

KAYNAKLI BAĞLANTILARIN YORULMA DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kenan AYDOĞDU, Kenan GENEL

Özet – Tekrarlı yüklemelere maruz kaynaklı makine parçalarında ve/veya yapılarda oluşan hasarların başlıca nedeni yorulmadır. Hasar analizleri sonuçlarından, imal edilen çelik yapılarda yorulma çatlaklarının çoğu kez gerilme yığılmasının yüksek olduğu çentik etkisine sahip kaynak geometrilerinden başladığı anlaşılmıştır. Ayrıca, gerilme yığılmasının olduğu noktaların dışında, bağlantının yorulma özelliklerine etkileyen çok sayıda faktör bulunduğundan kaynak bağlantısı ana metale göre daha düşük yorulma dayanımına sahiptir. Artık çekme gerilmesinin büyüklüğü, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro-yapısal etkisi diğer önemli parametreleri oluşturmaktadır. Kaynak bağlantısının yorulma özelliklerinin iyileştirilmesi, ITAB'ın dayanımının toklukta düşüşe yol açmadan arttırılması, bağlantıdaki çekme artık gerilmesinin ve çentik etkisinin minimize edilmesiyle ilgili olduğu söylenebilir. Bu çalışma ark kaynağı ve gaz altı kaynağı ile birleştirilmiş kaynak bağlantılarının yorulma özelliklerini etkileyen faktörler ve yorulma ömrüne arttırmaya yönelik teknikler kısaca incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Kaynak bağlantısı, Yorulma ömrü, Artık Çekme Gerilmesi, Çatlak Başlangıcı

Abstract – Fatigue is a major cause of failure in welded machine parts and/or structure subjected to dynamic loading. It has been realised from result of failure analyses that fatigue cracks in fabricated steel structures often occur at welded joints where stress concentrations due to the joints geometry are relatively high. Moreover, since there is a number of factors affecting fatigue performance of welded joint, excluding stress concentrated point, welded joints have low fatigue strength with respect to base material. The magnitude of tensile residual stress, and effect of micro-structural of heat affected zone (HAZ) form other important parameters. It can be said that

K. Aydoğdu, K. Genel; SAÜ Müh.Fak. Makine Müh.Bl

the improvement of fatigue performance of welded joint is related to enhance of strength of HAZ with high toughness, minimisation of tensile residual stress and stress raiser effect in weld joint. In this study factors affecting fatigue performance of welded joint with metal arc weld process including gas metal arc welding, and fatigue life improvement techniques were investigated briefly.

Key Words – Yorulma Dayanımı, Kaynaklı Bağlantı, Artık İç Gerilme,

I.GİRİŞ

Bilindiği gibi kaynakla birleştirme yöntemi makine imalat endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptir. Makine parçalarının önemli oranda değişken zorlamalar altında çalışması nedeniyle kaynaklı bağlantılarda her zaman için yorulma hasarı riski taşır [1]. Kaynak birleştirmenin yüksek ısı ve/veya basınç altında gerçekleştirilmesi ve kaynak dikişinde oluşturulan sıcaklığın malzemenin ergime sıcaklığının üzerinde olması bağlantıda ısıl gerilmelere yol açmakta, ayrıca ısının tesiri altında kalan bölgenin metalurjik yapısının ana malzemeye göre farklılık göstermesi dinamik zorlamalar altında çalışan parçada yorulma çatlak başlangıç ve ilerleme süresini kısaltmaktadır. Bunun sonucunda kaynakla birleştirilmiş bağlantının yorulma ömrü her zaman ana metale göre daha kısadır. Diğer taraftan çatlak başlangıç ve ilerleme safhasını geciktiren etkiye sahip bütün işlemler bağlantının yorulma dayanımını arttıracaktır. Ancak kaynak bağlantısının yük taşıma kabiliyetini, dolayısıyla da yorulma dayanımını artırma amacıyla öne sürülebilecek iyileştirme tekniklerinin kendi arasında ters ilişki içerisinde bulunması öne sürülebilecek genel bir yaklaşım zorlaştırmaktadır [2]. Örneğin, parçada kaynak ağzının açılması yük taşıma kabiliyetini arttırması beklenirken kaynak banyosunun aşırı fazla tutulması, yüksek ısı girdisinin bir sonucu olarak kaynakla birleştirilmiş parçada/yapıda çekme türünde ısıl gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu tür gerilmeler ise sadece

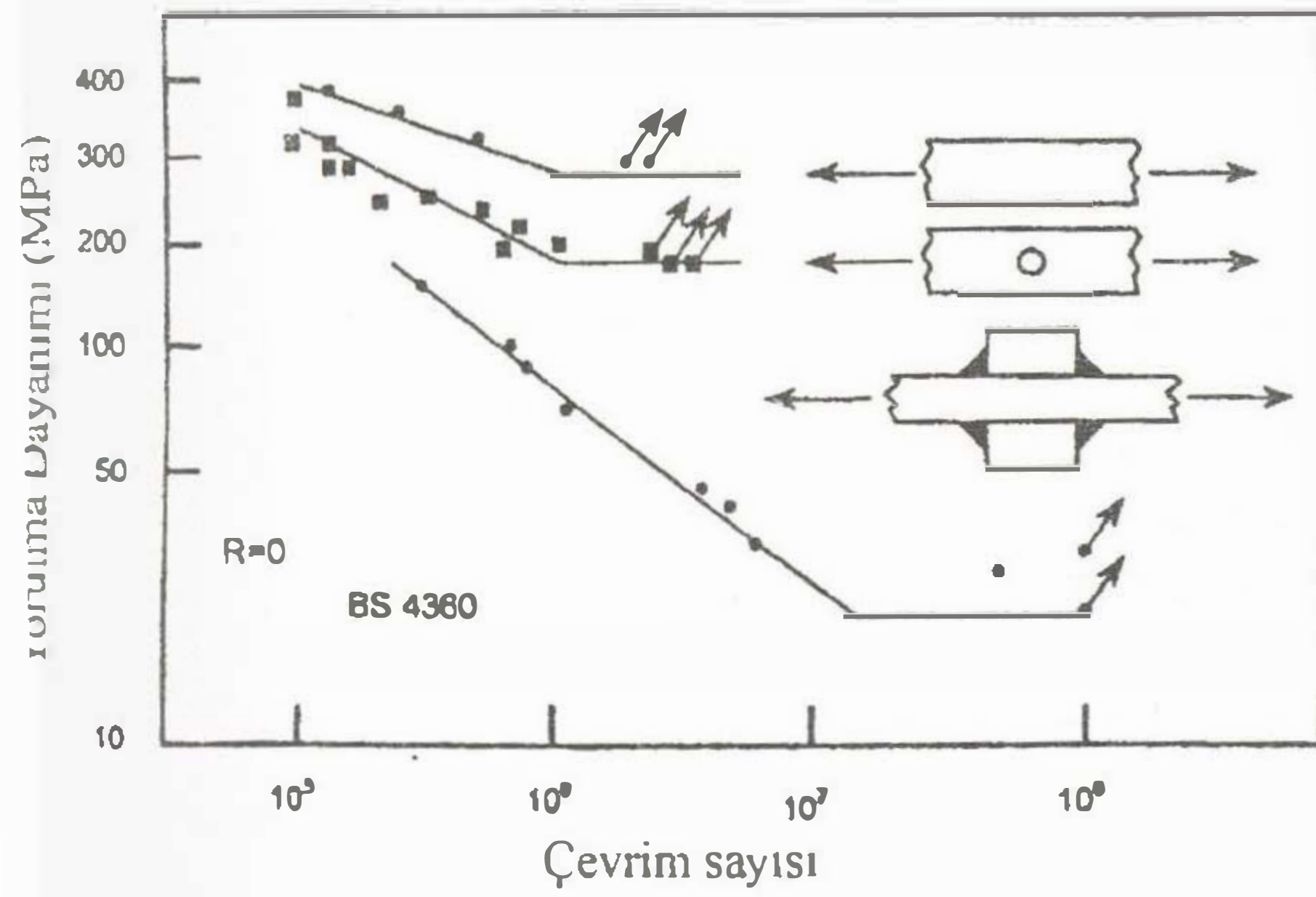
yorulma davranışı için, aynı zamanda statik zorlamalara maruz kalacak konstrüksiyonlarda dahi istenmemektedir [2].

Bu çalışmada kaynakla birleştirilmiş bağlantının yorulma dayanımına etkileyen değişkenler sistematik olarak ele alınmaya çalışılmış ve bağlantının yorulma davranışını iyileştirmeye yönelik metotlar üzerinde durulmuştur.

II. KAYNAKLI BAĞLANTILARIN YORULMA DAVRANIŞI

Sanayileşmiş ülkelerde üretilen hadde mamülü çeliklerin % 50 varan kısmı kaynak edilebilir şekilde üretilmekte ve büyük bir çoğunluğu kaynaklı konstrüksiyonlarda kullanılmaktadır. Çekme dayanımı 340 ile 640 MPa arasında değişen bu çelikler kullanılarak imal edilmiş kaynaklı parçaların dinamik yükler altındaki davranışları ayrıca önem kazanmaktadır [3]. Ancak kaynaklı parçalarla yapılan yorulma deneylerinden bağlantının yorulma dayanımının, ana metale göre oldukça düşük değerler verdiği görülmüştür [1,2,3].

Şekil 1'de verilen Wöhler eğrisi kaynağın parçanın yorulma davranışını olan etkisini göstermektedir [4]. Şekil incelendiğinde, iş parçasına taşıyabileceği kuvvet değiştirmeyecek şekilde kaynak yapılmasına rağmen, kaynaklanmış haldeki parçanın yorulma dayanımı, aynı kesitteki parçaya göre çok daha düşüktür. Yorulma dayanımındaki düşüş miktarı ortasında delikli parçaya göre de fazladır.



Şekil 1 Kaynağın parçanın yorulma davranışına olan etkisi [4]

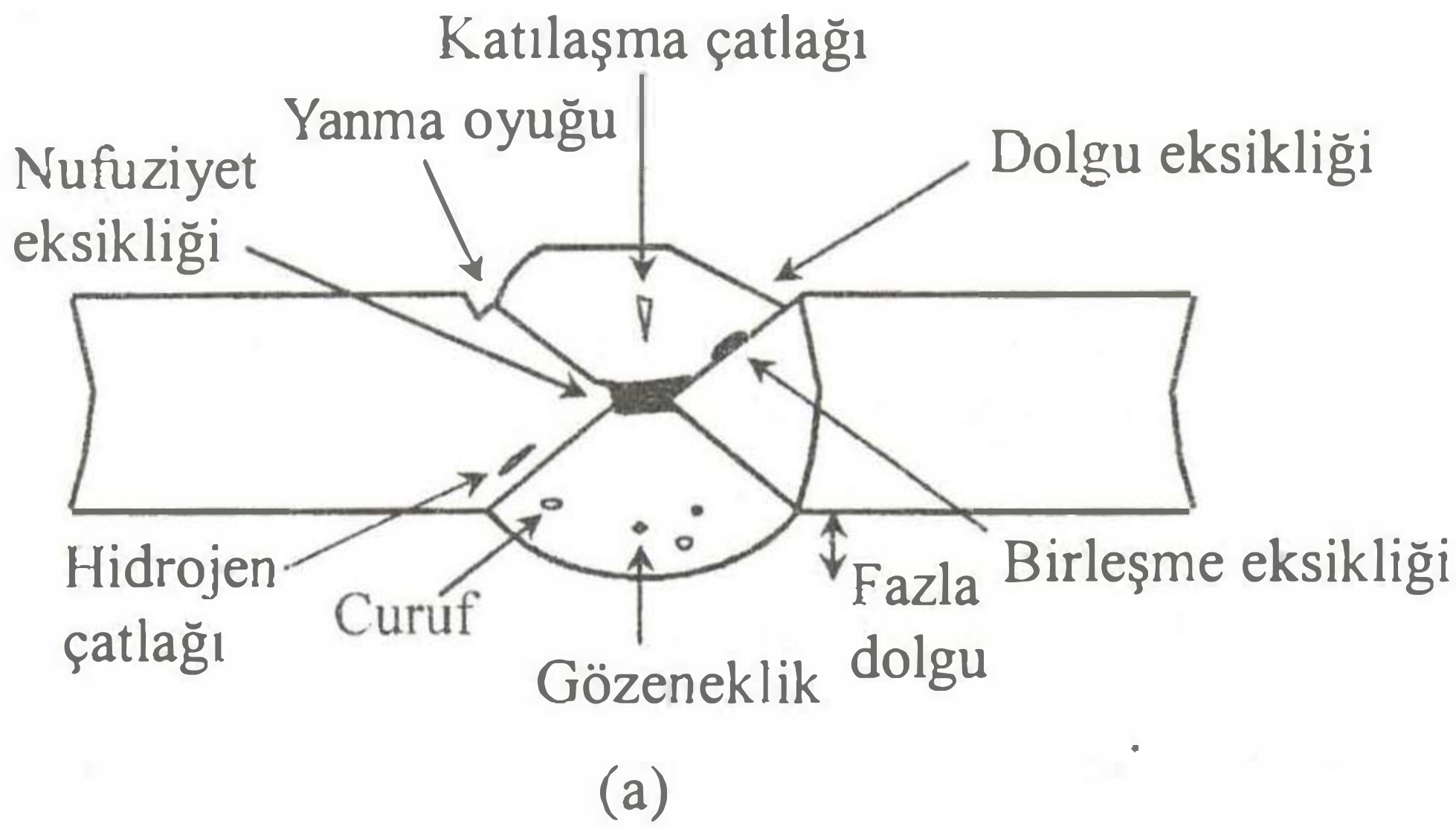
Dinamik yükler altında kaynaklı parçanın düşük yorulma dayanımını sergilemiş olması sadece bağlantının çentik etkisiyle açıklanamamaktadır. Kaynak bağlantısının metalurjik olarak, iç yapısının homojen olmayan bölgelerden oluşması, bağlantının çekme iç gerilmeleri ve kaynak hataları ve/veya diğer geometrik süreksizlikler göstermesi parçanın yorulma davranışını üzerinde önemli bir etki yapmaktadır [3]. Yüzeyi yeterince parlatılmış çeliklerde toplam ömrün neredeyse % 90'ını yorulma çatlak başlangıcında geçtiği dikkate alınır [1],

kaynaklı birleştirmelerde oluşan ve makro büyüklükte değerlendirilebilecek hataların önemi daha fazla ön plana çıkmaktadır. Gerçekleştirilen birleştirme mümkün mertebe az ve küçük hata içerdiği olmasına rağmen, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak tanımlanan ve büyük ölçüde içyapı değişimine uğranmış, kaynak dikişine komşu ana metalin iri taneli ve gevrek karakterde olması, (özellikle çelik malzemelerde) değişken zorlamalar etkisi altındaki parçada potansiyel yorulma çatlak başlangıç sahalarını oluşturabilmektedir [5-7]. Ayrıca metalin kendisinden, ve daha çok koruyucu gaz yada elektrod örtüsündeki nemden kaynaklanan ergimiş kaynak banyosundaki hidrojen, ITAB bölgesinde iç gerilmelerin etkisiyle çatlak oluşturabilmektedir [6,7]. Böylece kaynaklı parçanın yorulma olayında çatlak oluşum safhası aşılmış olmaktadır. Hiç şüphesiz çatlak oluşumu kaynak dikişinin sertliği, gelişen iç gerilmenin büyüklüğü ve hidrojen miktarına bağlıdır [6].

II.1 Kaynak Hataları ve Diğer Çentik Etkisine Sahip Geometrik Süreksizlikler

Yapılan araştırmalar sonunda yorulma çatlaklarının çoğunlukla yerel gerilme yığılmasına yol açan kaynak hataları veya kuvvet akış çizgilerinin düzgün yönlendirilmesini etkileyen geometrik süreksizlikler olduğu görülmüştür [1,3,4,]. Gerekli önlemler alınmasına rağmen, genellikle bütün kaynaklı birleştirmeler farklı büyüklüklerde de olsa hata içermektedir. Kaynak prosesine ait değişkenlerin uygun seçilmemesi doğrudan yada dolaylı olarak bağlantıda kaynak hatalarına neden olmaktadır. Bu hatalar tek boyutlu ve düzlemsel olabileceği gibi farklı geometride hacimsel süreksizliklerden de oluşabilmektedir. Şekil 2'de şematik olarak kaynak dikişi ve etrafında başlıca oluşabilecek kaynak hataları şematik olarak verilmiştir [8]. Düzlemsel hata olarak göz önüne alabileceğimiz, hidrojen çatlakları, tabakalı yırtılma, nüfuziyet eksikliği katılma çatlakları ve katışkılar daha küçük olmalarına rağmen, yorulma çatlak başlangıç noktalarını oluşturabilmektedirler. Hatanın parçadaki konumu, büyüklüğü ve zorlanma altındaki kuvvet akış çizgilerinin yönlendirilmesi bağlantıda doğacak çentik etkisinin büyüklüğünü belirleyecektir (Şekil 3) [9]. Özellikle kaynak ağzı açılmış parçada birleşme hatası, burulme veya hidrojen çatlaklarının zorlanma doğrultusuyla açı yaparak konumlanmış olması burada doğuracağı gerilme yığılmasının yanında, ayrıca kayma gerilmesinin çekme eksenine ile açı yapan düzlemlerde değerinin artması ($\approx 45^\circ$ açılı düzlemde en büyük değerini alması) daha da önem arz etmektedir. Burada hata aşırı büyük olmasa bile, kayma gerilmesinin yüksek olması nedeniyle hata etrafında mikro düzeyde plastik şekil değişiminin etkisiyle yorulma çatlak başlangıcını önemli oranda hızlandıracaktır.

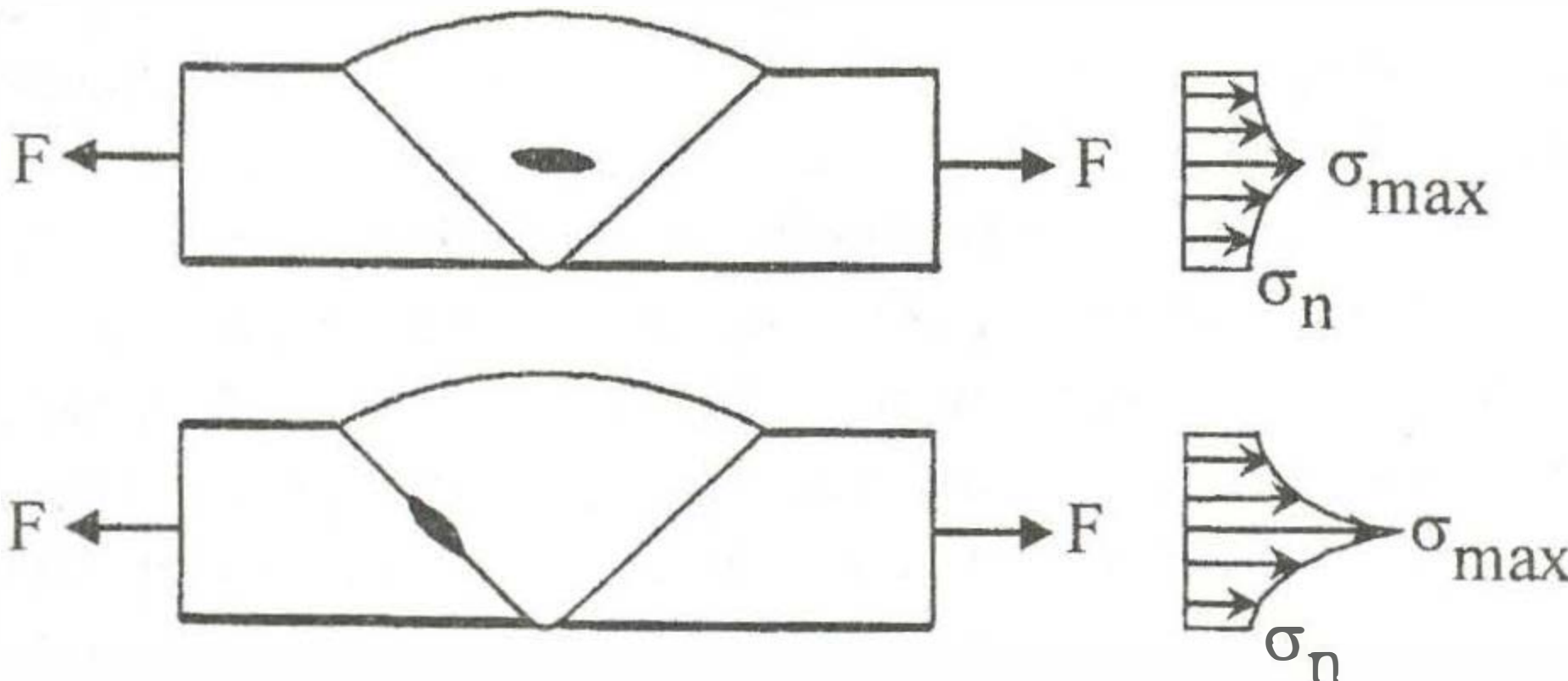
Kaynak dikişinden ana metale geçiş kısmında kuvvet akışını etkileyecek, farklı kalınlıktaki parçaların birleştirilmesi, aynı kalınlıktaki parçaların eksenlerinin çakışık olmaması (eksantrik bağlantı), kaynak dikişinde aşırı dolgu bırakılması, yanma oluğu gibi geometriler bağlantıda çentik etkisi yapacaktır. Kaynak bağlantısındaki eksantrikliğin (e), parça kalınlığına (t) oranı $e/t = 0,15$ olacak şekilde alından kaynaklanmış ve sağdaki parça üzerinden aksenal çekme yükü verilmiş olan bağlantıdaki gerilme dağılımı Şekil 4'de verilmiştir [10].



(a)

(b)

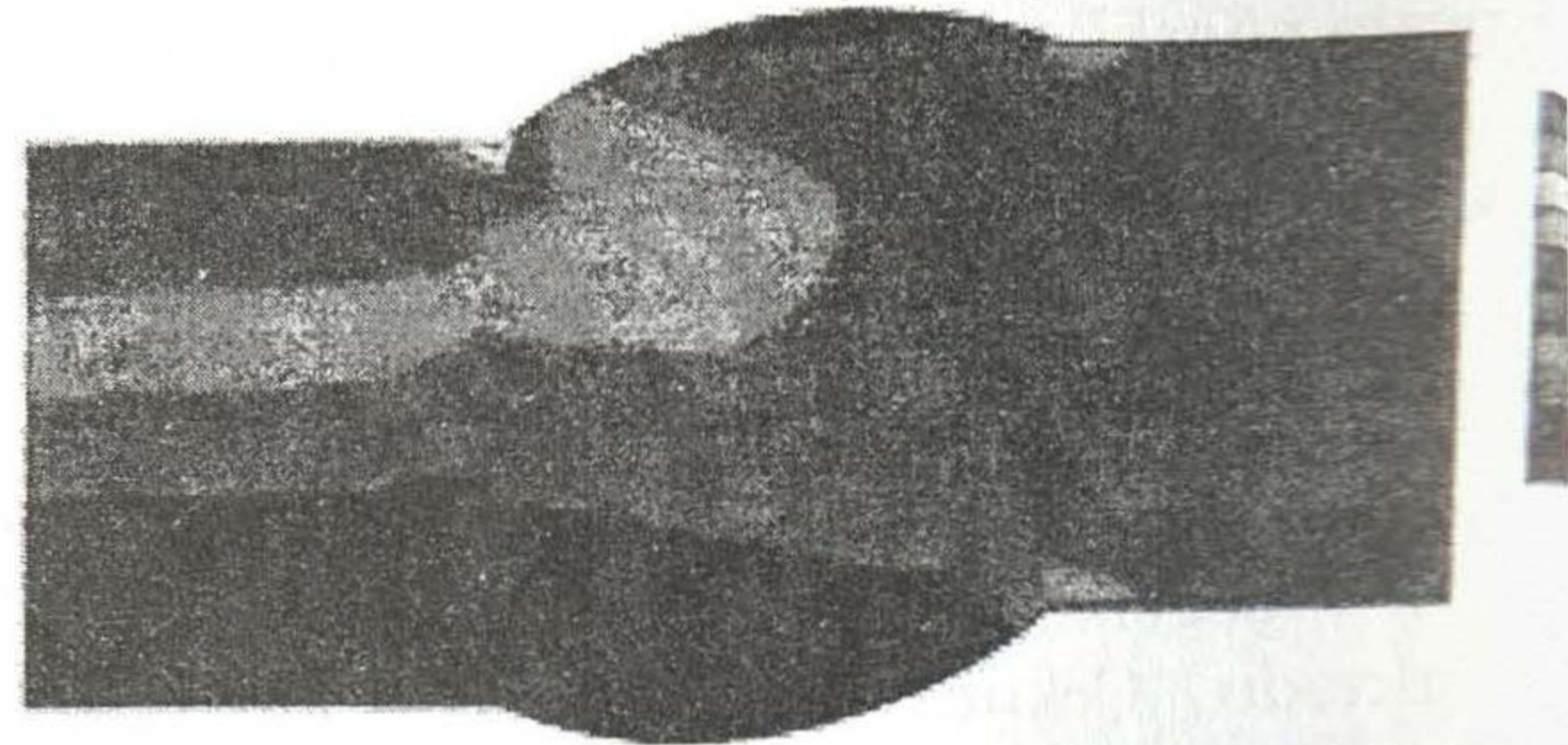
Şekil 2 Kaynak hataları ve gerilme yığılmasına yol açan diğer süreksizlikler [8]



Şekil 3 Kuvvet doğrultusunda ve çapraz konumdaki hatanın neden olduğu gerilme yığılması (şematik olarak) [9].

Bu gerilme analizi Pro Engineer programının bir alt modülü olan Pro/Mechanica programı kullanılarak yapılmıştır. Düzgün kaynaklanmış parça için nominal

gerilme değeri 166,6 MPa iken, şekilde de görüldüğü gibi soldaki parçanın kaynak eşik kısmındaki gerilme değeri 608,1 MPa'dır. Burada bağlantıdaki eşik açısını azaltarak bu açının azaltılması durumunda gerilme yığılması etkisi azalmaktadır [10].

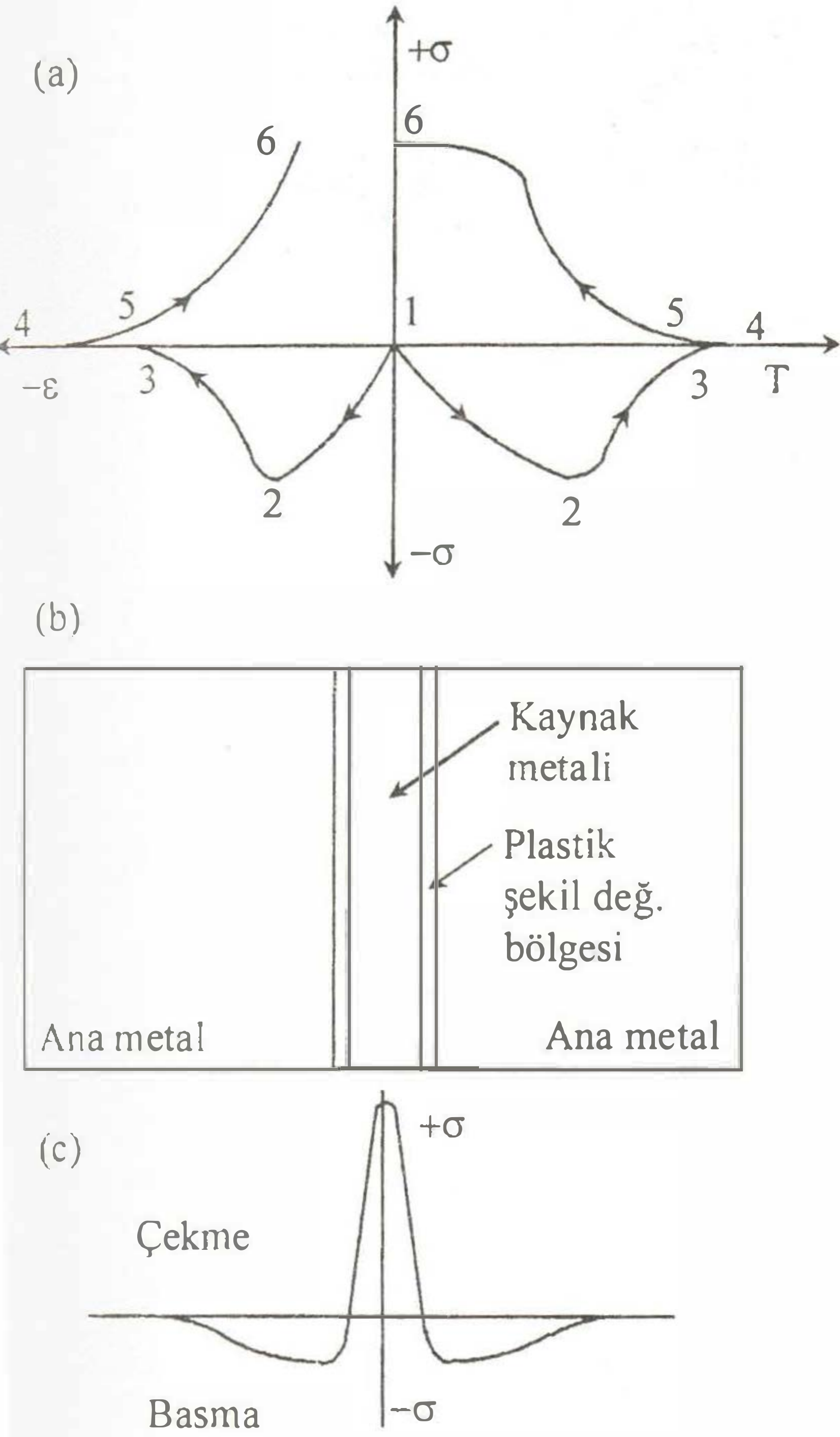


Şekil 4 Eksantrik olarak kaynaklanmış bağlantıdaki gerilme dağılımı [10]

II.2 Artık İç Gerilmelerin Oluşumu ve Yorulma Davranışına Etkisi

Gerilme sıcaklık ve şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak kaynak bölgesinin ısınma, erime, soğuma katılma sırasında oluşmaktadır. Çekme türündeki gerilmenin büyüklüğü parçaya uygulanan ısı ve metalin ısı iletim özelliği, malzemenin elastiklik modülü, akma sınırı, kaynak hızı, parçadaki şekil değişimi sınırlandırılması ve kaynak şekline bağlı olarak değişmektedir [9,11]. Ark ve MAG kaynağı kullanılan düşük karbonlu (% 0,14-0,19) çeliklerde yapılan gerilme ölçümlerinde kaynak dikişi üzerindeki çekme gerilmesinin 330-440 MPa arasında değiştiği görülmüştür [12,13]. Şekil 5'de artık gerilmenin oluşum safhaları sıcaklık ve şekil değiştirmedeki değişime bağlı olarak şematik olarak verilmiştir [14]. Kenarlarından hareketsizleştirilmiş iki metalin kaynağında, başlangıçta ısı iletim ısı genleşmeye yol açacaktır (Şekil 5'de 1). Sıcaklık yükselme ile birlikte (2) ergimiş metal gerilme taşıyamamakta ve böylece plastik şekil değiştirme sonucu gerilme sıfıra yaklaşmaktadır. Artan sıcaklıkla (3) ve 4) ısı genleşme yumuşama ve ergime işlemi gerçekleşecektir. Ergimiş bölgenin soğumaya başlamasıyla kaynak metalinde de katılma kendini göstermektedir (5). Katılma, ergimiş bölgeden düşük sıcaklıktaki bölgeye doğru olan hızlı soğuma ile büyük oranlı hacimsel büzülme neden olacaktır. Ancak kaynak eksenine boyunca sıcaklık, kaynak eksenine doğru doğrultudaki sıcaklıktan daha yüksek olması nedeniyle (ana metal üzerinden iletimle soğuma) kaynak eksenine boyunca hacimsel büzülme gecikmeli olarak sonuçlanmaya çalışacaktır. Ana metalin bu hareketi engellemesi kaynak dikişi üzerinde çekme türünde artık iç gerilmenin oluşmasına, sistemde mekanik denge gerektiren gelişen çekme gerilmesine karşılık ana metalde basınç gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 5'de 6). Çekme türünde gerilmenin kaynak dikişi üzerinde yer alması, bağlantı

yük taşıma kabiliyetine ve dolayısıyla da yorulma dayanımını azaltıcı yönde etki yapması nedeniyle bu gerilmenin büyüklüğü önemlidir. Artık iç gerilmeler yüksek çentik etkisine sahip noktalarda çok eksenli gerilme durumu oluşturması, bu noktada gevrek kırılma koşullarını hazırlamaktadır. Kaynak dikişinde özellikle ITAB bölgesinde tokluk değerinin düşmesi çatlak oluşumunu ve ilerleme hızını arttıracaktır [6, 7].



Şekil 5 (a) Kaynak sırasında sıcaklık, birim şekil değiştirme ve gerilme arasındaki ilişki (b-c) alın aynağında artık gerilmenin dağılımı [14]

Yüksek artık iç gerilme ve yüksek çentik etkine maruz noktalar hidrojen kırılması, gerilmeli korozyon ve erozyonlu yorulma hasarı için parçanın en zayıf noktalarını oluşturmaktadır. Korozyonlu yorulmanın erilmeli korozyondan farklı olarak, belirli ortam-malzeme çifti için değil de, korozyona duyarlı bütün metallerde kendini göstermesi nedeniyle gerilmeli korozyona göre daha fazla ön plana çıkmaktadır [15].

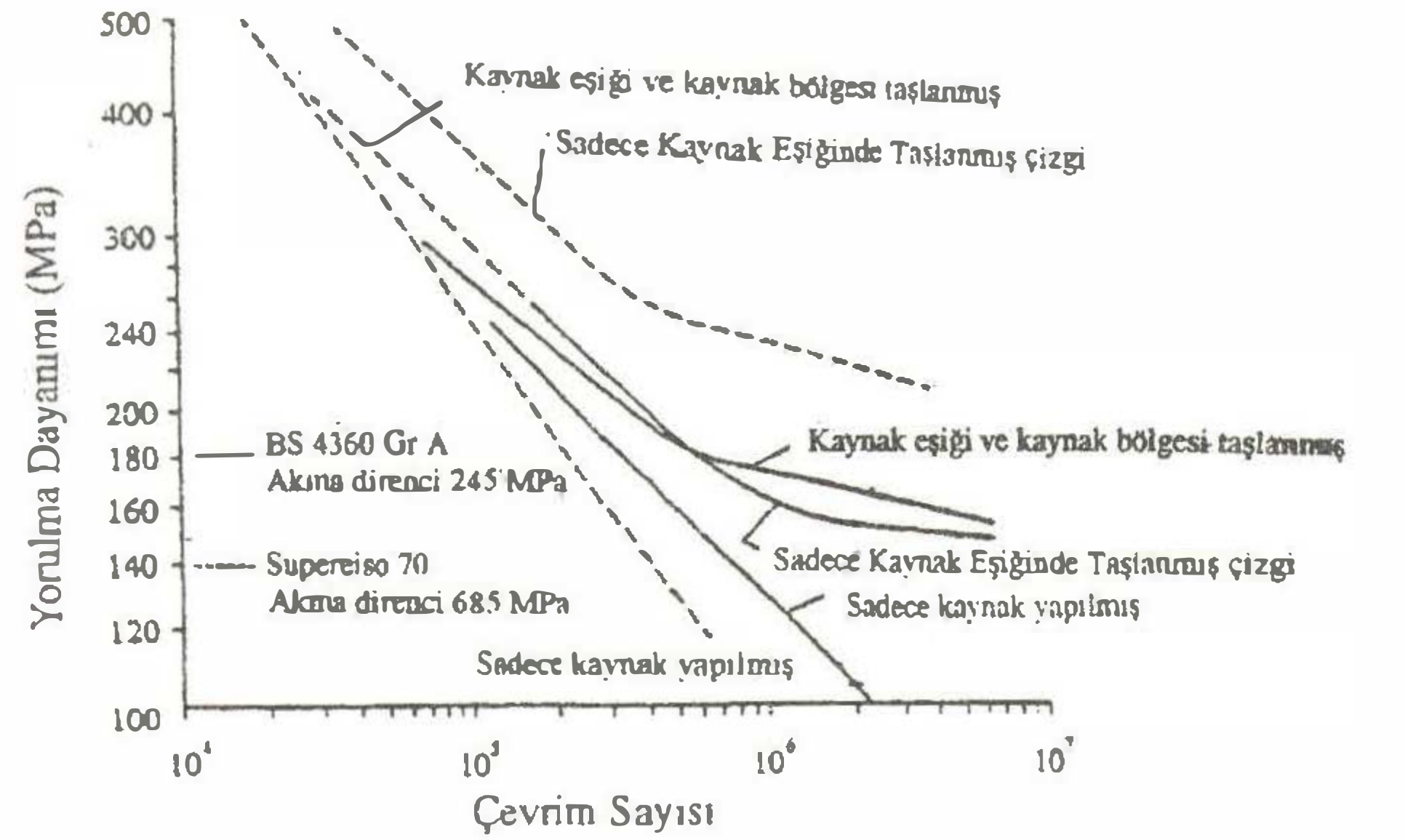
3.3 Kaynak Bağlantısının Yorulma Davranışını İyileştirmeye Yönelik Metotlar

Kaynak sonrası kaynak dikişindeki çapak ve diğer kusurların en az 1400 d/d dönme hızındaki taş ile temizlenmesi aynı zamanda dikişteki aşırı dolgu miktarının ve eşik açısının (parça yüzeyi ile dolgu düzlemi arasındaki açı) azaltılması sonucu bu bölgedeki gerilme yığılmasını azalmaktadır. Ancak ilave masraf anlamına gelen bu işlem uygulanırken malzeme yüzeyinde çatlak oluşumuna neden olabilecek bir iz bırakılmamalıdır [16].

Disk taşlama işleminin taşlama bölgesindeki farklılığa göre yorulma davranışına olan etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Sadece kaynak eşik taşlanması durumunda 2×10^6 çevrim sayısı için yorulma dayanımındaki iyileşme % 23 mertebesinde kalırken, kaynak dikiş yüzeyinin tamamen taşlanması durumunda artış % 35 kadar ulaşabilmektedir [16].

Kaynak eşik açısının artırılması durumunda bu noktadaki çentik etkisinin azalması beklenen bir sonuçtur. Alından kaynaklanmış ve eşik açısı 100 derece olan bir bağlantıda, eşik açısının 150 dereceye çıkartılması durumunda 2×10^6 çevrim sayısı için tespit edilen yorulma dayanımının iki kat arttığı görülmüştür [1].

Kaynak sonrası, TIG yada plazma kaynağı kullanılarak ana metal ile kaynak dikişi arasındaki geçiş profilinin daha düzgün olmasını sağlanacak şekilde uygulan yüksek ısı girdisiyle geçiş bölgesi yeniden ergitilir.

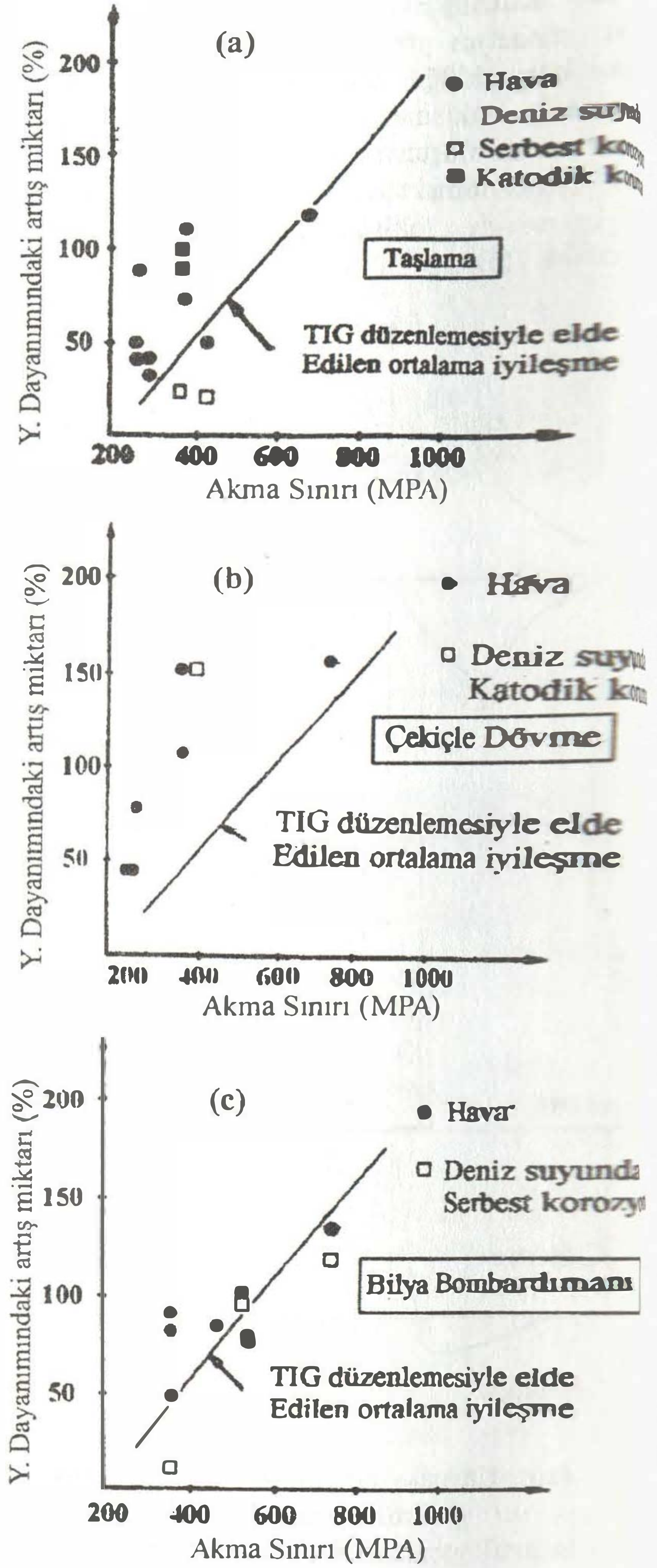


Şekil 6 Taşlama işleminin kaynak bağlantısının yorulma davranışına etkisi [16]

Böylece hem profilin çentik etkisi iyileştirilmiş olur, hem de burada bulunması muhtemel yanma oluğu, gözenek ve curuf gibi diğer kaynak hataları yok edilir. Şekil 7'de taşlama, çekiçle dövme ve bilya püskürtme işlemlerinin S-N eğrisinde 2×10^6 çevrim sayısı için belirlenen yorulma dayanımında sağladığı artış miktarı görülmektedir [16]. Şekil incelendiğinde her üç işlemin yorulma dayanımındaki sağladığı iyileşme akma sınırıyla orantılı olarak artmaktadır. Deniz suyunda katodik koruma şartlarında çekiçle dövme işleminin, taşlamaya

göre daha yüksek korozyonlu yorulma dayanımını sağladığı anlaşılmaktadır (Şekil 7a, b). Korozyon etkinin bulunmadığı hava şartlarında, çekiçle dövme yorulma dayanımında % 150'ye aşan iyileşme sağlamaktadır ki bu diğer iyi yöntemin sağladığı artıştan da yüksektir (Şekil 7 a-c).

Kaynak bağlantısındaki çekme artık gerilmesinin azaltılması, servis sırasında parça üzerindeki etkin gerilmenin azaltılması anlamına gelmektedir. Kaynaklı parçaya uygulanacak gerilme giderme tav sıcaklığının ve tutma süresinin belirlenmesi ayrıca önem taşımaktadır. Bu işlemin temelinde metalin ısıtılarak akma sınırının düşürülmesi ve artık gerilmenin etkisindeki bağlantıda kısmen plastik şekil değiştirmenin oluşturulması yatmaktadır.



Şekil 7 (a) Taşlamanın (b) çekiçle dövmenin (c) bilya bombardımanının kaynaklı parçanın yorulma dayanımına etkisi [16]

Dolayısıyla malzemenin akma sınırı, uygulanacak işlem sıcaklığını belirlemektedir [6,7]. Ark kaynağına birleştirilmiş düşük karbonlu (%0,14) çelikte yapılmış çalışmada, strain-gage kullanılarak parça üzerindeki birim şekil değişimi ölçülmüş ve artık gerilme değeri hesaplanmıştır. Isıl işlem öncesi 330 MPa olan gerilme 560°C sıcaklığa 4 saatte ısıtma ve bu sıcaklıkta 18 saat tutulmak suretiyle gerçekleştirilen gerilme giderme işlemi sonrasında 90 MPa'a düştüğü görülmüştür.

arşın yüzeyden 1mm derinlikte ölçülen sertlik değerindeki değişme sadece 50VSD mertebelerinde aldığı tespit edilmiştir [12]. Verilen örnekte anlaşıldığı gibi gerilme giderme işleminin uygun yapılması durumunda artık çekme gerilmesinde % 73'lere varan bir düşüş elde edilebilmektedir.

Çekme türündeki artık gerilme değerini azaltmak amacıyla kaynak dikişine uygulanacak olan soğuk ezme, tekiçle dövme, bilya püskürtme gibi işlemlerin sadece çekme gerilmesi değerini azaltmadığı aynı zamanda işlemin uygulandığı bölgede soğuk şekil değiştirmenin sonucu olarak sertliğin arttırması ilave iyileşmeler sağlamaktadır [1,2].

III. SONUÇLAR

Genel olarak yorulma dayanımı geliştirme teknikleri incelendiğinde her tekniğin farklı oranda yorulma davranışında gelişme sağladığı görülmektedir. Bir tekniğin bir diğerine olan üstünlüğü malzeme özelliği ve bazı teknolojik şartlara bağlı olduğu tespit edilmiştir. Tekiçle dövme, bilya püskürtme, kaynak dikişinde yapılacak taşlama ve yeniden ergitme metotları ilave tekiçlik ve malzeme giderleri eklemesine rağmen yorulma dayanımının iyileştirilmesi etkilidir. Basma gerilmesi oluşturacak tekniklerinin yanında, gerilme giderme işlemasının kontrollü bir şekilde uygulanması servis sırasında parça üzerindeki etkin gerilmeyi azaltarak yorulma dayanımını arttırmaktadır. Burada kaynaklı konstruksiyonun büyüklüğü en önemli kısıtlayıcı faktördür. Çentik etkisini azaltmak amacıyla, taşlama, IG ve plazma yöntemleriyle kaynak profilinin iyileştirilmesi de başlıca uygulanabilecek yöntemlerden biridir.

Özellikle çatlak oluşum safhasını engellemek ve/veya çatlak çıkartıcı etkiye sahip bütün uygulanabilecek teknikler bağlantının yorulma özelliğinin iyileştirilmesi anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

- H.O.Fuchs, R.I., Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley&Sons, (1980).
K.Aydoğdu, (2002) *Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Dayanımını Etkileyen Faktörler*, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002)
Tauscher, H, (Çev.Güleç, Ş., Aran, A.) *Çeliklerin ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı*, MBEAE Matbaası, Gebze (1983)
S.J. Maddox, (2000) *Fatigue Design Rules for Welded Structures*, *Prog.Struct.Engng.Mater.* 2, 102-109.

- 5 H.J.Bargel, G.Schulze, (Çev.Güleç, Ş., Aran, A.) *Malzeme Bilgisi*, c.1, MBEAE Matbaası, Gebze (1988).
6 L.M. Gourd, (Çev. B. Eryürek, O. Bodur, A. Dikicioğlu) *Kaynak Teknolojisinin Esasları*, Birsen Yayınevi.(1996).
7 S.Anık, *Kaynak Tekniği C.3, Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti*, İTÜ Kütüphanesi, 1030, (1975).
8 *Metals Handbook, Fatigue and Fracture Control of Metals*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1996)
9 S. Anık, *Kaynaklı Tasarımın Esasları*, Ders Notları
10 E. Kara, K.Genel, *Yayınlanmamış Çalışma*.
11 S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 3 th edition. Addison Wesley Longman, (1997)
12 Olabi, A.G., Hashmi M.S.J.,(1995) The effect of post-heat treatment on mechanical-properties and residual-stress mapping in welded structural steel, *J. Materials Processing Technology*, 55, 117-122.
13 M.Chiarelli, A.Lanciotti, M.Sacchi, (1999), Fatigue Resistance of MAG welded Steel Elements, *International Journal of Fatigue*, 21, 1099-1110.
14 K. Easterling, *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworths, London, (1983)
15 D. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall, USA, (1996)
16 K.J.Kirkhope ve diğ. (1999), *Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques, Part 1:Review*, 12, 447-474.