



**ÇEKMEYE MARUZ KAYNAKLI ÇELİK PLAKALARIN KIRILMA
DAVRANIŞININ SINTAP YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

**(INVESTIGATION OF THE FRACTURE BEHAVIOR OF WELDED STEEL PLATE
SUBJECTED TO TENSION BY SINTAP PROCEDURE)**

Binnur GÖREN KIRAL*

ÖZET/ABSTRACT

Kaynaklı bağlantılar endüstride makina ve yapı elemanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Üretim veya işletme aşamalarında bu gibi elemanlarda çatlak benzeri kusurlar oluşabilmektedir. Çatlak içeren bu tür yapıların işletme yüklerine karşı dayanıklılığın tayini önemlidir. Çünkü söz konusu parça nükleer bir santral, bir petrokimya tesisi veya herhangi bir endüstriyel işletmede emniyet açısından kritik bir parça olabilir. Bu çalışmanın amacı, kaynaklı çelik yapılarda, yapının dayanabileceği hasar yüklerini ve ani gevrek kırılmalara sebep olmayacak kritik çatlak uzunluklarını tespit etmektir. Bunun için, dokuz Avrupa Birliği ülkesinin araştırma merkezleri, üniversiteleri ve sanayi kuruluşlarının yer aldığı Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilmiş olan SINTAP (European Structural Integrity Assessment Procedure) prosedürü kullanılmıştır.

Welded connections are widely used in industry as machine and construction components. Crack-like defects in welded connections may occur during manufacturing or service life. The assessment of the integrity of structures containing such cracks is very important, since these components could be a critical part in a nuclear power plant, a petrochemical or any industrial plant. This study aims to assess the failure loads and critical crack sizes which the welded steel structure can withstand unless brittle fracture occurs. To this end, SINTAP (European Structural Integrity Assessment Procedure), developed by the European Commission covering research centers, universities and industries of nine European countries, is used.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

SINTAP Yöntemi, Kırılma, Kaynaklı çelik plaka, Gerilme şiddet faktörü
SINTAP Procedure, Fracture, Welded steel plate, Stress intensity factor

* DEÜ Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İZMİR

1. GİRİŞ

Kaynaklı makina ve yapı elemanlarında çatlak benzeri kusurlar kaynak bölgesi veya kaynak yakınlarında sıklıkla görülmektedir. Bunun sebebi, kaynak bölgesinde malzemenin mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olan artık gerilmelerdir. Kaynak işleminden sonra oluşan yapı ana metalin malzeme özelliklerinden çok büyük farklılıklar gösterebilmektedir.

Bu kaynaklı bağlantıların nükleer, petrokimya ve taşımacılık gibi alanlarda kullanıldığı düşünüldüğünde hasarın tespiti çok büyük önem taşımaktadır. Dokuz Avrupa Birliği ülkesinin araştırma merkezi, üniversite ve sanayi işbirliği ile Avrupa endüstrisini geliştirmek amacıyla Brite Euram'ın sponsorluğunda SINTAP prosedürü geliştirilmiştir. Bu yöntem, parçanın maruz kaldığı yük ve içerdiği çatlak boyu arasında bağlantı kurup hasarın meydana gelmeyeceği koşulları tayin etmeye olanak sağlar. Yöntemin kaynaklı yapılara uygulanması durumu GKSS Araştırma Merkezi (Hamburg-Almanya) tarafından üstlenilmiş olup çok sayıda nümerik ve deneysel çalışma sonunda proje 1999 senesinde tamamlanmıştır.

Bu çalışmada çekmeye maruz, çatlak içermesi muhtemel kaynaklı çelik plakalar incelenmiş ve kırılma davranışları kaynak dikiş kalınlığına bağlı olarak tespit edilmiştir. Analizlerde, SINTAP prosedüründe, kaynaklı bağlantılar (mismatch) içeren yapılar için geliştirilen II. Basamak (Level II) seçeneği kullanılmıştır. Bu amaçla analizler için MATLAB programlama dili kullanılarak yük, çatlak boyu, geometri, malzeme özellikleri gibi parametreleri gözönüne alabilen bir program geliştirilmiştir.

2. SINTAP YÖNTEMİ VE BASAMAKLARI

SINTAP prosedürü çalışma koşulları esnasında yapıda gevrek kırılma, yırtılma ve plastik hasar olup olmayacağını tespit etmeyi sağlamak için geliştirilmiş bir yöntemdir. SINTAP prosedürünün başlıca prensipleri şöyledir:

- (i) Malzeme özelliklerine ait mevcut verilerin niteliğine bağlı olan hiyerarşik bir yapısı vardır.
- (ii) Verilerin niteliğinin artmasıyla konservatiflik azalır.
- (iii) Kaynaklı parçaların mukavemetine mismatch etkisini gözönüne alabilen özel bir yöntemdir (Ainsworth vd., 2000, Webster ve Bannister, 2000).

SINTAP prosedürünün temel basamakları Çizelge 1'de gösterilmektedir. SINTAP prosedüründe basamaklar çözümün doğruluğunun değil, hassasiyetinin ve emniyet payının ölçütüdür. Basamaklar ilerledikçe çözümün hassasiyeti artar, buna karşın emniyet katsayısı küçülür. En üst basamak kullanıldığında daha fazla veriye ihtiyaç olup daha hassas sonuca ulaşılrken, en alt basamak için gerekli veri daha az olup elde edilen sonuçlardaki emniyet katsayısı daha büyüktür. Çizelge 1'de verilen dört basamak dışında ileri seviyeli üç basamak daha bulunup bunların kullanımı için daha karmaşık verilere gereksinim duyulmaktadır (Koçak ve Motarjemi, 2002).

SINTAP prosedüründe parçanın hasar durumunu saptamak için FAD (Failure Assessment Diagram) ve CDF (Crack Driving Force) olmak üzere iki seçenek vardır. Bunların kullanımı araştırmacının seçimi ile birlikte malzeme özelliklerinin hangilerinin bilindiğine bağlıdır.

FAD seçeneğinde; hasar sınırı, çatlak ucu yüklemesinin (veya uygulanan yükün neden olduğu gerilme şiddet faktörü) malzemenin kırılma tokluğu değeriyle normalize edilmesiyle tespit edilir. Herhangi bir boyutta çatlak içeren bağlantının taşıyabileceği yük veya herhangi bir yükleme altında gevrek kırılmaya neden olmayacak çatlak boyu bu hasar hattındaki bağlı konumla bulunur.

Çizelge 1. SINTAP Prosedürünün Basamakları

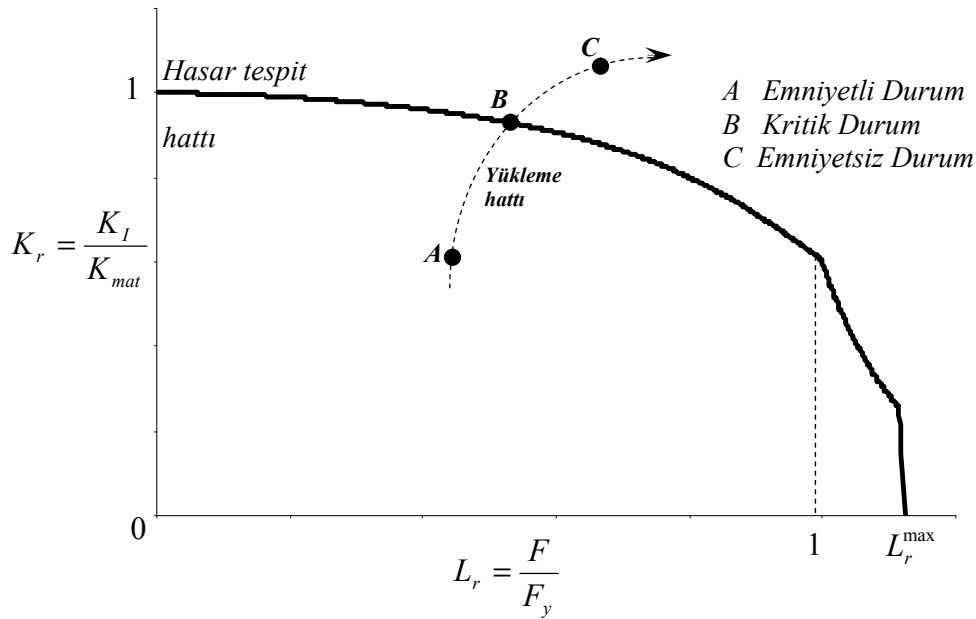
Basamak	Gerekli Veri	Kullanım Yeri
Temel	Akma mukavemeti	Akma mukavemeti dışında malzeme ile ilgili başka veri olmadığında
I	Akma ve çekme mukavemeti	Mismatch % 10'dan az olduğunda
II	Akma ve çekme mukavemeti, mismatch limit yükü	Mismatch yapılar için kaynak ve ana metal akma mukavemetleri bilindiğinde. Mismatch % 10'dan büyük olduğunda
III	Gerilme-şekil değiştirme eğrisi	Malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri bilindiğinde (mismatch yapılar da uygun)

FAD'de en temel eşitlik aşağıdaki gibidir (Aisworth vd., 2002) (Şekil 1).

$$K_r = f(L_r) \quad (1)$$

$f(L_r)$ fonksiyonu FAD ve CDF'de özdeş olup L_r Eşitlik 2 ile tanımlanabilir.

$$L_r = \frac{F}{F_y} \quad (2)$$



Şekil 1. FAD (Failure Assessment Diagram) yaklaşımı

Yatay eksen ifade eden, L_r , yük oranı olarak tanımlanabilir ve uygulanan yük, F 'nin, çatlak içeren bağlantının limit ya da akma yükü, F_y 'ye oranıdır. Limit yük malzemenin akma mukavemetine bağlı olarak çatlak içeren parçada net alana etkiyen ve akmaya neden olacak yük değeridir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi dikey eksen ($K_r = K_I / K_{mat}$) aynı zamanda yük oranının fonksiyonu olup ($f(L_r)$) malzeme özelliklerine göre tespit edilir. Şekilden de görüldüğü gibi bu fonksiyon hasar tespit hattıdır. Bu fonksiyona ait denklemler EK bölümünde verilmiştir. Yüklem hattı uygulanan yüke ve parçanın içerdiği çatlak uzunluğuna göre tespit edilir. Yüklem hattının, hasar tespit hattının altında kalması durumunda yapı güvencedir (Şekil 1, A

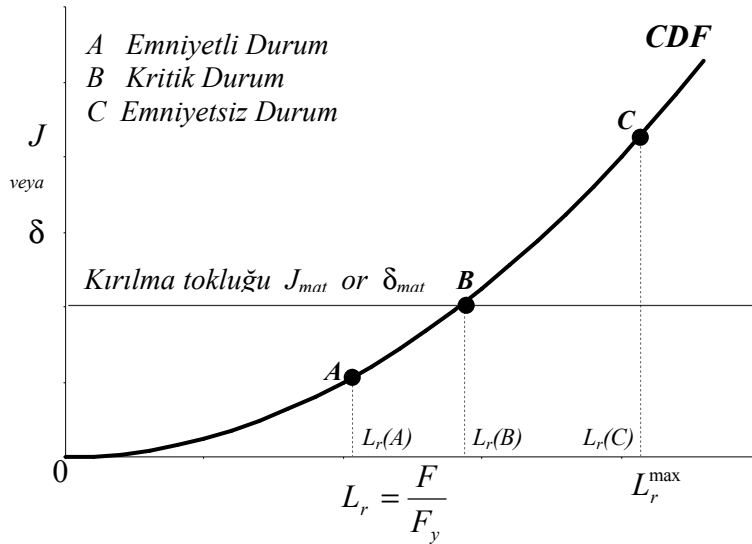
noktası). Yani, bünyesinde bulundurduğu çatlak boyu ve o yükleme durumu için parça emniyettedir. C noktası ise emniyetsiz durumu göstermektedir. Bu noktada bünyesinde çatlak içeren parça o yükleme altında hasara uğrayacaktır. B ise kritik durumu göstermektedir. Bu çalışmadaki sayısal örnek ise çeşitli yükleme durumları için kritik durumun saptanması üzerinedir.

CDF seçeneğinde ise hasar tespit hattı, çatlak ilerlemesine karşı malzemenin gösterdiği direncin (*R*-curve) çatlak ucu yüküyle karşılaştırmak suretiyle belirlenir (Şekil 2).

$$\delta = \delta_e [f(L_r)]^{-2} \text{ veya } J = J_e [f(L_r)]^{-2} \quad (3)$$

$$\delta_e = K_I^2 / E' \sigma_y \text{ veya } J_e = K_I^2 / E' \quad (4)$$

Burada, δ_e elastik çatlak ucu açılma miktarı, J_e elastik *J*-integrali değeri, K_I gerilme şiddet faktörü, E' düzlem gerilme durumunda Young (elastisite) modülü E , düzlem şekil değiştirme durumunda ise $E/(1-\nu^2)$ 'dir; ν Poisson oranıdır.



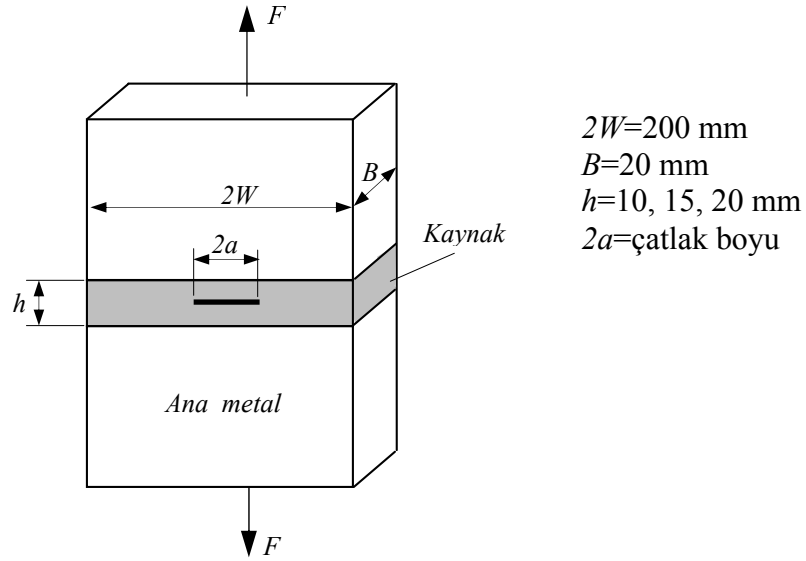
Şekil 2. CDF (Crack Driving Force) yaklaşımı

CDF yaklaşımında ise yük oranına bağlı olarak Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 ile Şekil 2'deki fonksiyon elde edilir. Malzemenin kırılma tokluğu değerini ifade eden J_{mat} ve δ_{mat} değerlerine göre parçanın emniyetli olup olmadığı saptanabilir. FAD yaklaşımında olduğu gibi A noktası emniyetli, C noktası emniyetsiz, B noktası ise kritik durumu göstermektedir.

3. PROBLEMİN TANITILMASI

Bu çalışmada SINTAP prosedürü, kaynak dikiş kalınlıkları sırasıyla 10, 15 ve 20 mm olan çekmeye maruz kaynaklı plakalara uygulanmıştır (Şekil 3). Çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiş olup ana metal olarak çelik yapılarda kullanılan A 572 Gr. 50 çeliği ve kaynak elektrodu olarak da E 70T-6 kullanılmıştır. Şekil 3'te verilen boyutlara sahip bir kaynaklı çelik plaka için ani kırılmalara neden olmayacak

kritik çatlak boyları çeşitli yükleme durumları için tespit edilmiştir. Bu çalışmada çatlak boydan boya olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 3. Çekmeye maruz kaynaklı çelik plaka

Çizelge 2. Malzemelerin mekanik özellikleri (Chi,1999)

Malzeme	Akma muk. σ_y (MPa)	Çekme muk. σ_w (MPa)	Elastisite Modülü E , (GPa)	Kırılma Tokluğu K_{mat} (MPa \sqrt{m})
Kaynak (E70T-6)	555	645	201	95
Ana Metal (A 572)	347	433	204	250

Çizelge 2’de verilen kırılma tokluğu değerleri, K_{mat} , ana metal ve kaynak malzemesinin Charpy enerji değerlerine bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile elde edilir (Motarjemi vd., 2002):

$$K_{mat} = \sqrt{\frac{E \cdot (0.53CV^{1.28}) \cdot 0.2^{(0.133CV^{0.256})}}{1000 \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (5)$$

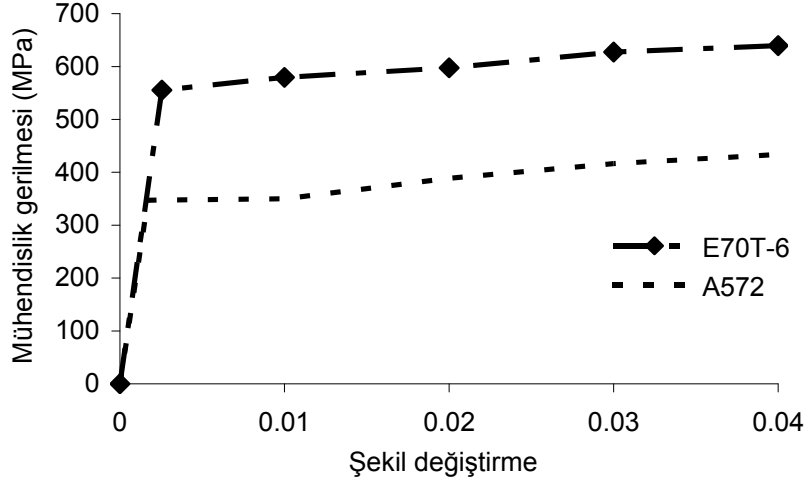
Ana metal (A-572) ve kaynak malzemesi (E70T-6)’nin gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4’te verilmiştir (Chi, 1999).

3.1. Gerilme Şiddet Faktörü

SINTAP prosedürü kullanılırken temel büyüklüklerden biri de gerilme şiddet faktörüdür. Gerilme şiddet faktörü, K_I , çatlak ucu elastik alanının büyüklüğünü tanımlar. K_I ayrıca, çatlak ucu gerilme alanının elastik olması şartıyla, malzemelerde çatlak ilerleyişi ile kırılma davranışları arasındaki ilişkiyi belirler (Uğuz, 1996). Gerilme şiddet faktörü bünyesinde çatlak bulunan parçanın yükleme şekline ve geometrisine bağlıdır. Şekil 3’teki gibi geometri ve yüklemeye sahip bir plaka için Mod I gerilme şiddet faktörü aşağıda verilmiştir (Motarjemi ve Koçak, 2002).

$$K_I = \frac{F}{B\sqrt{W}} \times \left[\frac{\pi a}{4W} \text{Sec} \frac{\pi a}{2W} \right] \times \left[1 - 0.025 \cdot (a/W)^2 + 0.06 \cdot (a/W)^4 \right] \quad (6)$$

Eşitlik (6)'dan görüleceği gibi gerilme şiddet faktörü, çatlak boyu ve uygulanan yükler değişmekte olduğundan kırılma koşulları bu iki parametre aynı anda incelenerek tayin edilir.



Şekil 4. Ana metal ve kaynak malzemesi gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Chi, 1999)

3.2. Limit (Akma) Yük Hesabı

SINTAP prosedüründe kullanılan diğer bir büyüklük ise limit (akma) yüküdür. Limit yük, çatlak içeren parçanın net alanına etkiyen ve akmaya neden olan yük olarak tanımlanır. Homojen bir plaka için düzlemsel çekme durumunda limit yük aşağıdaki gibidir:

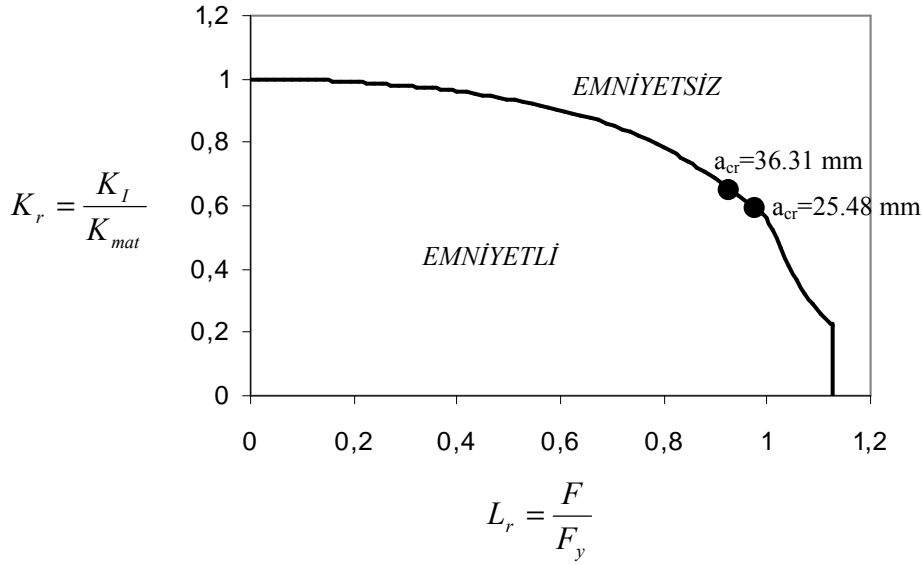
$$F_y = 2 \cdot (W - a) \cdot B \cdot \sigma_y \quad (7)$$

Eşitlik (7)'de verilen σ_y kullanılan malzemenin akma mukavemetidir. Kaynaklı parça için limit yük malzeme özellikleri ve kaynak geometrisi gibi parametrelere bağlı olup hesap yöntemi ekte verilmiştir.

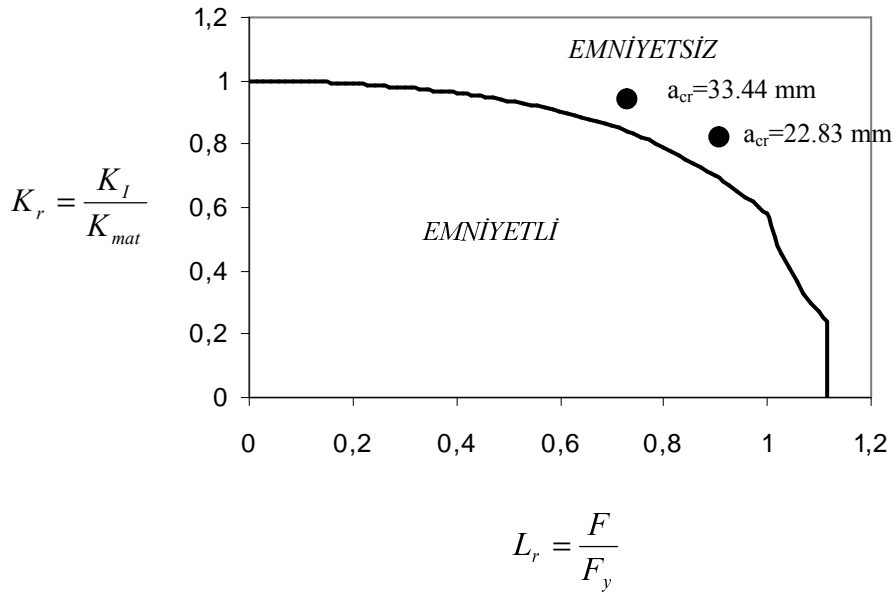
4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, SINTAP prosedürü kullanılarak kaynak bölgesinde çatlak içeren plakaların düzlemsel çekme yükleri altındaki kırılma davranışı incelenmiştir. Kaynaklı plakanın gevrek kırılma ile hasara uğramayacağı kritik çatlak boyları farklı dikiş kalınlıkları ve farklı yük genlikleri için tespit edilmiştir. Kaynaklı plaka için elde edilen sonuçlar homojen plaka için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Şekil 5, çatlak içeren homojen plaka için elde edilen FAD diyagramını göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere, homojen plakada $L_r=0.94$ değeri için kritik çatlak boyu 36.31 mm'dir. Bu yükleme durumu için, plaka bu kritiktenden daha büyük bir çatlak içerirse plakada kırılma meydana gelir. Bu değer altındaki plaka emniyetlidir. $L_r=0.97$ için ise kırılmaya neden olmayacak çatlak boyu sınırı 25.48 mm'dir.



Şekil 5. Çatlak içeren homojen plaka için FAD diyagramı



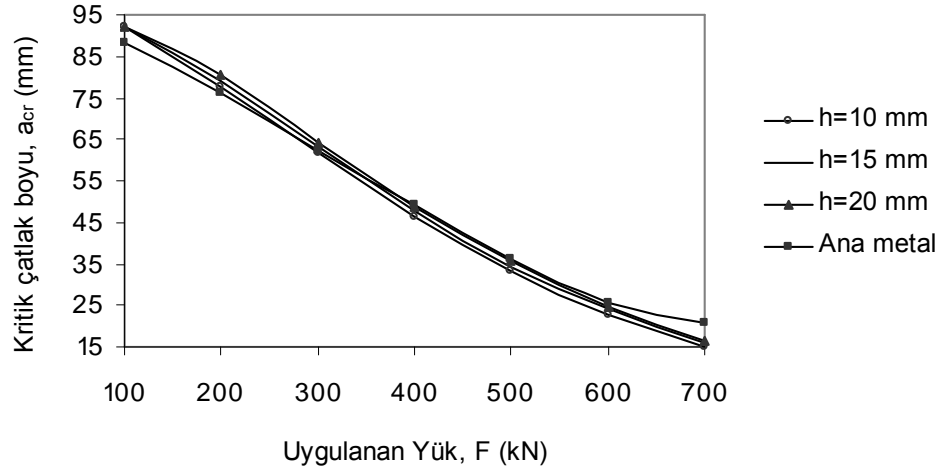
Şekil 6. Çatlağın kaynak bölgesinde olması durumu için FAD diyagramı

Şekil 6’da ise, dikiş kalınlığı $h=10$ mm olan kaynaklı plakanın kaynak bölgesinde çatlak bulunması durumunda elde edilen FAD diyagramı görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, çatlak boyu 33.44 mm’ye ulaştığında plakanın güvenle taşıyabileceği yük için $L_r=0.71$, 22.83 mm için $L_r=0.86$ olmalıdır. Plakanın emniyetle taşıyabileceği yük değerlerindeki bu azalma, kaynak malzemesinin kırılma tokluğu değerinin ana metale göre düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, ana metal ile kaynak malzemesinin akma ve çekme mukavemet değerleri ile kırılma tokluğu ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirinden farklıdır. Bu da homojen plaka ile kaynaklı plakanın limit yükleri birbirinden farklı olması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla L_r ile tanımlanan eksen iki durum için aynı yük değerlerine karşılık gelmez. Çünkü limit yük değerleri;

Kaynaklı plaka için $F_y=700641$ N
 Homojen plaka için $F_y=642671$ N

olarak hesaplanmıştır.

Bu değerler gözönüne alındığında, kaynaklı plaka için $L_r=0.71$ ile homojen plaka için $L_r=0.94$, 500000 N'a; kaynaklı plaka için $L_r=0.86$ ile homojen plaka için $L_r=0.97$, 600000 N'a karşılık gelmektedir. Diğer bir sonuç ise, eşit çatlak boyları için kaynaklı parça akma yükünün % 71 'ine kadar kırılmadan dayanabilirken, homojen çelik plakada ise bu değer % 94'e ulaşmaktadır. Bu duruma, homojen çelik plakasının kırılma tokluğunun kaynaklı parçaya göre daha yüksek olması; yani çeliğin kaynaktan daha tok malzeme olması neden olur.



Şekil 7. Uygulanan yüke bağlı olarak kritik çatlak boylarının değişimi

Şekil 7, uygulanan yüke bağlı olarak kritik çatlak boyunun değişimini göstermektedir. Dikiş kalınlığının artmasıyla müsaade edilen çatlak boyunda çok küçük bir değişiklik olmuştur. 300000 N'luk yük uygulandığında kritik çatlak boyu, a_{cr} , kaynak dikiş kalınlığı, $h=10$ mm için 62.42 mm; $h=15$ mm için 63.06 mm ve $h=20$ mm için ise 62.43 mm olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan yöntem, değişik parametreler gözönünde bulundurularak homojen veya kaynaklı parçaların kırılma davranışını ortaya koymak için hızlı ve güvenli sonuç veren bir yöntemdir. Bu yöntem, kırılma davranışlarının inceleneceği değişik geometriye sahip makina parçaları ve kaynaklı bağlantılar için kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, GKSS Araştırma Merkezi'nin (Hamburg, Almanya) desteği ile hazırlanmıştır. Yazar, Dr. Mustafa Koçak ve Dr. Afshin Motarjemi'ye desteği ve yardımı için teşekkür etmeyi bir borç bilir.

KAYNAKLAR

- Ainsworth R. A., Bannister A. C., Zerbst U. (2000): "An Overview of the European Flaw Assessment Procedure SINTAP and Its Validation", Int. J. Press. Vessels and Piping, Vol. 77, p. 869-876.
- Chi W.M. (1999): "Prediction of Steel Connection Failure using Computational Fracture Mechanics", Doktora Tezi, Stanford University.
- Koçak M., Motarjemi A. K. (2002): "Structural Integrity of Advanced Welded Structures", IIW Int. Conf. on Advanced Processes and Technologies in Welding and Allied Processes, Copenhagen, Denmark.
- Motarjemi A. K., Koçak M. (2002): "Fracture Assessment of a Clad Steel Using various SINTAP Defect Assessment Procedure Levels", Fatigue Fracture Engineering Material Structure, 25, 929-939.
- Uğuz A. (1996): "Kırılma Mekaniğine Giriş", Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.
- Webster S., Bannister A. (2000): "Structural Integrity Assessment Procedure for Europe of the SINTAP Programme Overview", Engineering Fracture Mechanics, 67, 481-514.

SEMBOL LİSTESİ

a	çatlak boyu
F	uygulanan dış yük
F_y	limit (akma) yükü
$f(L_r)$	hasar tespit eğrisinin fonksiyonu
F_y^W	kaynak metalinin limit (akma) yükü
F_y^B	ana metalin limit (akma) yükü
F_y^M	kaynaklı parçanın limit (akma) yükü
K_I	gerilme şiddet faktörü
K_{mat}	malzemenin kırılma tokluğu
K_r	K_I/K_{mat}
L_r	yük oranı, F/F_y
M	mismatch oranı (σ_y^W / σ_y^B)
σ_y^B	ana metalin akma mukavemeti
σ_y^W	kaynak metalinin akma mukavemeti
σ_u	çekme veya kopma mukavemeti

EK :

Bu çalışmada SINTAP prosedürünün II. Basamak kullanılan diğer denklemler aşağıda verilmiştir (Koçak ve Motarjemi, 2002).

$$f(Lr) = \begin{cases} [1 + 0.5L_r^2]^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu^M L_r^6)] & 0 \leq L_r < 1 \\ f(L_r = 1)L_r (N^M - 1) / 2N^M & 1 \leq L_r < L_r^{\max} \\ 0 & L_r > L_r^{\max} \end{cases}$$

$$\mu^M = \frac{(M-1)}{(F_y^M / F_y^B - 1) / \mu^W + (M - F_y^M / F_y^B) / \mu^B}$$

$$N = 0.3 \left[1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right]$$

$$L_r^{\max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5(1 + \sigma_m^W / \sigma_y^W) (F_y^M / F_y^W) \\ 0.5(1 + \sigma_m^B / \sigma_y^B) (F_y^M / F_y^B) \end{array} \right.$$

$$\frac{F_y^M}{F_y^B} = \begin{cases} M & 0 \leq \psi \leq \psi_1 \text{ için} \\ \frac{24(M-1)}{25} \left(\frac{\psi_1}{\psi} \right) + \frac{(M+24)}{25} & \psi_1 \leq \psi \text{ için} \end{cases}$$

$$M = \frac{\sigma_{yW}}{\sigma_{yB}}$$

$$\psi_1 = e - (M - 1) / 5$$