



KESMEYE ZORLANAN İNCE ÇELİK LEVHALARLA YAPILAN  
CİVATALI BAĞLANTILARDA HASAR ŞEKİLLERİ

(FAILURE MODES OF BOLTED-THIN SHEET STEEL  
CONNECTIONS) LOADED IN SHEAR

S. SAYLAN\*, M. BELEVİ\*\*

ÖZET / ABSTRACT

Genellikle çatı döşemeleri, zemin döşemeleri, duvar panelleri ve köprülerde kullanılan G300 ve G550 soğuk çekilmiş saclarla yapılan cıvatalı bağlantıların tasarımında, AS/NZS 4600, AISI, CSA-S 136, Eurocode 3 gibi ulusal standartlara uyulmaktadır ve kenar yırtılma hatası, yuva hatası ve net kesit hatası olmak üzere üç farklı hata modu gözlenmektedir. Bu hata modlarının çekme kuvvetlerini tahmin edilebilmek için uluslararası tasarım standartları değişik formüller önermektedir.

Deney verilerinin, tasarım standartları kullanılarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılması sonucu, Eurocode 3 tasarım standardının, en doğru ve güvenilir hata modu tahmini sağladığı sonucuna varılmıştır.

*AS/NZS 4600, AISI, CSA-S 136, Eurocode 3 standards are used to design of cold formed sheet steels which are generally used for roof decks, floor decks, wall panels and bridge forms. Three different failure modes are observed shear tests of bolted connections that are fabricated from thin G300 and G550 sheet steels; end pull-out, bearing and net section failures. The national design standards recommended different design equations for predict to ultimate capacity that failure modes.*

*As a result of compare to experimental tests data with predicted ultimate connection strengths which are determined using design standards, all failure modes are more accurately predicted to using Eurocode 3 design standards.*

ANAHTAR KELİMELELER / KEYWORDS

Soğuk çekilmiş, İnce sac, Cıvatalı bağlantılı, Hata modu  
*Cold formed, Sheet steel, Bolted connection, Failure mode*

---

\* Göktepe Plastik A.Ş., Işıkkent, İZMİR.

\*\* DEÜ Mühendislik Fak., Makina Müh. Bölümü, Bornova, İZMİR.

## 1. GİRİŞ

Soğuk çekilmiş saclarla yapılan civatalı birleştirmelerde, AS/NZS 4600 (Avustralya-Yeni Zelanda), AISI (Amerika), *Eurocode 3* (Avrupa) ve CSA-S 136 (Kanada) gibi tasarım standartlarına uyulmalıdır (Rogers ve Hancock, 2000). Gerilme konsantrasyonlarının eleman ve bağlantıların üzerindeki zararlı etkilerini azaltmak, aynı zamanda bu eleman ve bağlantıların yapısal davranışlarını etkilemeyen küçük deplasmanları gösterebilmesine olanak sağlamak için sacların minimum uzama kabiliyetine sahip olması gerekmektedir (Dhalla ve Winter, 1974 a,b).

Deneyleri yapılan 0.42 mm kalınlığında G300 ( $\sigma_c=300$  Mpa) yumuşak sac ve 0.8 mm kalınlığında G550 ( $\sigma_c= 550$  Mpa) yüksek mukavemetli saclarla yapılan bağlantıların maksimum yük taşıma kapasitesi, sacların soğuk haddelenme yönüne göre enine, boyuna, çapraz kesilmesine (Wu vd., 1995); kesilmiş sacın şekline ve boyutlarına; civata tipine, sayısına ve sac üzerine yerleşimine bağlı olarak yuva hatası, kenar yırtılması, net kesit hatası ve civata kesilmesi gibi olası hata modlarından biri tarafından yönlendirilmektedir (Winter, 1956). Ancak ince saclarla yapılan bağlantılarda civata kesilmesine rastlanmamaktadır.

0.42 mm G300 ve 0.8 mm G550 sacdan yapılmış 63 adet bağlantının davranışları incelendiğinde, AISI ve AS/NZS 4600 ile CSA-S 136 tasarım standartlarının kesmeye çalışan ince sac bağlantıların hata modunun doğru tahmininde, *Eurocode 3* standardına göre daha başarısız oldukları gözlenmiş ve bağlantının yük taşıma kapasitesine en yakın ve doğru değerlere, *Eurocode 3* tasarım standardı formülleri kullanılarak ulaşılmıştır

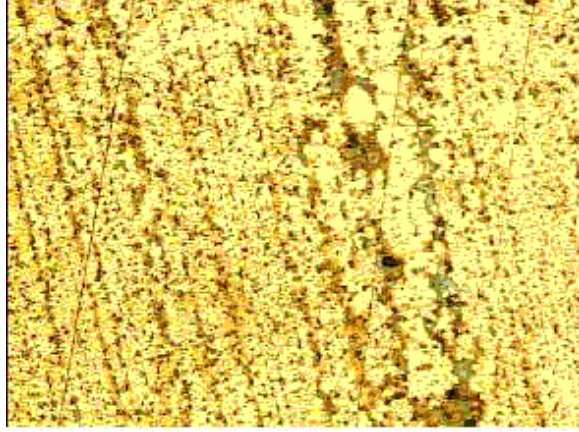
## 2. SOĞUK ÇEKİLMİŞ SACLAR

### 2.1. Soğuk Çekilmiş G300 Yumuşak Sac ve G550 Yüksek Mukavemetli Saclar

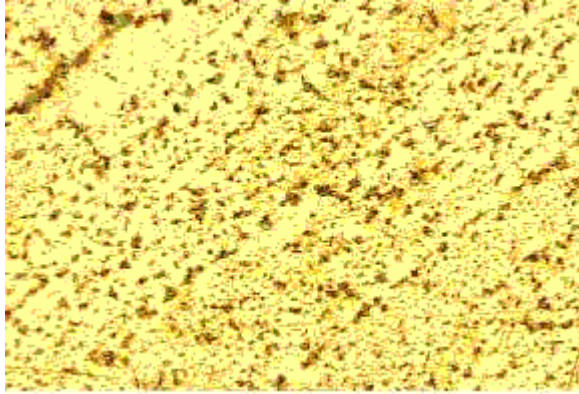
Bu araştırmada incelenen saclar, soğuk çekilerek üretilmiş, bu üretim yöntemi ile tam ve doğru kalınlık elde edilmiş, mukavemet ve sertliği arttırılmış saclardır. Bu proses soğuk çekilmiş sacın tane yapısının haddelenme yönünde uzamasına sebep olur ve malzeme mukavemeti doğrusal olarak artar, duktilitesi azalır. Soğuk çekilmenin bir sonucu olan toplam dislokasyon yoğunluğunun artışından dolayı tane distorsiyonları artar, ancak ısı işlem yoluyla bozuk tane yapısını değiştirmek ve çelik özelliklerini kontrol etmek mümkündür. Hem G300 hem de G550 saclarına gerilim giderme tavlama uygulanmış, bu esnada rekristalizasyon oluşmamasına rağmen toplam dislokasyon yoğunluğu azalmıştır. Gerilim giderme tavlama çeliğin rekristalizasyon sıcaklığının altına ısıtılıp kalınlık boyunca ısı sabit olana kadar o ısıda tutulup ardından yavaşça soğutulmasıyla yapılır. G300 sacların tavlama, G550 ile karşılaştırıldığında daha yüksek sıcaklıktadır. Bu olay bir miktar tercihli tane yönelmesi gözlenmesine rağmen yumuşak saclarda (G300) yaklaşık İzotropik malzeme özellikleriyle sonuçlanır (Rogers ve Hancock, 1999).

G550 ve G300 saclarının malzeme özellikleri, parçaların haddelenme yönüne göre kesilme doğrultusuna ve haddelenme oranına bağlı olarak değişir. Malzeme soğuk olarak haddelenerek ne kadar fazla inceltirse sacın mukavemeti o kadar yüksek olur, taneler haddelenme doğrultusunda uzayarak yönelir, tane sınırları kaybolmaya başlar ve haddelenme miktarı attıkça tanelerin uzaması ve yönelmesi artarak mukavemet yükselir. Şekil 1’de enine kesilmiş sacdaki, Şekil 2’de çapraz yönde kesilmiş sacdaki tane yönelmesi görülmektedir. Ancak düşük haddelenme oranına sahip yumuşak saclarda tane yönelmesi gözlemlenemez, tane büyüklüğü birbirlerine yakın ve tane sınırları belirgindir. Bu yüzden mukavemet düşüktür. Haddelenme yönünde (boyuna), dik yönde (enine), 45° açıyla (çapraz) kesilen

malzemeler farklı çekme mukavemetleri göstermektedir. Enine kesilen sacların çekme ve akma mukavemet değerleri, boyuna ve çapraz yönde kesilmiş örneklerle göre oldukça yüksektir. Haddelendirme oranı yükseldikçe kesilme yönüne bağlı mukavemetler arasındaki fark artmaktadır.



Şekil 1. Enine kesilmiş sac tane yapısı (5x objektif)



Şekil 2. Çapraz kesilmiş sac tane yapısı (5x objektif)

Deneylerde kullanılan G550 ince sacların soğuk çekilme miktarı yüksek olduğu için mukavemeti yüksektir ve enine, boyuna, çapraz kesilen örnekler arasında mukavemet farkı vardır ( $\sigma_{\text{enine}}=577$  MPa,  $\sigma_{\text{çapraz}}=553$  MPa,  $\sigma_{\text{boyuna}}=539$  MPa). G300 ince sacın ise çok düşük haddelendirme miktarından dolayı mukavemeti düşüktür ve yumuşak sac olarak nitelendirilir. Ayrıca tane yönelmesinin az olmasından dolayı kesilme yönüne bağlı olarak fazla bir mukavemet farklılığı gözlenmediği için G300 sacın malzeme özellikleri kesilme yönüne bağlı değildir diye düşünülebilir ( $\sigma_{\text{enine}}=350.7$  MPa,  $\sigma_{\text{çapraz}}=340.4$  MPa,  $\sigma_{\text{boyuna}}=333.1$  MPa).

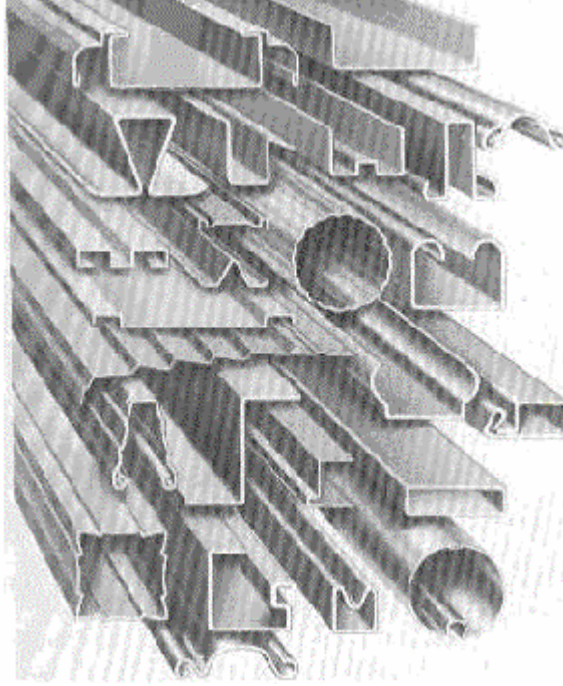
## 2.2. Soğuk Çekilmiş Sacların Avantajları

Soğuk çekilmiş çeliklerin bina konstrüksiyonlarında kullanılmaya başlanması 1850'lerde Amerika ve İngiltere'de başlanmıştır. Bununla birlikte 1940'lardan sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Genel olarak soğuk çekilmiş saclar bina tasarımında aşağıdaki avantajları sağlar,

- Kalın sıcak çekilmiş saclarla kıyaslandığında, düşük yük ve kısa mesafelerde daha ekonomik bir tasarım ortaya çıkmaktadır.

- ii. Alışılmış olandan farklı kesit konfigürasyonları, soğuk çekilme işlemleri ile ekonomik olarak sağlanabilir ve sonuç olarak avantajlı mukavemet/ağırlık oranı elde edilir (Şekil 3).
- iii. Yük taşıma panelleri ve döşemeleri, zemin, çatı, duvar konstrüksiyonu için yararlı yüzeyler sağladığı gibi elektrik ve elektriksel iletim boruları için kapalı küçük hücreler oluşturur.
- iv. Yük taşıma panelleri ve döşemeleri yalnızca yüzeye dik gelen kuvvetlere değil, aynı zamanda kesme kuvvetlerine de karşı koyar.



Şekil 3. Soğuk çekilmiş kesitlerin değişik şekilleri

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapısal elemanlar, tahta, beton gibi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında aşağıdaki özellikleri gösterirler;

1. Hafiflik
2. Yüksek mukavemet ve rijitlik
3. Seri imalat ve prefabrikasyon kolaylığı
4. Hızlı ve kolay montaj demontaj
5. İklimsel koşullardan oluşan gecikmeler azalır (örneğin, beton dökümü hava sıcaklığına bağlı olarak zorlaşmaktadır).
6. Daha doğru detaylandırma
7. Çevre sıcaklığında büzülme ve eğilme olmaz.
8. Üniform kalite

### 3. BAĞLANTI TASARIMI VE HATALARI

#### 3.1. Soğuk Çekilmiş Sacların Cıvatalı Bağlantı Tasarım Koşulları

Bu bölümde cıvatalı bağlantıların mukavemetinin tahmini için kullanılan Avustralya AS/NZS 4600, Amerika AISI, Kanada CSA-S 136 ve Avrupa *Eurocode 3* tasarım

standartlarındaki mukavemet formüllerinin açıklamaları, karşılaştırılmaları ve şartları değerlendirilmektedir.

AS/NZS 4600 ve AISI tasarım standardının net kesit kuvveti için önerdiği bağıntı,

$$F_{net}=(1-0.9r+3rd/s)A_n.\sigma_c = A_n.\sigma_c \quad (1)$$

olup burada; r: civatalarla iletilen kuvvetin parça kesitindeki kuvvete oranı, d: civata çapı, s:ince malzemeler için sac genişliği,  $A_n$ : net kesit alanı ve  $\sigma_c$ : malzemenin çekme mukavemetidir. Eşitlik (1)'de gösterilen denklem *Eurocode 3* tasarım formülasyonuna benzemektedir; ancak, *Eurocode 3*'te, d: civata deliğinin nominal çapı olarak tanımlanır. CSA-S 136 tasarım standardı, kesitteki civataların pozisyon ve sayısına bağlı gerilim azaltma faktörü içermez ve net kesit kuvveti,

$$F= A_n. \sigma_c \quad (2)$$

formülü ile hesaplanır.

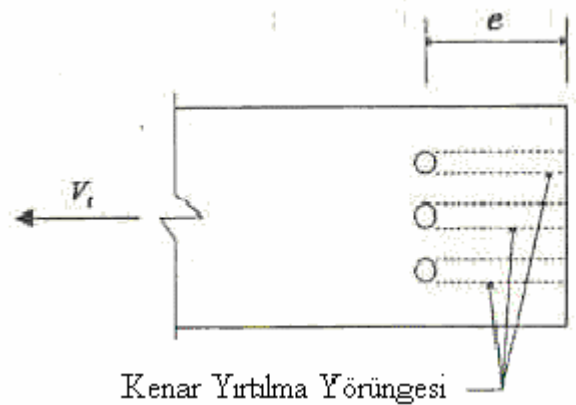
Yuva kuvveti, tasarım standardına bakmaksızın,

$$F_b= c.t.d. \sigma_c \quad (3)$$

olup, burada d: civatanın nominal çapı, t: sac kalınlığı ve c: değişken yuva katsayısıdır. AS/NZS 4600 ve AISI standartları, somun ve civata kafasının altında rondela bulunan tek kesme düzlemlili bindirme bağlantı için c=3 olarak belirlemiştir. Oysaki aynı şartlardaki bağlantı için *Eurocode 3* tasarım standardı c katsayısını 2 olarak kabul etmiştir. Kanada standardında c katsayısı, civata çapının sac kalınlığına oranına bağlı olan delik kenarının stabilitesi diye tanımlanır ve c değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Değişken yuva katsayısı, c

d/t	c
d/t =10	3
10< d/t <15	30 t/d
d/t =15	2



Şekil 4. Tek civatanın kenar yırtılma yörüngesi

Cıvatalı bağlantının kenar yırtılma kuvveti, civata deliğinden, kuvvet uygulama yönüne uzanan iki paralel düzlemin uzunluğuna bağlıdır. Hataların bu tipi blok kesme kopmasından farklıdır (Blok kesme kopması, yük yönüne dik kesitte yırtılma ile yük yönüne paralel yönde boyuna kesilmenin birlikte oluşumu sonucu numunenin kopmasıdır). Çünkü her civatanın yırtılması Şekil 4'te gösterilen kendi yörüngesi boyuncaadır. Her civatanın kenar yırtılma kuvveti AS/NZS 4600 ve AISI standartlarında

$$F_e = t.e. \sigma_c \quad (4)$$

şeklindedir ve e: kenara yakın deliğin merkezinin kuvvet düzlemine veya sac kenarına olan uzaklığıdır. *Eurocode 3* tasarım standardında kenar yırtılma kuvveti, yukarıdaki formülasyondan farklı olarak, bir faktörle azaltılmıştır ve aşağıdaki gibidir.

$$F_e = t.e. \sigma_c / 1.2 \quad (5)$$

CSA-S 136 tasarım standardı kullanılan bir bağlantıdaki her civatanın nominal kenar yırtılma kuvveti, Eşitlik 2'de daha önceden tanımlanan net kesit kuvveti ile hesaplanır. Burada Şekil 4'te gösterilen civata için net kesit alanı,

$$A_n = 0,6.2t.(e-d_h/2) \quad (6)$$

eşitliği ile belirlenir ve burada  $d_h$ : civata deliğinin çapıdır.

### 3.2. Olası Hata Modları

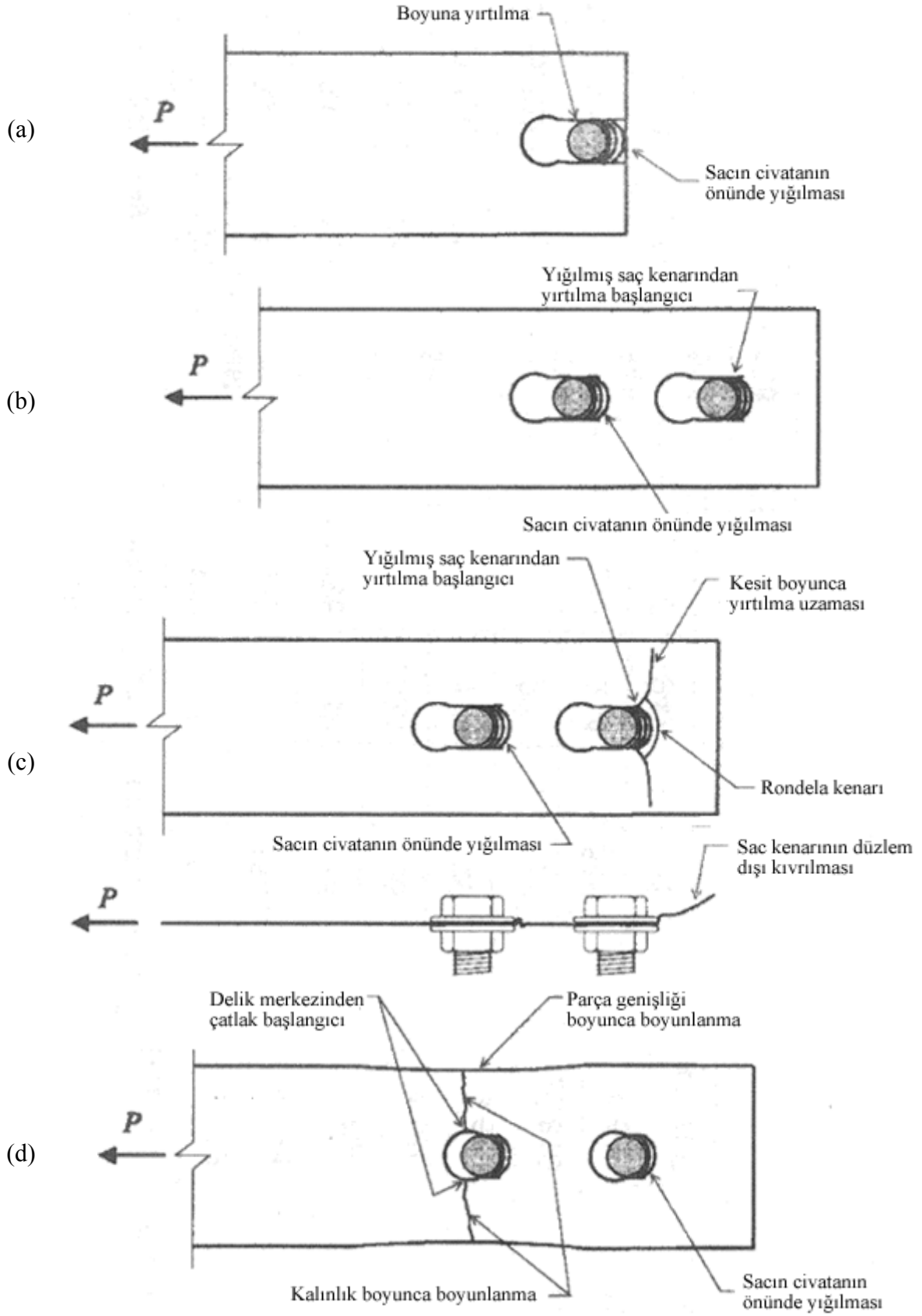
Cıvatalı bağlantıların hata modları 4 sınıfa ayrılmıştır; bunlar, kenar yırtılması, net kesit hatası, civata kesilmesi ve yuva hatasıdır. Deneyleri yapılan bütün cıvatalı bağlantı örnekleri sadece sac hatalarının oluşacağı şekilde ölçülandırılmıştır ve bu yüzden civata kesilmesi tanımlanmamıştır. Testler esnasında oluşan tipik hatalar Şekil 5'te gösterilmiştir.

Kenar yırtılma hatası, tek cıvatalı bağlantılarda, civata deliği merkezinin kenara olan uzaklığının, civata çapının 3 katından küçük olduğu durumlarda meydana gelir. Bu yırtılma hatası sırasında yırtılan sac Şekil 5a'da görüldüğü gibi yığılarak sac levha kenarına doğru ilerlemektedir.

İnce sac bağlantıları, civatanın önünde sacın yığılması ile yük yönünde başlangıç yırtılmasının oluştuğu, kenar yırtılma hatasının oluşumuna benzer yuva hatası göstermektedir (Şekil 5b). Bazı örneklerde, ilave yırtılmalar, test parçasının sonuna yakın birikmiş malzemenin kenarında gözlemlenir. Bazı test örnekleri için, yığılmış malzemenin kenarındaki bu yırtılmalar Şekil 5c'de gösterildiği gibi yük ekseninin yönüne dik doğrultuda yayılmaktadır. Sac düzlem dışına ve civatanın arkasına doğru kıvrıldığında ve rondelanın önünde sac yığılması oluştuğunda, numunenin çekme yükü yırtılma ile ilişkilidir. Bu düzlem dışına kıvrılma, sac levhanın uç kısmı kıvrılarak sınırlanır ve yırtılma miktarı azaltılabilir. Kenarların kıvrılarak sağlamlaştırılması veya küçük metal klipslerin kullanılması ile bağlantının kenarının düzlemde kalması sağlanır.

G300 yumuşak sac, G550 sacla karşılaştırıldığında, daha yüksek deformasyon kapasitesine sahiptir. Bunun sebebi, G300 sacın daha yüksek duktilitesidir (Rogers ve Hancock,1997). Düzlem dışı deformasyon kapasitesindeki artış düzlem dışı deformasyon yırtılmaları ile yönlendirilir ve bu yırtılmalar, civatanın önünde yığılmış malzemenin köşesinde meydana gelmeyip, orijinal civata deliği merkezinde oluşur.

Cıvatalı bağlantı örnekleri, net kesit boyunca çatlak ilerlemesinden önce büyük miktarda yuva distorsiyonları sergiler. Net kesit çatlağı bu durumda, numunenin boyun vermesinden sonra, kenardan en uzak olan orijinal civata deliği merkezindeki kısa yarıklarla devam eder, malzemenin akması genişlik boyunca olur ve ardından çekme yükünde net kesit yarığı oluşur (Şekil 5d). Yumuşak saclar yüksek deformasyon sertleşmesi kapasitesine sahiptir ve soğuk çekilmiş G550 saclarla karşılaştırıldığında, daha fazla akma ve boyunlanma sergilerler. İnce G550 sacların çoğunda, son çatlak bölgesine bitişik alanda boyunlaşma görülebilir. Bu davranış, kenara en yakın civata deliği önünde birikmiş sacdan başlayan çapraz veya dikine yarıkların oluştuğu yuva hatalarından farklıdır.



Şekil 5. Cıvatalı bağlantı hata örnekleri (a) Kenar yırtılması; (b) Kenar kıvrılması engellenmiş yuva hatası; (c) Kenarı kıvrılmış yuva hatası; (d) Net kesit hatası



### 3.3. Yuva Hatası ve Net Kesit Çatlağının Tanımlanmasında Önerilen Yöntemler

Yapısal tasarım için kullanılan formülasyonun gelişiminde, test sonuçlarının önerilen formüller ile karşılaştırılması gerekmektedir. Oluşan hata modu ile önerilen tasarım modelinin eşleştirilebilmesi için deneylerde gözlemlenen hatalar dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Yuva hatasının olduğu ve test örneğinin kenarında düzlem dışı kıvrılmanın engellenemediği bazı civatalı bağlantılarda hata modu tanımlanamayabilir. Civata deliğinde lokal yırtılma tanımlanamayabilir ve bu da yuva hatasının özelliğidir. Başlangıç gözlemi olarak, bu test örneklerinde, net kesitin çatlaması sayesinde hata belirlemektedir; bununla birlikte gözlemlenen sac yırtılmasına, civata deliğinin çevresinde oluşan düzlem dışı sac distorsiyonlarına ve lokal yuva gerilimlerine neden olabilir. Net kesit çatlağı aşağıdaki özelliklerle tanımlanabilir,

1. Boyunlanma, test örneğinin genişliği boyuncadır.
2. Boyunlanma, test örneğinin kalınlığı boyuncadır.
3. Net kesit hatası, numunenin kenara en uzak olan civata deliğinde oluşur.
4. Test örneğinde önemli bir düzlem dışı kıvrılma oluşmaz.
5. Civata deliğinin yakınında önemli bir düzlem dışı deformasyon oluşmaz.

Test parçasının sonunda oluşan tipik yuva hatası durumunda, düzlem dışı kıvrılma ve civata deliğinin yakınında sacın kapsamlı düzlem dışı distorsiyonu oluşmaz, parçanın yırtılma eğilimi azalır. Eğer yırtılmalar belli değilse ve civata önünde yığılma varsa, hata yuva geriliminden kaynaklanabilir. Eğer yırtılmalar görülüyorsa, yuva geriliminin bir sonucu olarak hesaplanabilir ve aşağıdaki özellikler gözlemlenir:

1. Test parçasının kenarında önemli düzlem dışı kıvrılma oluşur.
2. Civataların yakınında önemli düzlem dışı deformasyonlar oluşur.
3. Test parçası genişliğince boyunlanma olmaz.
4. Sac parçası kalınlığınca yırtılma oluşmaz
5. Yırtılmalar rondela veya civatanın önünde yığılan malzemenin yakınında oluşur ve merkezi civata deliğinin eksenine düşer.
6. Yırtılmalar genellikle test parçasının kenarına çapraz doğrultuda yayılmaktadır.

Yuva ile ilişkilendirilmiş yırtılmaların, çekme yükünden sonra oluşumuna sıklıkla rastlanır ve bundan dolayı bağlantının yük taşıma kapasitesi, çekme yükünden etkilenmez. Bununla birlikte yük yönüne yaklaşık dik olan önemli yırtılmalar hata modunun farkedilmesini oldukça etkilemektedir ve çoğunlukla hata tipinin tanımlanamamasıyla sonuçlanmaktadır.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 4.1. Malzeme Özellikleri ve Deney Koşulları

Toplam 63 adet tek kesme düzlemleri bindirme saclarının civatalı bağlantı testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır. Deneysel testlerin amacı, G300 ve G550 ince sacdan yapılan civatalı bağlantıların varolan *Eurocode 3*, *AS/NZS 4600*, *AISI* ve *CSA-S 136* tasarım koşullarının değerlendirilmesi ve hata modlarının belirlenmesidir. Soğuk çekilmiş saclar standart rulolar halindedir. Malzeme özellikleri ve kalınlıkları aynı olmasına rağmen, soğuk çekilmiş sacların anisotropik yapılarından dolayı, aynı sacdan farklı yönde kesilen parçalar farklı mukavemetler göstermektedir (Çizelge 2 ve Çizelge 3).



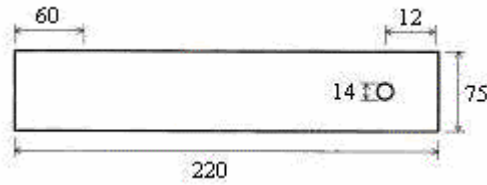
Kesmeye göre test edilen tek kesme düzlemlili bindirme bağlantılarının farklı ebat ve şekillerdeki örnekleri, civata tip ve sayısının farklılıkları ile birlikte kenar yırtılma, yuva ve net kesit hataları olmak üzere üç ana hata modunu ortaya çıkarır. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gözlemlenmesi gereken hata modları ve o hatanın oluşmasını sağlayacak sac parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 2. 0.8 mm yüksek mukavemetli ince sac deneysel mukavemet sonuçları

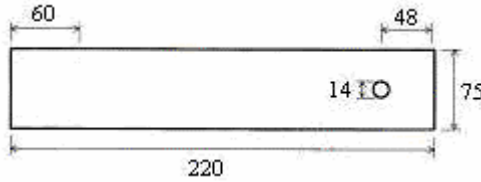
	Enine Kesilmiş Sac	Boyuna Kesilmiş Sac	Çapraz kesilmiş sac
Çekme Mukavemeti (MPa)	577	539	553
Uzama %	21,9	25	19,4

Çizelge 3. 0.42 mm yumuşak ince sac deneysel mukavemet sonuçları

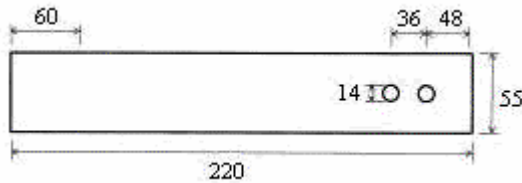
	Enine Kesilmiş Sac	Boyuna Kesilmiş Sac	Çapraz kesilmiş sac
Çekme Mukavemeti (MPa)	350.7	333.1	340.4
Uzama %	30.5	30.8	25.8



Şekil 6. Tek civatalı, kenar yırtılma hatası oluşan test örneği



Şekil 7. Tek civatalı, yuva hatası oluşan test örneği



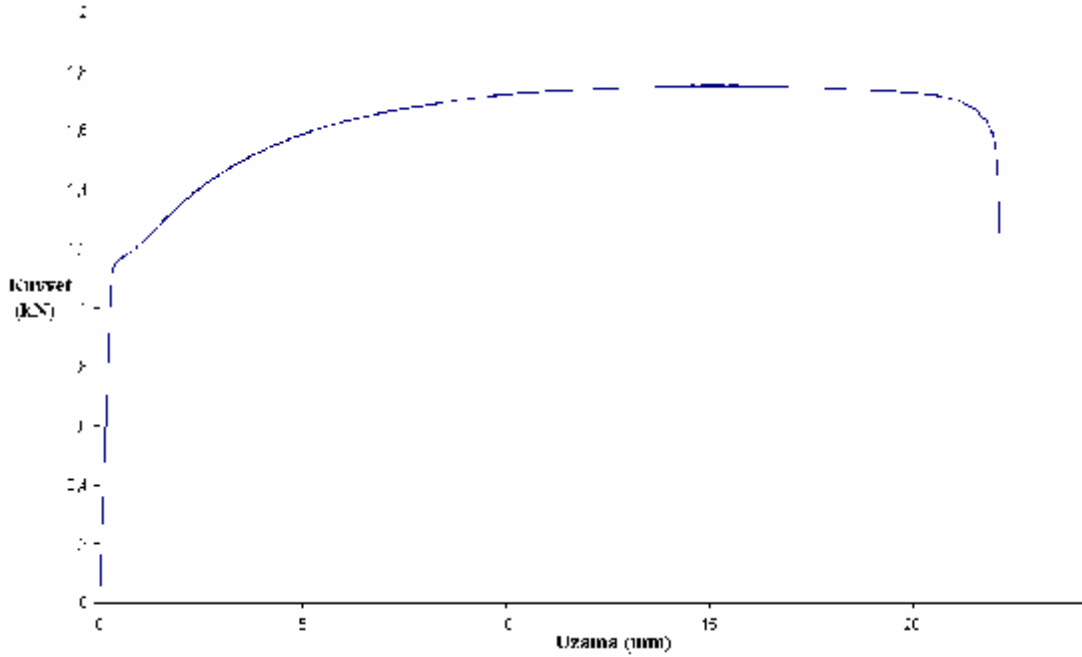
Şekil 8. İki civatalı, net kesit hatası oluşan test örneği

Yapılan deneylerde civata kesilmesi hatasıyla karşılaşmamak için 8x8 kalite M12 galvanizli civata ve dış çapı 33.6 mm olan rondela kullanılmıştır. Rogers & Hancock tarafından yapılan G550 sac-civatalı bağlantı test sonuçlarında, klasik veya birleşik rondelanın kullanılması ile çekme yuva yükünde önemli bir farklılığın olmadığı görülmüştür. Test numuneleri, çekme kuvveti ile aynı eksendeki, tek, iki veya üç civatalı, eş merkezli yüklenecek tek kesme düzlemlili bindirme bağlantılardır. Civata çapından 2 mm büyük civata deliği açılmasından dolayı, delik merkezine göre civatanın merkezinin değişik konumları oluşabilmektedir. Bütün civatalar minimal yükten sonra bağlantının kayabilmesi için 10 Nm'den az bir torkla sıkılmıştır ve bundan dolayı 0-4 mm arasında olası bir kayma mümkündür. Bununla birlikte 2-4 mm'lik bağlantı kayması normaldir. Bağlantılar test

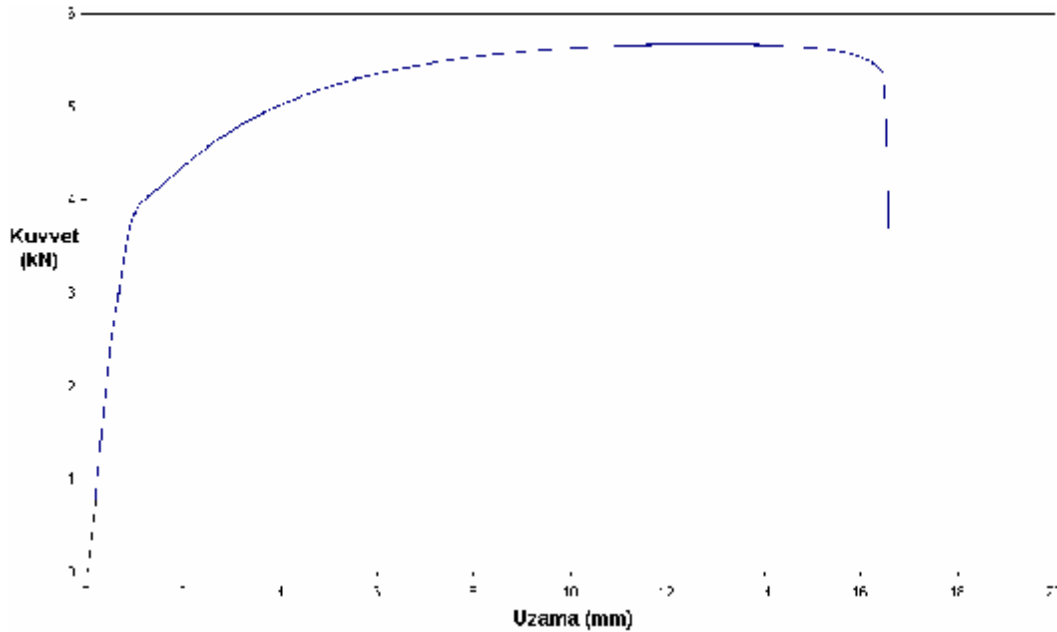
edilirken çekme yükündeki büyük farklılıkların ve sapmaların ortadan kaldırılabilmesi için 2 mm/dak. gibi yavaş bir hızla çekilmiştir.

Bağlantının başlangıç kaymasından dolayı bir deformasyon sınırı kullanılmadan çekme yükü elde edilir. Sac malzemelerin tümünün akma ve çekme mukavemetleri TS 138 standardına göre yapılan çekme testlerinden elde edilir. Sac parçaların tüm tiplerinin malzeme özellikleri, sac kalınlıkları kullanılarak hesaplanır

Test edilen G550 sacların tümünde çok az deformasyon sertleşmesi ile sürekli akma olur ve G300 saclar bir gerilim deformasyon bölgesinin ardından akma bölgesini takip eden keskin bir akma noktası gösterir (Şekil 9 ve Şekil 10).

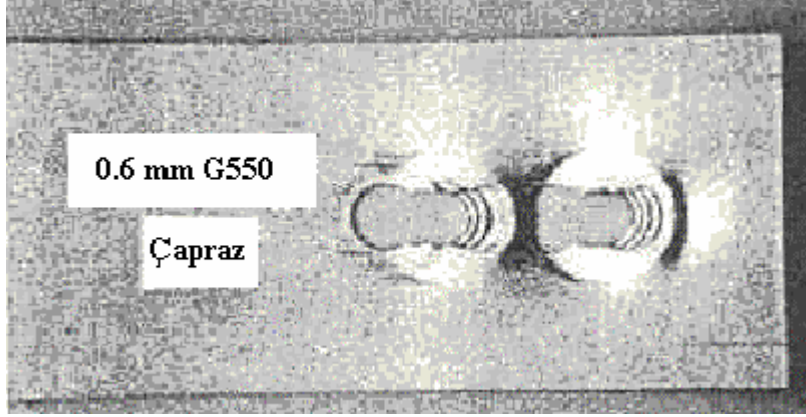


Şekil 9. 0.42 mm G300 sac numune kuvvet-uzama diyagramı



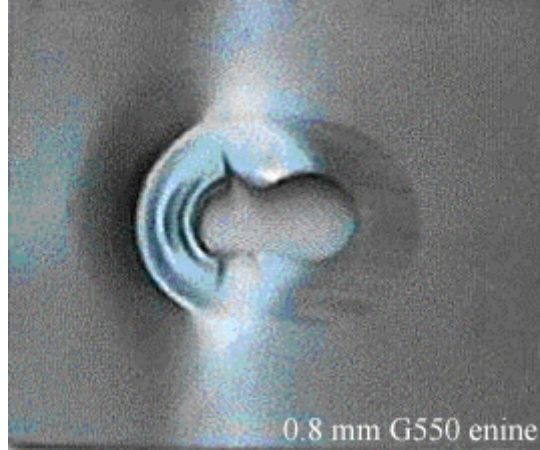
Şekil 10. 0.8 mm G550 sac numune kuvvet-uzama diyagramı

Yapılan deneylerde sacların kesilme yönüne bakmaksızın yuva hatası ile net kesit hatası rahatça gözlenebilmiştir. Şekil 11’de gösterilen iki cıvatalı test örneği, sac malzemenin cıvatanın önünde yığıldığı tipik yuva hatası davranışı sergilemektedir. Burada numunenin kıvrılması yer almamakta ve bu yüzden sacın dik yırtılması gözlemlenmemektedir.



Şekil 11. İki cıvatalı bağlantı yuva hatası

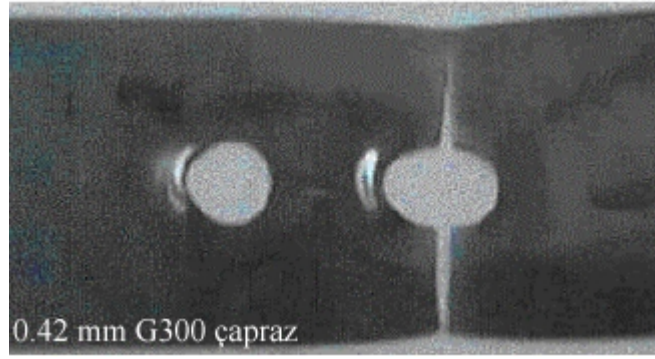
Bazı örneklerde yuva hatasıyla birleşmiş yırtılmanın, yaklaşık olarak kuvvet yönüne dik doğrultuda oluştuğu Şekil 12.’de gösterilmiştir. Yapılan deneylerde sacın cıvata deliğinin yakınındaki düzlem dışına önemli deformasyonu ile bağlantılı yuva hatası gözlemlenmiştir. İki cıvatalı bağlantıda oluşan net kesit hatası Şekil 13’te gösterilmiştir



Şekil 12. Kenara 48 mm uzaktaki tek cıvatalı bağlantı yuva hatası

#### 4.2. Çekme Test Sonuçları ile Tasarım Formüllerinin Yeterliliğinin Karşılaştırılması

Dinamik çekme test yükü,  $P_t$ ,  $0.75\sigma_{Ak}$  ve  $0.75\sigma_c$  azaltma faktörü kullanılmadan, ilgili standartlar kullanılarak hesaplanan tahmini çekme yükü,  $P_p$ , ile karşılaştırılmaktadır. Tahmini hata modunun belirlenmesinde, tasarım standartlarının içindeki değişik bağlantı eşitliklerinden hesaplanan en küçük yük kullanılmıştır. Test yükü/Tahmini yük oranının karşılaştırılmasına dayanan tasarım formülünün yeterliliği hakkındaki sonuçlar, oluşan hata modu ile tahmin edilen hata modu eşleştirilemezse geçersizdir.



Şekil 13. İki cıvatalı bağlantı net kesit hatası

Rogers ve Hancock'a göre sadece CSA-S 136 tasarım standardı farklı cıvatalı bağlantı test örneklerinin hata modu tahmininde uygun olarak kullanılabilirken, bizim yapmış olduğumuz 0.42 mm yumuşak sac ve 0.8 mm yüksek mukavemetli sacların cıvatalı bağlantı test örneklerinin hata modu tahmininde *Eurocode 3* tasarım standardı daha uygun olmaktadır. AS/NZS 4600 VE AISI tasarım standartları için doğru hata modu tahmininin, yanlış hata modu tahminine oranı, 39/24'dür ve burada yanlış tahminlerin çoğunluğu yuva hatası oluştuğunda net kesit hatasının belirlenmesidir. Tasarım denklemlerinden kaynaklanan tahmini hata modlarındaki hata, yuva direncinin fazla, net kesit direncinin eksik hesaplanmasına yol açabilir.

CSA-S 136 tasarım standardı kullanıldığında doğru/yanlış hata modu tahmini 49/14 olur. Bu 14 yanlış tahmin, net kesit hatası beklenmesine rağmen yuva hatasının oluştuğu örneklerdir.

$d/t \geq 15$  olan bağlantılar için CSA-S 136 yuva hatası denkleminde  $c=2$ 'dir ve yuva direnci fazla tahmin edilebilmektedir.

*Eurocode 3* tasarım standardı kullanıldığında, doğru/yanlış hata modu tahmini 58/4 olmaktadır. Bu 4 yanlış hata modu, net kesit hatası tahminine rağmen yuva hatasının oluştuğu 0.42 mm yumuşak sacda oluşmuştur. Buna rağmen diğer tasarım standartlarıyla mukayese edildiğinde, *Eurocode 3* standardı özellikle yüksek mukavemetli saclar için hata modu tahminine en uygun tasarım standardıdır (Çizelge 4, Çizelge 5).

#### 4.3. Tasarım Standardı Tahmini Yüğü ile Test Çekme Yüğü ile Karşılaştırılması

Testleri yapılmış olan cıvatalı bağlantılar, kaydedilen hata modlarına göre gruplara ayrılmıştır. Böylece o hata modu için geliştirilen tasarım formülü kullanılarak hesaplanan her cıvatalı bağlantının çekme yüğü ile tahmini bağlantı kapasitesi karşılaştırılır. Yuva hatasının oluştuğu tüm örnekler standartlardaki tahmini yuva kapasitesi formülasyonuna göre hesaplanarak mukayese edilir. Bu tarz hataların ana mukayese kriteri, her bir tasarım denkleminin çekme yüğü/tahmini yük oranının 1'e yakınlığı ( $P_t/P_p = 1$ ) olarak açıklanabilir (Çizelge 4, Çizelge 5, Çizelge 6 ve Çizelge 7).

Çizelge 4. 0.42 mm soğuk çekilmiş yumuşak ince sacların çeşitli civatalı bağlantılarının deney verileri ve test/tahmini oranları

DENEY SONUÇLARI	Kesim Yönü:	Kenar Yırtılması TEK DELİK (e=12 mm)			Yuva Hatası TEK DELİK (e=48 mm)			Net Kesit Hatası İKİ DELİK		
		ENİNE	CAPRAZ	BOYUNA	ENİNE	CAPRAZ	BOYUNA	ENİNE	CAPRAZ	BOYUNA
P <sub>t</sub> : Test Çekme Yüğü (N)	P <sub>t1</sub> :	1870	1805	1732	4850	4865	4955	6605	6662	6450
	P <sub>t2</sub> :	1790	1804	1762	4700	4725	4435	6622	6322	6450
	P <sub>t3</sub> :	2087	1835	1745	4972	4790	4645	6588	6727	6440
	P <sub>t4</sub> :	1740	1773							
	Ort. a P <sub>t</sub> :	1871,750	1804,250	1746,333	4840,667	4793,333	4678,333	6605,000	6570,333	6446,667
AS/NZS 4600 ve AISI Standartlarına göre Hesaplanan Tahmini Yüğü, P <sub>p</sub>		P <sub>t</sub> =t.e.σ <sub>ç</sub>			P <sub>t</sub> =c.σ <sub>ç</sub> .d.t (c=3)			P <sub>t</sub> =(1-0.9r+3r.d/s).A <sub>n</sub> .σ <sub>ç</sub> , d=civata çapı		
	P <sub>t1</sub> /P <sub>p</sub> :	1,060	1,053	1,032	0,916	0,946	0,984	1,251	1,310	1,294
	P <sub>t2</sub> /P <sub>p</sub> :	1,015	1,053	1,050	0,888	0,919	0,881	1,254	1,243	1,294
	P <sub>t3</sub> /P <sub>p</sub> :	1,183	1,071	1,040	0,940	0,932	0,923	1,247	1,322	1,292
	P <sub>t4</sub> /P <sub>p</sub> :	0,986	1,034							
	Ort. P <sub>t</sub> /P <sub>p</sub> :	1,061 <sub>4</sub>	1,053 <sub>4</sub>	1,041 <sub>3</sub>	0,915 <sub>3</sub>	0,933 <sub>3</sub>	0,929 <sub>3</sub>	1,251 <sub>3</sub>	1,292 <sub>3</sub>	1,294 <sub>3</sub>
S.D:	0,08682712	0,007385161	0,005176327	0,014863604	0,00786943	0,029996718	0,001858541	0,024685758	0,000668941	
C.o.V:	0,005654212	0,000163622	5,35887E-05	0,000441853	0,000123856	0,001799606	6,90835E-06	0,001218773	8,94964E-07	
EUROCODE 3 Standartına göre Hesaplanan Tahmini Yüğü, P <sub>p</sub>		P <sub>t</sub> =t.e.σ <sub>ç</sub> /1.2			P <sub>t</sub> =c.σ <sub>ç</sub> .d.t (c=2,5)			P <sub>t</sub> =(1-0.9r+3r.d/s).A <sub>n</sub> .σ <sub>ç</sub> , d=delik çapı		
	P <sub>t1</sub> /P <sub>p</sub> :	1,272	1,264	1,239	1,100	1,136	1,181	1,178	1,225	1,211
	P <sub>t2</sub> /P <sub>p</sub> :	1,218	1,263	1,260	1,066	1,103	1,057	1,181	1,162	1,211
	P <sub>t3</sub> /P <sub>p</sub> :	1,420	1,285	1,248	1,127	1,118	1,107	1,175	1,237	1,209
	P <sub>t4</sub> /P <sub>p</sub> :	1,184	1,242							
	Ort. P <sub>t</sub> /P <sub>p</sub> :	1,273 <sub>4</sub>	1,263 <sub>4</sub>	1,249 <sub>3</sub>	1,098 <sub>3</sub>	1,119 <sub>3</sub>	1,115 <sub>3</sub>	1,178 <sub>3</sub>	1,208 <sub>3</sub>	1,210 <sub>3</sub>
S.D:	0,052096272	0,008864262	0,00621174	0,017836325	0,009441846	0,035994632	0,001749858	0,02308815	0,000625743	
C.o.V:	0,008142065	0,000235725	7,71714E-05	0,000636269	0,000178297	0,002591227	6,12401E-06	0,001066125	7,83109E-07	
CSA-S 136 Standartına göre Hesaplanan Tahmini Yüğü, P <sub>p</sub>		P <sub>t</sub> =1,2.(e-d <sub>n</sub> /2).σ <sub>ç</sub>			P <sub>t</sub> =c.σ <sub>ç</sub> .d.t (c=2)			P <sub>t</sub> =A <sub>n</sub> .σ <sub>ç</sub>		
	P <sub>t1</sub> /P <sub>p</sub> :	2,120	2,107	2,064	1,375	1,420	1,476	1,096	1,138	1,125
	P <sub>t2</sub> /P <sub>p</sub> :	2,029	2,106	2,100	1,332	1,379	1,322	1,099	1,080	1,125
	P <sub>t3</sub> /P <sub>p</sub> :	2,366	2,142	2,080	1,409	1,398	1,384	1,093	1,149	1,123
	P <sub>t4</sub> /P <sub>p</sub> :	1,973	2,069							
	Ort. P <sub>t</sub> /P <sub>p</sub> :	2,122 <sub>4</sub>	2,106 <sub>4</sub>	2,081 <sub>3</sub>	1,372 <sub>3</sub>	1,399 <sub>3</sub>	1,394 <sub>3</sub>	1,096 <sub>3</sub>	1,122 <sub>3</sub>	1,124 <sub>3</sub>
S.D:	0,08682712	0,01477377	0,010352653	0,022295406	0,011802997	0,045004016	0,001628498	0,021447728	0,000581328	
C.o.V:	0,022616846	0,000654793	0,000214355	0,00099417	0,000278621	0,004050723	5,30401E-06	0,00092001	6,75884E-07	

**Not:** σ<sub>enine</sub>=350,7 MPa, σ<sub>çapraz</sub>= 340.4 MPa, σ<sub>boyuna</sub>= 333,1 MPa, t: sac kalınlığı, e: delik eksenin kenara olan mesafesi, d: civata çapı, s: sac genişliği, c: yuva katsayısı, r: parça kesitindeki kuvvet/civatalarla iletilen kuvvetin oranı

Çizelge 5. 0.8 mm soğuk çekilmiş yüksek mukavemetli ince sacların çeşitli civatalı bağlantılarının deney verileri ve test/tahmini oranları

DENEY SONUÇLARI	Kesim Yönü:	Kenar Yırtilması TEK DELİK (e=12 mm)			Yuva Hatası TEK DELİK (e=48 mm)			Net Kesit Hatası İKİ DELİK		
		ENİNE	CAPRAZ	BOYUNA	ENİNE	CAPRAZ	BOYUNA	ENİNE	CAPRAZ	BOYUNA
DENEY SONUÇLARI P <sub>t</sub> : Test Çekme Yüğü (N)	P <sub>t1</sub> :	5256	4650	4675	12300	11843	11875	18031	17800	17470
	P <sub>t2</sub> :	4937	5112	4847	14900	15225	14818	18081	17684	17126
	P <sub>t3</sub> :	5113	4795	4700	13477	12957	12864	18049	17916	17814
	P <sub>t4</sub> :	5079	4967	4822	13723	14147	13826	18063		
	Ortalama P <sub>t</sub> :	5096,25	4881	4761	13600	13543	13345,75	18056	17800	17470
ASINZ 4600 ve AISI Standartlarına göre Hesaplanan Tahmini Yüğü, P <sub>p</sub>		$P_p = t \cdot e \cdot \sigma_c$			$P_p = c \cdot \sigma_c \cdot d \cdot t \ (c=3)$			$P_p = (1-0.9r+3r \cdot d/s) \cdot A_n \cdot \sigma_c \ , \ d: \text{civata çapı}$		
	P <sub>t1</sub> /P <sub>p</sub> :	0,949	0,876	0,903	0,740	0,744	0,765	1,086	1,119	1,127
	P <sub>t2</sub> /P <sub>p</sub> :	0,891	0,963	0,937	0,897	0,956	0,955	1,089	1,112	1,105
	P <sub>t3</sub> /P <sub>p</sub> :	0,923	0,903	0,908	0,811	0,814	0,829	1,087	1,126	1,149
	P <sub>t4</sub> /P <sub>p</sub> :	0,917	0,936	0,932	0,826	0,888	0,891	1,088		
	Ort. P <sub>t</sub> /P <sub>p</sub> :	0,920 <sub>4</sub>	0,920 <sub>4</sub>	0,920 <sub>4</sub>	0,818 <sub>4</sub>	0,850 <sub>4</sub>	0,860 <sub>4</sub>	1,088 <sub>4</sub>	1,119 <sub>3</sub>	1,127 <sub>3</sub>
S.D:	0,023644054	0,037915922	0,016637504	0,064160049	0,091904601	0,081428725	0,001276734	0,007292249	0,022187822	
C.o.V:	0,000419281	0,001078213	0,000207605	0,003087384	0,006334842	0,004972978	1,22254E-06	3,54513E-05	0,0003282	
EUROCODE 3 Standartına göre Hesaplanan Tahmini Yüğü, P <sub>p</sub>		$P_p = t \cdot e \cdot \sigma_c / 1,2$			$P_p = c \cdot \sigma_c \cdot d \cdot t \ (c=2,5)$			$P_p = (1-0.9r+3r \cdot d/s) \cdot A_n \cdot \sigma_c \ , \ d: \text{delik çapı}$		
	P <sub>t1</sub> /P <sub>p</sub> :	1,139	1,051	1,084	0,888	0,892	0,918	1,022	1,055	1,063
	P <sub>t2</sub> /P <sub>p</sub> :	1,070	1,156	1,124	1,076	1,147	1,145	1,025	1,048	1,042
	P <sub>t3</sub> /P <sub>p</sub> :	1,108	1,084	1,090	0,973	0,976	0,994	1,023	1,062	1,084
	P <sub>t4</sub> /P <sub>p</sub> :	1,100	1,123	1,118	0,991	1,066	1,069			
	Ort. P <sub>t</sub> /P <sub>p</sub> :	1,104 <sub>4</sub>	1,103 <sub>4</sub>	1,104 <sub>4</sub>	0,982 <sub>4</sub>	1,020 <sub>4</sub>	1,032 <sub>4</sub>	1,024 <sub>3</sub>	1,055 <sub>3</sub>	1,063 <sub>3</sub>
S.D:	0,028372865	0,04549225	0,019965005	0,076992059	0,110285522	0,09771447	0,001436023	0,006876641	0,020923302	
C.o.V:	0,000603765	0,001552159	0,000298951	0,004445833	0,009122172	0,007161088	1,37478E-06	3,15255E-05	0,000291856	
CSA-S 136 Standartına göre Hesaplanan Tahmini Yüğü, P <sub>p</sub>		$P_p = 1,2 \cdot (e-d_h/2) \cdot \sigma_c$			$P_p = c \cdot \sigma_c \cdot d \cdot t \ (c=2)$			$P_p = A_n \cdot \sigma_c$		
	P <sub>t1</sub> /P <sub>p</sub> :	1,898	1,752	1,807	1,110	1,115	1,147	0,953	0,981	0,988
	P <sub>t2</sub> /P <sub>p</sub> :	1,783	1,926	1,873	1,345	1,434	1,432	0,955	0,975	0,969
	P <sub>t3</sub> /P <sub>p</sub> :	1,846	1,806	1,817	1,217	1,220	1,243	0,954	0,988	1,008
	P <sub>t4</sub> /P <sub>p</sub> :	1,834	1,871	1,864	1,239	1,332	1,336	0,954		
	Ort. P <sub>t</sub> /P <sub>p</sub> :	1,840 <sub>4</sub>	1,839 <sub>4</sub>	1,840 <sub>4</sub>	1,228 <sub>4</sub>	1,276 <sub>4</sub>	1,290 <sub>4</sub>	0,954 <sub>4</sub>	0,981 <sub>3</sub>	0,988 <sub>3</sub>
S.D:	0,047288108	0,075820416	0,033275008	0,096240074	0,137856902	0,122143087	0,001120043	0,006395272	0,019457894	
C.o.V:	0,001677124	0,004311552	0,00083042	0,006946614	0,014253394	0,0111892	9,40872E-07	2,72663E-05	0,000252406	

**Not:**  $\sigma_{enine} = 577$  MPa,  $\sigma_{capraz} = 553$  MPa,  $\sigma_{boyuna} = 539$  MPa, t: sac kalınlığı, e: delik eksenine kenara olan mesafesi, d: civata çapı, s: sac genişliği, c: yuva katsayısı, r: parça kesitindeki kuvvet/civatalarla iletilen kuvvetin oranı

AS/NZS 4600 ve AISI tasarım standartlarının ikisinde cıvatalı bağlantının net kesit hata yükünün emniyetli tahmininde kullanılabilir. 0.42 mm yumuşak sac için test çekme yükü/tahmini yük oranı ortalama 1.278; 0.8 mm yüksek mukavemetli sac içinde 1.111 olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte yüksek mukavemetli sac için 0.920 olarak hesaplanan test çekme kuvveti/tahmini kenar yırtılma kuvveti oranı emniyetsiz bulunabilir. Yuva hatasının olduğu bağlantıların kapasitesi AS/NZS 4600 ve AISI standartlarında var olan şartlarla doğru tahmin edilememektedir. 0.8 mm mukavemetli sacların enine, boyuna, çapraz yönde kesilmiş bağlantı örnekleri için sırasıyla 0.92, 0.91, 0.93 test çekme yükü/tahmini yük oranları, emniyetsizdir.

Çizelge 6.0.8 mm yüksek mukavemetli ince sac hata kriterlerinin istatistiksel sonuçları

Hata Modu		İstatiksel Bilgi	Boyuna Pt/Pp	İstatiksel Bilgi	Enine Pt/Pp	İstatiksel Bilgi	Çapraz Pt/Pp
(a) AS/NZS 4600 (cold formed 1996) ve AISI (1996 edition 1997)							
Kenar Yırtılması	Deney Sayısı	4		4		4	
	Standart Sapma	0.017	0.920	0.024	0.920	0.038	0.920
	C.o.V	0.0002		0.0004		0.0011	
Yuva Hatası	Deney Sayısı	4		4		4	
	Standart Sapma	0.081	0.860	0.064	0.818	0.092	0.850
	C.o.V	0.0050		0.0031		0.0063	
Net Kesit Hatası	Deney Sayısı	3		4		3	
	Standart Sapma	0.022	1.127	0.001	1.088	0.007	1.119
	C.o.V	0.0003		0.0000		0.0000	
(b) CSA-S 136 (cold formed 1994)							
Kenar Yırtılması	Deney Sayısı	4		4		4	
	Standart Sapma	0.033	1.840	0.047	1.840	0.076	1.839
	C.o.V	0.0008		0.0017		0.0043	
Yuva Hatası	Deney Sayısı	4		4		4	
	Standart Sapma	0.122	1.290	0.096	1.228	0.138	1.276
	C.o.V	0.0112		0.0069		0.0143	
Net Kesit Hatası	Deney Sayısı	3		4		3	
	Standart Sapma	0.019	0.988	0.001	0.954	0.006	0.981
	C.o.V	0.0003		0.0000		0.0000	
(c) Eurocode 3 (European Committee 1996)							
Kenar Yırtılması	Deney Sayısı	4		4		4	
	Standart Sapma	0.020	1.104	0.028	1.104	0.045	1.103
	C.o.V	0.0003		0.0006		0.0016	
Yuva Hatası	Deney Sayısı	4		4		4	
	Standart Sapma	0.098	1.032	0.077	0.982	0.110	1.020
	C.o.V	0.0072		0.0044		0.0091	
Net Kesit Hatası	Deney Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.021	1.063	0.001	1.024	0.007	1.055
	C.o.V	0.0003		0.0000		0.0000	
C.o.V: Değişim Katsayısı							



CSA-S 136 tasarım standardı yumuşak ve mukavemetli saclar için gereğinden fazla emniyetli kenar yırtılma kuvveti tahmini sağlar. Test çekme yükü/tahmini yük oranı boyuna, enine, çapraz kesilmiş yumuşak sac için sırasıyla 2.08, 2.12, 2.1 ve mukavemetli sac için sırasıyla 1.84, 1.84, 1.83 olarak gerçekleşmiştir. Net kesit hatası bağlantı kapasitesi, net kesit alanı ve malzemenin çekme mukavemeti, gerilim azaltma faktörsüz kullanılarak doğru olarak modellenebilir. Test çekme yükü/tahmini yük oranları, mukavemetli sac için ortalama 0.974 ve yumuşak sac için ortalama 1.11 olarak hesaplanmıştır. Yuva hatası çekme kuvvetinin tahmin edilebilirliği, CSA-S 136 standardı gözönüne alınarak hesaplandığında, yumuşak sac için deneyde gözlemlenen çekme yüküne göre yaklaşık %25 kadar, emniyetli bulunmaktadır.

Cıvatalı bağlantıların çekme kuvveti *Eurocode 3* tasarım standardı kullanılarak hesaplandığında, diğer tasarım standartlarına göre daha doğru olarak hesaplanabilmektedir. *Eurocode 3*'e göre kenar yırtılma kuvveti, CSA-S 136 standardından daha makul seviyede bir emniyetle 1.1 test çekme yükü/tahmini yük oranında hesaplanır. Gerek yuva kuvveti gerekse net kesit kuvveti, *Eurocode 3* tasarım standardı kullanıldığında daha doğru olarak tahmin edilir ve test çekme yükü/tahmini yük oranı yaklaşık 1.02 civarındadır.

Çizelge 7. 0.42 mm yumuşak ince sac hata kriterlerinin istatistiksel sonuçları

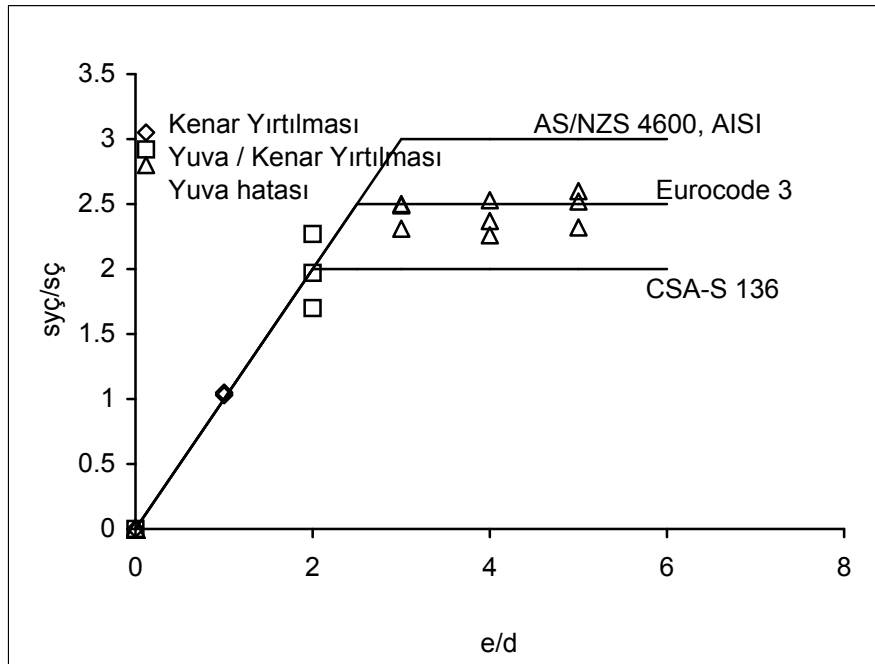
Hata Modu		İstatiksel Bilgi	Boyuna Pt/Pp	İstatiksel Bilgi	Enine Pt/Pp	İstatiksel Bilgi	Çapraz Pt/Pp
(a) AS/NZS 4600 (cold formed 1996) ve AISI (1996 edition 1997)							
Kenar Yırtılması	Deneysel Sayısı	3		4		4	
	Standart Sapma	0.005	1.041	0.087	1.061	0.007	1.053
	C.o.V	0.0001		0.0057		0.0002	
Yuva Hatası	Deneysel Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.030	0.929	0.015	0.915	0.008	0.933
	C.o.V	0.0018		0.0004		0.0001	
Net Kesit Hatası	Deneysel Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.001	1.294	0.002	1.251	0.025	1.292
	C.o.V	0.0000		0.0000		0.0012	
(b) CSA-S 136 (cold formed 1994)							
Kenar Yırtılması	Deneysel Sayısı	3		4		4	
	Standart Sapma	0.010	2.081	0.087	2.122	0.015	2.106
	C.o.V	0.0002		0.0226		0.0007	
Yuva Hatası	Deneysel Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.045	1.394	0.022	1.372	0.012	1.399
	C.o.V	0.0041		0.0010		0.0003	
Net Kesit Hatası	Deneysel Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.001	1.124	0.002	1.096	0.021	1.122
	C.o.V	0.0000		0.0000		0.0009	
(c) Eurocode 3 (European Committee 1996)							
Kenar Yırtılması	Deneysel Sayısı	3		4		4	
	Standart Sapma	0.006	1.249	0.052	1.273	0.009	1.263
	C.o.V	0.0001		0.0081		0.0002	
Yuva Hatası	Deneysel Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.036	1.115	0.018	1.098	0.009	1.119
	C.o.V	0.0026		0.0006		0.0002	
Net Kesit Hatası	Deneysel Sayısı	3		3		3	
	Standart Sapma	0.001	1.210	0.002	1.178	0.023	1.208
	C.o.V	0.0000		0.0000		0.0011	
C.o.V: Değişim Katsayısı							

#### 4.4. Çekme Hatası Gerilimleri ile Malzeme Mukavemetinin Karşılaştırılması

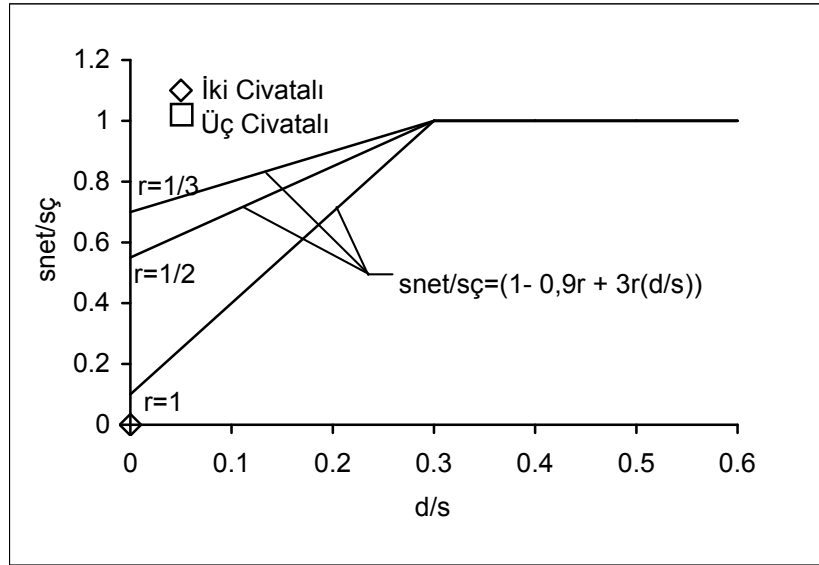
Her örnek için çekme yükündeki kesit gerilimi, ya kenar yırtılması ya yuva hatası yada bunların kombinasyonu olan hatalara yol açar. Çekme kesit gerilimi  $\sigma_{y\check{c}}$ 'nin ana metal çekme mukavemeti  $\sigma_{\check{c}}$ 'ye oranı,  $e/d$  oranıyla karşılaştırılır (Şekil 14). Yumuşak sac için sonuç grafiklerinden kritik yuva direncinin, malzeme çekme mukavemetinin yaklaşık 2.5 katına ulaştığı görülmektedir. Tek kesme düzlemlili bindirme sacların cıvatalı bağlantı yuva direnci, AS/NZS 4600 ve AISI tasarım standardı için malzeme çekme mukavemetinin 3 katı, *Eurocode 3*'e göre çekme mukavemetinin 2.5 katı ve CSA-S 136 standardına göre,  $d/t \geq 15$  olan ince malzemeler için 2 katı olmaktadır. Kenar yırtılmasına yol açan kritik kesit gerilimi, yuva hatasındaki kesit geriliminden düşüktür ve *Eurocode 3*'e göre tahmin edilen kenar yırtılma gerilimine daha yakındır.

Çekme yükündeki kesit geriliminin oluşturduğu net kesit hatalarına ait karşılaştırma Şekil 15'te verilmiştir. Kritik net kesit geriliminin  $\sigma_{net}$ , malzemenin dinamik çekme mukavemeti  $\sigma_{\check{c}}$ 'ye oranı,  $d/s$  oranına bağlıdır ve AS/NZS 4600 ve AISI standartları kullanılarak hesaplanır.

Tek cıvatalı bağlantılar, malzemenin ince olmasından dolayı net kesit çatlağına yol açmaz. Bu yüzden elimizdeki iki ve üç cıvatalı bağlantılar için sınırlı miktarda veri vardır. Çoğu örnekte net kesit geriliminin çekme mukavemetine oranı, yaklaşık olarak aynı 1.1 değeridir ve bu da göstermektedir ki  $r$  ve  $d/s$  oranına bağlı olan gerilim azaltma faktörü kullanmak yumuşak ve mukavemetli saclar için oldukça önemlidir. AS/NZS 4600, AISI ve *Eurocode 3* standartlarında kullanılan azaltma faktörü, CSA-S 136 standardında yer almayıp, net kesit hata gerilimi, delik sayısına bağlı değildir.



Şekil 14. 0.42 mm yumuşak sac numuneler için kenar yırtılma ve yuva gerilimlerinin çekme mukavemetine oranı



Şekil 15. 0.42 mm yumuşak sac numuneler için net kesit hata geriliminin çekme mukavemetine oranı

## 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

1. Yapılan deneylerin verileri göstermektedir ki AS/NZS 4600 ve AISI tasarım standartları, ince yumuşak sac ve mukavemetli saclardan yapılan bağlantıların hata modunun tahmininde kullanılamaz. Yapılan deneylerde sadece 0.42 mm yumuşak malzeme için AISI ve AS/NZS 4600 tasarım standardının kenar yırtılma formülü gerçek değere yakın bir tahmin sağlayabilmiştir. Bundan dolayı bu tasarım standartları tahmini yükteki bir hata kriterine dayanan bağlantının yuva kuvveti ve net kesit kuvvetinin doğru olarak hesaplanmasında kullanılamaz.

2. Yüksek mukavemetli saclarda *Eurocode 3* standardında önerilen tasarım formülü kenar yırtılma hatasının en iyi tahminini sağlar. Yapılan deneysel gözlemlere göre sac malzemenin yırtıldığı cıvatalı bağlantının deformasyonları yuva hata moduna ait olabilir. Ya yumuşak sacın deformasyon kapasitesindeki artışın sonucuna göre ya da parçanın kenar kıvrılmasının sebep olduğu ekstrem düzlem dışı deformasyonları ile lokal yırtılmalar oluşabilir. Bu tip lokal yırtılmalar gösterebilen örnekler *Eurocode 3* tasarım standardında belirlenmiş yuva tasarım metodunun kullanılması ile uygun şekilde tasarlanabilir. Yırtılma yuva hatalarının bu tipi hatanın net kesit çatlak modu ile ilgili değildir.

3. 0.42 mm'lik yumuşak sac ve 0.8 mm'lik mukavemetli saclardan oluşan bağlantıların net kesit hatası CSA-S 136 tasarım standardında parça genişliği ve cıvataların yerleşimine bağlı gerilim azaltma faktörü kullanılmaksızın hesaplanmaya çalışılmış ve yumuşak saclarda doğru ve güvenilir tahmin sağlanmasına rağmen mukavemetli saclar için elde edilen tahminler yeterince emniyetli olmamıştır. Bu yüzden mukavemetli sacların yuva hatasını belirlemede daha tam ve güvenilir tahminler sağlayabilen *Eurocode 3* tasarım standardı kullanılmalıdır.

4. Rogers ve Hancock tarafından yapılan testlerde AS/NZS 4600 ve AISI standartlarının cıvatalı bağlantıların hata modunun doğru tahmininde kullanılamayacağı belirtilmiştir. Gerek G300 sacların, gerekse G550 sacların net kesit direnci, CSA-S 136 standardına göre, net kesit alanı ile çekme mukavemeti kullanılarak hesaplanabilmektedir. Kenar yırtılması oluşan bağlantılarda *Eurocode 3* tasarım standardı ve yuva hatası oluşan bağlantılarda da CSA-S 136 tasarım standardı önerilmektedir.

Deneylerde kullandığımız saclar Avrupa’da imal edilmiş olup, yaptığımız deneylerin sonuçları da Avrupa tasarım standardına büyük uyum göstermektedir. Avrupa tasarım standardı hazırlanırken Avrupa’da üretilen sacların esas alınmasının buna neden olduğunu düşünmekteyim. Bu tip saclarla yapılan tasarımlarda, kullanılan sacın menşeinin ve uyum gösterdiği standardın gözönüne alınması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında beraber çalıştığım danışman hocam, Yard. Doç Dr. Melih BELEVİ ve Araş. Gör. Bahadır UYULGAN’a, D.E.Ü. Makina Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma, numunelerin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı Muhammed YAŞA’ya teşekkürü bir borç bilirim.

## KAYNAKLAR

- Dhalla A.K., Winter G. (1974a): “Steel Ductility Measurements”, Journal of Structural Division, ASCE, 100(2), 427-444.
- Dhalla A.K., Winter G. (1974b): “Suggested Steel Ductility Requirements”, Journal of Structural Division, ASCE, 100(2), 445-462.
- Rogers C.A., Hancock G.J. (1997): “Bolted Connection Test of Thin G550 and G300 Sheet Steels”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 124(7), 798-808.
- Rogers C.A., Hancock G.J. (1999): “Bolted Connection Design for Sheet Steels Less than 1.0 mm Thick”, Journal of Constructional Steel Research 51, 123-146.
- Rogers C.A., Hancock G.J. (2000): “Failure Modes of Bolted-Sheet-Steel Connections Loaded in Shear”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 126(3), 288-296.
- Winter G. (1956): “Tests on Bolted Connections in Light Gage Steel”, Journal of Structural Division, ASCE, 82(2), 920-1-920-25.
- Wu S.W.W., LaBoube R.A. (1995): “Strength of Flexural Members using Structural Grade of A653 and Grade E of A611 Steels”, 1st Progress Report, Department of Civil Engineering , University of Missouri-Rolla, Study 95-5.



**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 bağıntı 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 yapı 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

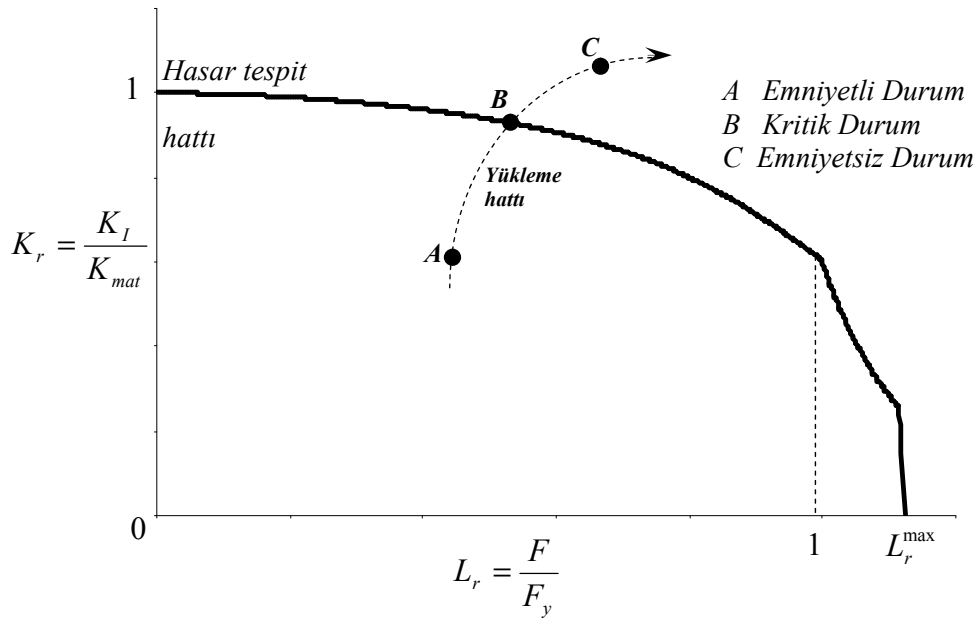
Basamak	Gerekli Veri	Kullanım Yeri
Temel	Akma mukavemeti	Akma mukavemeti dışında malzeme ile ilgili başka veri olmadığında
I	Akma ve çekme mukavemeti	Mismatch % 10'dan az olduğunda
II	Akma ve çekme mukavemeti, mismatch limit yükü	Mismatch yapılar için kaynak ve ana metal akma mukavemetleri bilindiğinde. 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 eksenini 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



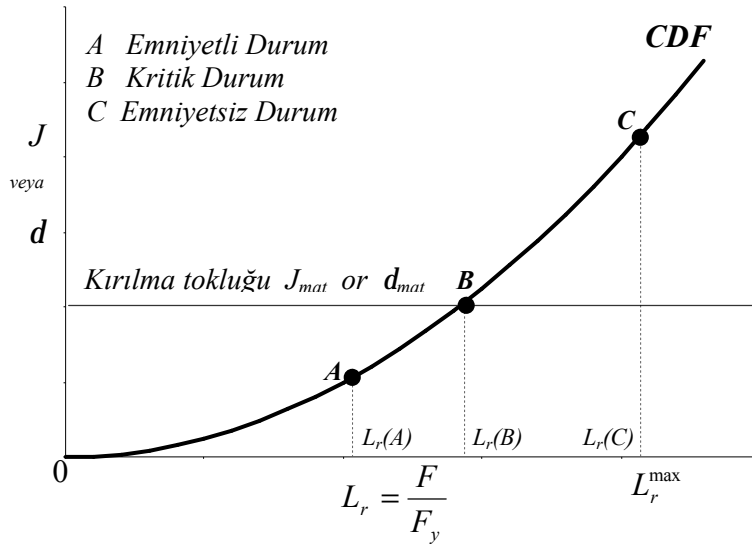
noktası). Yani, bünyesinde bulundurduğu çatlak boyu ve o yükleme durumu için parça emniyetlidir. C noktası ise emniyetsiz durumu göstermektedir. Bu noktada bünyesinde çatlak içeren parça o yükleme altında hasara uğrayacaktır. B ise kritik durumu göstermektedir. Bu çalışmadaki sayısal örnek ise çeşitli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

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

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

Burada,  $d_e$  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;  $\nu$  Poisson oranıdır.



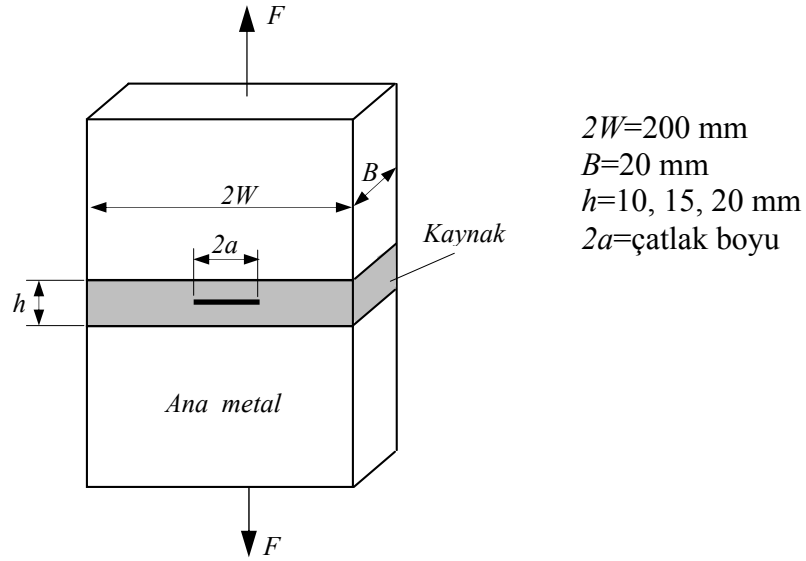
Şekil 2. CDF (Crack Driving Force) yaklaşımı

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  $d_{mat}$  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. $S_y$ (MPa)	Çekme muk. $S_w$ (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):

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

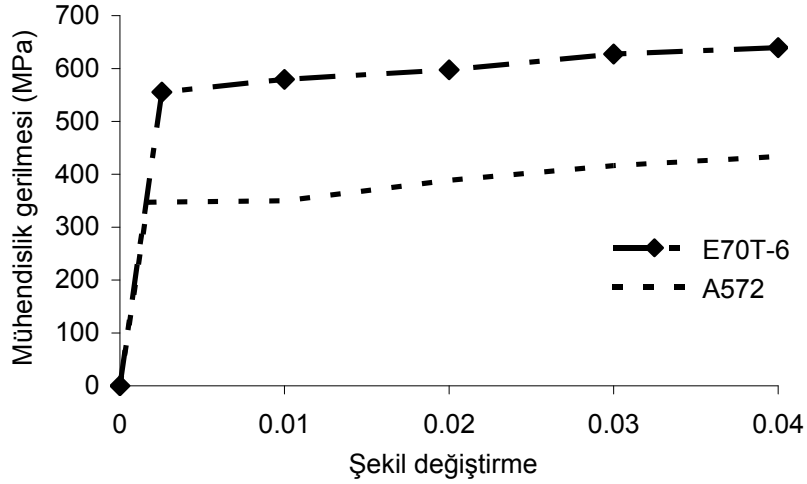
Ana metal (A-572) ve kaynak malzemesi (E70T-6)’nin gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 4’te verilmiştir (Chi, 1999).

### 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).

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

Eşitlik (6)'dan görüleceği gibi gerilme şiddet faktörü, çatlak boyu ve uygulanan yükte 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:

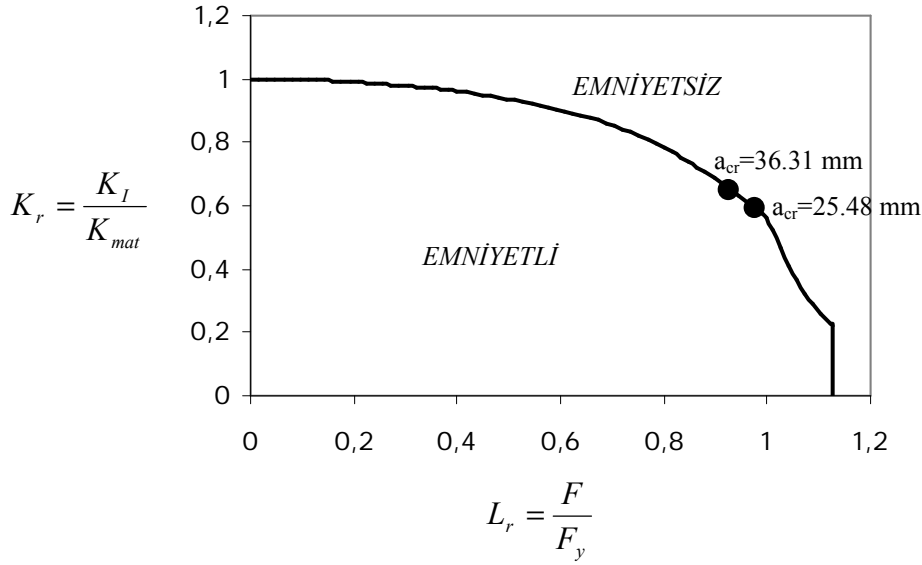
$$F_y = 2 \cdot (W - a) \cdot B \cdot S_y \quad (7)$$

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

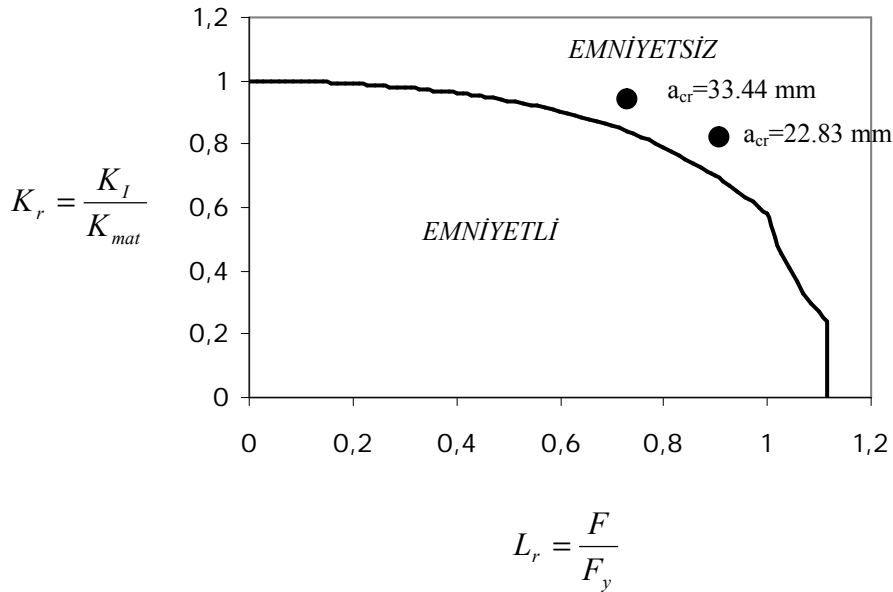
## 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

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 kritiğe değerden daha büyük bir çatlak içerirse plakada kırılma meydana gelir. Bu değer altında 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



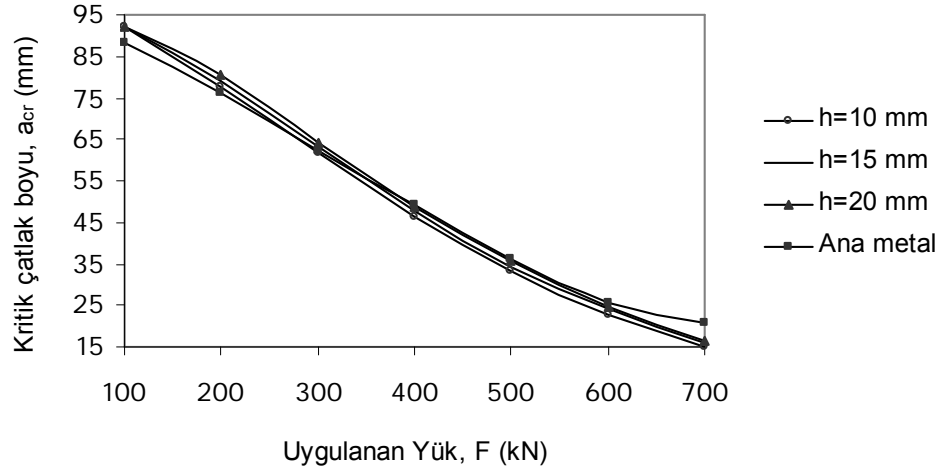
Şekil 6. Çatlağın kaynak bölgesinde olması durumu için FAD diyagramı

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 Girişi", 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 ( $s_y^W / s_y^B$ )
$s_y^B$	ana metalin akma mukavemeti
$s_y^W$	kaynak metalinin akma mukavemeti
$s_u$	çekme veya kopma mukavemeti

**EK :**

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

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

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

$$N = 0.3 \left[ 1 - \frac{s_y}{s_u} \right]$$

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

$$\frac{F_y^M}{F_y^B} = \begin{cases} M & 0 \leq y \leq y_1 \text{ için} \\ \frac{24(M-1)}{25} \left( \frac{y_1}{y} \right) + \frac{(M+24)}{25} & y_1 \leq y \text{ için} \end{cases}$$

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

$$y_1 = e - (M-1)/5$$