



XVII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
5-9 Eylül 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ

SÜNEK MALZEMELERE AİT AKMA EĞRİSİNİN ÇEKME TESTİNDEKİ LOKAL BOYUNVERME ÖNCESİ DEĞERLERE KADAR DOLAYSIZ ELDE EDİLMESİ

Emre Coruk* ve Celalettin Karadoğan†
Atılım Üniversitesi, Ankara

Besim Baranoğlu‡
Atılım Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Sac metallerde gerilim-genleme diagramlarını elde etmenin en kolay yolu tek eksenli çekme testidir. Ancak sac metal şekillendirme işlemlerinde çoğunlukla 0.5-2.0 arasında genleme değerlerine ulaşıyor olması, buna karşılık çekme testinden elde edilebilen deneysel bilginin 0.2-0.4 genleme değerlerine kadar elde edilebiliyor olması pek çok sac şekillendirme işleminin sayısal analizinde çekme testinden elde edilen bilginin yetersiz kalması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Sünek malzemelerin çekme testinde, lokal boyunverme öncesinde ulaşılan genleme değerleri, düzenli uzama sürecinde ulaşılan değerlerin birkaç katına çıkmasına rağmen yalnızca düzenli uzama sürecinde elde edilen veriler deney sonucu olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu çalışmada, boyun verme sürecinde optik yöntemlerle yapılan genleme ölçümleri yolu ile genlemenin en yüksek değere çıktığı noktayı içeren kesit boyunca önceden belirlenmiş bir malzeme modeli ile gerilim dağılımı hesaplanmıştır. Gerilimin kesit boyunca integralinin alınması ile elde edilen kuvvet değeri ile çekme testi cihazının ölçtüğü kuvvet değerinin eşitliği sağlanarak, akma eğrisi lokal boyunvermeden hemen önceki genleme değerlerine kadar dolaysız olarak bulunmuştur. Çalışmada sünek malzeme olarak ST4 ve ST12 çelikleri üzerinde deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçların simülasyonlardaki verilerle karşılaştırılması sonucunda yüksek yakınsama elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Malzeme karakterizasyonu, Çekme testi, Optik genleme ölçümü

GİRİŞ

Metal şekillendirme işlemlerinin modellenmesi, kullanılacak olan malzemeye uygun bir plastik deformasyon modelini ve şekillendirme sınırlarını doğru bir şekilde tespit edebilmeyi gerektirmektedir. Uygun plastik deformasyon modeli ise ancak ilgili malzemenin belirli özelliklerinin hassas bir şekilde tespit edilebilmesi ile elde edilebilir. Modellemenin ve dolayısı ile yapılacak olan tasarım/analizin doğruluğu, kullanılan malzeme modelinin ve bu modeldeki malzeme özelliklerinin ne kadar doğru hesaplandığı ile orantılıdır [3].

Günümüzde, sayısal modellemeye yönelik malzeme özelliklerinin tespiti (malzemenin mekanik karakterizasyonu) çeşitli deneyler yolu ile sağlanabilmektedir. Bunlar arasında en yoğun şekilde kullanılan deney eksenel çekme testidir (bundan sonra çekme testi olarak adlandırılacaktır). Bu test, gerek uluslararası tanımlı standartları, gerek basitliği ve gerekse ölçüm bölgesinde düzenli genleme dağılımı elde edilmesi dolayısı ile en çok tercih edilen yöntem olmuştur.

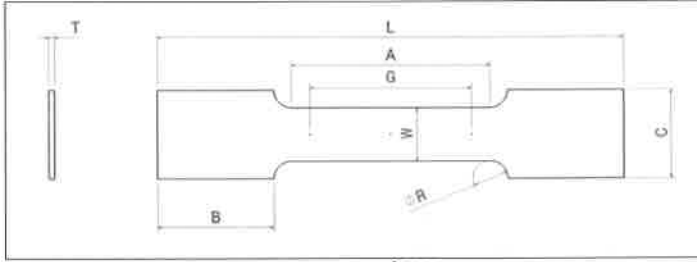
Çekme testi, en basit hali ile, standart olarak hazırlanan bir numunenin iki çene arasına tutturularak çekilmesi ve bu esnada uygulanan kuvvet ve oluşan deformasyonun eşzamanlı olarak ölçülmesi prensibine dayanır (çekme testi konusunda yoğun bir literatür mevcuttur [6]). Şekil-1'de ASTM E8-04 standardına uygun olarak

* Yüksek Lisans Öğrencisi, İmalat Müh. Böl., Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi, E-posta: ecoruk@atilim.edu.tr

† Yrd. Doç. Dr., İmalat Müh. Böl., Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi, E-posta: ckaradogan@atilim.edu.tr

‡ Yrd. Doç. Dr., İmalat Müh. Böl., Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi, E-posta: bbaranoglu@atilim.edu.tr

sac numune için standart test numunesi ölçülendirilmesi verilmiştir [6]. Çekme testi, günümüzde pek çok malzemenin özelliklerinin birbiri ile karşılaştırılması, kalite kontrolü, aşım geliştirilmesi ve benzer amaçlar için yoğun şekilde kullanılan bir deney olmuştur.



Şekil-1: Sac numune için ASTM E8-04 standardı. İlgili ölçüler standart tablolarda verilmiştir.

Eğer numunenin kesit alanı ($T \times W$) boyunca genleme değerinin eşit olduğu varsayılırsa, ölçülen deformasyon doğrudan genleme değerini elde edecek bir veri olarak ortaya çıkar (mühendislik genlemesi hesaplanırken deformasyon miktarı, başlangıç uzunluğuna (G) bölünmekte; gerçek genleme hesaplanırken de uzama miktarı başlangıç uzunluğuna bölünerek doğal logaritması alınmaktadır). Benzer şekilde, kesit alanının eksen boyunca büyüklüğü sabit kabul edildiğinde de gerilim, ölçülen kuvvet değerinin kesit alanına bölünmesi ile elde edilmektedir (eğer kesit alanı başlangıç kesit alanı olarak sabit kabul edilirse, mühendislik gerilimi, eğer deformasyon ile birlikte değiştiği kabul edilerek anlık değer hesaba katılırsa gerçek gerilim elde edilmektedir).

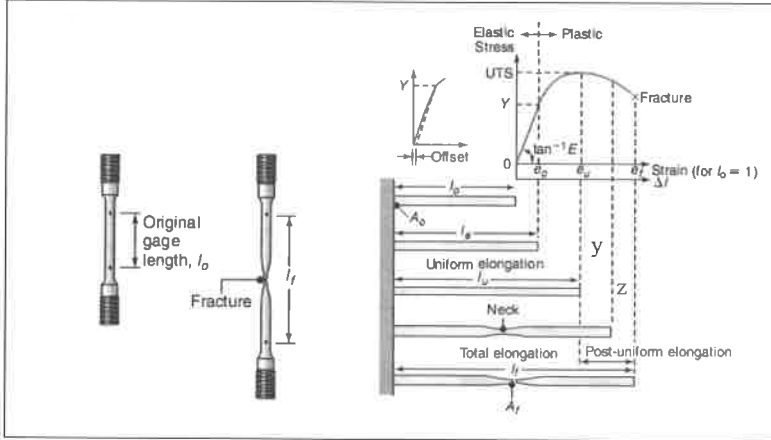
Gereksinim

Yukarıda tarif edilen ölçüm koşulları ancak G uzunluğu boyunca kesit alanı ($T \times W$) sabit olduğu takdirde anlamlıdır. Aksi durumda, yani G uzunluğu içinde kesit alanı değişkenlik gösteriyorsa, ne gerçek gerilim ne de gerçek genleme bu şekilde hesaplanamaz. Şekil-2’de, sünek bir metal malzeme için çekme testi yolu ile elde edilen örnek bir mühendislik gerilimi-mühendislik genlemesi grafiği görülmektedir [4]. Malzeme kopana kadar iki ayrı deformasyon şekli içerir:

- (1) grafikte e_u ile gösterilen noktaya kadar malzeme düzenli uzama denilebilen bir şekilde deforme olur. Burada, ölçüm bölgesi içinde kesit alanı sabittir. Bu sebeple, yukarıda bahsi geçen test koşulları geçerlidir ve genleme ve gerilim doğrudan ölçümlerden elde edilebilir.
- (2) Deformasyon e_u noktasını aştığında, kesit alanı ölçüm bölgesi içinde sabit değer alma özelliğini kaybeder. Bu, öncelikle yayılmış boyun verme (diffuse necking) bölgesi ile tanımlanan (Şekil-2’de y bölgesi) şekilde geniş bir alanda yayılı olarak ortaya çıkar. Daha sonra, Şekil-2’de z bölgesi ile gösterilen kısımda görülen, lokal boyunverme (localized necking) ortaya çıkar. Bu bölgelerde, ölçüm bölgesinde ne genleme ne de gerilim sabit kabul edilebileceğinden, yukarıdaki şekilde tarif edilen basit ölçümler ile hesapların yapılması mümkün değildir.

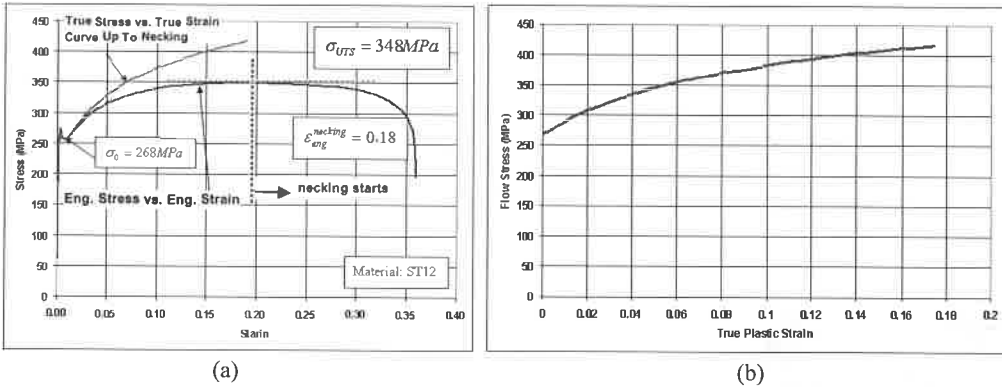
Birçok metal malzeme için e_u ile tarif edilen geçiş değeri 0.1-0.4 aralığındadır (örnek olarak verilen ST12 çeliği için çekme test sonuçları Şekil-3’te gösterilmektedir, e_u yaklaşık olarak 0.18dir). Bu durumda, gerçek plastik genleme ve gerçek gerilim değerlerinden elde edilen akma eğrisi en fazla bu değerlere kadar elde edilmektedir (Şekil-3b’de ST12 için akma eğrisi verilmiştir; görüldüğü gibi akma eğrisi yaklaşık 0.18 değerine kadar çizilebilmiştir). Görülebileceği üzere, çok basit ve çok kullanılan bir deneysel metod olarak çekme testi, sac metal şekillendirme işlemlerinde malzeme karakterizasyonu için yetersiz kalmaktadır.

Özellikle sayısal benzetimlerde bu duruma genel olarak bulunan çözüm, akma eğrisinin boyun verme değeri sonrasındaki genleme değerlerine ekstrapole edilmesi, yani akma eğrisinin büyük genlemeler için aynı davranışta olacağı varsayılarak genişletilmesidir. Bunun için öncelikle boyun verme noktasına kadar olan akma eğrisi belirli bir fonksiyon ile tarif edilir ve daha sonra bu fonksiyon daha büyük genleme değerleri için aynı kaldığı kabul edilerek eğri çizilir.



Şekil-2: Sünek bir malzeme için çekme testi deneyi ve malzemenin deformasyon şekli [3]

Genel olarak kullanılan üç formül Swift, Ludwick ve Voce bağıntılarıdır. Şekil-4'te ST 12 için 0.18 genlemeye kadar elde edilen akma eğrisinin bu üç fonksiyon için büyük denklemlere ekstrapole edilmiş eğrileri verilmektedir. Görüldüğü üzere, deneysel bilginin bulunduğu boyun verme kısmı için hemen hemen aynı eğriyi veren bu üç denklem, sac şekillendirme işlemleri için ortalama bir değer sayılabilecek 1.0 genleme değerlerinde birbirinden tamamen farklı değerlere ulaşmaktadır.

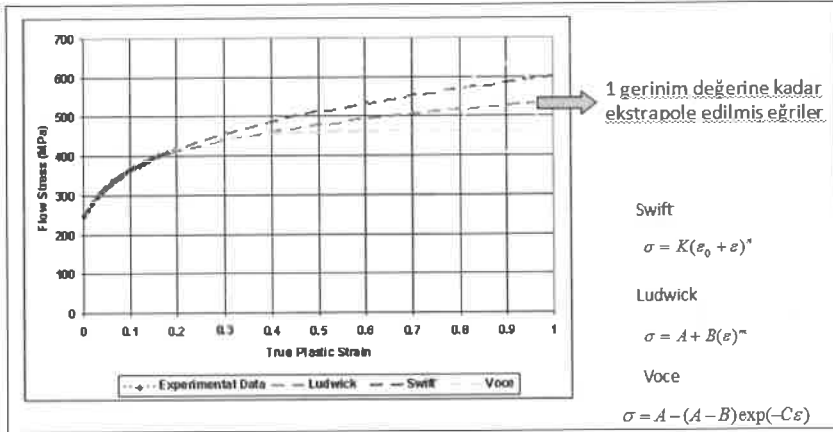


Şekil-3: ST12 Çeliği için çekme testi sonuçları (a) ve oluşturulan akma eğrisi (b) [4]

Çekme testindeki bu dezavantajı ortadan kaldıracak başka test metodları olmakla birlikte (örneğin basma testi, hidrolik şişirme testi, vb.) bunlar çekme testinin basit ve standartlaştırılmış yapısına sahip olmamaktadır. Örnek olarak basma testi, kolay hesaplanamayacak olan sürtünme etkilerini içermektedir.

Çekme testinde yayılı boyun verme bölgesinde genleme ve gerilim değerlerinin ölçüm değerlerinden elde edilmesine yönelik olarak çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu yaklaşımlar, oluşan boyun bölgesindeki kesit alanındaki en düşük çapın ve boyun bölgesinin eğiklik yarıçapının ölçümüne dayanan yaklaşık ifadeler içermektedir. Bunlar arasında en bilinenlerden ikisi Siebel [1] ve Bridgeman'ın [2] yaklaşımlarıdır.

Çekme testinde ilk optik cihazla ölçüm 1915 yılında gerçekleştirilmiş ve ilk olarak 1925 yılında sayısal görüntü işleme teknikleri deneysel gerilim analizinde kullanılmıştır [6]. Günümüzde bilgisayarlı görüntü işleme teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, optik yöntemlerle ölçüm ve genleme-gerilim değerlerinin bu ölçümler yardımı ile elde edilmesi yönünde çalışmalar da artmıştır. Bu çalışma kapsamında değerlendirilecek olursa, geçmiş araştırmalarda karşılaştırmalı çalışmaların yapıldığına dikkat edilebilir. Bu çalışmalarda karşılaştırma, deneysel yaklaşımlarla olduğu gibi [5], sonlu eleman yöntemi ile çekme testi modellenerek yapılan sayısal yaklaşımlarla da olmaktadır [7,8,9].



Şekil-4: Değişik yaklaşımların akma eğrisine yüksek genleme değerlerindeki etkisi

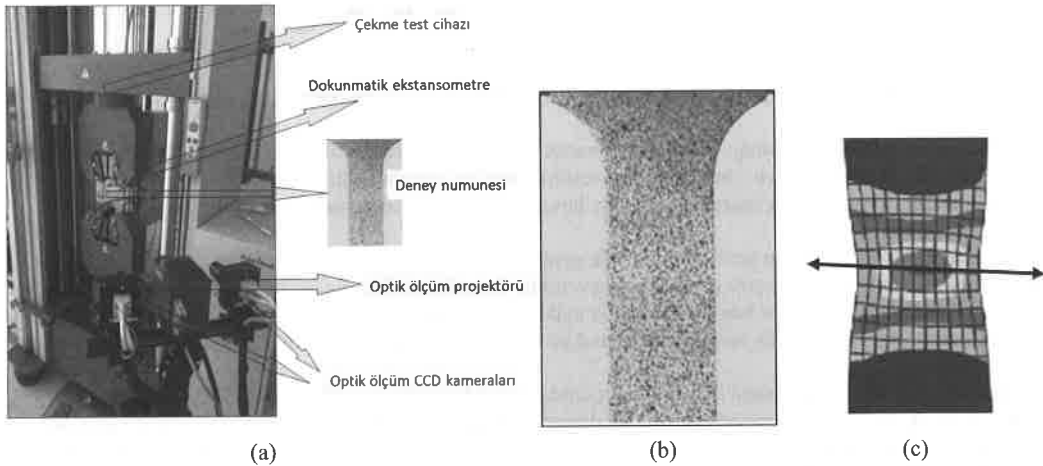
Bu çalışmada, herhangi bir deneysel ya da sayısal karşılaştırma yapılmadan, çekme testi cihazından elde edilen kuvvet değeri ve görüntü işleme sonuçları kullanılarak doğrudan gerçek gerilim-gerçek genleme eğrisi elde edilmektedir. Yöntem, iki ayrı sünek malzeme için (ST4 ve ST12 çelikleri) denenerek uygunluğu gösterilmiştir.

YÖNTEM

Deney düzeneği ve numunelerin hazırlanması

Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil-5a'da gösterilmiştir. Deneyler 30 ton (300kN) kapasiteli eksenel çekme test cihazında (Zwick/Röell) gerçekleştirilmiştir. Genleme hesaplamalarında kullanılacak olan eksenel uzama ölçümleri hem bu cihaz üzerindeki (numunler üzerine dokunarak ölçüm alan) ekstansometre ile hem de şekilde görülen optik ölçüm cihazı ile (GOM-Aramis) eşzamanlı olarak alınmıştır. Cihaz, üzerindeki güç hücresi üzerinden toplam yükü, eksenel uzama değerleri ile eş zamanlı olarak kaydetmektedir.

Deneylerde sac malzemelerden ASTM-E8 standardında numuneler sac plakalar üzerinden tel erozyon tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Deney numunelerinin ölçüleri (Şekil-1'de verilen standartlar uygulanarak) Tablo-1'de verilmiştir.



Şekil-5: Deney düzeneği (a), boyanmış numune (b) ve optik ölçüm sistemi ile elde edilen genleme değerleri ile bu genleme değerlerine bağlı olarak bulunan en yüksek genlemeye sahip kesit

Optik ölçüm sistemi ile birlikte kullanılan yazılım (GOM-Atos II) genleme hesaplamasını malzeme üzerindeki görüntünün sayısal olarak işlenmesi ile gerçekleştirmektedir. Optik sistemin algılaması ve ilgili

hesapları yapabildiği amacı ile deney numunesi önce mat beyaz boya ile boyanmakta, sonra bu boya üzerine siyah sprey boya ile siyah noktacıklı görüntü oluşturulmaktadır (Şekil-5b). Bu boyalı yapının ilk pozisyonu cihaz tarafından belirlendikten sonra, boyalı yapının şeklindeki değişiklik sayısal olarak işlenmekte ve takip edilmektedir. Yazılım, öncelikle bir başlangıç ağı oluşturmaktadır (bu ağ, iki boyutlu bir sonlu elemanlar ağına benzer bir görüntüdedir ve ağ boyutu yazılım tarafından ayarlanabilir). Üç boyutlu ölçümlerde bu ağ üç boyutlu bir yüzey yapısı oluşturmaktadır; ancak bu çalışmada kalınlık çok yüksek olmadığı için kalınlık yönünde ölçüm oluşturacak bir ağ elde edilmemektedir. Ölçümler bu ağ yapının şekil değiştirmesi üzerinden yapılmaktadır (Şekil-5c).

Tablo-1: Numune boyutları

G (Ölçüm bölgesi uzunluğu)	80±0.010 mm
W (en)	20±0.25 mm
T (kalınlık)	(sac malzemenin kalınlığı)
R	15.0mm
L (toplam uzunluk)	250.0 mm
A	120.0 mm
B	50.0 mm
C	30.0 mm

Ağ yapısı başlangıçta kare yapıdadır. Deney boyunca ağ yapısı, malzemedeki şekil değiştirmeye birlikte (yazılım tarafından anlık olarak güncellenerek) deforme olmakta, bu deformasyondaki yeni ağ üzerinde yapılan çizgisel ölçümler yoluyla yazılım her ağ noktası için

$$U = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

genleme matrisi elde edilmektedir [10, 11]. Plastik deformasyon için hacmin sabit kalacağı varsayımından yola çıkarak, kalınlık yönündeki normal genleme (ε_z) yukarıdaki denklemdeki genleme değerleri kullanılarak bulunabilir. Yazılım, deformasyonun her anında (kopma noktasına kadar) bu değerleri hem tablo hem de grafik olarak vermektedir.

Akma eğrisinin oluşturulması

Deneylerde kullanılan çekme test cihazı, yapılan ölçümleri eşzamanlı olarak kuvvet ve buna karşılık gelen uzama grafiği şeklinde kaydetmektedir ve cihazın yazılımı bu kayıdı ASCII ortamında tablo şeklinde vermektedir. ST12 malzeme için yapılan örnek bir kayıt (grafik olarak) Şekil-6a'de görülebilir.

Gerçek gerilim ve genleme değerleri, boyun verme noktasına kadar

$$\sigma_t = \left(\frac{P}{A_0} \right) \left(\frac{A_0}{A} \right) \quad ; \quad \varepsilon_t = \ln \left(\frac{A_0}{A} \right) \quad (2)$$

bağıntıları ile bulunabilir. Burada P ölçülen kuvvet değeri (N), A anlık kesit alanı (mm^2), A_0 ise kullanılan numunenin başlangıçtaki kesit alanıdır. Plastik deformasyon sırasında hacmin değişmeyeceği varsayımından yola çıkarak

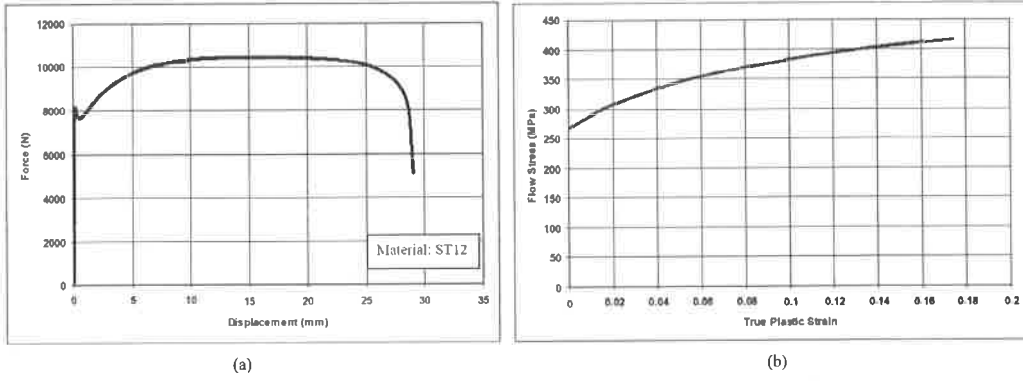
$$A_0 L_0 = AL \Rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \quad (3)$$

değeri elde edilebilir. Bu denklemlerde L_0 numunenin deney başındaki ölçüm bölgesi uzunluğunu (bu çalışmada 80mm olarak alınmıştır, bkz. Tablo-1), L ise numunenin ölçüm anındaki toplam uzunluğunu vermektedir. Görüldüğü üzere, eşzamanlı olarak yapılan kuvvet ve uzama ölçümleri, boyun verme noktasına kadar, doğrudan gerçek gerilim ve genleme hesabının yapılmasında kullanılabilir.

Simulasyonlarda kullanılmak üzere elde edilecek olan akma eğrisi ise, tanım itibarı ile, eşdeğer gerçek gerilimin (EGG) eşdeğer gerçek plastik genlemeye (EGPG) göre değişimini içeren grafiklidir. EGG, çekme testi söz konusu olduğunda, (2) formüllerinden elde edilen σ_t değeridir. EGPG ise

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} = \varepsilon_t - \varepsilon_0 - \left(\frac{\sigma_t - \sigma_0}{E} \right) \quad (4)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir. Burada E , malzeme için tespit edilen elastisite modülünü, σ_0 ve ε_0 ise sırasıyla akma noktasında elde edilen gerilim ve genleme değerlerini ifade etmektedir. ST 12 malzemeden yukarıdaki yaklaşım kullanılarak Şekil-6a'deki kuvvet-uzama grafiğinden elde edilen akma eğrisi Şekil-6b'de verilmektedir.



Şekil-6: Çekme test cihazından elde edilen kuvvet-uzama grafiği ve bu grafikten elde edilen akma eğrisi

Optik ölçüm yöntemi ile (1) denkleminde elde edilen genleme değerleri, anlık ve noktasal olarak elde edilmektedir. Deformasyonun düzenli olduğu boyun verme noktasına kadar bu değerler her kesit için (yaklaşık olarak) aynı değerleri vermekte ve ε_{xy} değeri ise sıfır olarak ortaya çıkmaktadır. Boyun vermenin başlaması sonrasında ise bu değerler noktasal olarak değişmekte, her noktanın lokal koordinat sistemi de yine o anlık olarak değişmektedir. Bu durumda, her noktadaki genlemeleri (1) denklemindeki şekilde koordinat eksenine bağımlı şekilde tanımlamak yerine, asal değerleri cinsinden belirlemek daha doğru olacaktır. Kalınlık yönünde kayma genlemesi olmadığı varsayılırsa, asal genlemeler

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 - (\varepsilon_x \varepsilon_y - \varepsilon_{xy}^2)} \quad (5)$$

denkleminde bulunabilir. Bu değerlerin bulunması sırasında iki asal eksen de tespit edilmektedir (ε_1 kullanılarak bulunan birinci asal eksen ve ε_2 kullanılarak bulunan ikinci asal eksen). Üçüncü asal genleme, hacmin sabit olduğu varsayımından yola çıkarak bulunabilir – bu durumda

$$\varepsilon_3 = 1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (6)$$

bağıntısı geçerlidir. Kalınlık yönünde kayma genlemelerinin sıfır olduğu göz önünde bulundurulursa, üçüncü asal eksen ise kalınlık yönündedir.

Akma eğrisi, yukarıda tarif edildiği üzere, eşdeğer genleme değerleri kullanılarak bulunmaktadır. Boyun verme noktasına kadar von-Mises eşdeğer genlemesi çekme eksen yönündeki genleme değeri ile aynı değeri vermektedir. Boyun verme noktası sonrasında ise eşdeğer genleme (EG)

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_{vM} = \sqrt{\frac{3}{2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} = \sqrt{\frac{4}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2)} \quad (7)$$

şeklinde elde edilebilir.

Her bir EG değerine karşılık elde edilecek eşdeğer gerilimlerin elde edilmesi için MATLAB® kullanılarak bir arayüz geliştirilmiştir. İlgili arayüz öncelikle EGleri optik ölçüm yazılımından almakta, bu değerleri kullanarak en yüksek eşdeğer genlemeye sahip nokta (EGN) işaretlenmekte ve bu noktadan geçen ağ kesitini en yüksek genlemeye sahip kesit (EGK) olarak belirlemektedir (Şekil-5c).

EGK boyunca sanal bir kesit alındığını varsayalım. Bu durumda, çekme test cihazı tarafından (o an için) ölçülen kuvvet değeri, kesit boyunca ağ üzerinde bulunan her bir kısmın üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşit olacaktır:

$$F_{cihaz}^j = \sum_{n=1}^{kısı sayıy} F_{kısı}^j \quad F_{kısı}^j = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cos \alpha + \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \sin \alpha \right) \frac{t_1 + t_2}{2} L \quad (8)$$

Burada, 1 ve 2 ile verilen indeksler ağ üzerindeki her bir kesitin birinci ve ikinci noktasına işaret etmektedir. Normal ve kayma gerilmeleri olan σ ve τ ise asal gerilmelerin 1-2 çizgisinin düzlemi üzerine transformasyonu ile elde edilmektedir (α , ilgili kesitin çekme eksenini ifade eder). Her bir noktadaki kalınlık, t , optik ölçümlerden elde edilmektedir (hacim sabit kabul edilerek); benzer şekilde ölçülen her bir kısmın uzunluğu L ile gösterilmiştir.

Henky gerilim-genleme ifadesi dikkate alınrsa,

$$S_j = \frac{2}{3} \frac{Y}{\bar{\epsilon}} \epsilon_j \quad (9)$$

kalınlık yönündeki gerilimin sıfır olacağı varsayımından yola çıkarak, asal gerilim değerleri ölçülen asal genleme değerleri cinsinden kolayca bulunabilir (Denklem (9)daki S_j asal deviatorik gerilmeleri ifade etmektedir). Bu noktada bilinmeyen, Y ile ifade edilen akma gerilmesi değeri olacaktır.

Yüklemenin adımsal olarak yapıldığı (her bir adımda statik denge koşullarının varolduğu) ve ölçümlerin belirli adımlarla kayıt altına alındığı düşünülürse, her adımda bulunan EGN dikkate alınarak yüklemeye karşılık gelen bir EGP listesi oluşturulabilir. Bununla birlikte, akma eğrisi, bu listeye karşılık bir akma gerilmesi değeri gerektirmektedir. Her bir adım i indeksi ile işaretlenirse, o adımdaki en yüksek EGP $\bar{\epsilon}_i$ ye karşılık akma gerilmesi Y_i olacaktır.

Burada, bir noktaya dikkat çekmek yerinde olur: belirli bir adımda EGN üzerinde hesaplanan EGP, o adıma kadar elde edilmiş tüm EGP değerlerinden yüksek olacaktır; o adımdaki EGK üzerindeki tüm noktaların da EGP'leri bu değer altında olacaktır. Bu sebeple, o adımdaki EGK üzerindeki bir noktanın EGP'si, daha önce elde edilmiş iki değer (örneğin i ve $i+1$ adımlarında elde edilmiş değerler) arasında olabilecektir. Bu durumda, EGK üzerindeki EGN dışındaki tüm noktalar için akma gerilmesi

$$Y = \left(\frac{\bar{\epsilon}_{i+1} - \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_{i+1} - \bar{\epsilon}_i} \right) Y_i + \left(\frac{\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_i}{\bar{\epsilon}_{i+1} - \bar{\epsilon}_i} \right) Y_{i+1} \quad (10)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Yukarıda verilen (8), (9) ve (10) denklemleri, (8) de verilen kuvvet dengesi ışığında bir araya getirilir ve kayıt altına alınmış olan her bir yüklem adımında yazılırsa, doğrusal bir denklem seti ortaya çıkarılır. Bu denklem seti

$$[A] \cdot \{Y_j\} = \{F_{cihaz}^j\} \quad (11)$$

matris ifadesi ile gösterilebilir. Bu matrisin çözülmesi, her bir adım için (daha önce tespit edilmiş EGP değerlerine karşılık gelen) akma gerilmelerini verecektir.

Görüldüğü üzere, tarif edilen yöntemle akma eğrisi doğrudan yapılan ölçümler üzerinden basit bir arayüz programı çalıştırarak elde edilebilmektedir. Bu yöntemde herhangi bir sayısal analiz ile karşılaştırma gerekmemektedir.

DENEYLER

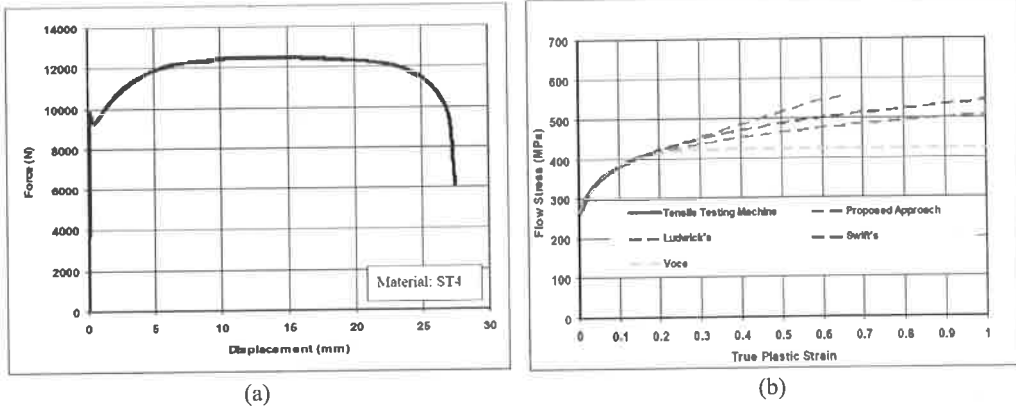
Yukarıda tarif edilen yöntem iki ayrı sünek malzeme (ST4 ve ST12 çelikleri) için akma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

ST4 malzeme için sonuçlar

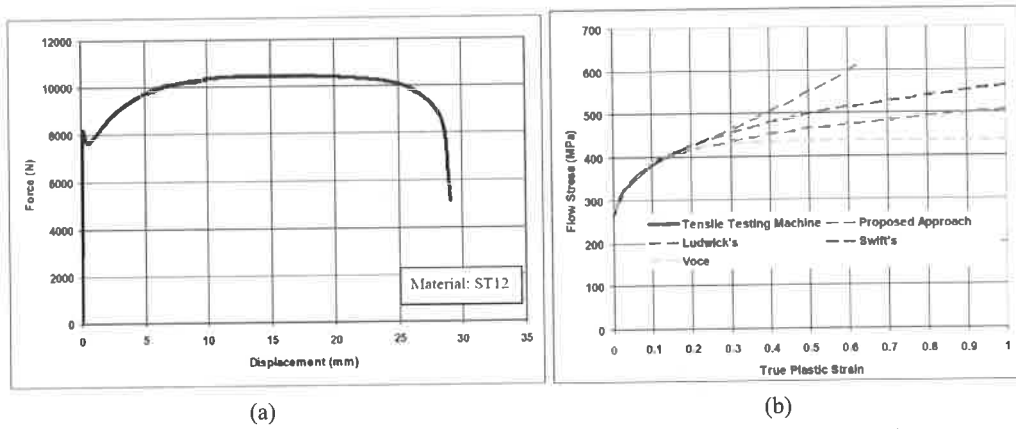
ST 4 malzeme için elde edilen kuvvet-uzama grafiği Şekil-7a'da verilmiştir. Bu malzeme için elde edilen akma eğrisi ve bu eğrinin ekstrapolasyon sonuçları ile karşılaştırması da Şekil-7b'de görülebilir.

ST12 malzeme için sonuçlar

ST12 malzeme için elde edilen kuvvet-uzama grafiği Şekil-8a'da verilmiştir. Bu malzeme için elde edilen akma eğrisi ve bu eğrinin ekstrapolasyon sonuçları ile karşılaştırması da Şekil-8b'de görülebilir.



Şekil-7: ST4 malzeme için kuvvet-uzama eğrisi (a) ve bu eğriden elde edilen akma eğrileri (b)



Şekil-8: ST12 malzeme için kuvvet-uzama eğrisi (a) ve bu eğriden elde edilen akma eğrileri (b)

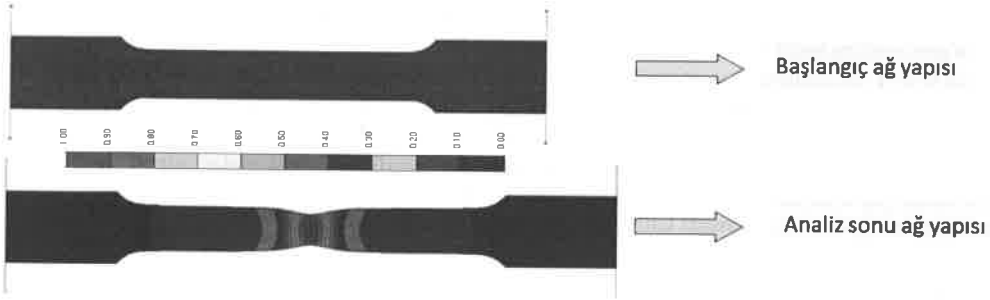
Sonuçlar

Yukarıdaki her iki malzeme için de yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen akma eğrilerinde şu hususlar doğrudan göze çarpmaktadır:

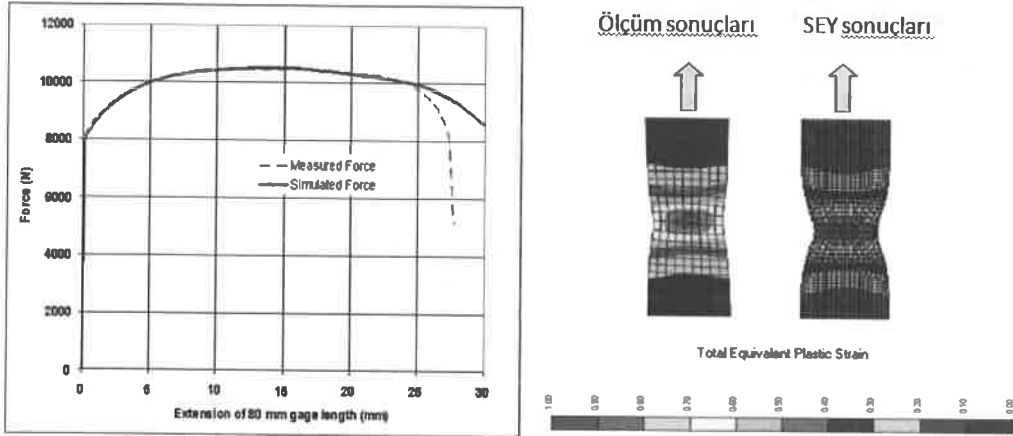
1. Her iki malzeme için de lokal boyunverme noktasına kadar (ST4 için yaklaşık 0.65, ST12 için de yaklaşık 0.6 genleme değerleri) hesaplama yapılabilmiş ve akma eğrisi doğrudan çizilebilmiştir.
2. Elde edilen akma eğrisi, her iki malzeme için de, ekstrapolasyon metodları ile elde edilen eğrilerden oldukça farklı bir eğri olarak ortaya çıkmaktadır.

Sonuçların doğruluğunun ve hassasiyetinin değerlendirilmesi için, bir sonlu eleman yöntemi analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, çekme testi numunesinin sonlu eleman modeli oluşturulmuş, bu modele malzeme özelliği olarak hesaplanmış olan akma eğrisi verilmiştir. Hesaplamalar Marc Mentat programı 2007 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizde 5000 eleman kullanılmış, 300 adımda çözüm elde edilmiş ve hiç ağ düzeltmesi yapılmamıştır (analizde kullanılan başlangıç ağ yapısı ve bu ağ yapısının deforme olmuş şekli Şekil-9'da verilmektedir)

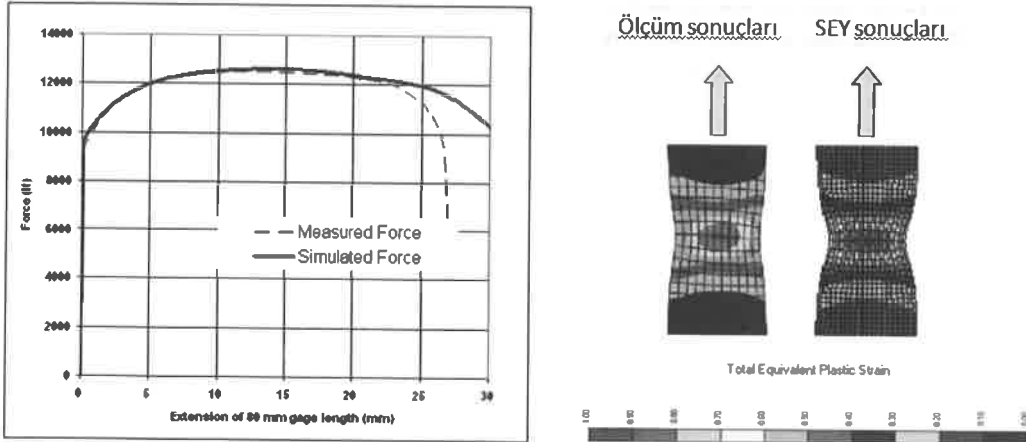
Çekme testi sanal olarak gerçekleştirilerek elde edilen kuvvet-uzama değerleri, deney sırasında elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Her iki malzeme için de sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonuçların, deney sonuçları ile (lokal boyun verme noktasına kadar) oldukça yakın olduğu görülebilir (Şekil-10 ve 11).



Şekil-9: Sonlu elemanlar simülasyonu için başlangıç ağ yapısı ve analiz sonu ağ yapısı (analiz sonu ağ yapısı üzerinde hesaplanan EGPĞ değerleri gösterilmiştir)



Şekil-10: ST4 malzeme için sınır eleman yöntemi (SEY) analizi ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil-11: ST12 malzeme için sınır eleman yöntemi (SEY) analizi ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

SONUÇ

Bu çalışmada sac numuneler için çekme testi ile elde edilen akma eğrisinin boyun verme sonrasında da elde edilmesi için optik ölçüm yöntemleri ile doğrudan bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, herhangi bir deneysel ya da sayısal bir karşılaştırma içermemekte, deney sırasında kaydedilen kuvvet ve eşzamanlı olarak optik

olarak ölçülen şekil değiştirme ölçümlerini kullanarak doğrudan akma eğrisini hesaplamaktadır. Yöntem, yüksek genlemelere kadar akma eğrisini elde edebilmektedir.

Yöntem MATLAB kullanarak kodlanmıştır. İki ayrı sünek malzemede (ST4 ve ST12 çelikleri) yöntem deneyerek sonuçlar sonlu eleman yöntemi analizinde malzeme bilgisi olarak girilmiş, simülasyon sonuçlarında çekme testinin ölçüm değerleri ile sayısal sonuçlar oldukça yakın çıkmıştır.

Bu çalışmada önerilen yöntem sadece sünek malzemeler için geçerlidir. Gevrek malzemelerde lokal boyunverme yayılı boyun verme noktasına çok yakın olduğundan elde edilen sonuçlar tatmin edici olmamaktadır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan yöntemde hasar dikkate alınmamıştır.

Kaynaklar

- [1] Siebel, E. ve Pomp, A., *Mitteilungen Keiser-Wilhelm Inst. Eisenforschung* 9, s.157-165, 1927.
- [2] Bridgeman, W., *Trans. Am. Met., Cilt 32*, s.533-574, 1944.
- [3] Banabic, D. ve Sester, M., *The influence of the constitutive equations on the accuracy of sheet metal forming processes simulation*, Proc. 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 23-26 Haziran 2011, Ankara-Türkiye.
- [4] Kalpakjian, S., *Manufacturing processes for engineering materials – 5th edition*, Pearson International 2002.
- [5] Dumoulin, S., Tabourot, L., Chappuis, C., Vacher, P. ve Arrieux, R., *Determination of the equivalent stress-equivalent strain relationship of a copper sample under tensile loading*, J. of Materials Processing Techn., Cilt 133, s. 79-83, 2003.
- [6] Devis, J. R. (ed.), *Tensile Testing – 2nd edition*, ASM International, 2004.
- [7] Réthoré, J., Roux, S. ve Hild, F., *From pictures to extended finite elements: extended digital image correlation (X-DIC)*, Comptes Rendus Mécanique, Cilt 335, s.131-137, 2007.
- [8] Tarigopula, V., Hopperstad, O.S., Langseth, M., Clausen, A.H. ve Hild, F., *A study of localisation in dual-phase high-strength steels under dynamic loading using digital image correlation and FE analysis*, International Journal of Solids and Structures, Cilt 45, p.601-619, 2008.
- [9] Zhao, Y. H., Guo, Y.Z., Wei, Q., Topping, T.D., Dangelewicz A.M., Zhu, Y.T., Langdon, T.G. ve Lavernia, E.J., *Influence of specimen dimensions and strain measurement methods on tensile stress-strain curves*, Materials Science and Engineering: A, Cilt 525, s.68-77, 2009.
- [10] GOM-Aramis Optical Measurement System Documentation, 2009.
- [11] Coruk, E., *Advanced identification of flow curve parameters in tension test*, Yüksek Lisans Tezi, Atılım Üniversitesi, 2011.