



BAÜ

**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK-MİMARLIK
FAKÜLTESİ DERGİSİ**

**JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING ARCHITECTURE
OF BALIKESİR UNIVERSITY**

1995/2

Balıkesir -Aralık 1995

UYUMSUZ OLUŞUM (*MIS-MATCHING*) GÖSTEREN KAYNAKLI YAPILARIN KIRILMA TOKLUĞUNA ETKİ EDEN FAKTÖRLER VE BU YAPILARDA CTOD TASARIM EĞRİSİ YORUMU

İrfan AY*

ÖZET

Kaynak bölgesi heterojen yapıdadır. Bu nedenle kaynaklı yapılarda kırılma tokluğu değerlendirilmesi zor olur. Klasik Kırılma Tokluğu yöntemleri ile kaynaklı yapılarda değerlendirme yapmak için iyileştirmeler gerekir. Hata değerlendirme yöntemlerinden olan CTOD Tasarım Eğrisi (PD 6493), kaynaklı yapılar için sadece rehberlik yapar, uyumsuzluk etkilerini gözönüne almaz.

Anahtar Kelimeler: Kırılma tokluğu, Kaynaklı yapı, CTOD tasarım eğrisi.

ABSTRACT

Welding zone in a structure is heterogenous. So, assessment of fracture toughness in welded joints is hard. Improvements are needed to make assessment for conventional fracture toughness procedures in welded structures. CTOD Design Curve (PD 6493) which is one of the defect assessment procedures in welded structure only gives guidance and does not consider mis-match effects.

Keywords: Fracture toughness, welded structure, CTOD design curve.

1. GİRİŞ

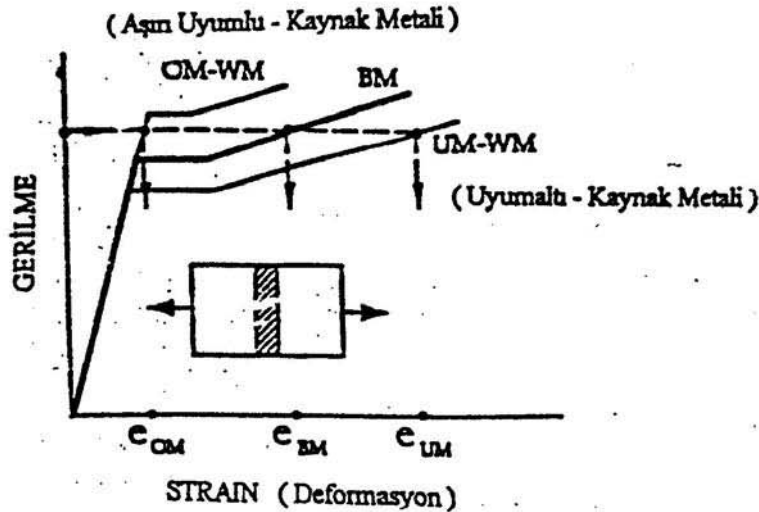
Mühendislikte kullanılan çelik yapıların kaynağında, kaynağın sağlam olması için yapılan uygulama, kaynak metalinin mukavemetini, ana metalinkinden yüksek yapmaktadır. Böylece, kaynak içersindeki bir kusurdan korunacağı umulur. Kaynak içersindeki kusur, kaynak bölgesinin mukavemet açısından farklı olmasıyla etkilenecektir. Örneğin; Kaynak metali, ısı etkisi altında kalan alan HAZ (Heat affected zone) ve ana metal bölgeleri, mukavemet açısından farklıdır. (Strain capacity) açısından da farklıdır. kaynak metali mukavemetinin (σ_{ak}), ana metal mukavemetine (σ_{ak}) oranına *uyumsuzluk oranı* $M = \sigma_{akw}/\sigma_{akB}$, şayet $M > 1$ ise; aşırı uyumlu (*over matching*) durum, şayet $M < 1$ ise; uyum altı (*under matching*) durum sözkonusudur. Bu nedenle kaynaklı yapılar, ya aşırı uyumlu, yada uyum altı hallerinden birini içerirler. İşte uyumsuzluk oranı M 'in kaynaklı yapının performansı üzerinde etkisi olacağı açıktır (1).

Homojen malzemelerin düzgün mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip oldukları ve içlerinde kusur barındırdıkları önceden varsayılır. Bu malzemelerin kırılma davranışları Kırılma Mekanikliği parametreleriyle incelenir. Lineer Elastik Kırılma Mekanikliğinde K_{Ic} , Elasto Plastik Kırılma Mekanikliğinde ise CTOD ve J- İntegrali önemli parametrelerdir. Kaynaklı yapılar gerçekte heterojen yapılardır. Bu etki, bu prosedürlerde gözönüne alınmaz. Oysa, uygulanan deformasyon, kusur boyutu ve tokluk değerleri arasında ilişki kurmak gerekir. Kaynaklı yapının kırılmasını karakterize eden CTOD ve J- integrali gibi parametreler, *uyumsuzluk oranı* M' den, *sertleşme üsteli* (n_w : kaynak metalinin, n_b : ana metalin)'den, *kaynak genişliği* ($2H$)'dan ve bunun numune boyutuna oranlarından ($2H/W-a$) etkilenecektir. Bu nedenle dikkate alınmaları gerekir.

2. HETEROJEN KAYNAKLI BİR YAPIDA ÇEKME TESTİ

Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi yapılacağı zaman kaynak dolgusunun sağlam olup olmadığını araştırmak büyük problem olur. Çünkü pek çok kaynağın kök pasosu, kapak pasolarından daha yüksek mukavemet gösterir. Ayrıca kaynak metalini ana metalin mukavemet ve süneklilikleri de farklıdır. İşte bu uyumsuz durum mutlaka dikkate alınmalıdır.

Şekil 1-de şematik olarak gösterilen bir (σ - e) eğrisini inceleyelim. Düz yada yuvarlak çeki numuneleri sabit bir yükte çekildiklerinde, kaynaklı yapının ayrı ayrı bölgelerinde farklı deformasyonlar (strain) oluşacaktır. Şayet $M > 1$ olduğunda, kaynak metalini elastik bölgede e_{OM} kalırken, aynı yükte ana metaldeki deformasyon e_{BM} kadar olacaktır. Ana metalden daha düşük akma mukavemetine sahip kaynak metalini $M < 1$ durumunda ise, deformasyon birikmesi olacak ve deformasyon e_{UM} 'e kadar varacaktır (2).



Şekil 1. Çapraz yapılmış kaynaklı bir aşırı uyumlu - uyumaltı kaynak şartları için sabit gerilme değerinde hangi deformasyon (strain) seviyeleri olacağını gösteren (σ - e) eğrisi.

3. KAYNAKLI YAPILARIN AKMA DAVRANIŞINDA ETKİLİ OLAN GEOMETRİK FAKTÖRLER

a- Geometrik Uyumsuzluk

Kaynaklanmış parçaların yanlış ekseninde kaynaklanması, karşılıklı uyumun olmaması, yapının akma davranışını etkiler.

b- Kaynak Paso Takviyesi

Statik yükte çalışacak kaynaklar için kaynak takviyesi yararlıdır. Kaynak dolgusu, kesitinde artış yapar. $M < 1$ durumundaki bir kaynağın kök ve kapak pasolarına yapılacak takviye, kaynak metalini aşırı plastiklikten koruyabilir.

c- Kaynak Metali Genişliği

Kaynaklanma eksenine dik yöndeki kaynak metali genişliği $2H$, $2H/B$, $2H/W$ -a gibi oranları, kaynaklı kısmın deformasyon (strain) davranışı etkiler.

$2H/B < 1$ olduğu zaman, kaynaklı yapının deformasyon kapasitesi artar (Toyodo ve Satoh,(3)).

$2H$, düşük değerlerde olduğu zaman, kaynak metalinde deformasyon birikmesine neden olur. Uyum altı durumundaki kaynaklı yapıların, kaynak metali ve HAZ'ında küçük $2H$ durumunda, deformasyon kapasitesi düşük olabilir (5,6).

4. KIRILMA TOKLUĞU TESTLERİ

a- Charpy-V Impact Testi

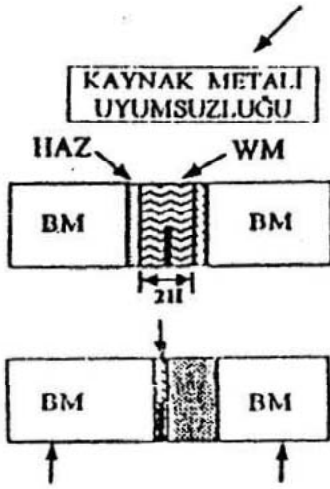
Çok kullanılan, hızlı yapılan ve nisbeten ucuz bir kırılma testidir. Bu test kaynaklı yapılara uygulandığı zaman önemli zorluklar gösterir. Teknik anlamda ise yararlı sonuçlar vermez. Şöyle ki; Kaynaklı yapılarda çatlağı başlatıp yaymak için, illa da yüksek Charpy enerjisine ihtiyaç olmaz. Ayrıca, iri taneli HAZ bölgesine açılan çentik radyüsünün büyük olması nedeniyle, çatlak ucunun orjinal mikroyapısı sebebiyle başka bir bölgeye yönelmesi kaçınılmazdır. Sonuçta; ölçülecek toklukta suni bir azalma gözlenir. Tokluk değerleri dağınık olur. Açık bir yorum yapılamaz. Yapı çelikleri için de CTOD ile Charpy-V değerleri arasında genelde uygulanan bir bağıntı da henüz bulunamamıştır.

b- CTOD ve J-İntegrali Testleri

Kırılma mekaniğinde en geçerli testler CTOD ve J-integralidir. Bu iki test, Elasto-Plastik Kırılma Mekaniğinde çatlağın başlamasını, büyümesini ve kararsız durumu çok iyi karakterize eder. Böylece yapının bütününe değerlendirmede, şartlara en uygun malzeme seçmede çok kullanılır. Mevcut bu iki test, homojen malzemeler için geliştirilmişlerdir. Malzemenin düzgün bir mikroyapıya ve mekanik özelliğe sahip olduğunu, çatlak içerdiğini

önceden varsayar. Oysa, gerçek, kaynaklı yapılarda mekanik heterojenlik mevcuttur. Bu heterojen durum, plastik bölgenin oluşumunu ve çatlak ucundaki gerilme durumunu etkileyecektir. O zaman da CTOD ve J-integrali etkilenecektir. İşte bu nedenle, mevcut CTOD ve J-integrali testinin kaynaklı yapılarda uygulanabilmesi için önemli iyileştirmelerin yapılması gerekir. Bu iyileştirmeler numune hazırlamada, test etmede ve değerlendirme aşamalarında olur.

**EĞME NUMUNELERİNİN TESTİNDE
UYUMSUZLUK FAKTÖRLERİ**



- Uyumsuzluk Faktörü (M)
- IIAZ / WM / BM (IEA / Kaynak / Ana) TOKLUĞU
metali metali
- YÜKLEME MODU
- 3 - Noktadan eğmeli
- 2II / B (Kaynak genişliği / Kalınlık)
- 2II / (W - a) [Kaynak genişliği / Net kesit]
- $\frac{n_{WM}}{n_{BM}}$ (Kaynak metali sertleşme üsteli / Ana metal sertleşme üsteli)

Uyumsuzluk Faktörü

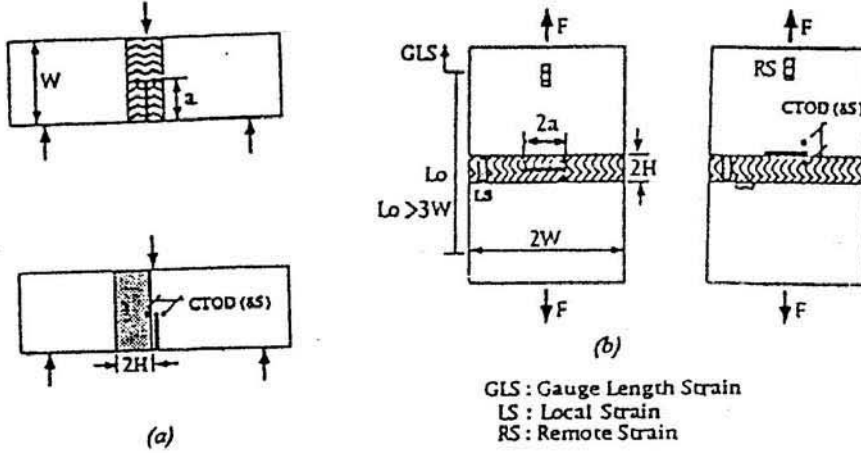
$$M = \frac{\sigma_{sk}(W)}{\sigma_{sk}(B)}$$

Şekil 2. Kaynaklı yapıların kırılma tokluğu testinde üç noktadan eğme numunesi kullanıldığında etkili uyumsuzluk faktörleri.

Şekil 2'de üç noktadan eğmeli numunelerin testinde etkili olan uyumsuzluk faktörleri görülmektedir. Ayrıca, üç noktadan eğme numunesi ve geniş plaka numunelerinde doğacak lokal deformasyonların hangileri olduğu Şekil 3'de görülmektedir. CTOD ve J-integrali hesaplanmasında gözönüne alınacak bu deformasyon değerleri tokluğu etkileyecektir.

Standart kırılma tokluğu test prosedürleri, çatlak ağzı açıklığı yerdeğişimi (CMOD: Crack Mouth Opening Displacement)'ni esas alırlar. Oysa, yerdeğişim ölçümlerinin daha güvenilir olması için, ölçümün çatlakın kendi ucundan (CTOD: Crack Tip Opening Displacement) yapılmalıdır. CMOD ile CTOD arasında bir ilişki olması gerekir. Son zamanlarda geliştirilen CTOD (δ_3), 5 mm'lik uzunluktaki yerdeğişim ölçümleri, kaynak metali ve HAZ bölgelerinde en uygun ve anlamlı yöntem olarak düşünülebilir. Çünkü (δ_3), CTOD ve J-integrali gibi standart olan testlerde, uzaktan ölçülen yerdeğişim değerleri yerine lokal bir ölçüm sunmaktadır. Hele hele numune, mekanik olarak inhomojen ise; bunun özel bir anlamı, önemi olur. Şu anda heterojen, uymusuz yapıdaki kaynaklı malzemelerin kırılma tokluklarının

nasıl test edileceği hakkında spesifik bir standart yoktur. Bu yüzden homojen malzemeler için geliştirilmiş yöntemlerin (CTOD ve J-integrali gibi) geçerli olacağı şartlar belirlenmelidir. Bu şartlar: M , $2H$, $2H/B$, $2H/W-a$ gibi parametrelerdir.



Şekil 3. Kaynaklı yapılarda kırılmayı analiz ederken kullanılacak deformasyon (strain) değerlerinin iki farklı numunede şematik gösterilişi.

c- Kaynak Metalinde Durum

Kaynak metaline çentik açılmış üç noktadan eğmeli test numunelerinde genellikle, $2H$ kaynak genişliği büyük olduğu zaman, kırılma tokluğu üzerine uyumsuzluğun etkisinin önemli olduğuna inanılır. $a/w=0.5$, $2H/W-a>1$ gibi geometrik şartta kaynak metalinde plastiklik meydana gelir ve bu durum %50 uyumsuzluğa kadar da sürer. Bu plastiklik homojen malzemelerinkine benzer olacaktır.

$a/w=0.1$, $2H/W-a<1$ gibi geometrik şartta, kaynak genişliği küçük olduğu zaman, aşırı uyumlu numunelerde oluşan Global deformasyon (strain), ana metalinkine benzer olacaktır. Ana metal içinde yayılacaktır. Bu durumda standart kırılma tokluğu test prosedürleri doğru netice vermez. Local yerdeğişim ölçümü olan (δ_s) 'in tokluk değerlendirilmesinde kullanılması gerekir (7).

d- HAZ Bölgesinde Durum

Isı etkisi altında kalan bölgeye çentik açılmış üç noktadan eğmeli test numunelerinde, kaynakların kaba taneli HAZ'daki kusurlarını kapatmak için, aşırı uyumlu olacak tarzda paso çekme işlemi uygulandığını daha önce söylemiştik. HAZ'daki plastikliğin, düşük mukavemetli bölge tarafından kontrol edileceği farzedilir. StE 460 çeliğinin gevrek haldeki HAZ'ının aşırı uyumlu $M>1$ kaynak metal durumu, CTOD (δ_s) 'in değeri düşer (Bak şekil 4.). Oysa $M<1$ durumunda ise CTOD (δ_s) değerinin yükseldiği görülmektedir.

e- J-İntegrali

Joch ve Ainsworth adlı araştırmacılar, mukavemet açısından uyumsuz kaynaklı yapıların üç noktadan eğme test numunelerinde, J-integrali hesabı için (η_c) boyutsuz faktöründe bazı

değişiklikler içeren çalışmalar yapmışlardır (6,7). (η_c) boyutsuzluk faktörü; uyumsuzluk oranı M , ve $2H/W$ -a'nın bir fonksiyonudur. $a/w=0.1-0.5$ arası değerler için J -hesabı:

$$J = \left(\frac{K_I^2}{E'} \right) + \left(\eta_c \times \frac{A}{B} \times (W - a_0) \right) \quad \dots (1)$$

A: Yük-yerdeğişim eğrisi altındaki alanın plastik kısmıdır.

B: Numune kalınlığı.

W: Numune genişliği.

a_0 : İlk çatlak uzunluğu.

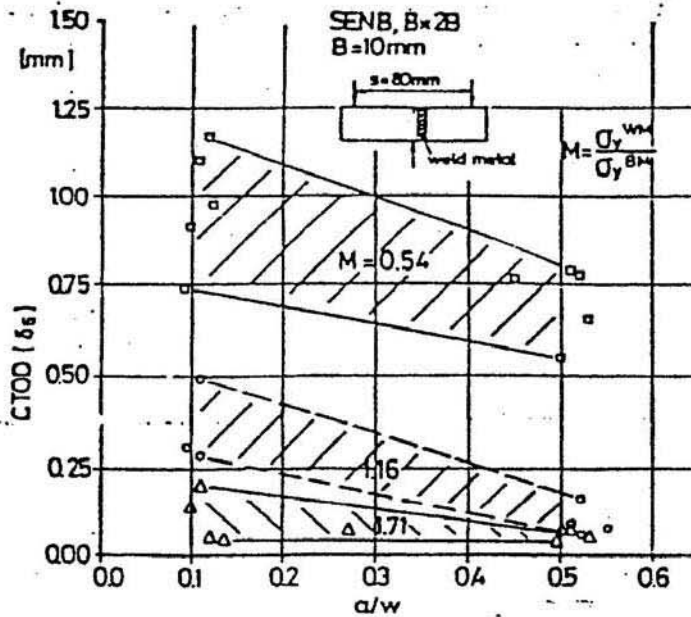
Homojen numuneler için:

$$\eta_c = 3.5 - 1.4167 \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad \dots (2)$$

Heterojen numuneler için:

$$\eta_c = \left(3.5 - 1.4167 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right) \left(\frac{\sigma_{YB}}{\sigma_{YW}} + \left(\frac{1 - \sigma_{YB}/\sigma_{YW}}{2} \right) \right) \quad \dots (3)$$

Son zamanlarda bu formüller kullanılarak pek çok çalışma yapılmaktadır.

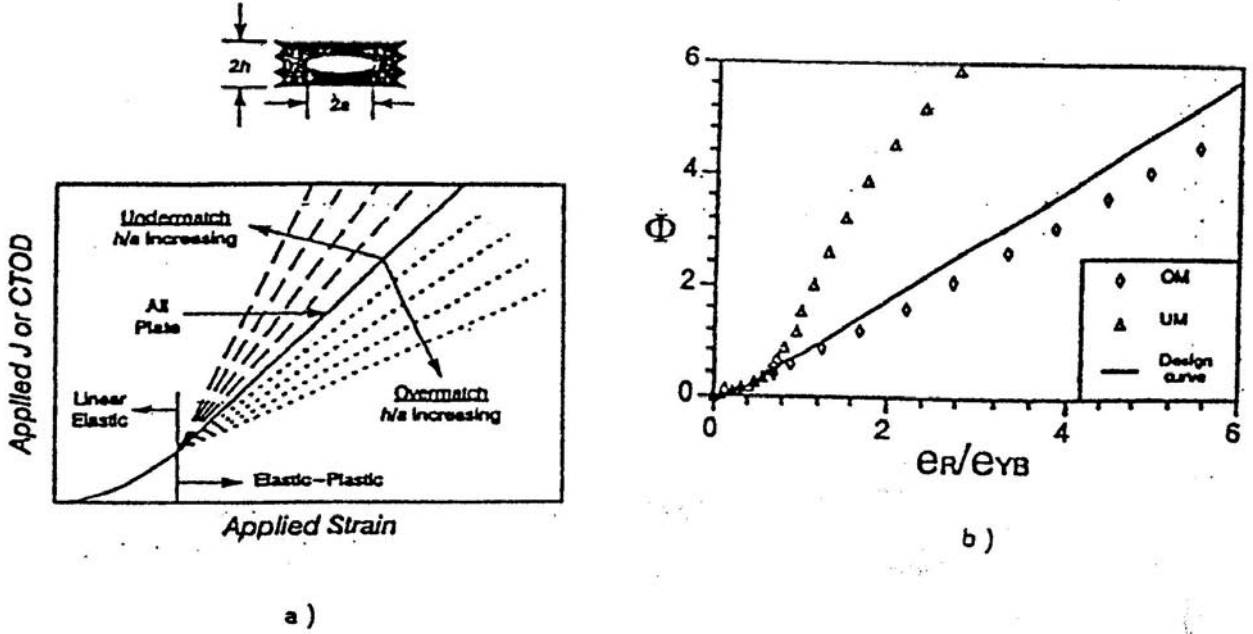


Şekil 4. HAZ tokluğu üzerine a/w ve uyumsuzluk oranı M 'in etkisini gösteren, üç noktadan eğme numunelerinde lokal olarak ölçülen CTOD (δ_s) ilişkisi.

5. KUSUR DEĞERLENDİRME PROSÜDÜRLERİNDE CTOD TASARIM EĞRİSİ

CTOD Tasarım Eğrisi, ergitme kaynağı yapılmış, mühendislikte kullanılan yapıların içindeki kusurların değerlendirilmesinde, kusurların kabuledilebilir sınırlar içerisinde olup olmadığı hakkında rehberlik yapar. Fakat yapının uyumsuz oluşum (*mis-matching*) etkisini gözönüne almaz. Oysa, yapıda çatlak zorlayan kuvvet (CTOD veya J -İntegrali) belirlenecekse, kaynaklı yapının mekanik heterojenliği mutlaka gözönüne alınmalıdır. Bununla beraber bazı

araştırmacılar, çatlak içeren uyumsuz kaynaklı birleştirmelerin davranışlarını değerlendirmek için tasarım eğrisini kullanırlar (11).



Şekil 5. a- CTOD Tasarım Eğrisi ile kıyaslandığında CTOD üzerine uyumsuzluğun ve kaynak genişliğinin etkisinin şematik görünüşü. b- %20 uyumsuzluğa sahip östenitik bir çelikte CTOD Tasarım Eğrisi (8).

Şekil 5. de sabit bir (h/a) değeri için çatlak zorlayan kuvvet üzerinde uyumsuz oluşumun etkisi görülmektedir. Şekil'den de görüleceği gibi, aşırı uyumlu (*over match*) kaynaklı birleştirmede, (h/a) arttığında, eğrinin eğiminin aşağılara kaydığı, uyum altı (*under match*) kaynaklı birleştirme durumunda h/a arttığında eğrinin eğiminin yukarıya doğru çıktığı görülmektedir. Eğride çatlak zorlayan kuvvet olarak CTOD veya J-İntegrali alınırken, uygulanan deformasyon olarak genellikle numunenin tüm boyunda ölçülen strain (GLS) esas alınır. Bu ise, ya ana metalin akma değeri (e_y)'ye yada kaynak metalinin akma değeri (e_y)'ye uygun düşer (10).

Bazı araştırmacılar CTOD Tasarım Eğrisi için, uyumsuzluk etkisini önceden bildirme özelliğine sahip olduğunu ileri sürerken, bazıları bu konuda yetersiz kaldığını ileri sürmüşlerdir. Bu konuda çok geniş araştırmaya ihtiyaç vardır.

6. SONUÇLAR

1. Kaynak metalinin akma mukavemeti, kaynak olan kısmın içinden, yuvarlak çekme numuneleri kullanılarak belirlenmelidir. Uyumsuzluk derecesi, bu tip numune sonuçlarından bulunur. Aynı zamanda, paso içerisindeki mukavemet değişiklikleri de gözönüne alınmalıdır.

2. 2H/W-a, 2H/B oranları kaynaklı birleştirmenin çevresinde ve kaynaklı yapıda plastikliğin gelişmesinde önemli rol oynar.
3. Genel olarak, merkezinde çatlak olan, kaynak metaline çentik açılmış geniş plaka test sonuçları, kaynak metalinin aşırı uyumlu (*over matching*) olmasının faydalı yönde etkisi olduğunu göstermektedir.
4. Uyum altı (*under matching*) kaynaklı birleştirmelerde kaynak metalinde uygulanan deformasyon (strain) birikir, bu yüzden kaynaklı yapı, yeterli deformasyon sertleşmesine ve çok düşük deformasyon seviyelerinde yüksek tokluğa ihtiyaç gösterir.
5. Derin çentikli üç noktadan eğmeli numunelerde uyumsuz kaynaklı yapılar için CTOD ve J-İntegralinin uygulanabilmesi üzerine çok farklı görüşler vardır. řu ana kadar standart prosüdürleri kullanarak kaynak metali ve HAZ testi için bileşik pratik tavsiyeleri formüle edecek çok az bilgi mevcuttur.
6. Üç noktadan eğmeli standart numuneler kullanılarak, hayli yüksek uyumsuzluk gösteren kaynaklı yapılar için uyumsuzluk mertebesinde bağımsız (δ_5) tekniği, tokluk değerlendirilmesi için doğru bir ölçüm sağlamaktadır.
7. CTOD Tasarım Eğrisi, kaynaklı yapıların uyumsuzluk etkisini göstermez. Aynı zamanda uyumaltı şartları gösteren kaynaklı birleştirmelere uygulanmamalıdır. Aşırı uyumlu kaynaklı birleştirmeler için ise, hayli yüksek değerler verir.
8. Kaynaklı yapıların kırılma toklukları ve hata değerlendirme prosüdürleri üzerine çok çalışma yapılması gereği ortadadır.

KAYNAKLAR

1. AY İ., *Kaynaklı Yapılarda Uyumsuz Oluşumun Önemi*, Ulusal Kaynak Sempozyumu Mayıs, 1996.
2. KOÇAK M., DENYS R., *CTOD and Wide Plate Testing of Welds with Particular Emphasis on Mis-Matched Welded Joints*, GKSS 94/E/69.
3. SATOH S., TOYODA., *Joint Strength of Heavy Plates with Low Strength Weld Metal*, Welding Journal Research Supplement, pp.311-319, Sept., 1975.
4. KIRK M.T., DODDS JR., *The Effect of Weld Metal Strength Mis-Match on the Deformation Behaviour of Steel Butt Weldments*, University Illinois Report, UILU-ENG 91-2002, Jan., 1991.
5. DENYS R., LEFEVRE A.A., *Fracture of High Strength Steel Welds: Effect of Weld Metal Matching*, Proc. of the 11 th. Int. Conf. On Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME vol, III. Glasgow, 1993.

6. PETROVSKI B., KOÇAK M., *Evaluation of the Fracture Behavior of Strength Mismatching Steel Welds Joints with Surface Cracked Tensile Panels and SENB Specimens*, Ibid Ref. 17.pp.511-538.
7. JOCH J., AINSWORTH R.A., HYDE T.H., NEALE B.K., *Fracture Parameters and Fracture Assessment for Welded Structure*, Ibid Ref. 17.pp.609-622.
8. KOÇAK M., SCHWALBE K.H., *Fracture of Welds Joint Strength Mis-Match Effect*, IW Doc.X-F-003-94. April, 1994.
9. JOCH J., AINSWORTH R.A., HYDE T.H., *Limit Load and J Estimation for Idealised Problems of Deeply Cracked Welded Joints in Plane Strains Bending and Tension*, Report of Dep. Mech.Eng.Univ.of Nottingham, Feb.1992.
10. HORNET P., KOÇAK M., *Fracture of bi Material Joints: Effect of Strength Mismatching on Crack Resistance Curves*, 10.th European Conference on Fracture ECF 10, Berlin, FRG, 20-23 Sept.1994.
11. HARRISON P.L., WEBSTER S.E., *Effect of Mis-Match on Significance of Weld Defect Assessment*, IW Doc. X-F-014-94, April, 1994.