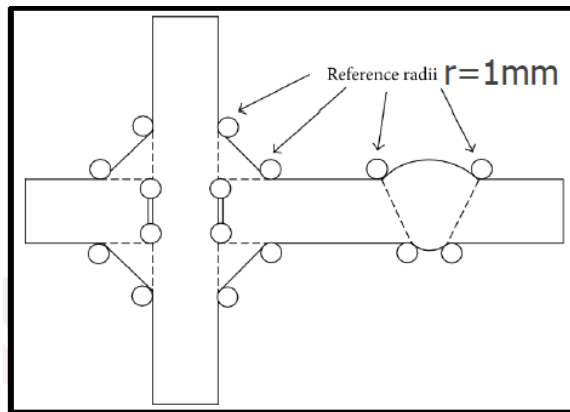
Etkin çentik gerilme yönteminde kaynak ucu ve kökünün bir çentik etkisi yaratması durumundan yola çıkılarak yorulma hesabı farazi bir çentik yarıçapına göre gerçekleştirilir. Bu yöntem genellikle hot spot ve nominal gerilme yöntemlerinin kullanılmadığı

durumlarda, kaynak kökünde bir çatlak başlangıcı öngörüldüğünde kullanılmaktadır. Çoğunlukla iyi bir şekilde muayene edilmemiş, pasolar arası temizliğe özen gösterilmemiş kaynaklarda dikiş içerisinde gözenekler oluşmakta ve bu metodu doğrulamaktadır. Literatürde bu yöntemin 5mm kalınlığın altındaki plakalarda doğrulanmadığı belirtilmektedir.



Şekil 2.51. Kaynaklı yapılarda gerilme yaklaşımları (Al-Emrani, Aygöl 2014)

Etkin çentik gerilmesinin belirlenmesi çentiğin gerçek radyüsü, etkin radyüs ile değiştirildiğinde elde edilen gerilim, toplam çentik gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. IIW dokümanında etkin radyüs, yapısal çelikler için 1mm kabul edilmektedir. Malzemenin doğrusal elastik bir şekilde davrandığı varsayımı geçerlidir.



Şekil 2.52. Çentik gerilimi gösterimi (Al-Emrani, Aygöl 2014)

Etkin çentik gerilimi pratik yaklaşımda kaba bir sonlu elemanlar modeli oluşturularak ilk hesaplamaların yapılması ve ardından gerilim konsantrasyon faktörleri

kullanılarak yorulma hesabının gerçekleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) tarafından çelik FAT:225, alüminyum FAT:71 olarak belirlenmiştir.

Table 3.4 Effective notch fatigue resistance for steel

No.	Quality of weld notch	Description	FAT
1	Effective notch radius equal to 1 mm replacing weld toe and weld root notch	Notch as-welded, normal welding quality $m = 3$	225

Table 3.5 Effective notch fatigue resistance for aluminium

No.	Quality of weld notch	Description	FAT
1	Effective notch radius equal to 1 mm replacing weld toe and weld root notch	Notch as-welded, normal welding quality $m = 3$	71

Şekil 2.53. Çelikler ve alüminyum için çentik gerilmesine göre FAT değerleri.(IIW)

2.7 Literatürde Yapılmış Benzer Çalışmalar

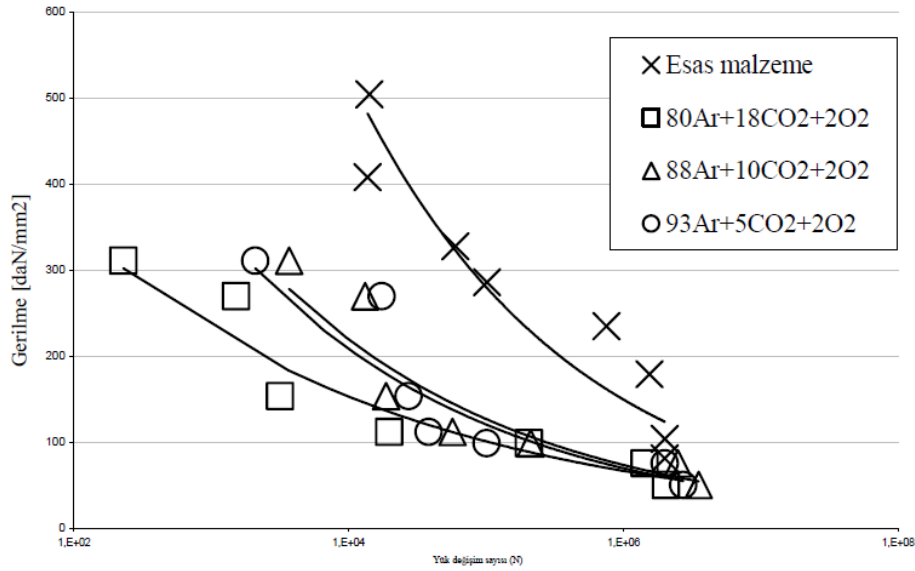
Kaynaklı bağlantıların türleri ve özelliklerine göre literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Yan, Yang ve Qi'nin (2006) yaptığı deneysel bir çalışmada lazer kaynaklı nikel-titanyum alaşımının dönel eğmeli yorulma dayanımının kaynaksız parçaya göre düştüğü, aynı zamanda yorulma karakteristiklerinin ana malzeme için sünek iken kaynaklı malzemede gevrek kırılma gözlemlendiği belirtilmiştir.

Deshmukha, Venkatachalamb, Hemant Divekarc, ve Sarafd'in (2014) yaptığı çalışmada ise kaynak penetrasyonunun başka bir deyişle nüfuziyetinin yorulma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda bu konuyla alakalı ampirik bir formülasyonun geliştirilemediği, buna karşın nüfuziyet eksikliği olan kaynaklı parçalarda yorulma dayanımının gözle görünür şekilde azaldığı, stress geçişlerinin nüfuziyet eksiliği sebebiyle yükseldiği ve bu sebeple çatlak oluşumuna yol açtığı belirtilmiştir.

Tong, Niu, Ren ve Zhao (2021) yaptıkları çalışmada yüksek hız çeliklerinin kaynaklı bağlantılarla yorulma dayanımlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada kaynaklı

yapılarda geometrik süreksizlikler dolayısıyla stress konsantrasyonlarının oluştuğu, kaynak sonrasında artık gerilmelerin yorulma dayanımına etkisi olacağı belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada kaynak yüzeyindeki kusurlar sebebiyle mikro çatlakların oluşabileceği ve bunun da yorulma dayanımını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Bu yüzden kaynaklı yapıların yorulma dayanımlarının iyileştirilmesinde kaynak sonrası temizlik ve taşlama(grinding) işlemlerinin malzeme ömrü açısından büyük önem arz ettiği belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada kaynak bölgesindeki sertlik değerlerinin ana malzemedeki sertlik değerlerinden yüksek olduğu, kırılmaların ısı tesiri altındaki bölgeye çok yakın yerlerde gerçekleştiği belirtilmiştir.

Aynı zamanda literatürde kaynak parametrelerinin, dolgu malzemesinin ve koruyucu gaz bileşiminin değişmesiyle, nüfuziyet, çekme dayanımı gibi özelliklerinin nasıl geliştiğiyle ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan, Aydın Şık'ın 2004 yılında yaptığı çalışma çok değerli sonuçlar ortaya koymuştur. Şık yaptığı çalışmada Mig/Mag metodu ile farklı karışım bileşenlerine sahip koruyucu gazlar kullanarak yorulma dayanımlarını incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen grafik şekil 2.52'de verilmiştir.



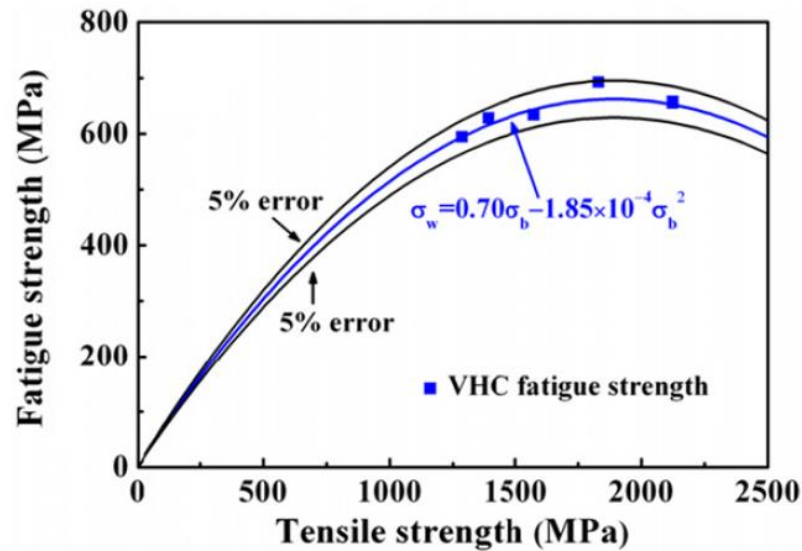
Şekil 2.54. Farklı karışım gazlarının yorulma dayanımı etkileri(Şık 2004)

Yapılan çalışmada diğer çalışmalarda da olduğu gibi kaynaklı yapının yorulma dayanımının ana malzemeye göre düşük olduğu, koruyucu gaz karışımındaki argon oranının yorulma dayanımını olumlu olarak etkilediği belirtilmiştir. Buna karşın karışım gazındaki

argon oranının %93 civarına çekilmesi yorulma dayanımını olumsuz etkilemiştir. Bunun sebebi ise CO₂ bileşeninin karışımdaki miktarının azalması olarak sunulmuştur. Karışım gazındaki CO₂ oranının düşük olması yeterli ısıyı sağlamaması dolayısıyla kaynak banyosunda argon hapsi ve azot çözülmesi meydana getirmiştir. Bu da kaynak dikişinin mekanik özelliklerini kötü yönde etkilemektedir (Gülenç 1995).

Bir başka çalışmada ise Topçu, mığ kaynak yöntemi ile tığ kaynak yöntemini 304 ve 1040 çeliklerinin ısı tesiri altındaki bölgedeki mekanik özellikleri bakımından incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, mığ kaynak yönteminin tığ kaynak yöntemine kıyasla daha yüksek sertlik değerleri oluşturduğu, mekanik özellikler bakımından mığ yönteminin tığ yöntemine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada yapılan çekme deneylerinde kopmaların kaynaklı bölge ve itab'ın dışındaki iri taneli bölgede gerçekleştiği öne sunulmuştur.

Pang 2013 yılında yaptığı çalışmada çekme dayanımı ile yorulma dayanımının doğru orantılı olarak arttığını sunmuştur. Bununla birlikte kaynaklı yapılarda da benzer şekilde çekme dayanımı ile yorulma dayanımının paralel olarak ilerleyeceği literatürdeki çalışmalara göre söylenebilir.



Şekil 2.55. Çekme dayanımı ile yorulma dayanımı arasındaki ilişki(Pang 2013)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında farklı kaynak metotlarıyla birleştirilen S355J2 yapı çeliğinin dönel eğmeli yorulma testi düzeneği ile yorulma ömürlerinin kıyaslanması ve yöntemlerin birbirlerine göre farklılıklarının incelenmesi hedeflenmiştir.

Deney kapsamında aynı kalınlık ve geometrideki parçalar üç farklı kaynak yöntemiyle ve üç farklı birleştirme metoduyla kaynatılmıştır. Kaynaklanan parçaların birleştirme geometrileri ISO 9692-2 standardına göre belirlenmiştir. Kaynak yöntemleri ise ISO 4063 standardına göre belirlenmiştir.

3.1. DeneySEL Çalışmalar

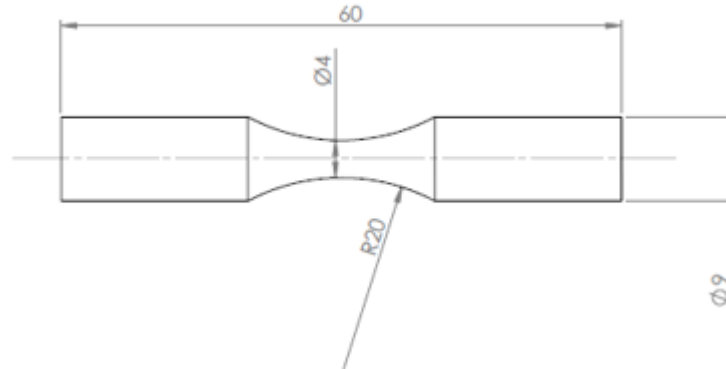
Bu çalışmada kullanılan kaynak yöntemleri ISO 4063 standardına göre; metal aktif gaz(135), tungsten inert gaz(141) ve elektrik ark kaynağı (111) şeklindedir.

Kaynaklanan numunelerin tümü sıvı penetrant testiyle kontrol edilmiş ve parçaların yüzeyinde herhangi bir hata veya çatlak bulunmamıştır. Aynı zamanda parçaların yüzeyleri zımparalanarak yüzey kaliteleri birbirlerine eşit seviyeye getirilmiştir. Parçalar kaynaklandıktan sonra herhangi bir ısıtma işlemi yapılmamıştır. Aynı zamanda parça kalınlığı düşük olduğu için numunelere ön ısıtma yapılmamıştır.

Gerçekleştirilen tüm kaynaklar yatay pozisyonda ve sabit amper ve voltaj parametreleri altında gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin imalatı aşamasında tüm kaynaklar aynı kaynak makineleriyle yapılmıştır. Metal aktif gaz yöntemiyle birleştirilen tüm numunelerde amper voltaj ve tel sürme aralık değerleri ile kullanılan kaynak teli aynıdır. Benzer şekilde tungsten inert gaz ve elektrik metal ark kaynağı yönteminde de parametreler sabit tutulmuş ve numuneler kaynaklanırken sadece kaynak yöntemleri ve birleştirme geometrileri değişkenlik göstermektedir.

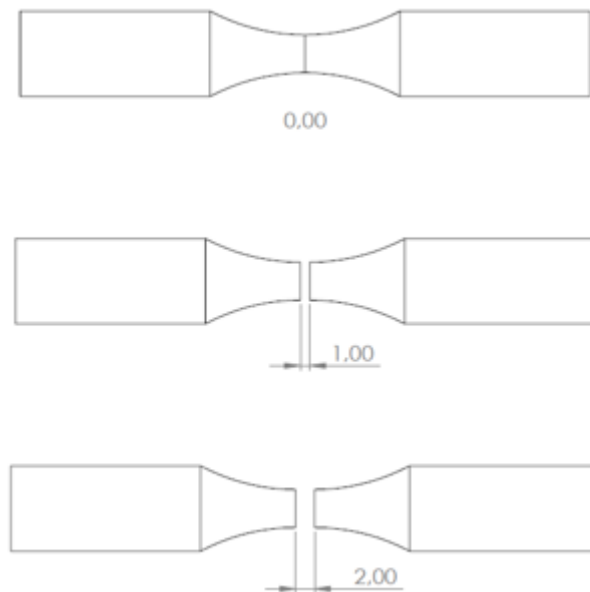
Deneylerde kullanılacak parçaların geometrileri ISO 1143 standardına göre belirlenmiştir. İçyapı kusurları gibi tahribatsız kontrol edilmesi mümkün olmayan hataları

elemine etmek adına her çeşit yöntemden en az üç adet numune ile deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.1. Yorulma testine tabi tutulan parça geometrisi

Deneyler esnasında üç farklı ark kaynağı yöntemiyle birleştirilen numuneler, aynı zamanda Şekil 3.2’de gösterildiği gibi üç farklı birleştirme geometrisiyle birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme standardı olan 9692-2 standardında söz konusu birleştirme için kök aralığı yani kaynatılan parçalar arasındaki boşluğun 0 ila 2 milimetre arasında olması tavsiye edilmektedir. Buna göre finaldeki geometri Şekil 3.1’deki gibi olacak şekilde her kaynak yöntemi için en az üç adet yorulma deneyi numunesi imal edilmiş, kaynaklanan tüm numunelerin yüzeysel çatlak kontrolleri sıvı penetrant yöntemi ile kontrol edilmiştir ve herhangi bir indikasyona rastlanmamıştır.



Şekil 3.2. Kaynaklı birleştirme geometrileri

Piyasada sıklıkla kullanılan S355J2 çeliği için genel anlamda akma dayanımı 355 MPa çekme dayanımı ise 470-630 MPa arasındadır. Numuneler imalat aşamasına alınmadan önce tedarik edilirken laminasyon testlerine tabii tutulmuş ve herhangi bir iç kusur gözlenmemiştir. Çizelge 3.1’de söz konusu malzemenin kimyasal özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 3.1. S355J2 Çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Hasçelik)

C	Mn	P	S	Si	Al
d(kalınlık, mm) max	max.	max	max	max	max
0.14-0.21	1.20-1.60	0.025	0.020	0.10-0.30	0.020-0.050

3.1.1. Kullanılan kaynak makineleri

Deneylerde metal aktif gaz, tungsten inert gaz ve elektrik ark kaynağı makineleri kullanılmıştır. Kullanılan tüm makinelerin kalibrasyonu ve rutin kontrolleri yapılmıştır. Makinelere ait teknik özellikler ve görseller makinelerin resmi internet sitelerinden alınmıştır.

Metal asal gaz yöntemiyle birleştirilen numunelerin imalatında (MAG kaynak yöntemi) Fronius TPS 500i kaynak makinesi kullanılmıştır. Şekil 3.3 ve Çizelge 3.2’de kaynak makinesiyle ilgili görsel ve teknik özellikler belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Fronius TPS 500i kaynak makinesi (fronius.com)

Çizelge 3.2. Fronius TPS 500i kaynak makinesine ait teknik özellikler (fronius.com)

Giriş Voltajı: 50/60 Hz	3x400V
Cos phi	0.99
Minimum Kaynak Akımı	5A
Maksimum Kaynak Akımı	500A
Açık Devre Voltajı	71V
Koruma Sınıfı	IP 23

Tungsten inert gaz yöntemiyle birleştirilen numunelerin imalatında (TIG kaynak yöntemi) Kolarc TX 400W Pulse argon kaynak makinesi kullanılmıştır. Şekil 3.4 ve Çizelge 3.3'te makineyle ilgili görsel ve teknik özellikler belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Kolarc TX 400W Pulse kaynak makinesi (kolarc.com)

Çizelge 3.3. Kolarc tx 400w pulse kaynak makinesine ait teknik özellikler (kolarc.com)

Şebeke Gerilim	400V
Şebeke Gerilim Toleransı	-10% / +15 %
Minimum Kaynak Akımı	5A
Maksimum Kaynak Akımı	400A
Koruma Sınıfı	IP23

Elektrik ark kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerin imalatında Magmaweld Monostick 200i kaynak makinesi kullanılmıştır. Şekil 3.5 ve Çizelge 3.4’te kaynak makinesiyle ilgili görsel ve teknik özellikler belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Magmaweld monostick 200i kaynak makinesi (magma weld.com)

Çizelge 3.4. Monostick 200i kaynak makinesine ait teknik özellikler (magma weld.com)

Şebeke Gerilimi	230V
Güç	9.7 kVA
Minimum Kaynak Akımı	10A
Maksimum Kaynak Akımı	200A
Açık Devre Gerilimi	65V
Elektrod Çapı	1.60mm-4.00mm
Koruma Sınıfı	IP23

3.1.2. Kullanılan sarf malzemeler

Üç farklı kaynak metodunda kullanılan sarf malzemeler yani dolgu metallerine ait mekanik ve kimyasal özellikler aşağıda belirtilmiştir.(Şekil 3.6, 3.7, 3.8)

Tüm dolgu malzemelerinin minimum akma dayanımları 420 N/mm^2 ve minimum çentik darbe dayanımları 47 J 'dir. Bununla birlikte tüm dolgu malzemelerinin çekme dayanımları neredeyse aynı aralıktadır. Kimyasal özellikleri bakımından incelenecek olursa; karbon oranları hepsinde birbirine çok yakın, silisyum ve mangan değerleri MAG ve TIG yöntemlerinde kullanılan dolgu malzemelerinde eşitken, elektrik ark kaynağında kullanılan elektrot için bu değerler görece daha düşüktür.

Normları

TS EN ISO 2560-A	: E 42 0 RR 1 2
EN ISO 2560-A	: E 42 0 RR 1 2
AWS A5.1	: E 6013

Kaynak Metalinin Bileşimi % (Tipik)

C	Si	Mn
0.07	0.3	0.5

Mekanik Değerler

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Çentik Darbe Dayanımı (ISO-V/0°C)	Uzama (L ₀ =5d ₀) (%)
min. 420	510-610	min. 47 J	min.22

Şekil 3.6. ISO 2560-A E 42 0 RR 1 2 kaynak elektrotuna ait özellikler (gedik.com.tr)

Normları

TS EN ISO 14341-A	: G3Si1
TS EN ISO 636-A	: W3Si1
EN ISO 14341-A	: G3Si1
EN ISO 636-A	: W3Si1
AWS A5.18	: ER70S-6

Kaynak Telinin Kimyasal Bileşimi % (Tipik)

C	Si	Mn
0.08	0.85	1.45

Mekanik Değerler

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Çentik Dayanımı (ISO-V/-30°C)	Uzama (L ₀ =5d ₀) (%)
min. 420	500 - 640	min. 47 J	min. 22

Şekil 3.7. ISO 14341-A G3Si1GEKA SG2 kaynak teline ait özellikler (gedik.com.tr)

Normları

TS EN ISO 14341-A	: G3Si1
TS EN ISO 636-A	: W3Si1
EN ISO 14341-A	: G3Si1
EN ISO 636-A	: W3Si1
AWS A5.18	: ER70S-6

Kaynak Telinin Kimyasal Bileşimi % (Tipik)

C	Si	Mn
0.08	0.85	1.45

Mekanik Değerler

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Çentik Dayanımı (ISO-V/-30°C)	Uzama (L ₀ =5d ₀) (%)
min. 420	500 - 640	min. 47 J	min. 22

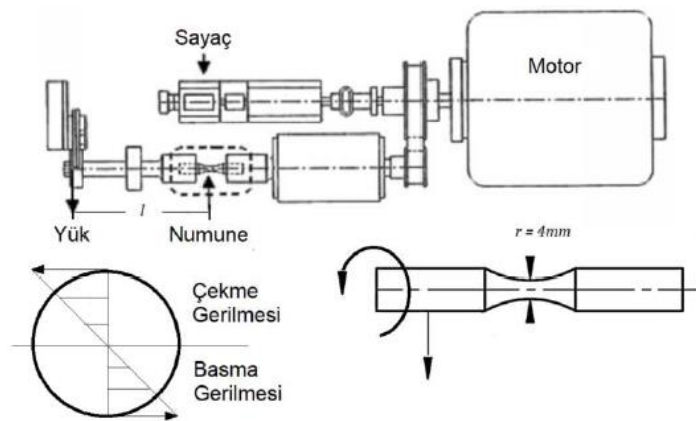
Şekil 3.8. ISO 636-A W3Si1 tel elektroda ait özellikler (gedik.com.tr)

3.1.3. Deney düzeneği

Yorulma dayanımlarının tespit edilmesi için yapılan deneylerde, Hi-Tech HKM 19 dönel eğmeli yorulma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9). Cihazın motor devri 5740 devir/dakikadır. Deney numunesi kırıldığı anda devreye bağlı olan sayaç durur ve tamamlanan döngü sayısında kalır. Böylece numunenin hasar sonucunda kırıldığı döngü sayısı tam olarak belirlenmiş olur. Deneyler sürecinde olası elektriksel problemleri önlemek için kesintisiz güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3.10'de deney düzeneğinin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Hi-Tech HKM 19 dönel eğmeli yorulma cihazı



Şekil 3.10. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü (Özden 2020)

Deneyler aynı gerilmeler altında her bir durum için üçer adet numune ile gerçekleştirilmiştir. Her bir numunede oluşturulan gerilme genliği 330 MPa'dır. Yükün

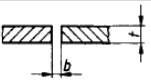
belirlenmesinde (Pang vd., 2013) çekme dayanımı ile yorulma dayanımı arasındaki bağıntının araştırıldığı çalışma esas alınmıştır (3.1). Aynı zamanda kaynaklı birleştirme ile imal edilen numunelerin yorulma ömrünün, kaynaklı tek parça halinde olan numunelerin yorulma ömrüne göre kıyasla daha düşük olacağı varsayılmıştır. Yorulma ve çekme gerilmeleri arasındaki bağıntıyı veren formül aşağıda verilmiştir (Pang 2013).

$$\sigma_w = 0,70\sigma_b - 1,85 \times 10^{-4}\sigma_b^2 \quad (3.1)$$

3.2. Kaynak Prosedürleri

Üç farklı kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerin tümü tek pasoda ve her bir kaynak türü için aynı aralıklardaki parametrelerde birleştirilmiştir. Aynı şekilde kullanılan tüm sarf malzemeler ve ortam şartları aynıdır. Hiçbir numuneye ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıtma işlem yapılmamıştır.

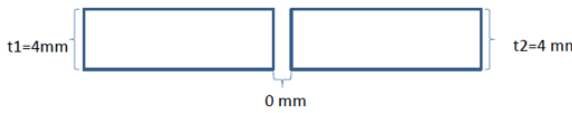
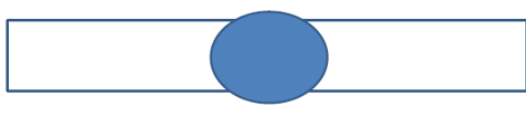
Numunelerin kaynak ağızları ve birleştirme geometrileri kaynatılacak parça kalınlığı olan 4 milimetreye göre Şekil 3.13’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. ISO 9692-2 kaynak ağızı hazırlığı standardına göre belirtilen kaynak tipinde herhangi bir kaynak ağızı açısı tavsiye edilmemiştir. Kök aralığı yani parçalar arasındaki mesafe 2 milimetreden küçük olması tavsiye edilmiştir. Buna göre 0, 1 ve 2 milimetre kök aralıklarıyla farklı kaynak yöntemleri test edilmiştir.

Kaynak					Kaynak ağızı					Kaynak konumu (ISO 6947'e göre)	Notlar
Referans No.	İş parçası kalınlığı t	Tipi	Sembol (ISO 2553'e göre)	Şekille izahı	Enine kesiti	Açı α, β	Aralık b	Kök yüzeyi kalınlığı c	Nüfuziyet derinliği h		
2.2	$3 \leq t \leq 20$	Küt alın kaynağı	II			-	$b \leq 2$	-	-	PA	Aralığın genişliği, küçük toleranslar içinde muhafaza edilmelidir.

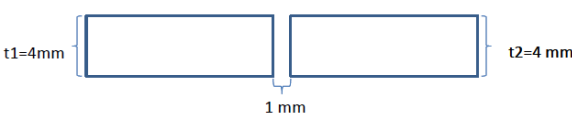
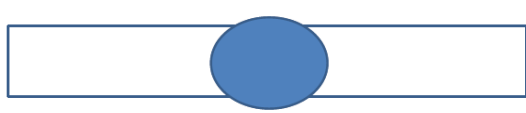
Şekil 3.11. ISO 9692-2 standardına göre numunelerin kaynak ağızı hazırlığı

Elektrik ark kaynağı, metal aktif gaz kaynağı, tungsten inert gaz kaynağı yöntemleri

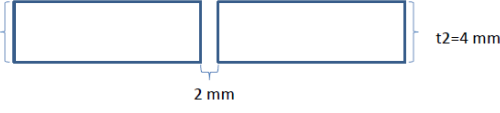
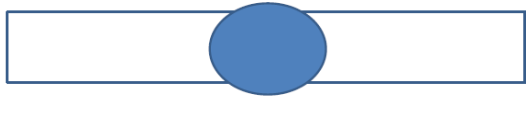
için kullanılan parametreler Şekil 3.11 ve Şekil 3.20 arasında verilmiştir.

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi Filler Material Designation and Make Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) Welding Position (acc.to ISO 6947) Schweißposition (nach ISO 6947)			
TS EN ISO 2560-A E 42 0 RR 1 2					PA			
Kaynak Dizaynı Welding Design Schweißdesign					Kaynak Sıraları Welding Sequences Schweißsequenzen			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Volta (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (Kj/mm)
Run	Welding Process	Size of Filler Material	Current (A)	Voltage (V)	Type of Current and Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Weld Speed (mm/s)	Heat Input (Kj/mm)
Lagig	Schweißprozess	Größe des Füllmaterials	Strom (A)	Spannung (V)	Stromart und Polarität	Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)	Schweißgeschwindigkeit (mm/s)	Wärmeeintrag (Kj/mm)
1	111	2,0	130-150	17-20	DC+	20-22	3,33	0,79-0,87

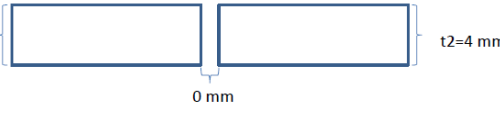
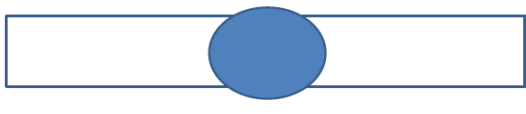
Şekil 3.12. Elektrik ark kaynağı 0 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi Filler Material Designation and Make Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) Welding Position (acc.to ISO 6947) Schweißposition (nach ISO 6947)			
TS EN ISO 2560-A E 42 0 RR 1 2					PA			
Kaynak Dizaynı Welding Design Schweißdesign					Kaynak Sıraları Welding Sequences Schweißsequenzen			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Volta (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (Kj/mm)
Run	Welding Process	Size of Filler Material	Current (A)	Voltage (V)	Type of Current and Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Weld Speed (mm/s)	Heat Input (Kj/mm)
Lagig	Schweißprozess	Größe des Füllmaterials	Strom (A)	Spannung (V)	Stromart und Polarität	Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)	Schweißgeschwindigkeit (mm/s)	Wärmeeintrag (Kj/mm)
1	111	2,0	130-150	17-20	DC+	20-22	3,33	0,79-0,87

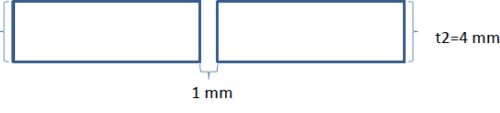
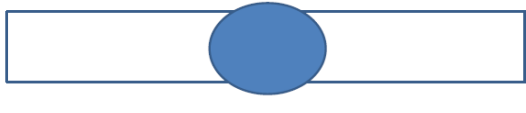
Şekil 3.13. Elektrik ark kaynağı 1 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi <i>Filler Material Designation and Make</i> <i>Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat</i>					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) <i>Welding Position (acc.to ISO 6947)</i> <i>Schweißposition (nach ISO 6947)</i>			
Kaynak Dizaynı <i>Welding Design</i> <i>Schweißdesign</i>					Kaynak Sıraları <i>Welding Sequences</i> <i>Schweißsequenzen</i>			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Voltaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (Kj/mm)
<i>Run</i>	<i>Welding Process</i>	<i>Size of Filler Material</i>	<i>Current (A)</i>	<i>Voltage (V)</i>	<i>Type of Current and Polarity</i>	<i>Wire Feed Speed (m/min)</i>	<i>Weld Speed (mm/s)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
<i>Lagig</i>	<i>Schweißprozess</i>	<i>Größe des Füllmaterials</i>	<i>Strom (A)</i>	<i>Spannung (V)</i>	<i>Stromart und Polarität</i>	<i>Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)</i>	<i>Schweißgeschwindigkeit (mm/s)</i>	<i>Wärmeinput (Kj/mm)</i>
1	111	2,0	130-150	17-20	DC+	20-22	3,33	0,79-0,87

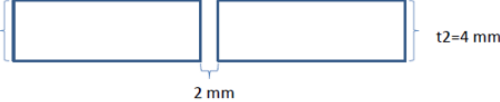
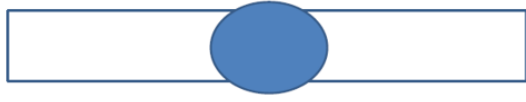
Şekil 3.14. Elektrik ark kaynağı 2 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi <i>Filler Material Designation and Make</i> <i>Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat</i>					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) <i>Welding Position (acc.to ISO 6947)</i> <i>Schweißposition (nach ISO 6947)</i>			
Kaynak Dizaynı <i>Welding Design</i> <i>Schweißdesign</i>					Kaynak Sıraları <i>Welding Sequences</i> <i>Schweißsequenzen</i>			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Voltaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (Kj/mm)
<i>Run</i>	<i>Welding Process</i>	<i>Size of Filler Material</i>	<i>Current (A)</i>	<i>Voltage (V)</i>	<i>Type of Current and Polarity</i>	<i>Wire Feed Speed (m/min)</i>	<i>Weld Speed (mm/s)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
<i>Lagig</i>	<i>Schweißprozess</i>	<i>Größe des Füllmaterials</i>	<i>Strom (A)</i>	<i>Spannung (V)</i>	<i>Stromart und Polarität</i>	<i>Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)</i>	<i>Schweißgeschwindigkeit (mm/s)</i>	<i>Wärmeinput (Kj/mm)</i>
1	135	1,0	130-150	17-20	DC+	20-22	3,33	0,79-0,87

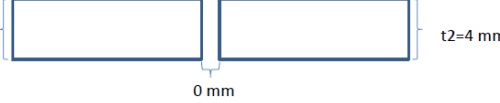
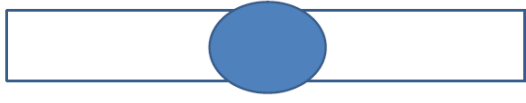
Şekil 3.15. MAG yöntemi 0 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi <i>Filler Material Designation and Make</i> <i>Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat</i>					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) <i>Welding Position (acc.to ISO 6947)</i> <i>Schweißposition (nach ISO 6947)</i>			
Kaynak Dizaynı <i>Welding Design</i> <i>Schweißdesign</i>					Kaynak Sıraları <i>Welding Sequences</i> <i>Schweißsequenzen</i>			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Voltaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (Kj/mm)
<i>Run</i>	<i>Welding Process</i>	<i>Size of Filler Material</i>	<i>Current (A)</i>	<i>Voltage (V)</i>	<i>Type of Current and Polarity</i>	<i>Wire Feed Speed (m/min)</i>	<i>Weld Speed (mm/s)</i>	<i>Heat Input (Kj/mm)</i>
<i>Lagig</i>	<i>Schweißprozess</i>	<i>Größe des Füllmaterials</i>	<i>Strom (A)</i>	<i>Spannung (V)</i>	<i>Stromart und Polarität</i>	<i>Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)</i>	<i>Schweißgeschwindigkeit (mm/s)</i>	<i>Wärmeinput (Kj/mm)</i>
1	135	1,0	130-150	17-20	DC+	20-22	3,33	0,79-0,87

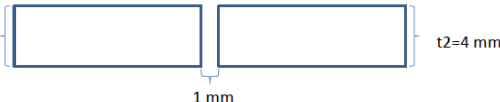
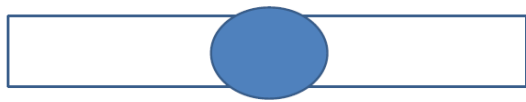
Şekil 3.16. MAG yöntemi 1 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi Filler Material Designation and Make Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) Welding Position (acc.to ISO 6947) Schweißposition (nach ISO 6947)			
ISO 14341-A G3Si1 GEKA SG2					PA			
Kaynak Dizaynı Welding Design Schweißdesign					Kaynak Sıraları Welding Sequences Schweißsequenzen			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Voltaaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (Kj/mm)
Run	Welding Process	Size of Filler Material	Current (A)	Voltage (V)	Type of Current and Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Weld Speed (mm/s)	Heat Input (Kj/mm)
Lagig	Schweißprozess	Größe des Füllmaterials	Strom (A)	Spannung (V)	Stromart und Polarität	Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)	Schweißgeschwindigkeit (mm/s)	Wärmeeintrag (Kj/mm)
1	135	1,0	160-180	24-25	DC+	23,3	45,65	0,79-0,87

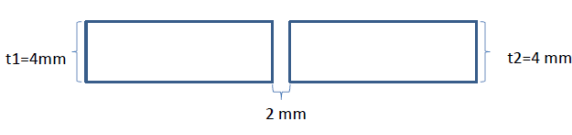
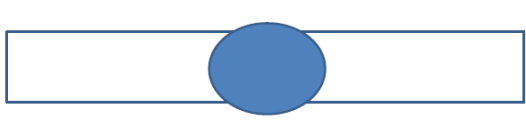
Şekil 3.17. MAG yöntemi 2 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi Filler Material Designation and Make Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) Welding Position (acc.to ISO 6947) Schweißposition (nach ISO 6947)			
ISO 636-A W3Si1					PA			
Kaynak Dizaynı Welding Design Schweißdesign					Kaynak Sıraları Welding Sequences Schweißsequenzen			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Voltaaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (Kj/mm)
Run	Welding Process	Size of Filler Material	Current (A)	Voltage (V)	Type of Current and Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Weld Speed (cm/min)	Heat Input (Kj/mm)
Lagig	Schweißprozess	Größe des Füllmaterials	Strom (A)	Spannung (V)	Stromart und Polarität	Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)	Schweißgeschwindigkeit (cm/min)	Wärmeeintrag (Kj/mm)
1	141	2	130-150	10-11	DC+	-	6	0,9-1,05

Şekil 3.18. TIG yöntemi 0 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi Filler Material Designation and Make Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) Welding Position (acc.to ISO 6947) Schweißposition (nach ISO 6947)			
ISO 636-A W3Si1					PA			
Kaynak Dizaynı Welding Design Schweißdesign					Kaynak Sıraları Welding Sequences Schweißsequenzen			
								
Paso	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Voltaaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (Kj/mm)
Run	Welding Process	Size of Filler Material	Current (A)	Voltage (V)	Type of Current and Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Weld Speed (cm/min)	Heat Input (Kj/mm)
Lagig	Schweißprozess	Größe des Füllmaterials	Strom (A)	Spannung (V)	Stromart und Polarität	Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)	Schweißgeschwindigkeit (cm/min)	Wärmeeintrag (Kj/mm)
1	141	2	130-150	10-11	DC+	-	6	0,9-1,05

Şekil 3.19. TIG yöntemi 1 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

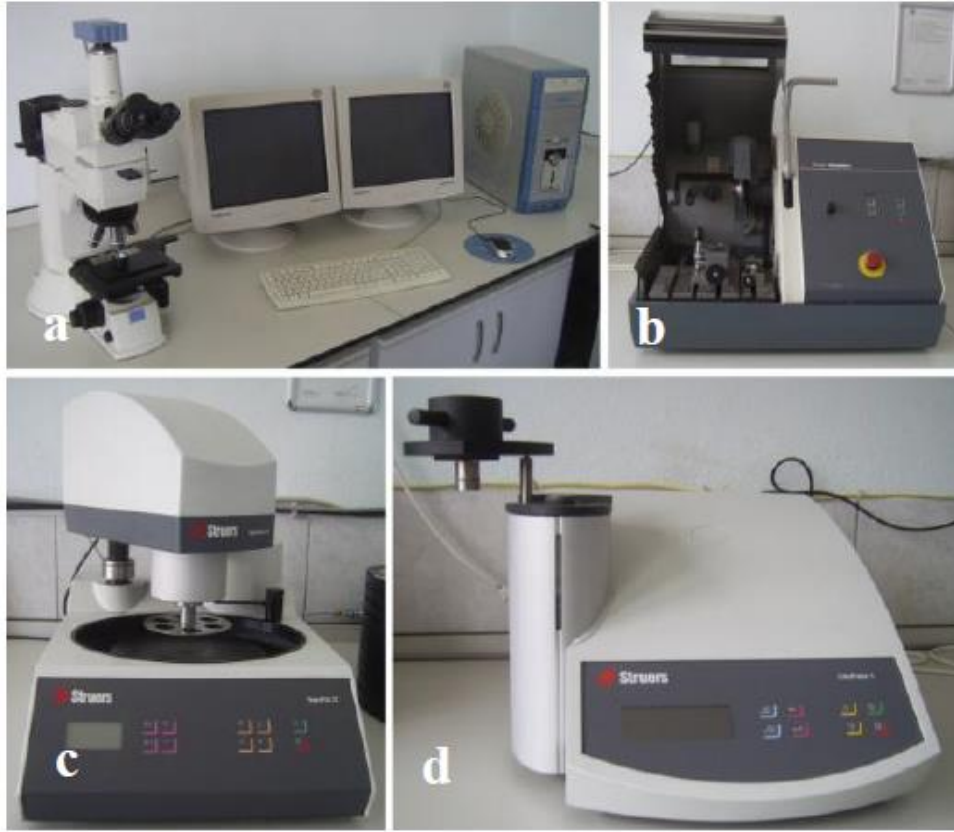
Dolgu Malzemesi ve Tanımı ve Üreticisi Filler Material Designation and Make Füllmaterial Bezeichnung und Fabrikat					Kaynak Pozisyonu (ISO 6947) Welding Position (acc.to ISO 6947) Schweißposition (nach ISO 6947)			
ISO 636-A W3Si1					PA			
Kaynak Dizaynı Welding Design Schweißdesign					Kaynak Sıraları Welding Sequences Schweißsequenzen			
								
Pato	Kaynak Yöntemi	Dolgu Malzemesi Ölçüsü	Akım (A)	Volaj (V)	Akım Tipi Kutuplama	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (cm/dk)	Isı Girdisi (Kj/mm)
Run	Welding Process	Size of Filler Material	Current (A)	Voltage (V)	Type of Current and Polarity	Wire Feed Speed (m/min)	Weld Speed (cm/min)	Heat Input (Kj/mm)
Lagig	Schweißprozess	Größe des Füllmaterials	Strom (A)	Spannung (V)	Stromart und Polarität	Drahtvorschubgeschwindigkeit (m/min)	Schweißgeschwindigkeit (cm/min)	Wärmeinput (Kj/mm)
1	141	2	130-150	10-11	DC+	-	6	0,9-1,05

Şekil 3.20. TIG yöntemi 2 milimetre ara boşluk için kaynak parametreleri

Gerçekleştirilen tüm kaynak işlemleri yatay pozisyonunda yapılmıştır. Yorulma testine tabii tutulmak üzere tüm farklı yöntemlerden üçer adet numune hazırlanmıştır. ISO 5817 standardına göre kaynak hatalarına sahip olan numuneler yorulma testlerine alınmamıştır.

3.4. Metalografik İncelemeler

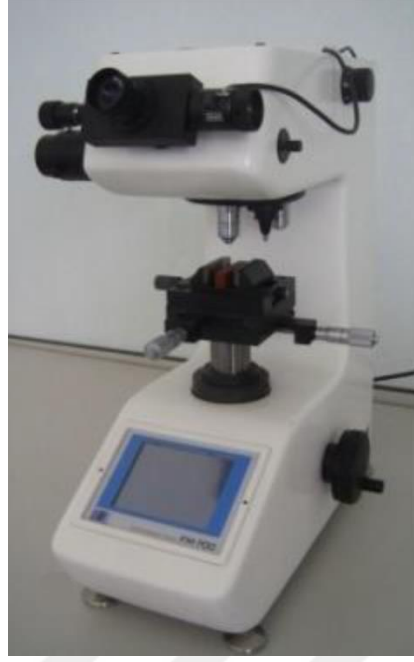
Metalografik incelemeler için her bir kaynak tipi ve yöntemiyle üretilmiş numunelerden kesitler alınmıştır. Mikro ve makro incelemeleri için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarındaki cihazlar kullanılmıştır. Numuneler; Struers Discotom-5 marka cihaz (Şekil 3.21b) ile kesilmiş, Struers Tegrapol-21 marka cihaz (Şekil 3.21c) zımparalanmış ve parlatılmış, CitoPress-1 marka cihaz (Şekil 3.21d) ile kalıplanmış, NIKON-ECLIPSE L150 marka cihaz (Şekil 3.21a) mikro yapı incelemeleri ve görüntü alma işlemleri yapılmıştır.



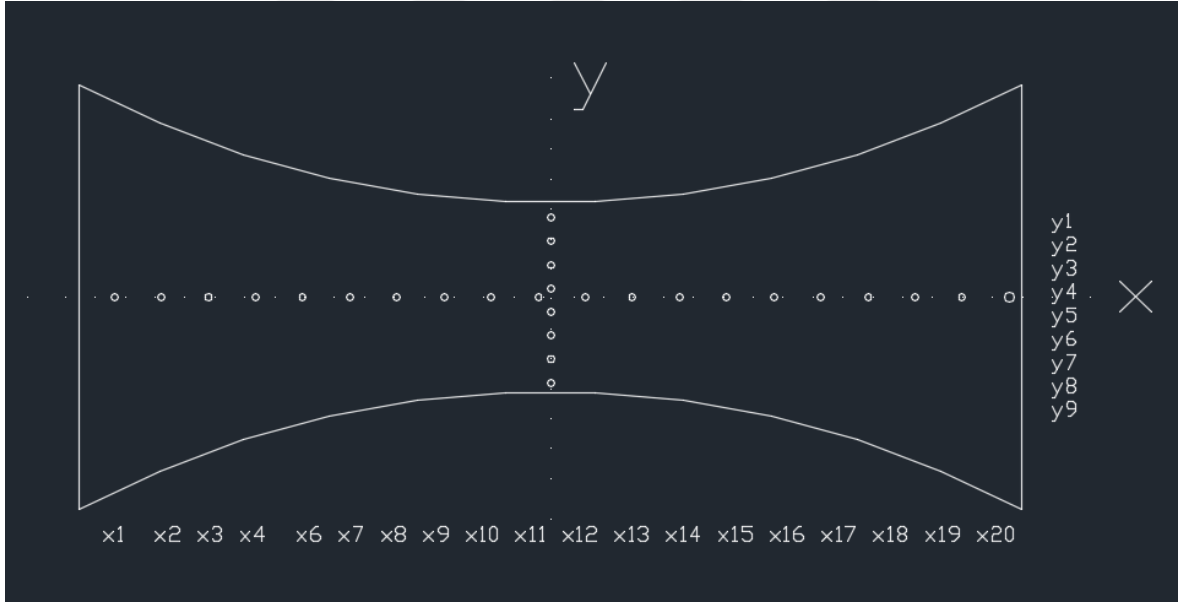
Şekil 3.21. Metalografik numune hazırlama cihazları: a) görüntü analizörü, b) kesme cihazı, c) parlatma ve zımparalama cihazı, d) kalıplama cihazı.

3.5. Mikro Sertlik Ölçümleri

Ana metal ve kaynaklı numunelerin kaynak yönüne dik kesitinde kesilip kalıplanan numuneler, zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan FUTURE-TECH marka FM-700 model cihaz ile (Şekil 3.22) mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde 200gr yük 10sn süre kullanılmıştır. Şekil 3.23’de mikro sertlik ölçüm noktaları şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği şekilde dikey eksen olan y eksenini boyunca 300 μm , yatay eksen olan x eksenini boyunca ise 500 μm aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler ısı tesiri altındaki bölgeleri kapsayacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.22. Sertlik Ölçüm Cihazı

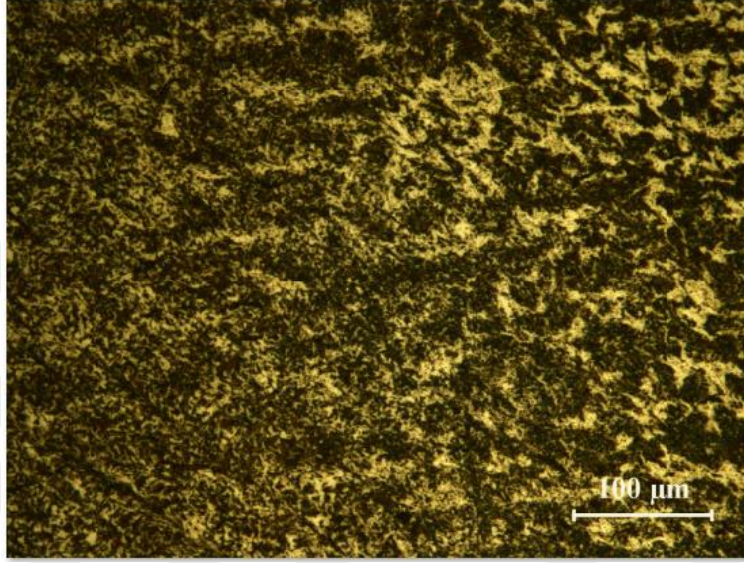


Şekil 3.23. Mikro sertlik ölçümlerinin yapılaş düzeni

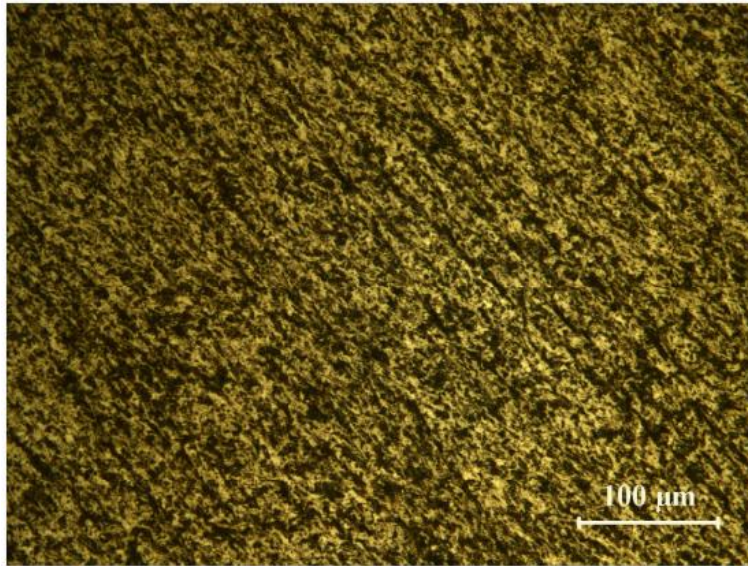
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Makro ve Mikro İncelemeler

Elektrik ark kaynağı yöntemi, MAG yöntemi ve TIG yöntemi için mikro ve makro yapı görüntüleri optik mikroskop ile incelenmiştir.

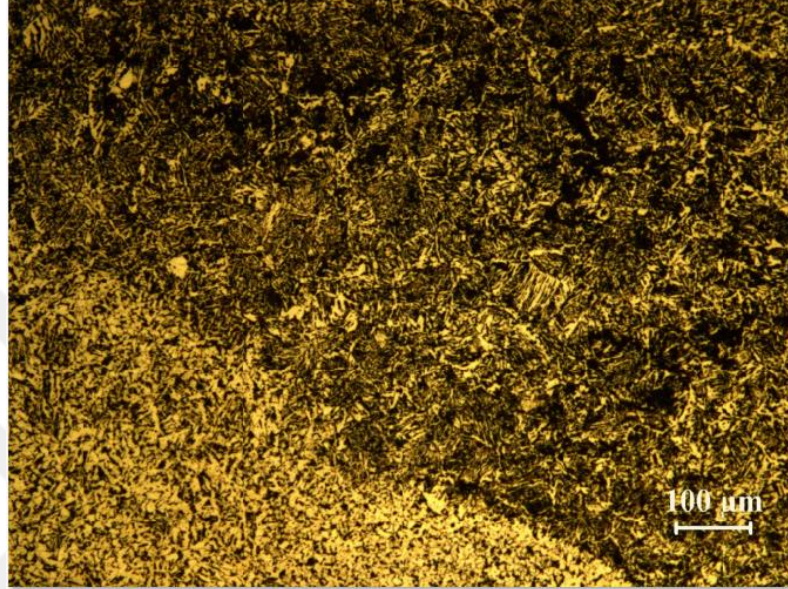


Şekil 4.1. 0 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı

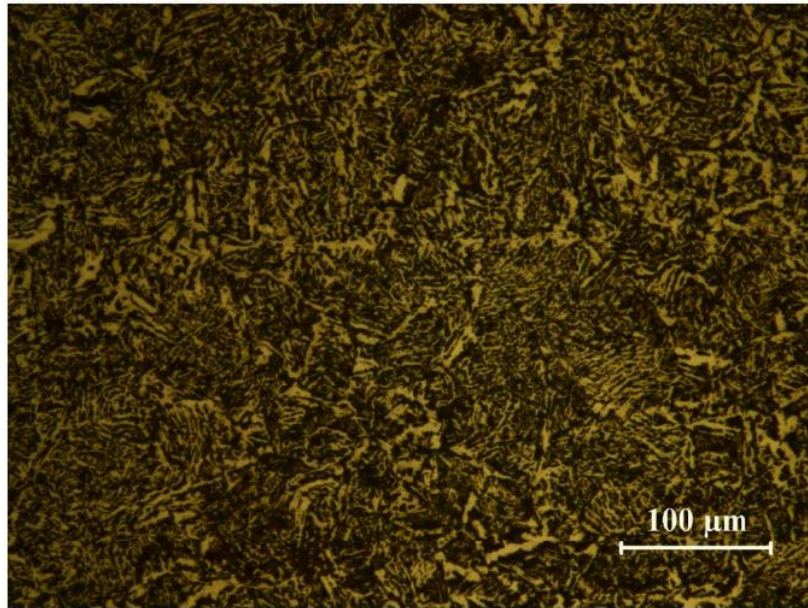


Şekil 4.2. 0 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesi kaynak metali mikro yapısı

Şekil 4.1’de 0mm kök aralığı ile yapılan elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal gölgesinden kaynak gölgesine geçişine ait mikro yapı görüntüsü verilmiştir. Burada ısının dağıldığı doğrultu boyunca tanelerin irileştiği görülebilir. Şekil 4.2’de ise aynı numuneye ait kaynak bölgesine ait mikro yapı görseli verilmiştir. Mikro yapıda martenzitik yapıdan daha çok beynitik yapı mevcuttur.

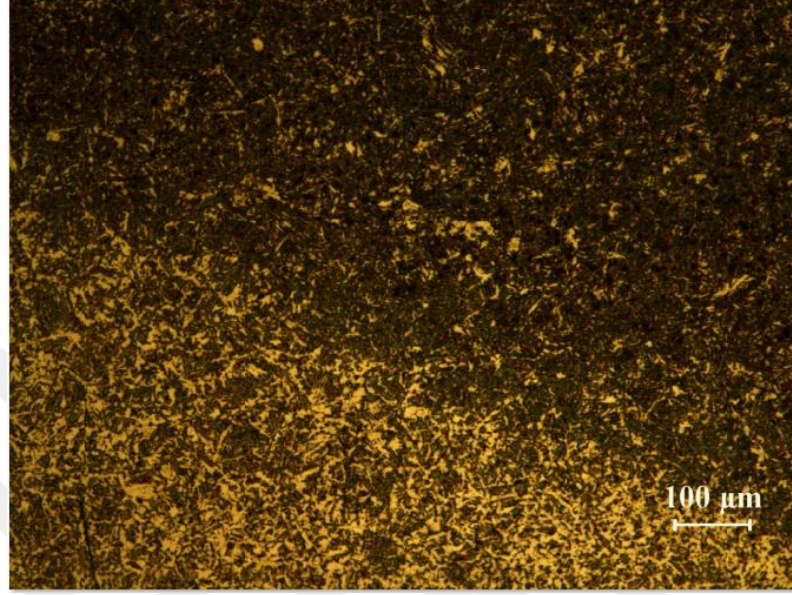


Şekil 4.3. 1 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı

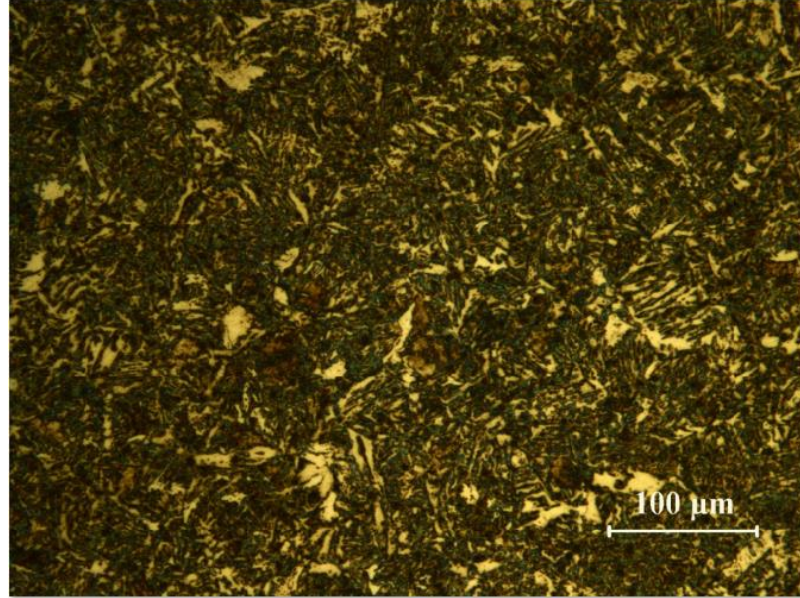


Şekil 4.4. 1 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesi kaynak metali mikro yapısı

Şekil 4.3 te ve Şekil 4.4’te 1mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesine ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4’te beynitik yapının yanında martenzitik yapının daha baskın olduğu görülmektedir.

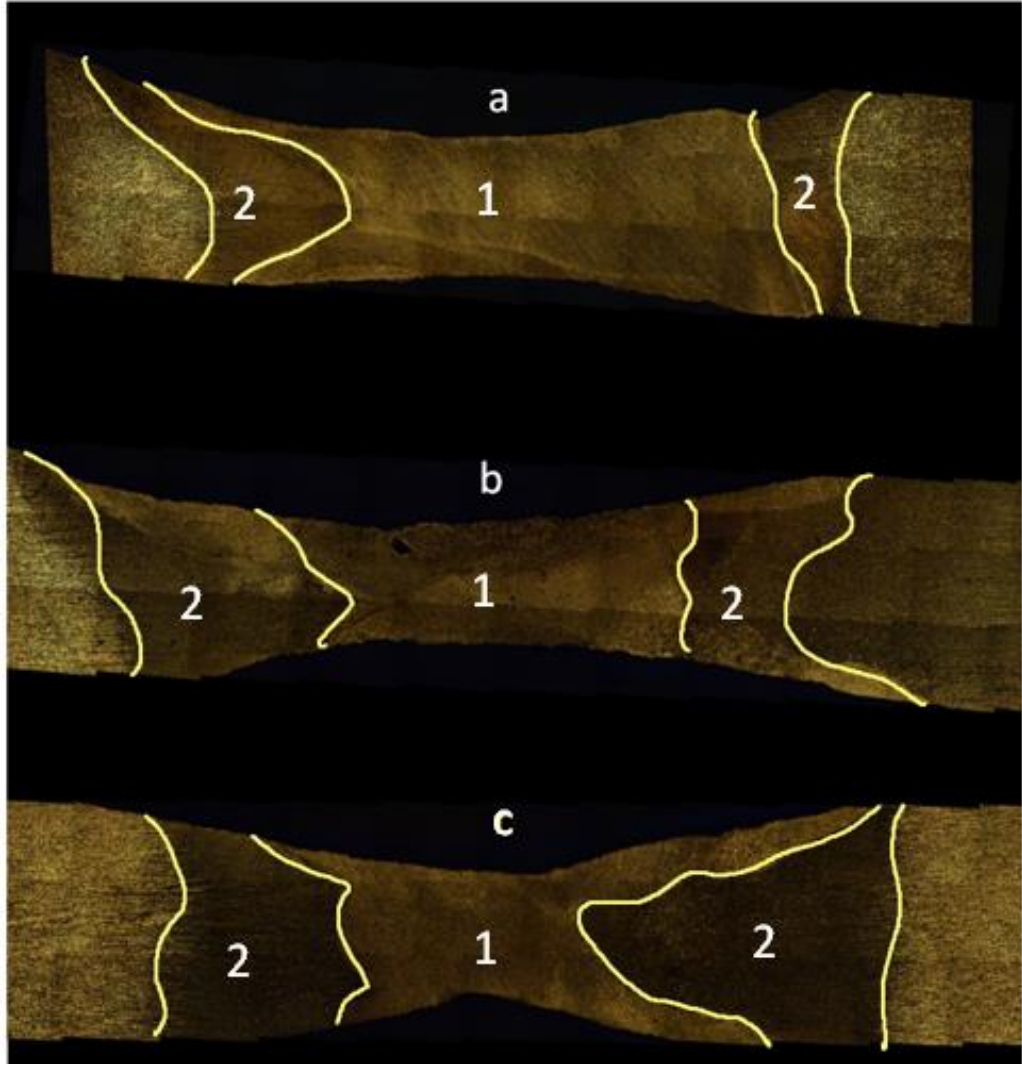


Şekil 4.5. 2 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı



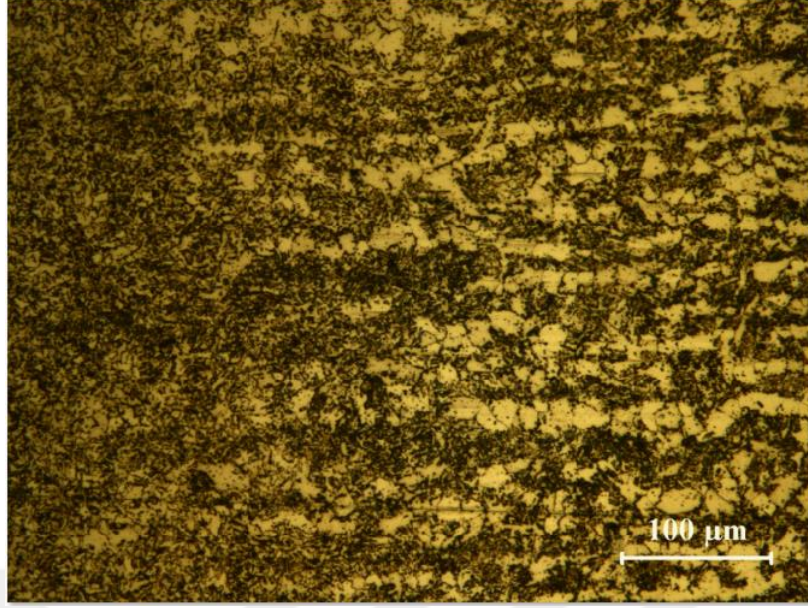
Şekil 4.6. 2 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesi kaynak metali mikro yapısı

Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da 2 mm boşluklu elektrik ark kaynağı numunesine ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Martenzitik ve beynitik yapının birlikte olduğu Şekil 4.6'da görülmektedir.

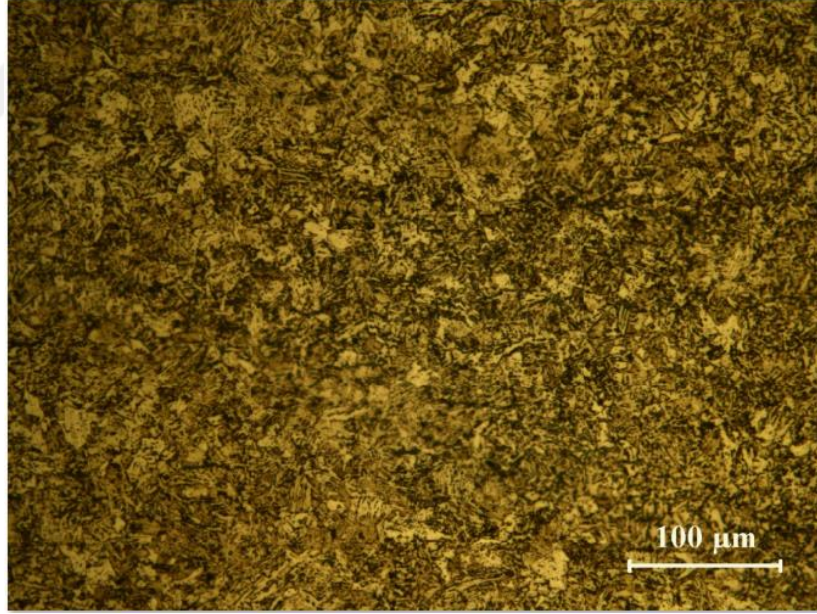


Şekil 4.7. Elektrik ark kaynağı yöntemi grubu makro yapı görüntüleri: a) 0 mm boşluk b) 1 mm boşluk, c) 2 mm boşluk

Şekil 4.7'de elektrik ark kaynağı yöntemi ile 0,1 ve 2mm kök boşluğu parametreleriyle birleştirilen numunelerin makro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 0 mm boşlukla birleştirilen numunede kaynak metalinin bulunduğu bölge daha geniştir ve ıtab alanı daha dardır. 1mm boşlukla birleştirilen numune de ise kaynak metalinin bulunduğu alan en küçüktür, 2mm boşluklu numunede ise 1mm boşlukluya göre daha geniştir. En yoğun martenzitik yapı 1mm boşluklu numunede gözlenmiştir.

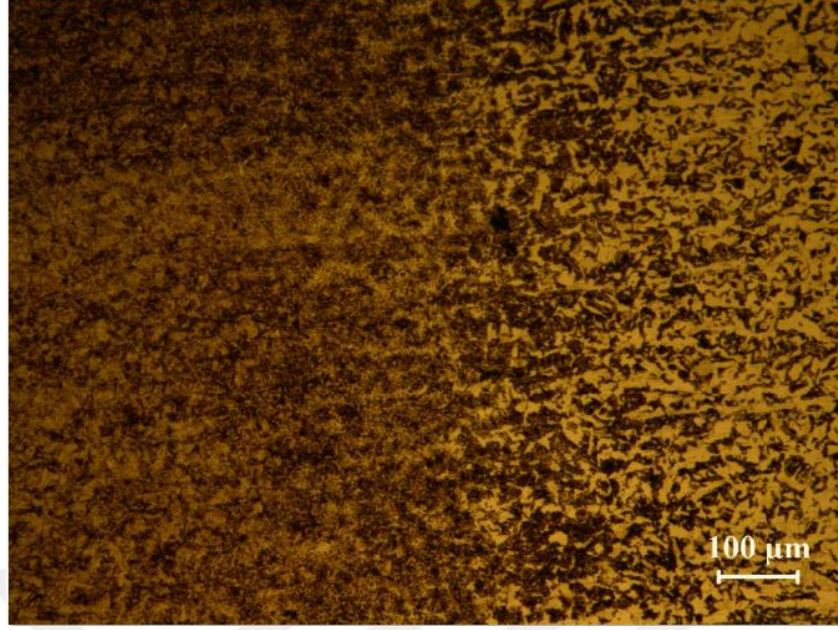


Şekil 4.8. 0 mm boşluklu MAG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı

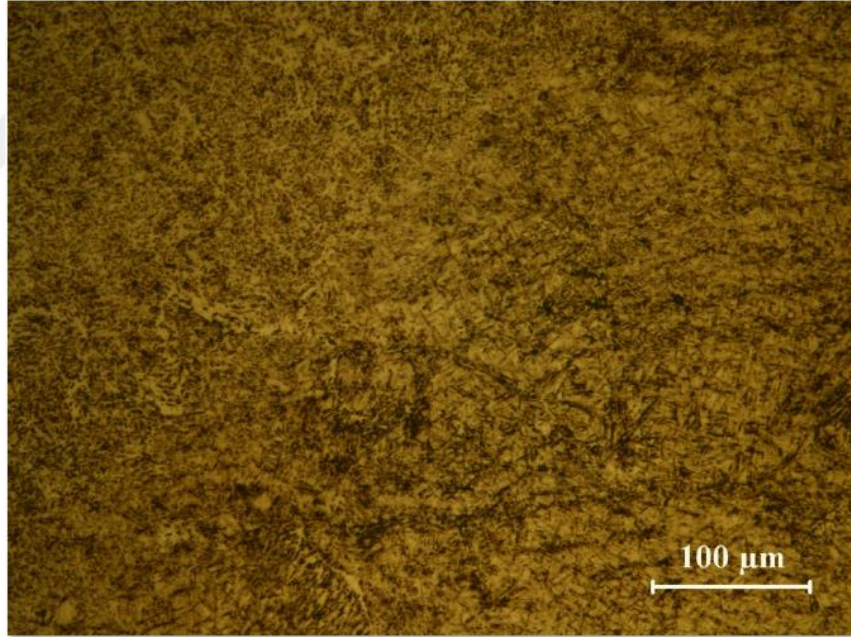


Şekil 4.9. 0 mm boşluklu MAG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı

Şekil 4.8’de ve şekil 4.9’da MAG yöntemi ve 0 mm kök aralığıyla birleştirilmiş numuneye ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Kaynak bölgesinin etrafında tanelerin irileştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Şekil 4.9’da ise hızlı soğumanın etkisiyle oluşan ince beynitik ve martenzitik yapılar görülmüştür.

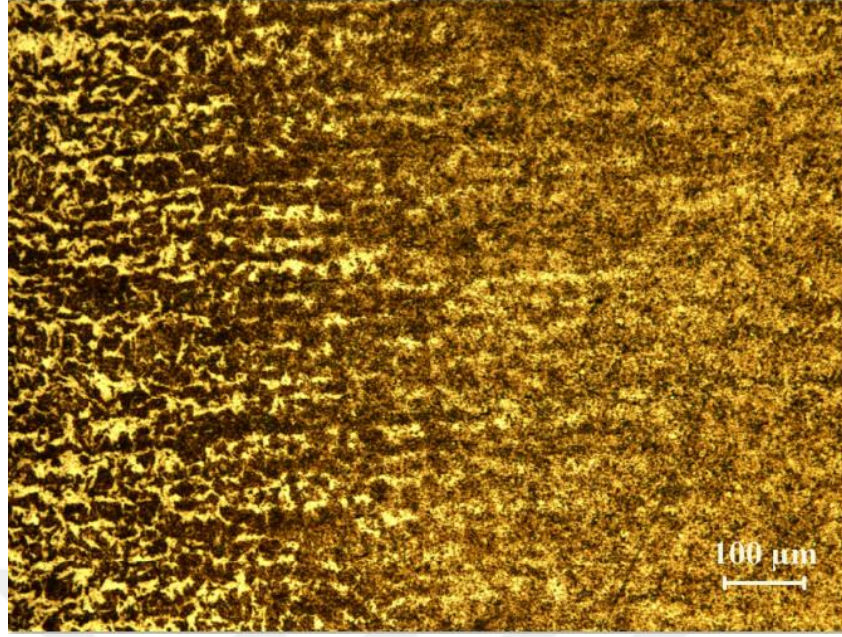


Şekil 4.10. 1 mm boşluklu MAG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı

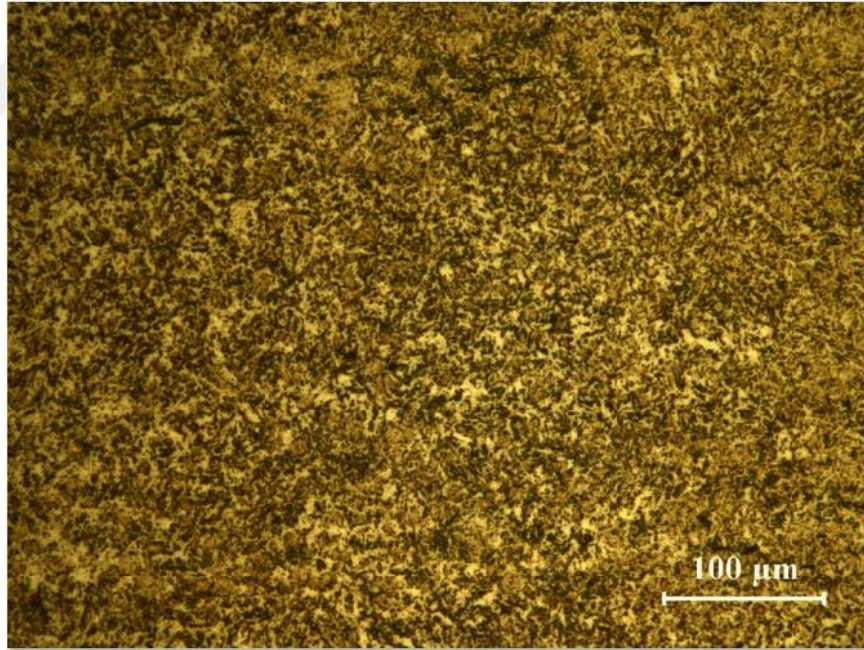


Şekil 4.11. 1 mm boşluklu MAG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı

1 mm boşlukla MAG yöntemiyle birleştirilen numuneye ait mikro yapı görüntüleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.10’da 0 mm boşlukla birleştirilen numuneye kıyasla tane irileşmesinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.11’de martenzitik yapıların yanında beyritik yapılar da görülmüştür.

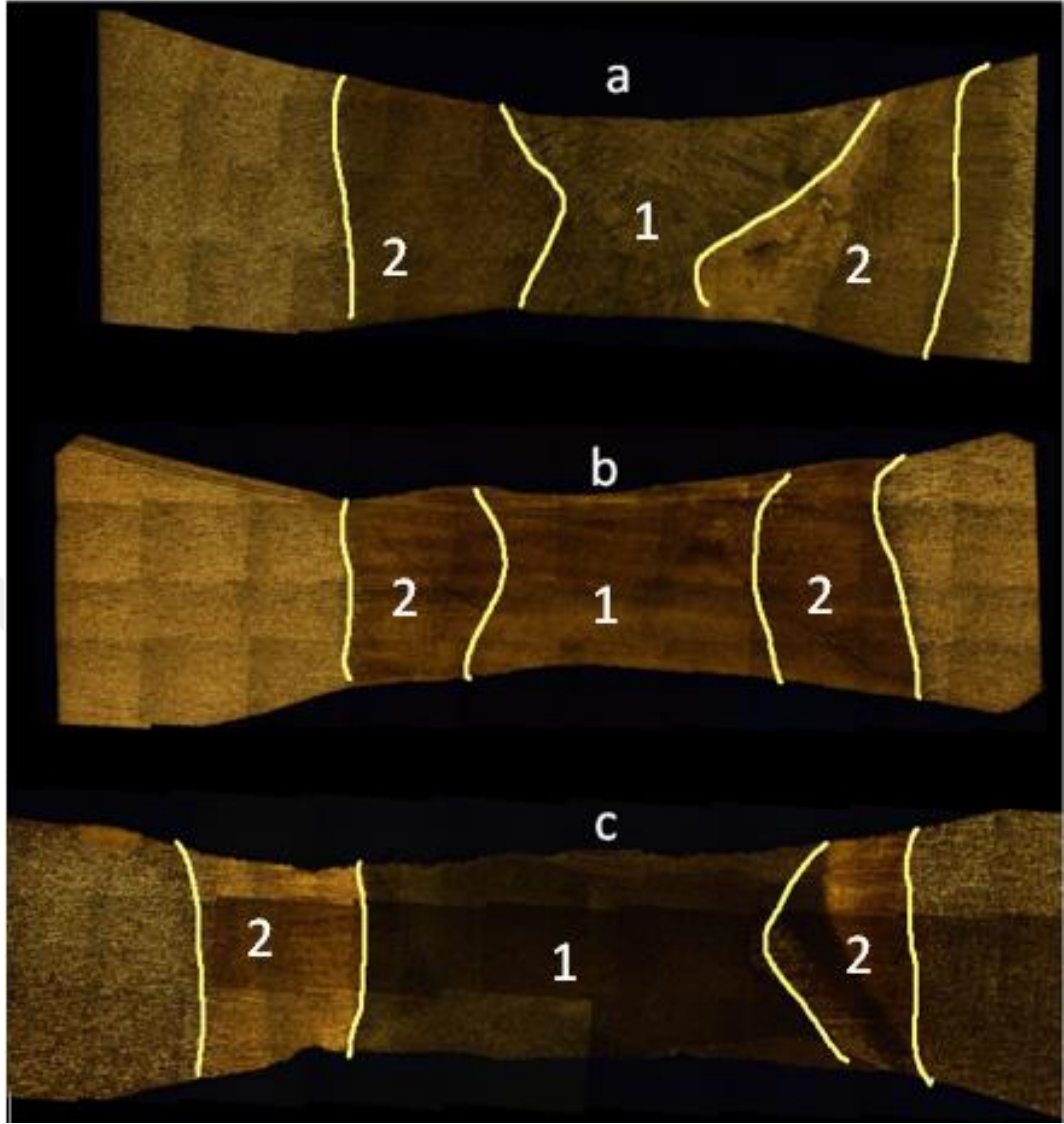


Şekil 4.12. 2 mm boşluklu MAG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı



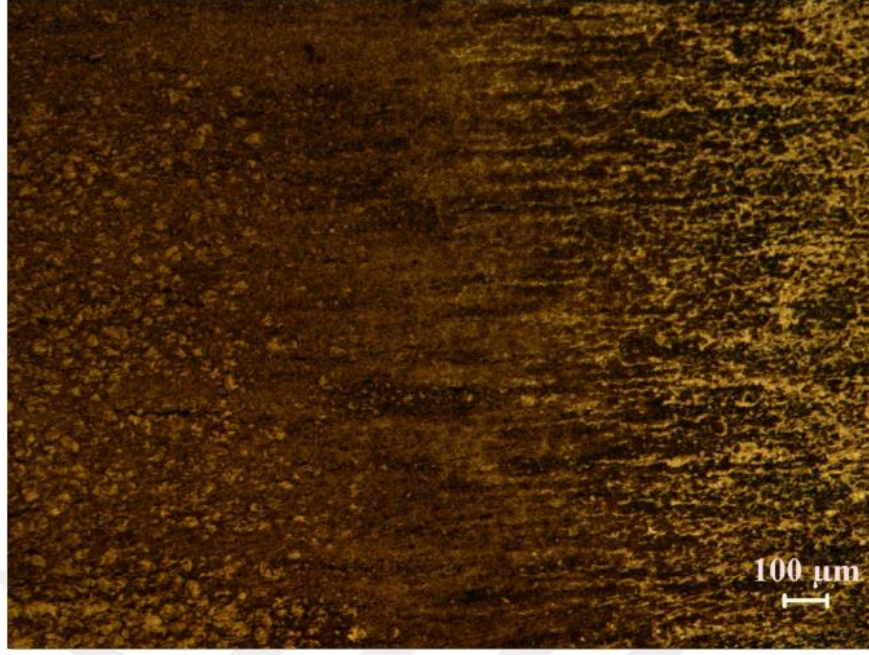
Şekil 4.13. 2 mm boşluklu MAG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı

MAG yöntemiyle 2 mm kök aralığıyla birleştirilen numunelere ait mikro yapı görüntüleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.12'de tane irileşmesinin 0 ve 1 mm boşluklu numunelere kıyasla daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Şekil 4.13'te martenzitik yapının baskın olduğu görülmektedir.

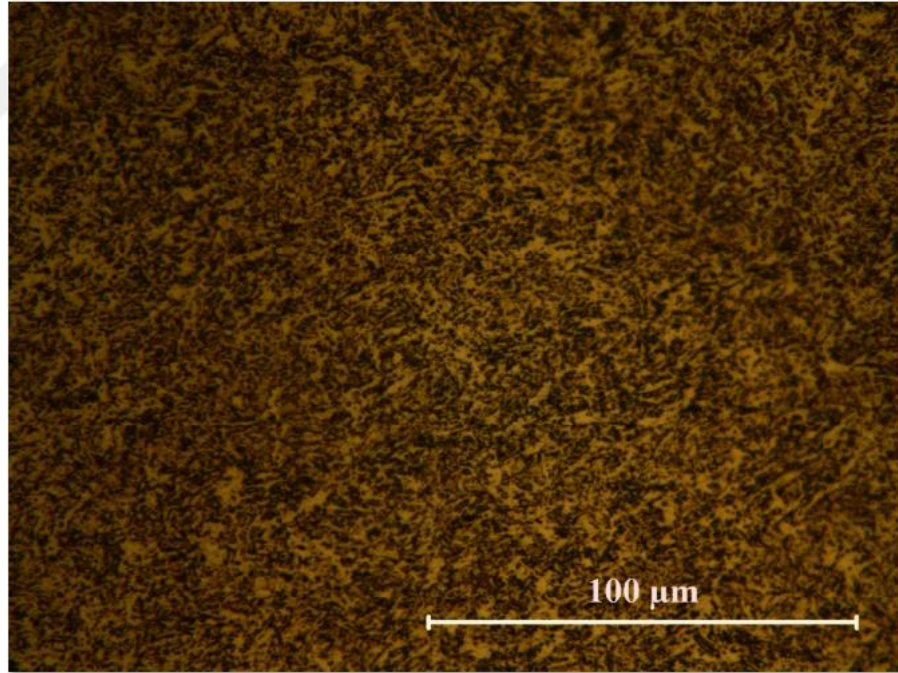


Şekil 4.14. MAG yöntemi grubu makro yapı görüntüleri: a) 0 mm boşluk b) 1 mm boşluk, c) 2 mm boşluk

MAG yöntemiyle 0,1 ve 2 mm kök aralıklarıyla birleştirilen numunelere ait makro yapı görüntüleri şekil 4.14'te verilmiştir. Kök aralığının artmasıyla beraber kaynak metali alanın genişlediği gözlemlenmiştir. Böylece mikro yapıdaki martenzit oranının gittikçe arttığı görülmüştür.(bkz: Şekil 4.9, 4.11, 4.13). Kaynak alanının kök boşluğunun artışıyla birlikte genişlediği görülmektedir.



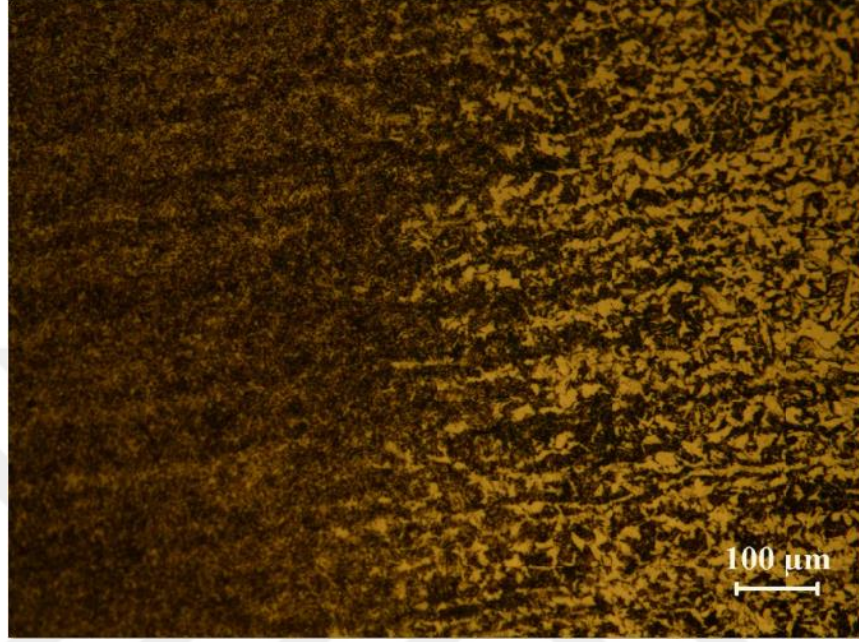
Şekil 4.15. 0 mm boşluklu TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı



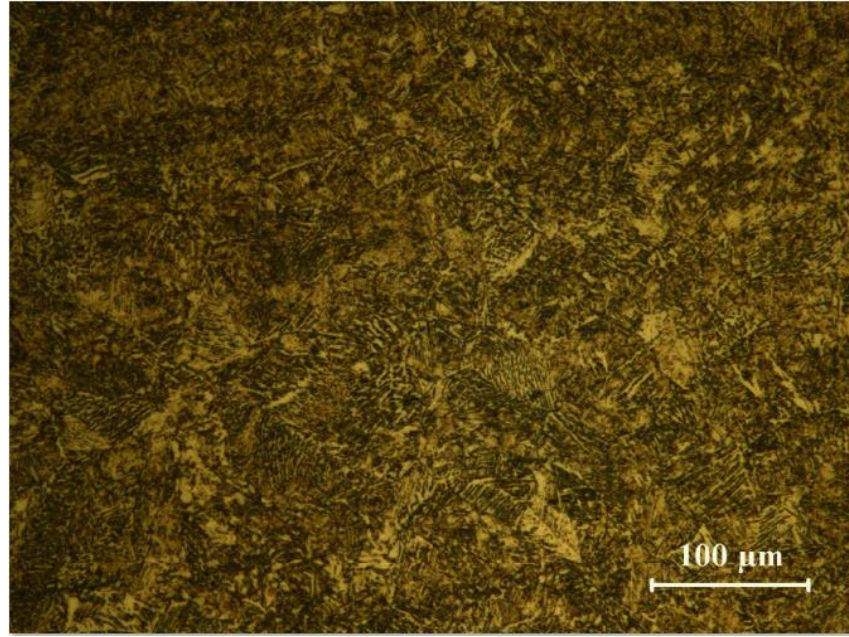
Şekil 4.16. 0 mm boşluklu TIG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı

Şekil 4.15'te 0 mm kök aralığı ile yapılan TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişine ait mikro yapı görüntüsü verilmiştir. Burada ısının dağıldığı doğrultu boyunca tanelerin irileştiği görülmektedir. Şekil 4.16'da ise aynı

numuneye ait kaynak bölgesine ait mikro yapı görseli verilmiştir. Yüksek ısı girdisi sonrasında hızlı soğumanın meydana gelmesi ile çok ince yapıdaki martenzitik-beynitik yapının oluştuğu görülmektedir.

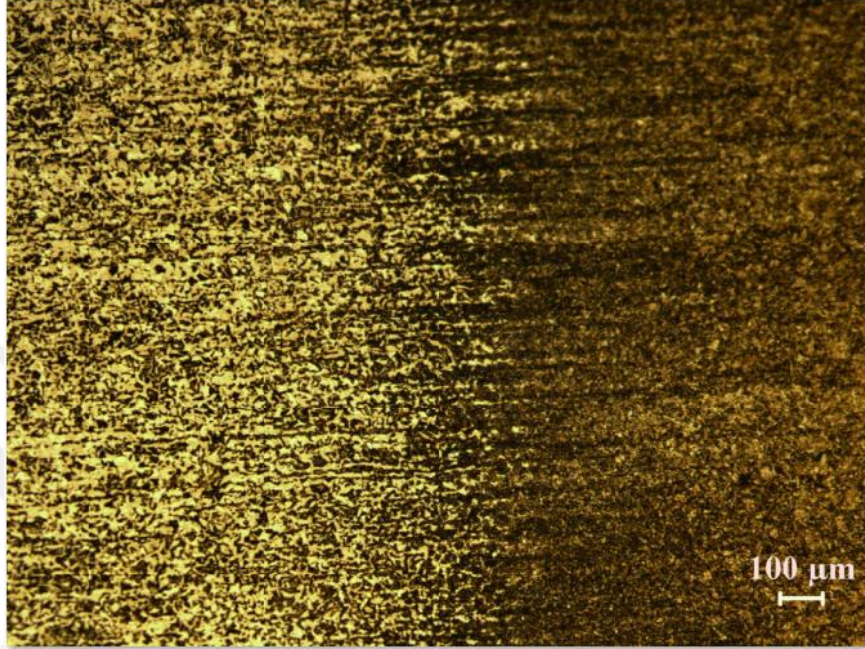


Şekil 4.17. 1 mm boşluklu TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı

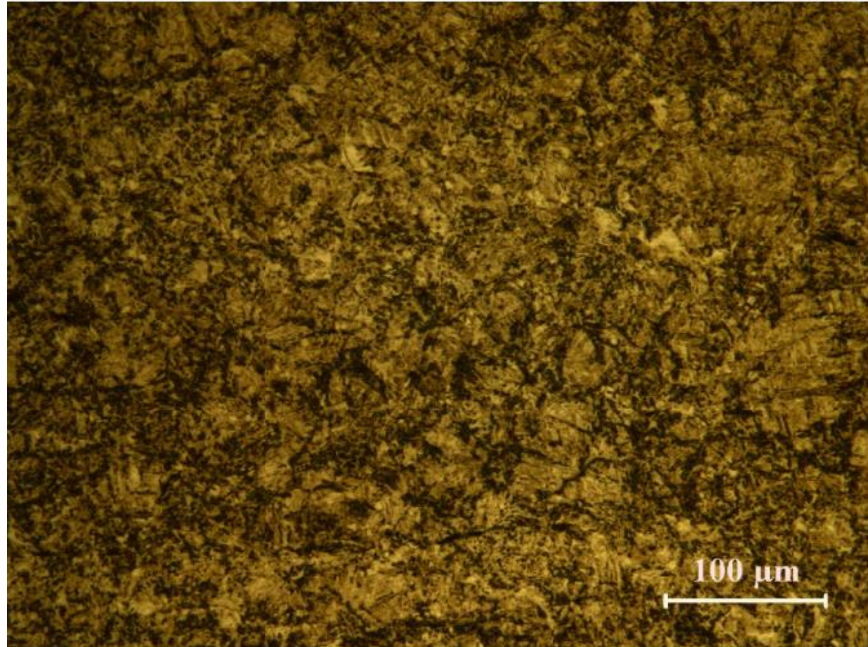


Şekil 4.18. 1 mm boşluklu TIG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı

Şekil 4.17’de ve Şekil 4.18’de TIG yöntemi 1 mm kök boşluğu parametresiyle birleştirilmiş numuneye ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.18’de beynitik yapının yanında martenzitik yapı da görülmektedir.

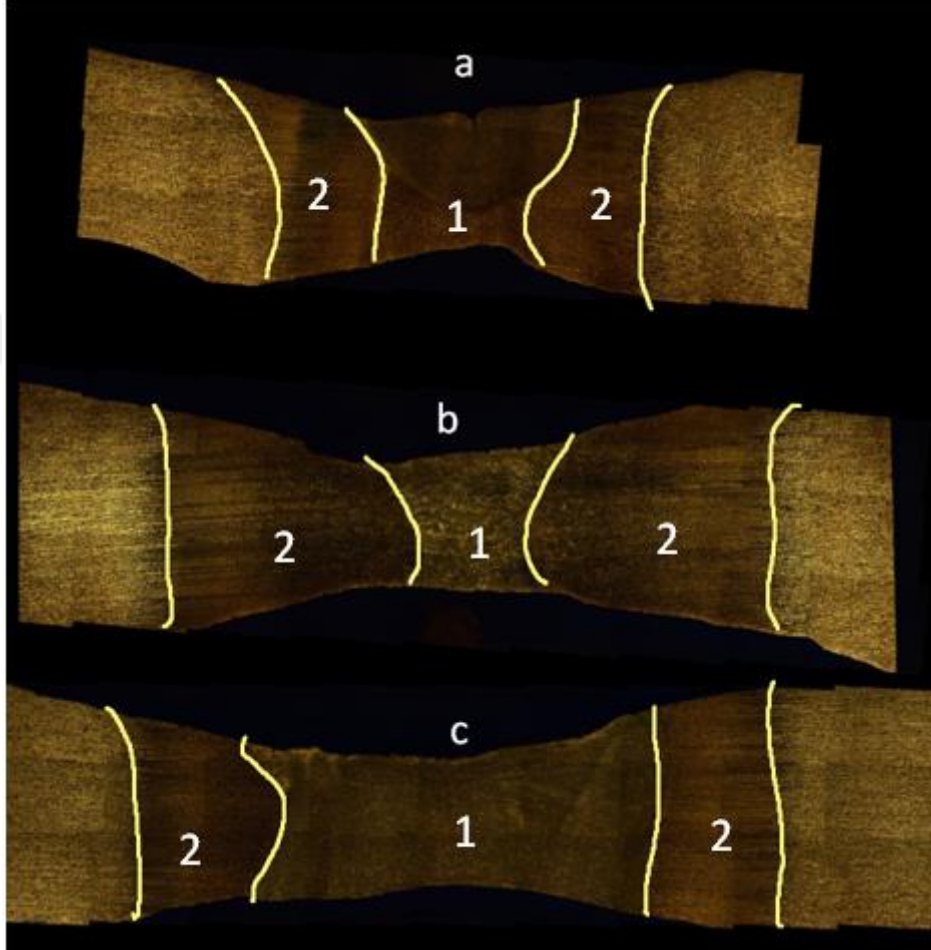


Şekil 4.19. 2 mm boşluklu TIG yöntemi numunesinin esas metal bölgesinden kaynak bölgesine geçişin olduğu bölgeye ait mikro yapısı



Şekil 4.20. 2mm boşluklu TIG yöntemi numunesi kaynak metali mikro yapısı

2 mm kök boşluğu ve TIG yöntemiyle birleştirilen numuneye ait mikro yapı görüntüleri Şekil 4.19 ve 4.20’de verilmiştir. Benzer şekilde esas metal ile kaynak bölgesi arasında tane irileşmesi gözlemlenmiştir (Şekil 4.19). Şekil 4.20’de ise martenzitik yapının yanında ince beynitik yapı da görülmektedir.



Şekil 4.21. TIG yöntemi grubu makro yapı görüntüleri: a) 0 mm boşluk b) 1 mm boşluk, c) 2 mm boşluk

TIG yöntemiyle 0, 1 ve 2 mm kök boşluğu parametreleriyle birleştirilen numunelere ait makro yapı görüntüleri Şekil 4.21’de verilmiştir. Burada kök boşluk mesafesinin artırılmasıyla kaynak metali bölgesinin önce azaldığı daha sonra arttığı gözlemlenmiştir. Buna paralel olarak yapıdaki martenzit oranı da benzer şekilde değişkenlik göstermiştir. Mikro yapılarda beynit ve martenzitin genellikle birlikte olduğu görülmüştür. Kaynak alanının kök boşluğu mesafesiyle doğru orantılı olarak genişlediği gözlemlenmiştir.

4.2. Mikro Sertlik Ölçümleri

Endüstride kullanılan S355J2 kalite yapı çeliği 20HRC (Rockwell) yaklaşık olarak 242 HV (Vickers) sertlik değerinde bulunmaktadır. Kaynaksız numunede sertlik ölçümleri ortalaması 244.3 HV olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Buna karşın kaynaklı numunelerde özellikle ısı tesiri altındaki bölgede sertlik değerlerinin değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4 'te her bir kaynak yönteminin, 0,1,2 mm kök boşluğu parametreleri için Şekil 3.22'de belirtilen düzene sertlik ölçümlerinden ortaya çıkan sonuçlar verilmiştir.

Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde elektrik ark kaynağı yöntemi için kök boşluğu parametresine göre incelendiğinde ortalama sertlik değerleri arasında net bir bağıntı kurulamamıştır. Fakat bölüm 4.1'de incelenen mikro yapı görüntüleri ele alındığında martenzitik ve beynitik yapı oranlarına göre mikro sertlikler ile tutarlı olduğu görülmektedir.

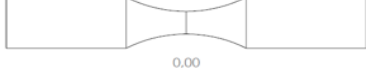
Yine bölüm 4.1'de yapılan mikro yapı incelemeleri göz önünde bulundurulacak olursa; MAG yöntemiyle birleştirilen numunelerde kök aralığının artmasına paralel olarak ısı girdisi, ITAB alanı artmış bunun sonucu olarak da hızlı soğuma gerçekleşmiştir, dolayısıyla sertlik değerleri kök aralığının artmasına paralel olarak yükselmiştir.

TIG yöntemi için mikro yapı incelemelerine bakılacak olursa, mag yöntemin aksine kök boşluğu ile mikro sertlik değerleri arasında bir bağıntı kurulamamıştır. Buna karşın mikro yapı incelemelerinde gözlemlenen beynitik ve martenzitik yapılar sertlik değerleri ile örtüşmektedir.

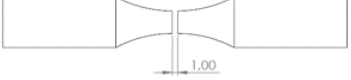
Çizelge 4.1. Kaynaksız numune için sertlik ölçümleri

Kaynaksız Numuneler		
Eksen	HV	HRc
y1	286,6	28,0
y2	258,5	23,7
y3	251,9	22,6
y4	236,1	19,5
y5	271,4	25,9
y6	259,3	23,8
y7	248,8	22,1
y8	248,5	22,0
y9	261,4	24,2
x1	242,5	20,9
x2	255,4	23,2
x3	235,7	19,4
x4	228,1	17,5
x5	234,0	19,0
x6	252,7	22,7
x7	228,8	17,7
x8	229,4	17,8
x9	243,5	21,1
x10	239,8	20,3
x11	245,6	21,5
x12	235,8	19,4
x13	244,0	21,2
x14	247,0	21,8
x15	245,9	21,5
x16	235,7	19,4
x17	220,0	15,5
x18	239,9	20,3
x19	230,2	18,0
x20	227,4	17,3
Ortalama	244,3	20,9
Min	220,0	15,5
Max	286,6	28,0

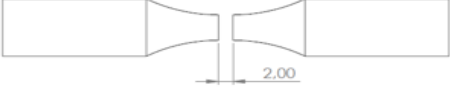
Çizelge 4.2. 0mm kök boşluğu için sertlik ölçümleri

								
E. Ark 0 mm Boşluk			Mag 0 mm Boşluk			Tığ 0 mm Boşluk		
Eksen	HV	HRc	Eksen	HV	HRc	Eksen	HV	HRc
y1	309,9	30,9	y1	266,4	25,0	y1	273,3	26,1
y2	269,0	25,5	y2	268,7	25,4	y2	289,7	28,4
y3	274,7	26,3	y3	277,9	26,8	y3	319,6	32,1
y4	278,7	26,9	y4	285,7	27,9	y4	310,4	31,0
y5	246,0	21,6	y5	304,7	30,3	y5	326,4	32,9
y6	278,3	26,9	y6	308,2	30,7	y6	347,1	35,2
y7	265,9	24,9	y7	292,6	28,8	y7	454,1	45,6
y8	291,1	28,6	y8	288,3	28,2	y8	461,5	46,2
y9	310,9	31,1	y9	278,0	26,8	y9	298,9	29,6
x1	263,0	24,5	x1	251,0	22,5	x1	231,5	18,3
x2	244,3	21,2	x2	236,6	19,6	x2	249,8	22,3
x3	259,7	23,9	x3	275,2	26,4	x3	267,8	25,3
x4	257,9	23,6	x4	241,4	20,6	x4	283,8	27,6
x5	267,4	25,2	x5	269,6	25,6	x5	290,5	28,5
x6	279,1	27,0	x6	268,0	25,3	x6	303,7	30,2
x7	292,1	28,7	x7	262,3	24,3	x7	420,2	42,7
x8	285,5	27,9	x8	285,3	27,9	x8	420,6	42,7
x9	241,8	20,7	x9	300,4	29,8	x9	326,5	32,9
x10	291,8	28,7	x10	292,5	28,8	x10	336,2	34,0
x11	281,9	27,4	x11	289,5	28,4	x11	359,5	36,6
x12	282,9	27,5	x12	301,2	29,9	x12	377,5	38,5
x13	252,4	22,7	x13	306,7	30,5	x13	352,5	35,8
x14	276,7	26,6	x14	282,3	27,4	x14	334,1	33,7
x15	215,2	14,4	x15	292,5	28,8	x15	273,9	26,2
x16	235,2	19,2	x16	280,2	27,1	x16	266,1	25,0
x17	251,5	22,5	x17	313,4	31,4	x17	246,7	21,7
x18	254,0	23,0	x18	289,5	28,4	x18	230,8	18,2
x19	248,7	22,1	x19	273,9	26,2	x19	238,3	20,0
x20	266,4	25,0	x20	252,7	22,7	x20	214,7	14,3
Ortalama	268,0	25,0	Ortalama	280,5	26,9	Ortalama	314,0	30,4
Min	215,2	14,4	Min	236,6	19,6	Min	214,7	14,3
Max	215,2	14,4	Max	313,4	31,4	Max	461,5	46,2

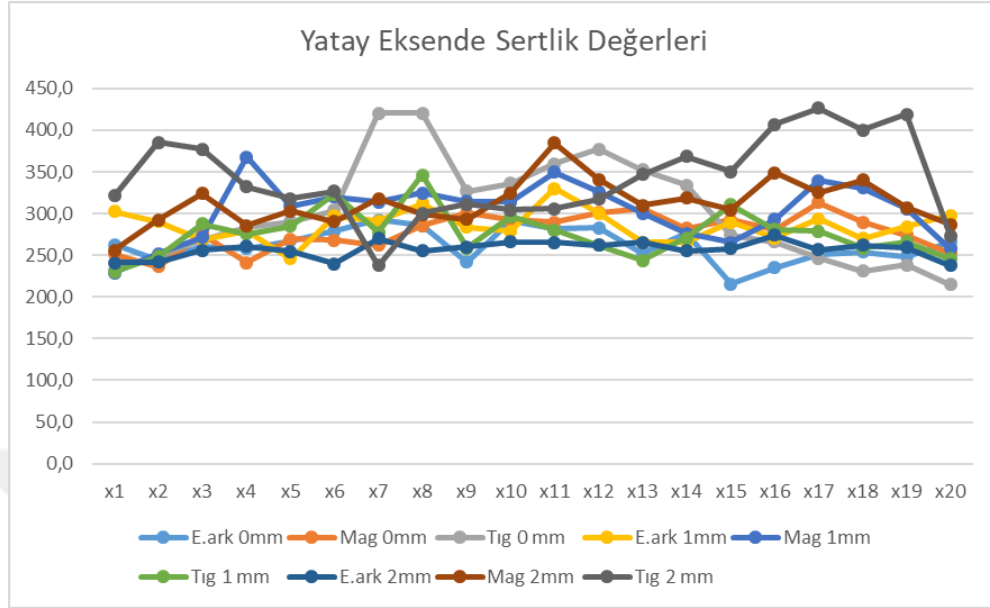
Çizelge 4.3. 1mm kök boşluğu için sertlik ölçümleri

								
E. Ark 1 mm Boşluk			Mag 1 mm Boşluk			Tığ 1 mm Boşluk		
Eksen	HV	HRc	Eksen	HV	HRc	Eksen	HV	HRc
y1	326,2	32,9	y1	307,0	30,6	y1	309,1	30,8
y2	340,7	34,5	y2	288,3	28,2	y2	304,8	30,3
y3	297,8	29,4	y3	331,0	33,4	y3	276,3	26,6
y4	293,2	28,9	y4	258,3	23,7	y4	283,2	27,6
y5	298,2	29,5	y5	296,9	29,3	y5	276,0	26,5
y6	281,5	27,3	y6	302,0	30,0	y6	284,8	27,8
y7	288,4	28,3	y7	314,8	31,6	y7	267,0	25,1
y8	303,4	30,1	y8	264,6	24,7	y8	253,2	22,8
y9	309,4	30,9	y9	298,6	29,5	y9	281,1	27,3
x1	302,4	30,0	x1	229,0	17,7	x1	230,5	18,1
x2	290,4	28,5	x2	252,2	22,7	x2	248,7	22,1
x3	268,8	25,4	x3	271,4	25,9	x3	287,9	28,2
x4	278,9	26,9	x4	367,9	37,5	x4	275,4	26,4
x5	245,8	21,5	x5	309,4	30,9	x5	284,8	27,8
x6	297,0	29,3	x6	320,3	32,3	x6	323,1	32,5
x7	291,2	28,6	x7	314,2	31,5	x7	277,6	26,8
x8	311,6	31,2	x8	324,4	32,7	x8	346,2	35,1
x9	283,9	27,7	x9	314,8	31,6	x9	258,8	23,8
x10	278,9	26,9	x10	313,9	31,4	x10	296,7	29,3
x11	330,2	33,3	x11	349,6	35,5	x11	279,9	27,1
x12	300,5	29,8	x12	326,0	32,8	x12	261,9	24,3
x13	265,6	24,9	x13	300,7	29,8	x13	244,0	21,2
x14	265,1	24,8	x14	276,1	26,5	x14	270,8	25,8
x15	290,0	28,5	x15	265,2	24,8	x15	310,4	31,0
x16	271,1	25,8	x16	293,3	28,9	x16	280,8	27,2
x17	294,0	29,0	x17	339,5	34,3	x17	278,9	26,9
x18	270,3	25,7	x18	330,8	33,4	x18	258,8	23,8
x19	284,0	27,7	x19	305,7	30,4	x19	266,3	25,0
x20	297,6	29,6	x20	257,9	23,6	x20	246,1	21,6
Ortalama	291,6	28,5	Ortalama	300,8	29,5	Ortalama	278,0	26,5
Min	245,8	21,5	Min	229,0	17,7	Min	230,5	18,1
Max	340,7	34,5	Max	367,9	37,5	Max	346,2	35,1

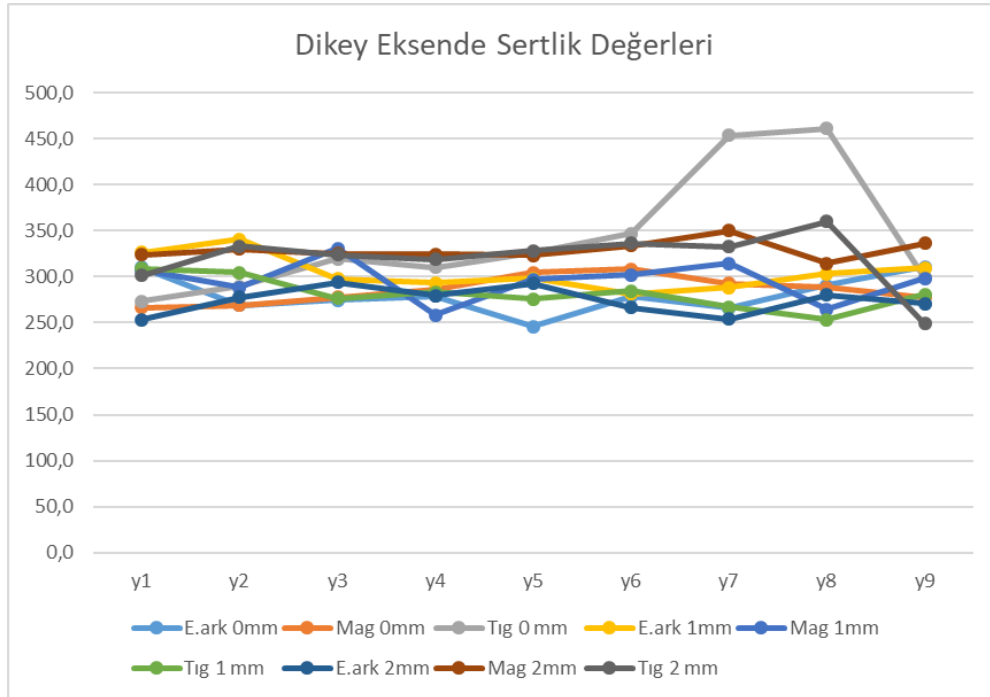
Çizelge 4.4. 2mm kök boşluğu için sertlik ölçümleri

								
E. Ark 2 mm Boşluk			Mag 2 mm Boşluk			Tığ 2 mm Boşluk		
Eksen	HV	HRc	Eksen	HV	HRc	Eksen	HV	HRc
y1	253,1	22,8	y1	323,9	32,6	y1	301,2	29,9
y2	277,6	26,8	y2	330,1	32,7	y2	333,0	33,6
y3	294,2	29,0	y3	325,0	32,7	y3	324,1	32,6
y4	279,5	27,0	y4	324,4	32,6	y4	318,9	32,1
y5	292,6	28,8	y5	323,4	33,7	y5	328,0	33,1
y6	266,6	25,1	y6	333,9	35,5	y6	336,2	34,0
y7	254,1	23,0	y7	350,1	31,5	y7	332,9	33,6
y8	280,3	27,1	y8	314,4	32,6	y8	360,4	36,7
y9	270,9	25,8	y9	336,7	34,0	y9	249,1	22,1
x1	241,4	20,6	x1	255,7	23,2	x1	321,2	32,3
x2	241,7	20,7	x2	292,1	28,7	x2	385,7	39,3
x3	255,9	23,3	x3	324,0	32,6	x3	377,0	38,5
x4	260,5	24,0	x4	285,8	27,9	x4	332,1	33,5
x5	254,8	23,1	x5	303,0	30,1	x5	317,9	31,9
x6	240,0	20,4	x6	290,4	28,5	x6	326,7	32,9
x7	270,0	25,6	x7	318,2	32,0	x7	237,9	19,9
x8	255,6	23,2	x8	299,0	29,6	x8	300,5	29,8
x9	260,3	24,0	x9	293,0	28,8	x9	311,1	31,1
x10	265,9	24,9	x10	324,9	32,7	x10	304,5	30,3
x11	265,3	24,8	x11	384,6	39,2	x11	306,1	30,5
x12	262,1	24,3	x12	340,9	34,5	x12	317,5	31,9
x13	265,2	24,8	x13	309,6	30,9	x13	347,3	35,2
x14	255,5	23,2	x14	318,8	32,0	x14	368,4	37,6
x15	258,0	23,6	x15	304,8	30,3	x15	350,5	35,6
x16	273,9	26,2	x16	349,1	35,4	x16	406,9	41,4
x17	256,5	23,4	x17	325,1	32,7	x17	426,6	43,6
x18	261,8	24,3	x18	340,4	34,4	x18	400,5	40,8
x19	259,3	23,8	x19	307,0	30,6	x19	419,0	42,6
x20	238,1	20,0	x20	287,1	28,1	x20	273,3	26,1
Ortalam	262,4	24,3	Ortalama	317,8	31,7	Ortalama	335,0	33,5
Min	238,1	20,0	Min	255,7	23,2	Min	237,9	19,9
Max	294,2	29,0	Max	384,6	39,2	Max	426,6	43,6

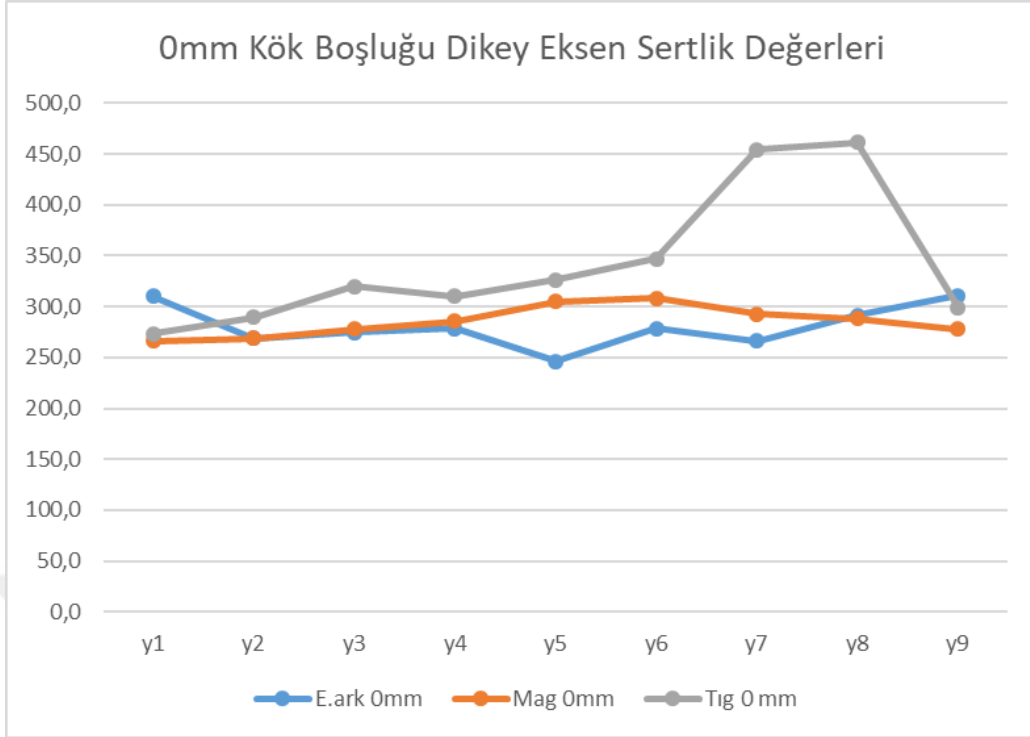
Yapılan sertlik ölçümlerinden oluşturulan çizgi grafikleri Şekil, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35'te verilmiştir.



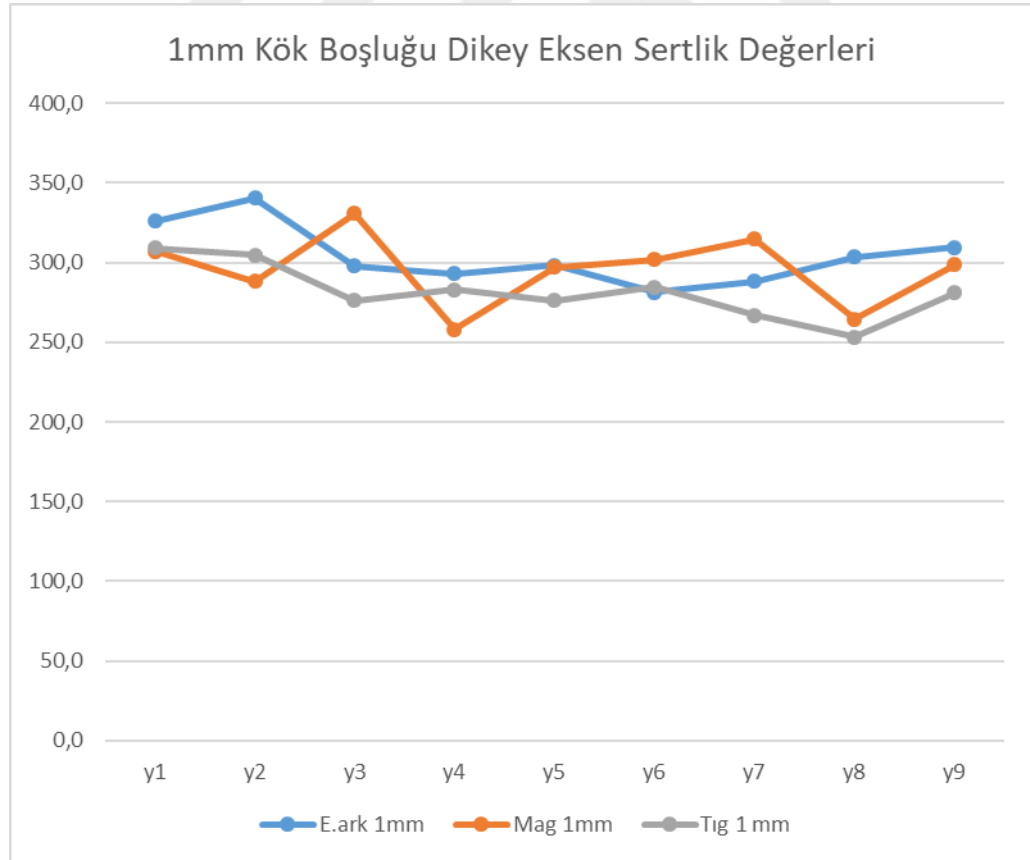
Şekil 4.22. Yatay ekseninde sertlik değerleri



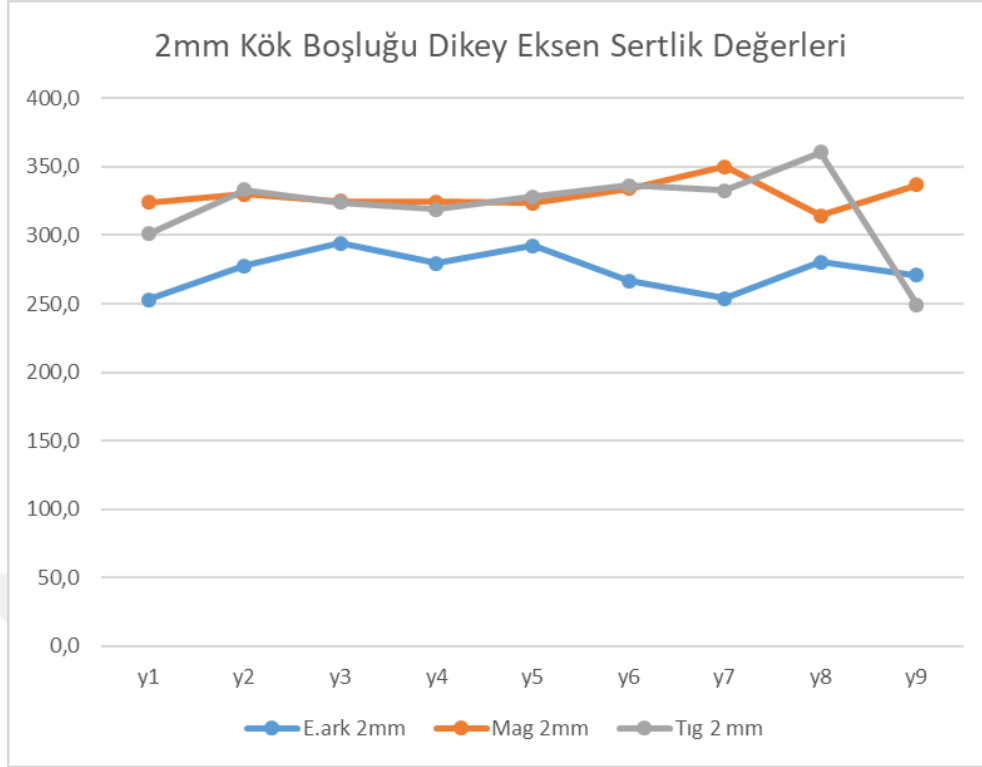
Şekil 4.23. Dikey ekseninde sertlik değerleri



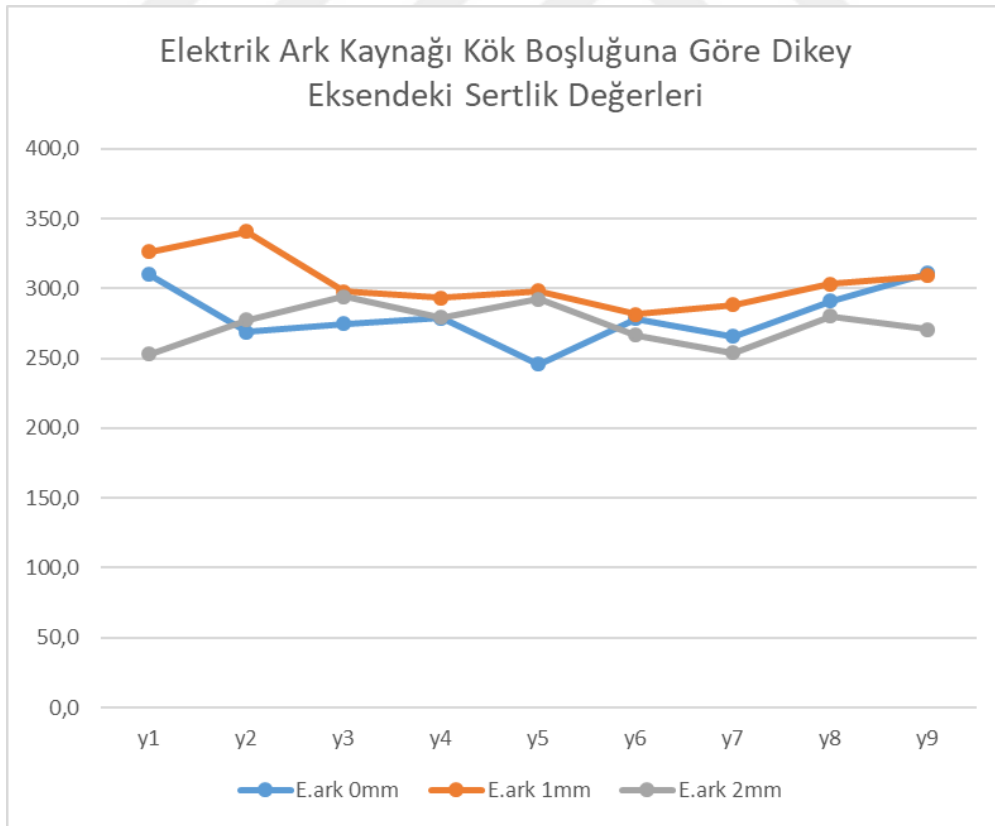
Şekil 4.24. Dikey ekseninde 0mm kök boşluğu için sertlik değerleri



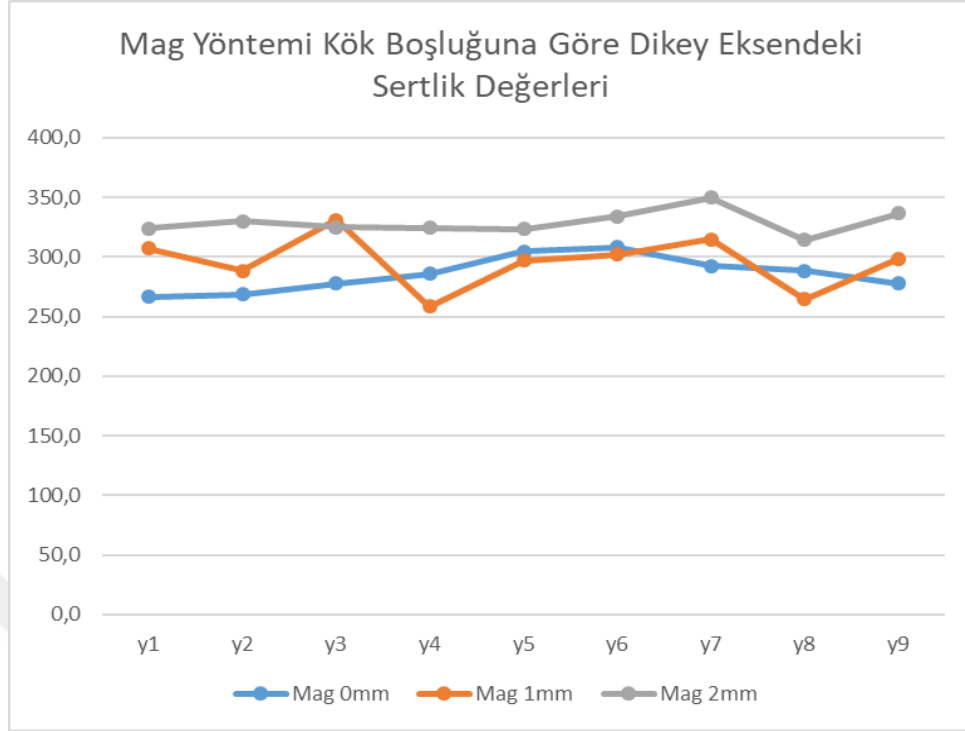
Şekil 4.25. Dikey ekseninde 1mm kök boşluğu için sertlik değerleri



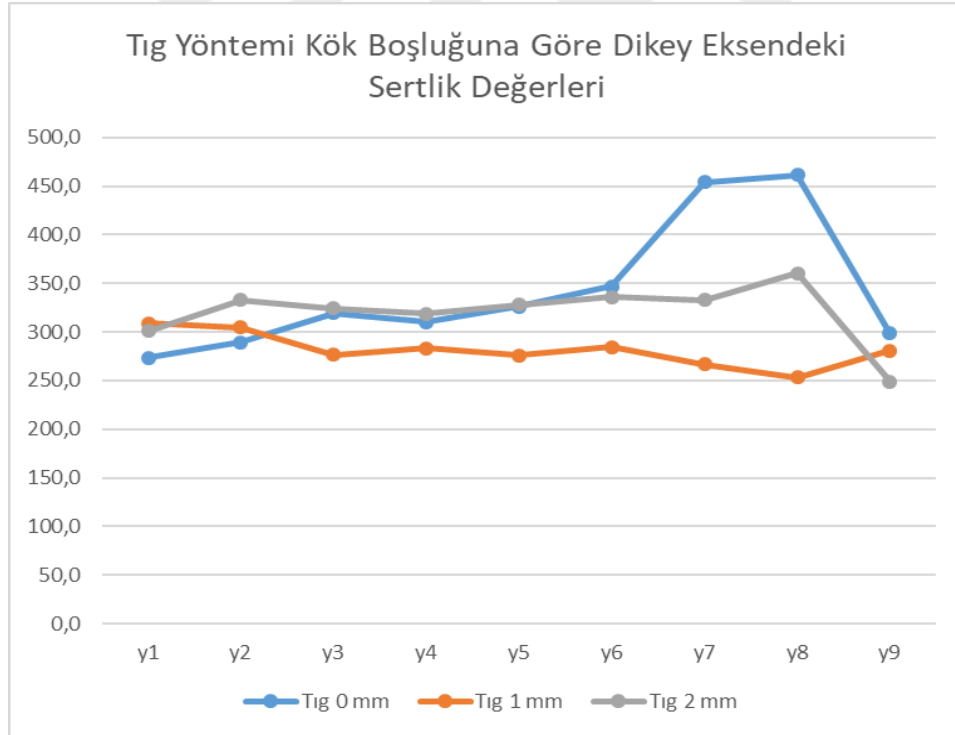
Şekil 4.26 Dikey ekseninde 2mm kök boşluğu için sertlik değerleri



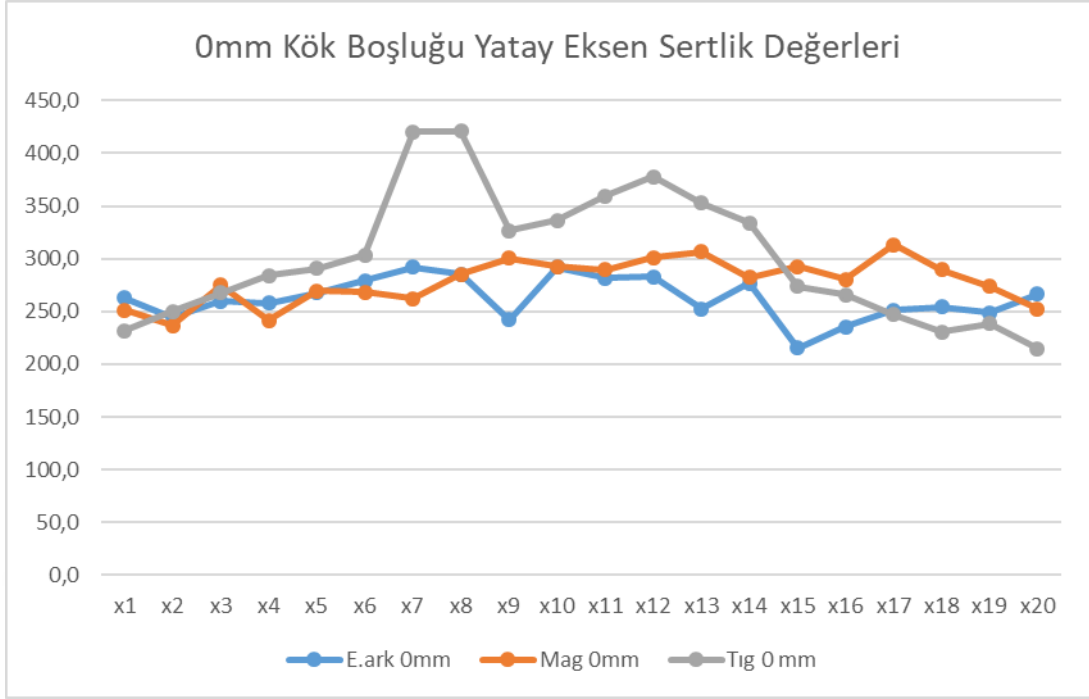
Şekil 4.27. Dikey ekseninde elektrik ark kaynağı için kök boşluğuna göre sertlik değerleri



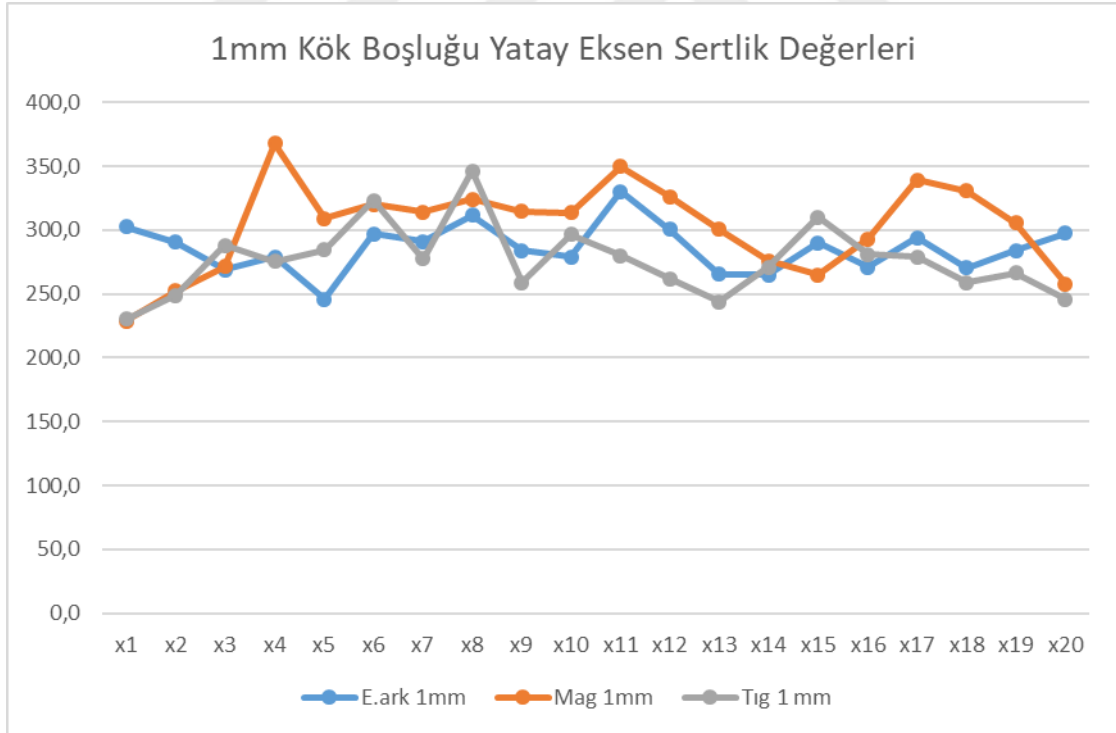
Şekil 4.28. Dikey ekseninde MAG yöntemi için sertlik kök boşluğuna göre değerleri



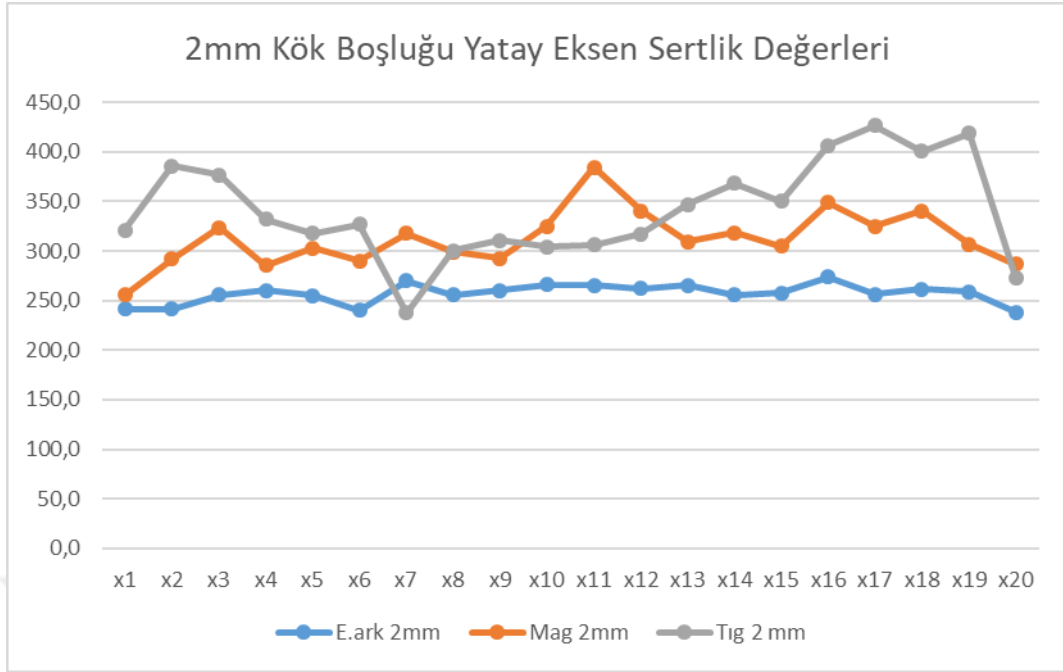
Şekil 4.29. Dikey ekseninde TIG yöntemi için sertlik kök boşluğuna göre değerleri



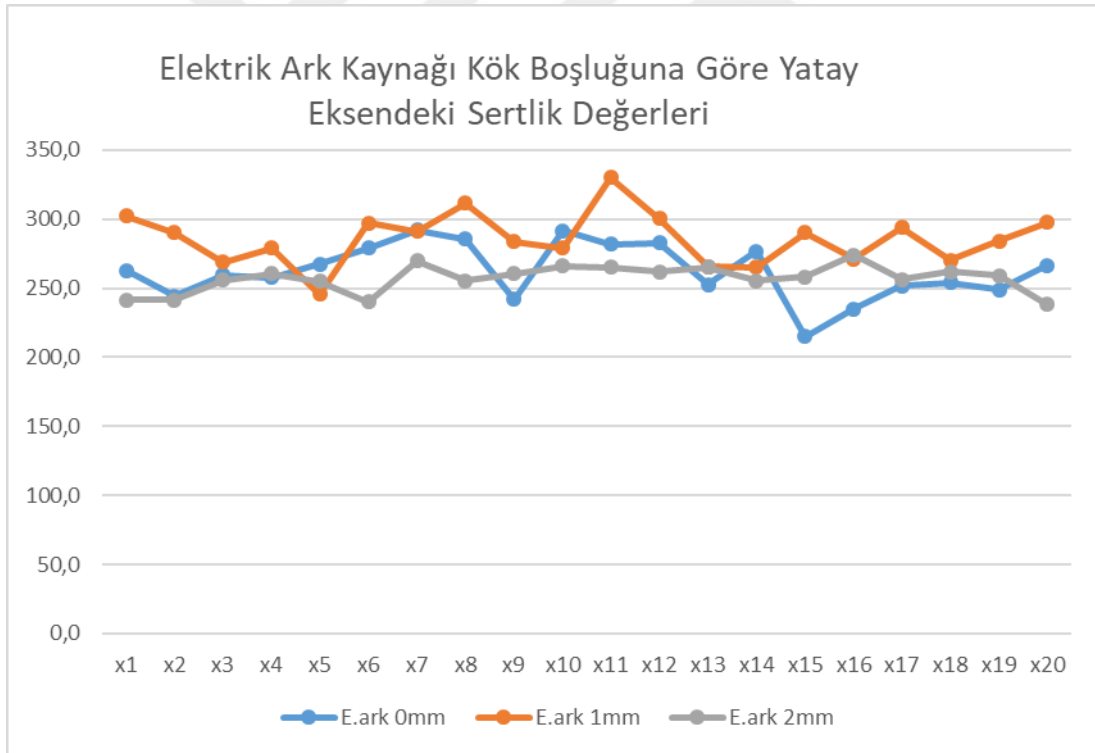
Şekil 4.30. Yatay ekseninde 0mm kök boşluğu için sertlik değerleri



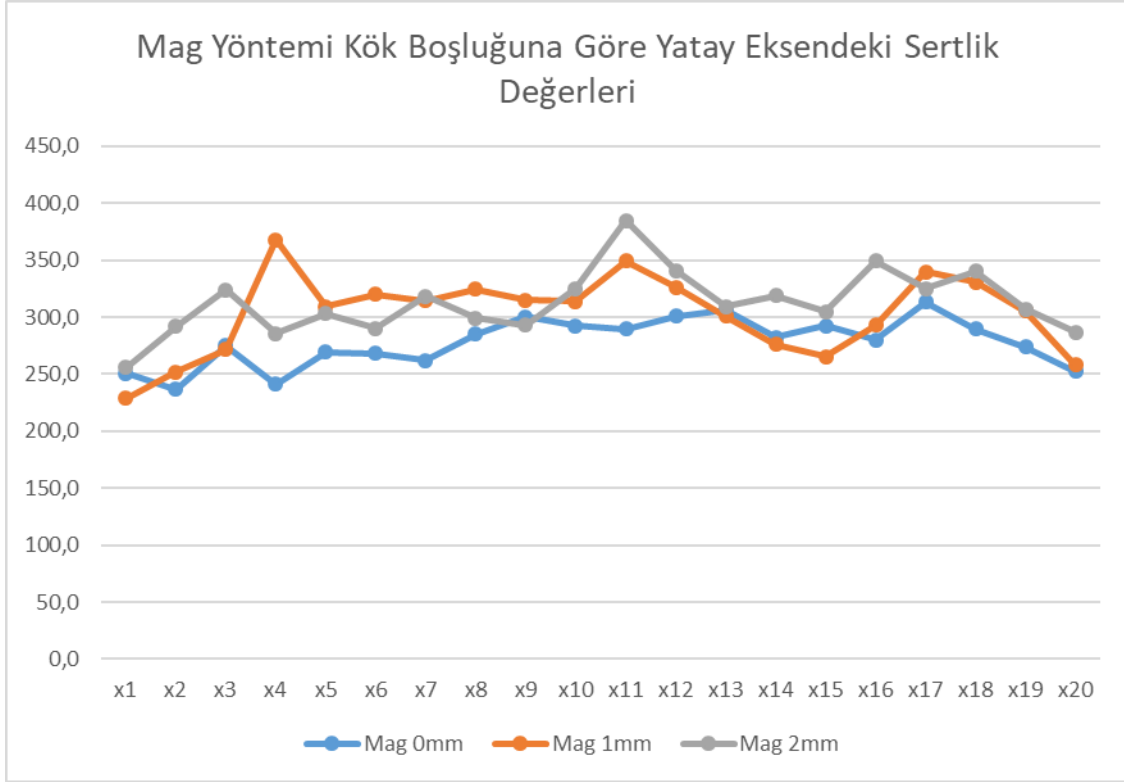
Şekil 4.31. Yatay ekseninde 1mm kök boşluğu için sertlik değerleri



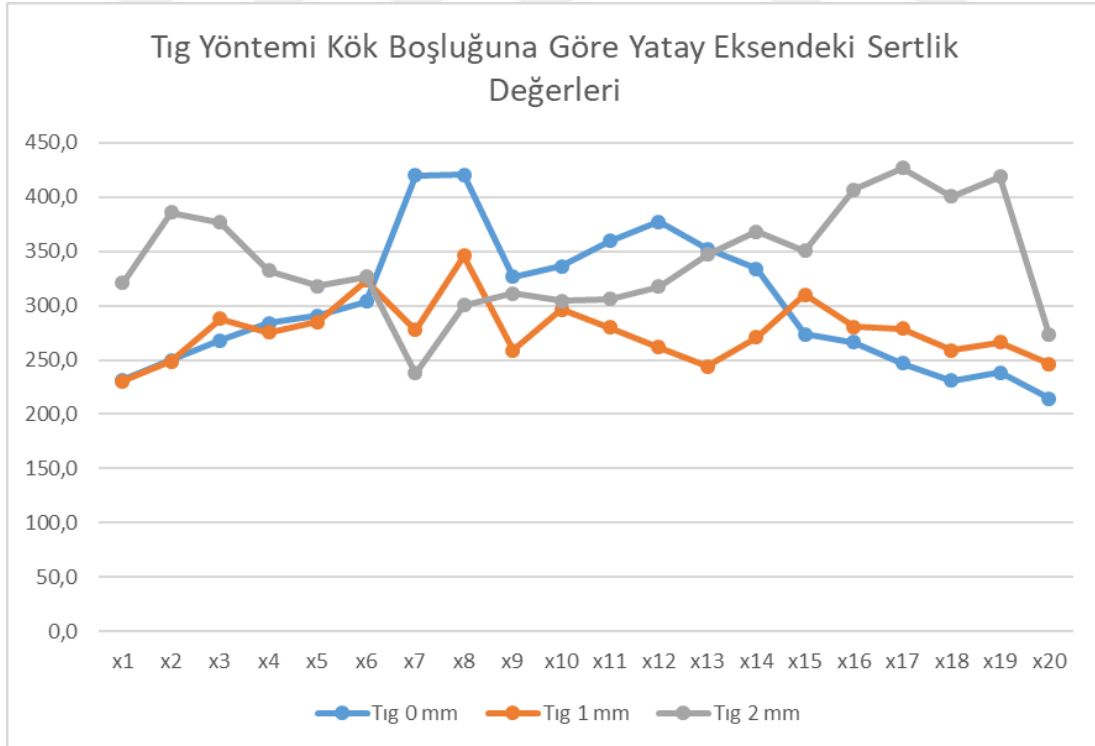
Şekil 4.32. Yatay eksen de 2mm kök boşluğu için sertlik değerleri



Şekil 4.33. Dikey eksen de elektrik ark kaynağı için kök boşluğuna göre sertlik değerleri



Şekil 4.34. Dikey ekseninde mag yöntemi için kök boşluğuna göre sertlik değerleri



Şekil 4.35. Dikey ekseninde tığ yöntemi için kök boşluğuna göre sertlik değerleri

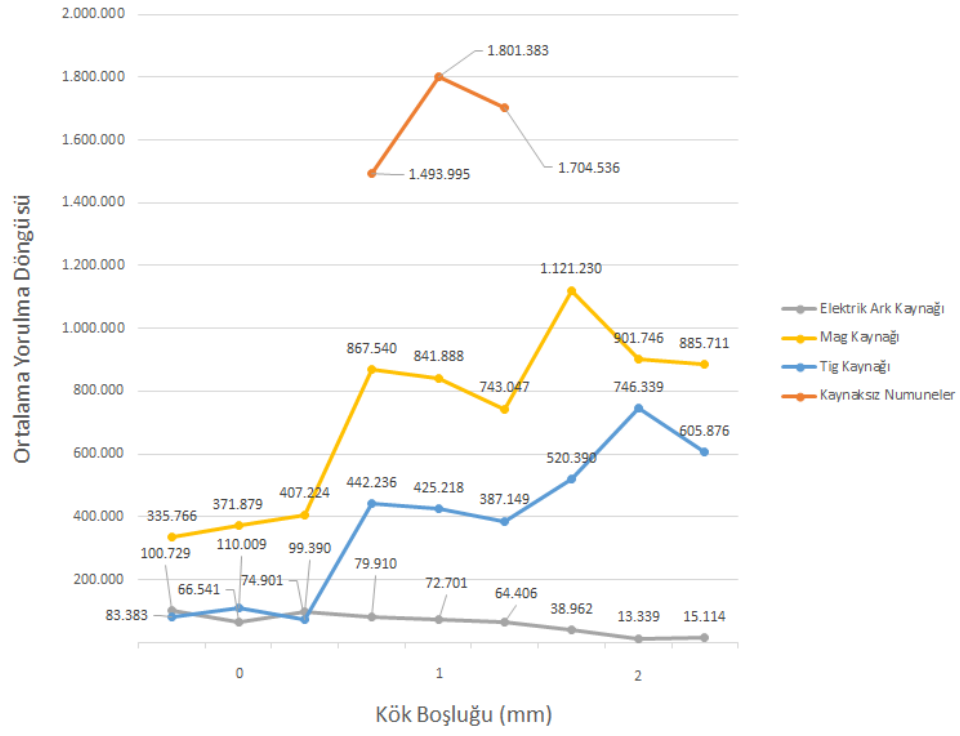
4.3. Yorulma Deneyleri ve Sonuçları

Farklı kaynak tipleri ve yöntemleriyle birleştirilen numunelerin yorulma dayanımlarının tespiti için dönel eğmeli yorulma cihazı aracılığıyla testler uygulanmıştır. Testler esnasında numunelere uygulanan gerilme genlikleri sabit tutulmuştur. Yorulma testlerinin döngü sayıları ve ortalamaları Çizelge 4.5’te verilmiştir.

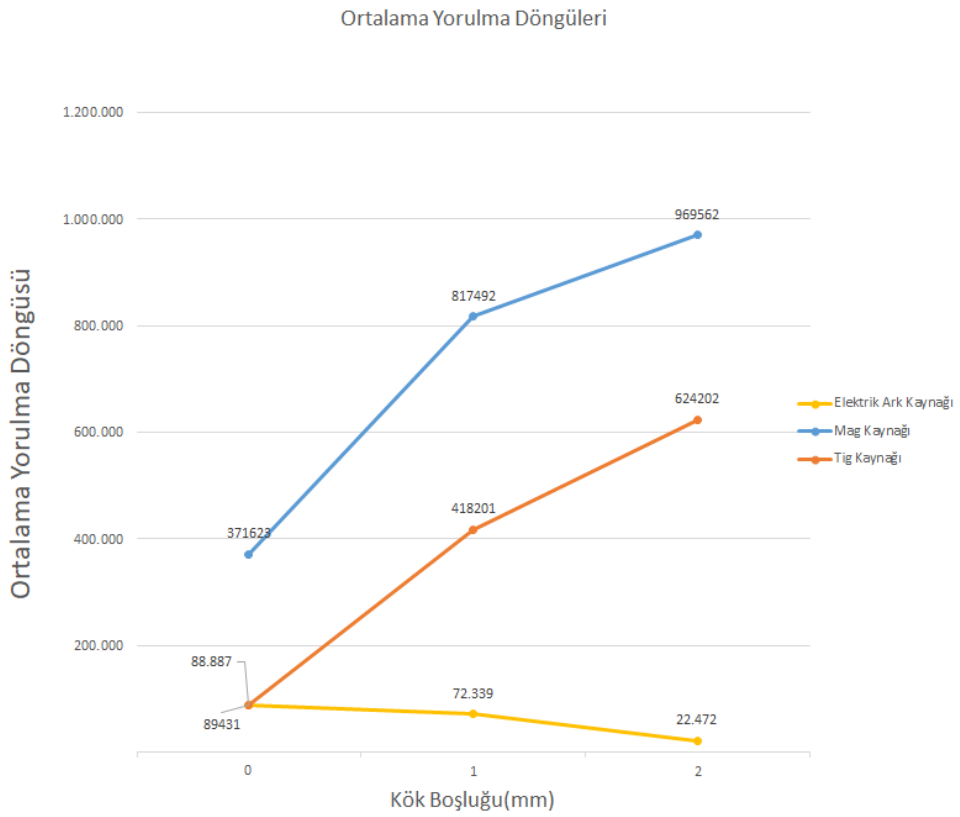
Çizelge 4.5.Farklı kaynak yöntemlerine ait yorulma testlerine ait sayısal veriler

Numune Tipi	Kök Boşluğu	Döngü Sayısı	Ortalama Döngü	Kök Boşluğu	Döngü Sayısı	Ortalama Döngü	Kök Boşluğu	Döngü Sayısı	Ortalama Döngü
Kaynaksız Numuneler								1.493.995	1.666.638
								1.704.536	
								1.801.383	
Elektrik Ark Kaynağı	0	100.729	88.887	1	79.910	72.339	2	38.962	22.472
		66.541			72.701			13.339	
		99.390			64.406			15.114	
Mag Kaynağı	0	335.766	371.623	1	867.540	817.492	2	1.121.230	969.562
		371.879			841.888			901.746	
		407.224			743.047			885.711	
Tig Kaynağı	0	83.383	89.431	1	442.236	418.201	2	520.390	624.202
		110.009			425.218			746.339	
		74.901			387.149			605.876	

Şekil 4.15’te farklı kaynak yöntemleri ve tipleri üzerinde gerçekleştirilmiş yorulma deneylerine yorulma döngülerine ait Şekil 4.16’da ise ortalamalara ait grafik verilmiştir. Bu grafikten yola çıkarak MAG ve TIG yöntemlerinde kök boşluğunun artması yorulma ömrünü uzatırken, elektrik ark kaynağı yönteminde olumsuz etkilemiştir.



Şekil 4.36. Farklı kaynak yöntemleri ve tiplerine göre yorulma döngüleri



Şekil 4.37. Farklı kaynak yöntemleri ve tiplerine göre ortalama yorulma döngüleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstride sıklıkla kullanılan ark kaynağı yöntemlerinden; elektrik ark kaynağı, MAG kaynağı ve TIG kaynağı yöntemleri kullanılarak, farklı kök boşluğu değerlerinde kaynaklanan malzemelerin dönel eğmeli yorulma dayanımlarına ilişkin sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

Çalışmada S355J2 çeliğinden numuneler belirtilen kaynak spesifikasyonlarında kaynaklanarak dönel eğmeli yorulma cihazı aracılığıyla yorulma dayanımları ve sertlik değerleri incelenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda mag kaynak yöntemiyle kaynaklanan numuneler ortalama en yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Bununla birlikte sertlik değerleri incelendiğinde TIG kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerde ortalama sertlik değeri en yüksektir. Elektrik ark kaynak yönteminde ise sertlik değerleri ortalaması en düşüktür.

Numuneler kaynak yöntemlerinden bağımsız olarak ara mesafe (kök boşluğu) üzerinden değerlendirilecek olursa; en yüksek ortalama yorulma dayanımını sağlayan yöntem yine mag yöntemi, en yüksek ortalama sertliği oluşturan TIG yöntemi iken, en düşük ortalama sertlik değerleri Elektrik ark kaynağı yöntemine aittir

Bu bilgiler göz önünde bulundurularak deneylere tabii tutulan kaynak yöntemleri ve ara boşluk parametreleri incelendiğinde en iyi yorulma dayanımı değerleri MAG kaynak yöntemi ile 2 milimetre ara boşluk mesafesinde elde edilmiştir.

Çalışmada elektrik ark kaynağı yöntemi dışındaki TIG ve MAG kaynak yöntemlerinde kök boşluğunun artması yorulma dayanımını olumlu yönde etkilerken, elektrik ark kaynağı yönteminde olumsuz olarak etkilemiştir. Benzer şekilde makro incelemelerde dolgu metali başka bir deyişle kaynak metali alanının artmasıyla yorulma dayanımının da paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Dönel eğmeli yorulma testi dışında da bu yöntemlerin farklı yorulma tiplerinde incelenmesi, numune sayılarının artırılması, değişken gerilme genlikleri altında incelenmesi, başka kaynak yöntemlerinin denenmesi,

kaynak sonrası ve öncesi ısıt işlemlerin incelenmesi, koruyucu gaz karışımları ve farklı dolgu malzemelerinin kullanılması konuyla ilgili verileri derinleştirecektir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*, Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü.
- Anık, S. , Vural, M. (1996) *Gazaltı Ark Kaynağı*, Gedik Eğitim Vakfı.
- Antolovich, S.D., Saxena, A., (1996). *Fatigue failures*, Metals Handbook; 9th edition Volume11: Failure analysis and prevention, American Society for Metals.
- Budynas, R.G, Nisbett J.K. (2011) *Shigley's Mechanical Engineering Design* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Cürgül, İ. (2005), *Makina Elemanları ve Çözümlü Problemleri Cilt 1*. Birsen Yayınevi.
- Dieter, E.G. (1988). *Mechanical Metallurg*, Mc Grow Hill Book Co., UK, 3-69, 375-471
- DIN 15085, (1996) *Steel Structures*, Deutsches Institut für Normung.
- DVS 1612, (2014). *Auslegung und Dauerfestigkeitsanalyse von Stahlschweißverbindungenim Schienenfahrzeugbau*, Deutscher Verbandfür Schweissen Und Verwandte Verfahren E.V.
- Ekberg, A., (2007). *Uniaxial High Cycle Fatigue*, Program of Solid and Fluid Mechanics, University of Chalmers.
- Eryürek, B,İ.(2007). *Kaynak Teknolojisi, Gazaltı Ark Kaynağı*, 2, 47-120, Askaynak Yayını.
- Findley, W. N. (1959). *A Theory For The Effect Of Mean Stress On Fatigue Of Metal Under Combined Torsion And Axial Load Or Bending*. Journal of Engineering for Industry, 81, pp.301-06
- Güven F., Rende H., (2019). *Kaynaklı Bağlantıların Tasarımlarında Güncel Yaklaşımlar*, XI. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi.
- H. Neuber. , (1985), *Kerbspannungslehre – Theorie der Spannungskonzentration*. 3rd ed. Verlag (Berlin): Genaue Berechnung der Festigkeit Springer.
- Hobbacher A. , (2007), *Recommendations for fatigue design of welded joint and components*. IIW dokument XIII-2151-07/XV-1254-07
- Hobbacher, A.F,(2009). *The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded jointsand components – A comprehensive code recently updated*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.04.002>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Hobbacher, A. & Kassner, M., (2012). *On Relation Between Fatigue Properties of Welded Joints*. Welding in the World, 56 (11/12).
- ISO 1143, (2021). *Metallic materials- Rotating bar bending fatigue testing*, International Standards.
- Kaluç, E. (2004), *Kaynak Teknolojisi El Kitabı Cilt 1*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- Kara, R. , Yıldırım, G., Çolak, F. ,Tinas, M. (2017). *TIG ve Elektrik Ark Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. El-Cezeri, 4 (2) , 274-281. DOI: 10.31202/ecjse.318221
- Karadeniz, E. Ozsarac, U. Yıldız, C. (2007). *The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes*. Material Design, 28: 649-56.
- Kaya, F. (2010). *Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Çelik Malzemelerin Numerik Olarak Modellenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 80 s. (yayınlanmamış).
- Komaç, E. (2009), *Askaynak Teknik Eğitim El Kitabı*, Eczacıbaşı.
- Konez, O. (2019). *Y25 Boji Şasisinin Statik Analizi ve Yorulma Bakımından İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 114 s. (yayınlanmamış).
- Lewandowski, J. , Rozumek D. (2016). *Cracks growth in S355 steel under cyclic bending with fillet welded joint, Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 86 (2016) 342–350, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.09.003>
- Lewei T., Lichao N., Zhenzhen R. , X.L. Zhao , *Experimental investigation on fatigue behavior of butt-welded high-strength steel plates*. Thin-Walled Structures 165 (2021) 107956
- Long, X. , Khanna, SK. (2007). *Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet*. Int J Fatigue 2007; 29: 879–886, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2006.08.003
- Magudeeswaran G., Balasubramanian V. , Madhusudhan Reddy G.(2008). *Effect Of Welding Processes And Consumables On High Cycle Fatigue Life Of High Strength, Quenched And Tempered Steel Joints*” Materials and Design 29 1821–1827, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.006>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Özden, R.C., (2020). *Alaşımlı Yay Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Kriyojenik İşlemin Etkisi, (Doktora Tezi)*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 74s.
- Pang, J. C. , Li, S. X. , Wang, Z. G., Zhang. F., (2013), General relation between tensile strength and fatigue strenght of metallic materials, *Materials Science Engineering A*, 546, 331-341.DOI:10.1016/j.msea.2012.11.103
- Radaj, D. , Sonsino, CM, Fricke, W. , (2006), *Fatigue assessment of welded joints by local approachesm*, 2nd ed. Woodhead Publishing; ps.660.
- Ronald, H.J, (1993). *Welding of Carbon Steels”, Welding Brazing and Soldering*, ASTM Handbook, 6:645-664.
- R.P.Skelton, (1982). *Low Cycle Fatigue and Life Prediction*, ASTMSTP770, ,pp. 337–381.
- Sabırlı, S. (2012).*Bir Raylı Taşıt Bogisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yorulma Analizi, (Yüksek Lisans Tezi)*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 75 s. (yayınlanmamış).
- Soy U, Iyibilgin O. , Findik F. , Oz C. , Kıyan Y. (2011). *Determination Of Welding Parameters For Shielded Metal Arc Welding* Scientific Research and Essays, Vol. 6(15), pp. 3153-3160, 11
- Soy U (2011). *Comparison of steels via SMAW and MIG welding methods under industrial loads*, *Steel and Composite Structures*,11(3): 225-232, <https://doi.org/10.12989/scs.2011.11.3.225>
- Şık A. (2004). *Mıg/Mag metodu ile kaynak yapılan yapı çeliği (st37-2) levhaların eğme yorulması gerilmesine çeşitli aktif gazlarının etkisi*. Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi Sayı:15, s.45-57
- TS EN ISO 9692-2. (2004). *Kaynak ve benzer işlemler - Kaynak ağzı hazırlığı - bölüm 2: Çeliklerin tozaltı ark kaynağı*, TSE.
- TS EN ISO 5817, (2007). *Kaynak - Çelik, nikel, titanyum ve alaşımlarında ergitme kaynaklı (demet kaynağı hariç) birleştirmeler - Kusurlar için kalite seviyeleri*, TSE.
- TS EN ISO 9692-1. (2014). *Kaynak ve benzer işlemler - Kaynak ağzı hazırlığı için tavsiyeler - Bölüm 1: Çeliklerin elle metal ark kaynağı, gaz korumalı metal ark kaynağı, gaz kaynağı, TIG kaynağı ve demet kaynağı*, TSE.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Tülbentçi, K. (1988). *Eriyen Elektrod İle Gazaltı Kaynağında (MIG/MAG) Kaynak Parametrelerinin Seçimi*, Kaynak Dünyası Gedik Holding A.Ş.

Tülbentçi, K. (1998), *MIG-MAG Kaynak Yöntemi*, Arctech.

Wilson, W.M.(1983). *Welding and Brazing*, Metals Handbook 6th, American Society for Metals, Ohio, 291-305

X.J. Yan. , D.Z. Yang, M. Qi. (2006). *Rotating–bending fatigue of a laser-welded superelasticNiTi alloy wire*. Materials Characterization 57. 58-63

Xiao, Z.G., Chen, T. , Zhao X.L. (2012). *Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads*, Int. J. Fatigue 38 57–64