

Araştırma Makalesi / Research Article

DETERMINING THE EFFECTIVE STRESS – EFFECTIVE STRAIN CURVE OF A HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL SHEET FROM THE VISCOUS PRESSURE BULGE TEST

Cemil Günhan ERHUY^{*1}, Mehmet Emin YURCI², Taylan ALTAN³

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız-İSTANBUL

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

³ The Ohio State University, ERC/NSM, Columbus/Ohio-USA

Geliş/Received: 10.10.2008 Kabul/Accepted: 09.01.2009

ABSTRACT

The accuracy of the stress – strain relation that defines the work-hardening characteristic of sheet metals is an important factor for the aspect of accurate prediction of the sheet material behavior in forming operations from the analyses. In order to obtain that relation, there are studies suggesting bulge test in which balanced biaxial stress state forms, instead of tensile tests in which the stress state is uniaxial. Determining flow stresses at the strains higher than ones reached in uniaxial tension without any extrapolation as implemented to the uniaxial data is emphasized as the advantage of bulge test.

The tests in which the bulge is formed under viscous pressure were applied to the high-strength low-alloy (HSLA) steel sheet selected (1.01 mm – H 320 LA). Grease is used as viscous medium in the tests carried out with a die with inside diameter of 275 mm. The effective stress – effective strain curve in viscous pressure bulge test was determined by a technique based on the database obtained from finite-element analysis. That curve was compared with the flow stress curves observed in the tensile tests at 0°, 45°, and 90° to the rolling direction and the flow stress curve at sheet thickness direction calculated from uniaxial tensile data at the three directions according to the approach of average plastic strain ratio based on the Hill-1948 anisotropic yield criterion using the equivalency of the balanced biaxial tension to the through-thickness compression.

Keywords: Sheet metal, HSLA steel, bulge test, uniaxial tensile test, flow stress curve.

YÜKSEK DAYANIMLI DÜŞÜK ALAŞIMLI BİR ÇELİK SACIN VİSKOZ BASINÇ İLE ŞİŞİRME DENEYİNDEN EFEKTİF GERİLME – EFEKTİF GERİNİM EĞRİSİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Sac metallerin pekleşme karakteristiğini tanımlayan gerilme – gerinim bağıntısının doğruluğu, sac malzemenin şekillendirme işlemlerindeki davranışının analizlerden doğru tahmini bakımından önemli bir faktördür. Bu bağıntının elde edilmesi için, gerilme halinin tek eksenli olduğu çekme deneylerinin yerine, dengelenmiş iki eksenli gerilme halinin olduğu sac şişirme deneyinin önerildiği çalışmalar mevcuttur. Tek eksenli çekmede ulaşılandan daha yüksek gerinimlerdeki akma gerilmelerinin, tek eksenli verilere uygulandığı gibi herhangi bir ekstrapolasyona gerek kalmadan belirlenmesi, şişirme deneyinin avantajı olarak vurgulanmaktadır.

Seçilen yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (YDDA) çelik saca (1.01 mm – H 320 LA), şişirmenin viskoz basınç altında oluşturulduğu deneyler uygulanmıştır. İç çapı 275 mm olan bir kalıp ile yürütülen deneylerde, viskoz ortam olarak greden faydalanılmıştır. Viskoz basınç ile şişirme deneyindeki efektif gerilme – efektif gerinim eğrisi, sonlu elemanlar analizinden elde edilmiş veri tabanına dayalı bir teknik ile belirlenmiştir. Bu eğri, haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultulardaki tek eksenli çekme deneylerinde gözlenen akma gerilmesi eğrileri ile ve üç yöndeki tek eksenli çekme verilerinden, Hill-1948 anizotropik akma kriterine dayalı ortalama plastik gerinim oranı yaklaşımına göre, dengelenmiş iki eksenli çekmenin kalınlık boyunca basmaya olan eşdeğerliği kullanılarak, sacın kalınlık doğrultusunda hesaplanan akma gerilmesi eğrisi ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sac metal, YDDA çelik, şişirme deneyi, tek eksenli çekme deneyi, akma gerilmesi eğrisi.

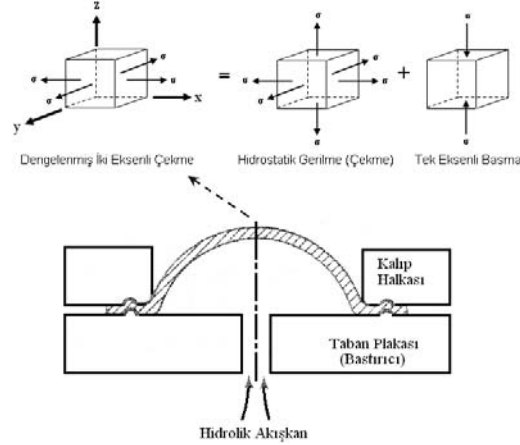
* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: e-mail / e-ileti: gunhanerhuy@gmail.com, tel: (224) 513 46 52

1. GİRİŞ

Başta otomotiv ve beyaz eşya sektörü olmak üzere, birçok sanayi dalında yaygın olarak kullanılan sac parçalarının imalatında, parçalarda biçim, boyut ve yüzey toleranslarının sağlanarak, istenen kalite düzeyine ulaşabilme başarısı, parça ve kalıp imalatçısının, genel anlamda, sac malzeme özellikleri, parça ve takım geometrisi ve işlem parametreleri şeklinde gruplandırılacak temel faktörlere olan hakimiyeti ile bağdaştırılabilir. Sac metallere şekillendirilen parçalarda, kalıp aşınmalarına bağlı biçim ve yüzey bozukluklarının yanı sıra, parçalarda boyunlanma veya aşırı incelleme, kırışma, kulaklanma ve damarlanma oluşumu, geri esnemeye dayalı açılma sapmaları, yan cidarlardaki kıvrıklaşmalar, dönme veya burulma gibi sıkça karşılaşılan sorunların, kalıpların imalatından önce yürütülen analizlerde doğru tahmin edilebilmesi önemlidir. Bu oluşumlara karşı yerinde önlemlerin alınabilmesi için, söz konusu faktörlerin beraberce ve mühendislik disiplinine dayalı yaklaşımlar ile doğru değerlendirilmesinin bir gereklilik arz ettiği, yapılmış çok sayıda çalışmadan anlaşılmaktadır.

Tek eksenli çekme deneyleri, sac malzemelerin sergilediği pekleşme davranışının belirlenmesi ve söz konusu davranışa dair bağlantıların ortaya konması amacıyla başvurulan en yaygın yöntem durumundadır. Ancak, sac şekillendirme işlemlerinde gerilme halinin çoğunlukla iki eksenlilik arz etmesi sebebiyle, malzeme davranışının belirlenmesinde de iki eksenli gerilme halinin geliştiği deneylerden yararlanılmasının daha uygun olacağı ve analizlerinde gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilebileceği, birçok araştırmacı tarafından değerlendirilmiş ve yayınlarda bildirilmiştir. Bu nedenle, dengelenmiş (eş) iki eksenli çekme gerilmesinin ortaya çıktığı sac şişirme deneyleri, uzun yıllardan beridir tek eksenli çekme deneylerinin bir alternatifi durumunda ele alınmış; yapılan çalışmalarda teorik ve deneysel yaklaşımlar ile irdelenmiştir.

Sac şişirme deneyinde, flanş kalıp ve bastırıcı tarafından, bir kitleleme halkasından da faydalanılmak suretiyle tutulan sacın, kalıbın dairesel boşluğuna denk gelen orta kısmı, pompalanan bir akışkanın sağladığı hidrolik basınç ile kubbe formunda şişmektedir. Şişen sacın tepe noktasında dengelenmiş iki eksenli çekme hali ortaya çıkmakta (Şekil 1); sac ile akışkan arasındaki sürtünme, metal-metal sürtünmesine kıyasla ihmal edilebilecek bir düzeyde ($\mu \approx 0$) olduğundan, yırtılma, Şekil 2'de de görüldüğü gibi kubbe formu parçanın tepe noktasında veya buraya yakın bir bölgede meydana gelmektedir. Şekillendirme sınır diyagramlarında majör ve minör gerinimlerin pozitif olduğu sağ taraftaki çekme-çekme bölgesinde, gerilmenin iki eksenli dengelenmiş hali için sınır gerinim değerlerine bu deneyler ile ulaşılabilir [1 - 4].



Şekil 1. Hidrolik şişirme deneyinin şematik esası ve dengelenmiş iki eksenli gerilme halinin hidrostatik çekme ve tek eksenli basma olarak ayrıştırılması [2]



Şekil 2. Kubbe formunda şişirilip tepe noktasına yakın bir bölgeden yırtılmış deney parçası [5]

Dengelenmiş iki eksenli çekme hali, hidrostatik çekme ve tek eksenli basma şeklinde etki eden iki gerilme sisteminin toplamı olarak değerlendirilebilmektedir (Şekil 1). Hidrostatik gerilmenin akma üzerine herhangi bir etkide bulunmadığı düşünülürse, dengelenmiş iki eksenli çekme deneyinin sunduğu akma eğrisi, sac malzemenin kalınlığı doğrultusunda uygulanabilecek tek eksenli basma deneyinden elde edilen akma gerilmesi eğrisine özdeş olacaktır. Bu eşdeğerlik Şekil 1’de örneklenmiştir [1, 2].

Sonuçları sürtünme gibi faktörlerden etkilenen benzeşim deneyleri kategorisinde yer almayan hidrolik şişirme deneyi, tek eksenli çekme deneyi gibi, malzemeye yönelik esas ya da temel deneylerden biri olarak değerlendirilmektedir [2].

Şişirme deneylerindeki kubbe formu deney parçası geometrisinin, bir metal stampa ile çöktürme deneyi uygulanarak da oluşturulabilmesi mümkün iken; şişirme deneylerinde şişirici ortam ile sac metalin sürtünmesi, metal-metal sürtünmesine kıyasla ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan, söz konusu deneyler ile dengelenmiş iki eksenli çekme altında daha yüksek gerinim değerlerine ulaşılabilir. Zira şişirme deneylerinin tek eksenli deneylere göre avantajı da esasen bu noktada belirmektedir. Sac şişirmede, tek eksenli çekme deneylerinde ortaya çıkan maksimum üniform gerinimin iki katına ulaşabilen gerinim değerlerindeki pekleşme davranışı modellenilebilmekte; tek eksenli çekme verilerine uygulandığı gibi, gerilme – gerinim eğrisi için herhangi bir ekstrapolasyona gerek kalmamaktadır. Ayrıca, özellikle anizotropik saclarda, plastik anizotropiye karşı duyarlılık sergileyen iki eksenli deformasyon davranışının tek eksenli çekme deneylerinden tahmin edilmesi yerine, şişirme deneyi ile belirlenmesinin daha uygun bulunduğu; plastik akışa dair tek eksenli çekme ve düzlem gerinim deneylerinden ortaya konan teorilerin doğrulanmasında da şişirme deneyine sıkça başvurulduğu literatürde belirtilmiştir [2, 6 - 10].

Hidrolik sac şişirme deneyine bir alternatif olarak, ERC/NSM (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) tarafından viskoz basınç ile şişirme (VPB, Viscous Pressure Bulge) deneyi geliştirilmiştir. Söz konusu sistemde sac malzeme, hidrolik şişirme deneylerindeki gibi pompalanan hidrolik akışkan yerine; sabit stampa, sac ve bastırıcı arasındaki özel bir viskoz ortamda, pres başlığı veya üst tablanın hareketi ile sağlanan basınç sayesinde şişirilmektedir.

Horta vd. (1970) tarafından düşük karbonlu bir çelik sac üzerinde yapılan çalışmada, iç çapı 4.5" (114.3 mm) olan bir kalıp kullanılarak gerçekleştirilen hidrolik şişirme deneyinden elde edilen gerilme – gerinim bağıntısı, Bramley ve Mellor tarafından, iç çapı 12" (304.8 mm) olan kalıpta aynı kalitedeki sac üzerinde elde edilen bağıntı ile karşılaştırılmış; iç çapı küçük olan kalıpta daha yüksek gerilme değerlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada, basınçtan kaynaklanan normal gerilmenin ve bükme gerilmelerinin ihmal edildiği analizlere dikkat çekilmek suretiyle, sac şişirme deneylerinde büyük çaplı kalıpların kullanılmasının daha avantajlı olduğu ve elde edilen sonuçların daha güvenilir bulunduğu bildirilmiştir. Gutscher vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada ise, ERC/NSM merkezinde kullanılan VPB deney düzeneğinden

faýdalanıldıđı; verilen bilgiye dayanarak da söz konusu düzenekteki kalıbın iç çapının 105.7 mm; kalıp profil yarıçapının 6.35 mm olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmamız kapsamında ERKALIP firmasında hazırlanan ve viskoz ortam olarak gres yağından faydalanılan VPB deney düzeneğinde ise, kalıp iç çapı 275 mm; kalıbın profil yarıçapı 25 mm olarak seçilmiş; düzeneğin diğer elemanları da buna göre boyutlandırılmıştır. Hazırlanan yeni düzenekte kalıbın büyük boyutlarda tasarlanması ile şişirme deneylerinde geri esnemeye yönelik çalışmaların daha kolay uygulanabilmesi; daha yüksek değerlerde ortaya çıkacak geri esnemelerin daha kolay ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu düzeneğe ile yürütülen VPB deneylerinde nominal kalınlığı 1.01 mm, kalitesi de H 320 LA olarak verilen yüksek dayanımlı düşük alaşım (YDDA / HSLA) çelik sacda Hill-1948 (Hill'48) akma kriterine göre akma gerilmesi eğrisi elde edilmiştir. Anılan eğri, haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultulardaki tek eksenli çekme deneylerinde çekme doğrultularındaki gerçek gerilme – gerçek gerinim eğrileri ile ve dengelenmiş iki eksenli çekmenin sacın kalınlığı boyunca basmaya özdeşliğinden faydalanılarak, Hill-1948 akma kriteri çerçevesinde ve ortalama normal anizotropi değerinin kullanıldığı düzlemsel izotropi yaklaşımına göre, üç yöndeki tek eksenli çekme verilerinden sac kalınlığı doğrultusunda saptanan akma eğrisi ile karşılaştırılmıştır.

2. ŞİŞİRME DENEYLERİNDE AKMA GERİLMESİ EĞRİSİ

Hill [12] tarafından 1948 yılında ortaya konan kadratik akma kriteri, üç eksenli gerilme hali için efektif gerilme ve efektif gerinim artımını (1) ve (2) eşitliklerinde görüldüğü gibi genellemektedir. Bu eşitliklerde yer alan F, G, H, L, M ve N katsayıları, malzemenin mevcut plastik anizotropisi ile ilgili durumu tanımladığından, anizotropi katsayıları olarak anılmaktadır [3, 12].

$$\sigma_{H-48} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2}{F+G+H}} \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{H-48} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{F+G+H} \sqrt{\frac{F(G d\varepsilon_y - H d\varepsilon_z)^2 + G(H d\varepsilon_z - F d\varepsilon_x)^2 + H(F d\varepsilon_x - G d\varepsilon_y)^2}{(FG+GH+HF)^2} + \frac{2d\varepsilon_{yz}^2}{L} + \frac{2d\varepsilon_{zx}^2}{M} + \frac{2d\varepsilon_{xy}^2}{N}} \quad (2)$$

Eksen takımının anizotropinin asal eksenleri ile çakışması ve orthotropi esası, düzlem gerilme hali ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$) için Hill-1948 akma kriterini (3) bağıntısına sadeleştirmektedir [3, 12, 13].

$$(G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (3)$$

Dengelenmiş iki eksenli gerilme haline dair $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ve $\sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ durumu gözönüne alındığında, (3) ile verilen denklemden, akmanın başladığı andaki gerilmeyi ifade eden σ değerine yönelik (4) eşitliği elde edilebilmektedir [13].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{F+G}} \quad (4)$$

Genel formda verilen (3) eşitliği, dengelenmiş iki eksenli gerilme hali için yeniden düzenlenir ve (4) bağıntısı yerine konursa, (1) genel eşitliği ile verilen σ_{H-48} için (5) denklemi ortaya çıkacaktır.

$$\sigma_{H-48} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{F+G}{F+G+H}} \sigma = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{F+G+H}} \quad (5)$$

Sacın haddelenme yönüne paralel (0^0 'lik) doğrultuda tek eksenli çekmedeki akma dayanımı X ile üç yöndeki plastik gerinim oranı r_0 , r_{45} ve r_{90} değerlerine bağlı olarak, Hill-1948 akma kriteri, düzlem gerilme hali için (6) eşitliğindeki gibi verilebilmektedir [14].

$$r_{90} \sigma_x^2 + r_0 \sigma_y^2 + r_0 r_{90} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90}) \tau_{xy}^2 = r_{90} (r_0 + 1) X^2 \quad (6)$$

Söz konusu eşitliğin dengelenmiş iki eksenli çekme ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ve $\sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$) için düzenlenmesi ile (7) denkleminin elde edilebileceği görülecektir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}} X \quad (7)$$

Dengelenmiş iki eksenli çekme halinin sacın kalınlık doğrultusundaki (z eksenindeki) tek eksenli basmaya eşdeğerliği dikkate alındığında, bu tek eksenli zorlamadaki akma gerilmesi $\sigma_z = -Z$ ve incelleme gerinimi $\varepsilon_z = -\varepsilon$, düzlemsel izotropi yaklaşımı çerçevesinde veya ortalama plastik gerinim oranı \bar{r} değerini kullanmak suretiyle, Hill-1948 akma kriterine göre mutlak değer olarak (8) ve (9) eşitliklerinden tahmin edilebilmektedir [6, 7].

$$|\sigma_z| = Z = \sqrt{\left(\frac{1 + \bar{r}}{2}\right)} \bar{\sigma} \quad (8)$$

$$|\varepsilon_z| = \varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2}{1 + \bar{r}}\right)} \bar{\varepsilon} \quad (9)$$

Söz konusu bağıntılarda geçen ortalama plastik gerinim oranı veya ortalama normal anizotropi faktörü \bar{r} , haddeleme yönüne 0^0 , 45^0 ve 90^0 'lik doğrultulardaki plastik gerinim oranı r_0 , r_{45} ve r_{90} değerlerine göre (10) eşitliğinden hesaplanmaktadır [1, 2, 3, 7, 11].

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (10)$$

Sac malzemenin tek eksenli çekmedeki akma dayanımı, haddeleme yönü olarak seçilen x ekseninde X ; sac düzleminde haddeleme yönüne dik doğrultuyu veya rulonun eni doğrultusunu ifade eden y ekseninde Y ; sac düzleminde haddeleme yönüne 45^0 'lik diyagonal doğrultuyu temsil eden $x'(45)$ ekseninde ise X'_{45} ile belirtildiğinde, (8) eşitliğinde geçen ortalama akma gerilmesi $\bar{\sigma}$ için (11.a) eşitliği verilmektedir. Benzer bir yaklaşım çerçevesinde, üç yöndeki tek eksenli çekme deneylerinde çekme doğrultularında ölçülen gerçek gerinimlere göre düzenlenmiş olan (11.b) denklemi, (9) ile verilen eşitlikte yer alan ortalama gerinim $\bar{\varepsilon}$ değerinin hesaplanmasına yönelik kullanılmaktadır [6, 7].

$$\bar{\sigma} = \frac{X + 2X'_{45} + Y}{4} \quad (11.a)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_x + 2\varepsilon_{x'(45)} + \varepsilon_y}{4} \quad (11.b)$$

Anizotropik bir sacın dengelenmiş iki eksenli gerilme hali altında yüklenmesinde, sac düzleminde x ve y eksenlerindeki gerinim artımları $d\varepsilon_x$ ve $d\varepsilon_y$, sacın plastik anizotropisine göre birbirinden farklılaşabilmektedir. Tavlanmış pirinç ve alüminyum ile dinlendirilmiş derin çekme kalitesindeki çelik saclar üzerinde Ranta-Eskola (1979) tarafından yürütülen çalışmada, şişirme deneyindeki söz konusu farklılaşmanın düzeyi incelenmiştir. Zira anizotropik saclarda, bu gerilme hali altındaki efektif gerinimin Hill-1948 akma kriterine göre belirlenebilmesi için, anizotropi katsayıları ile birlikte, $d\varepsilon_x$ ve $d\varepsilon_y$ arasında ortaya çıkan farklılaşmanın bilinmesi gerekmektedir.

Sacın kalınlık doğrultusu veya z eksenindeki gerinim artımını ifade etmekte olan $d\varepsilon_z$ ise, plastik şekillendirmede hacim sabitliği ilkesince $d\varepsilon_z = -(d\varepsilon_x + d\varepsilon_y)$ eşitliğinden hesaplanabilmektedir.

Sacın izotropik olması, haddeleme yönüne göre tüm θ doğrultularındaki plastik gerinim oranları ve bunların ortalaması için $r_0 = r_{45} = r_{90} = r_\theta = \bar{r} = 1$ eşitliğini geçerli kılmaktadır. Böyle bir durumda, izotropi için söz konusu olan Von Mises ve Tresca akma kriterleri değerlendirilebilir.

İzotropi durumunda, Hill-1948 akma kriterinin katsayıları arasında $L = M = N = 3F = 3G = 3H$ ve $2F = 1/Y^2$ bağıntıları geçerli olmaktadır. Burada Y , tüm yönlerde eşit olan tek eksenli çekmedeki akma dayanımı temsil etmektedir. Böyle bir durumda, Hill-1948 akma kriterine göre (1) eşitliği ile verilen efektif gerilmenin, (12.a) eşitliği ile Von Mises efektif gerilmesi $\underline{\sigma}_{VM}$ olarak ifade bulacağı görülebilir. Bu efektif gerilme, asal gerilmeler ($\sigma_I > \sigma_{II} > \sigma_{III}$) türünden (12.b) ile yazılabilmektedir. Aynı akma kriterine göre efektif gerinim artımı $d\underline{\varepsilon}_{VM}$ ise, normal ve kayma bileşenleri ile asal bileşenler ($d\varepsilon_I > d\varepsilon_{II} > d\varepsilon_{III}$) türünden (13) eşitliklerindeki gibi verilmektedir. [1, 3, 4, 11, 12]

$$\underline{\sigma}_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (12.a)$$

$$\underline{\sigma}_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]} \quad (12.b)$$

$$d\underline{\varepsilon}_{VM} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{d\varepsilon_x^2 + d\varepsilon_y^2 + d\varepsilon_z^2 + 2(d\varepsilon_{xy}^2 + d\varepsilon_{yz}^2 + d\varepsilon_{zx}^2)} \quad (13.a)$$

$$d\underline{\varepsilon}_{VM} = \sqrt{\frac{2}{3} (d\varepsilon_I^2 + d\varepsilon_{II}^2 + d\varepsilon_{III}^2)} \quad (13.b)$$

İzotropik akma kriterlerinden bir diğeri olan Tresca akma kriterinde efektif gerilme $\underline{\sigma}_T$ değeri, (14) eşitliği de belirttiği üzere, maksimum ve minimum asal gerilmeler arasındaki farka eşit olmaktadır. Söz konusu akma kriterinde efektif gerinim artımı $d\underline{\varepsilon}_T$ ise, (15) eşitliğinde de ifade edildiği gibi, mutlak değer olarak maksimum asal gerinim artımına eşit alınmaktadır. [1, 3, 11, 12]

$$\underline{\sigma}_T = \sigma_I - \sigma_{III} \quad (14)$$

$$d\underline{\varepsilon}_T = |d\varepsilon_i|_{\max} \quad (15)$$

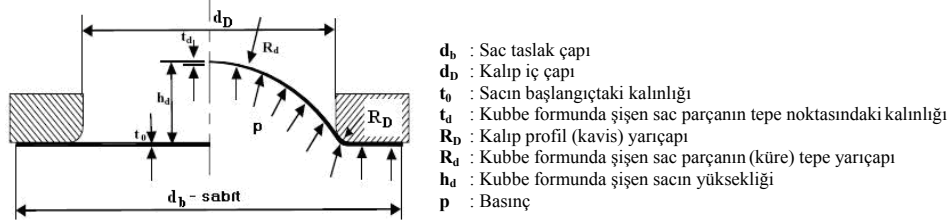
İzotropik sac, dengelenmiş iki eksenli çekme ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_I = \sigma_{II} = \sigma$ ve $\sigma_z = \sigma_{III} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$) hali altında şişirildiğinde, Von Mises ve Tresca efektif gerilme $\underline{\sigma}_{VM/T}$ değeri, (16) denkleminde de belirtildiği üzere, eksenlerde eş olan σ değeri ile elde edilmektedir. Hidrostatik gerilmenin akmaya etkide bulunmadığı kabul edilirse, dengelenmiş iki eksenli çekme halinin tek eksenli basmaya özdeşliğinden ötürü, bu da tek eksenli çekmedeki akma dayanımı Y değerine eşit olmaktadır.

$$\underline{\sigma}_{VM/T} = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_I = \sigma_{II} = \sigma = Y \quad (16)$$

Başlangıçtaki kalınlığı t_0 olup; şişirme sonrası parçanın tepe noktasında kalınlığı t_d değerine düşen izotropik sacdaki gerinimlere dair $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_I = \varepsilon_{II} = -\varepsilon_z / 2 = -\varepsilon_{III} / 2 = -\varepsilon / 2$ ve $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$ eşitliği gereğince, (17) denklemi ile de ifade edildiği üzere, Von Mises ve Tresca efektif gerinimi $\underline{\varepsilon}_{VM/T}$, kalınlık doğrultusundaki gerçek gerinimin mutlak değerine eşit olacaktır.

$$\underline{\varepsilon}_{VM/T} = -\varepsilon_z = -\varepsilon_{III} = \ln(t_0 / t_d) = 2\varepsilon_I = 2\varepsilon_{II} = 2\varepsilon_x = 2\varepsilon_y \quad (17)$$

Şişirme deneyindeki efektif gerilme, deney parçasının geometrisine ve basınca bağlı olarak, bükme gerilmelerini ihmal eden membran teorisi ile de hesaplanabilmektedir. Küre formunda şiştiği kabul edilen parçanın ve kullanılan kalıbın karakteristik geometrisi Şekil 3'te görülmektedir. [10]



Şekil 3. Şişirilen bir deney parçasının ve kullanılan kalıbın karakteristik geometrisi [10]

Flanşı kilitlemiş sac taslağın dairesel bir kalıpta şişirilmesinde dengelenmiş iki eksenli gerilme ve eksenel simetri gözönüne alınırsa ($R_{d-I} = R_{d-II} = R_d$), küre formunda şiştiği kabul edilen sacın tepe noktasındaki asal gerilmeler, membran teorisine göre (18) ile hesaplanabilmektedir [1, 6, 7, 9, 10].

$$\sigma_I = \sigma_{II} = \frac{pR_d}{2t_d} \quad (18)$$

Kalınlık yönünde etkiyen ve genellikle ihmal edilen normal gerilme de küçük asal gerilme olarak $\sigma_{III} = -p/2$ eşitliği ile dikkate alınabilmektedir [7, 10]. İzotropik olan Von Mises veya Tresca akma kriterleri seçildiğinde, bu iki kritere göre efektif gerilme $\sigma_{VM/T}$ değeri (19) eşitliği ile hesaplanabilmektedir [10].

$$\sigma_{VM/T} = \frac{p}{2} \left(\frac{R_d}{t_d} + 1 \right) \quad (19)$$

Şişirilen deney parçalarının küresel kabul edilen formunda, tepe noktasındaki profil yarıçapı R_d ve kalınlık t_d değerlerinin tahminine yönelik çeşitli ampirik bağıntılar ileri sürülmüştür. Ortalama R_d değerinin, şişme yüksekliği h_d değerine ve kalıp boyutlarına (kalıp iç çapı d_D ve profil yarıçapı R_D değerlerine) göre hesaplandığı (20) denklemi bunlardan birisidir. Temsilci durumu arz eden tepe noktasındaki kalınlık t_d ise, Hill tarafından (21) eşitliğindeki gibi öngörmüştür. [10]

$$R_d = \frac{[(d_D/2) + R_D]^2 + h_d^2 - 2R_D h_d}{2h_d} \quad (20)$$

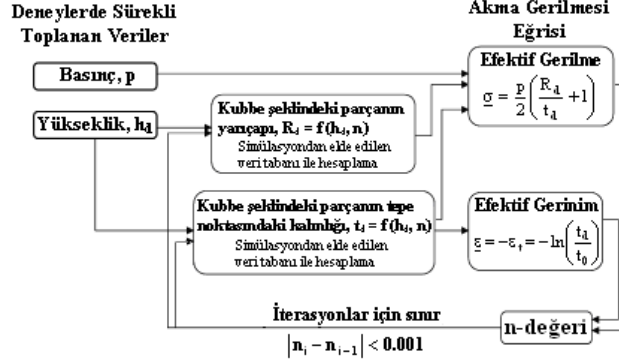
$$t_d = t_0 \left[\frac{1}{1 + (2h_d/d_D)^2} \right]^2 \quad (21)$$

Sac malzemenin pekleşmesi $\sigma = K\epsilon^n$ bağıntısına göre ifade edildiğinde, Chakrabarty ve Alexander, Hill tarafından (21) eşitliği ile ileri sürülen bağıntıyı, pekleşme üssü n değerini de içerecek şekilde geliştirmiş ve (22) eşitliğini elde etmişlerdir [10].

$$t_d = t_0 \left[\frac{1}{1 + (2h_d/d_D)^2} \right]^{2-n} \quad (22)$$

Kalıp kavis yarıçapının hidro-şekillendirme işlemlerine etkisi, Shang ve Shim (1984) tarafından yapılan çalışmada, hidrolik şişirme deneylerinden faydalanılarak irdelenmiştir.

Gutscher vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, VPB deneyi ile birlikte, söz konusu deneyden efektif gerilme – efektif gerinim bağıntısının (akma gerilmesi eğrisinin) elde edilmesine yönelik olarak, ERC/NSM araştırma merkezinde geliştirilen bir teknik tanıtılmıştır. Esasen tersine bir yöntemi ifade eden söz konusu teknik, prosedür olarak Şekil 4’te açıklanmıştır.



Şekil 4. Viskoz basınç ile sac şişirme deneylerinden FEM veri tabanına dayalı teknik ile efektif gerilme ve efektif gerinim değerlerinin belirlenmesi [10]

Deneysel anlık ölçülen şişme yüksekliği h_d ve basınç p değerleri kullanılarak, FEM simülasyonları ile oluşturulmuş veri tabanının sayesinde, sac parçanın tepe noktasındaki profil yarıçapı R_d ve kalınlık t_d değerleri sağlanacak şekilde yapılan iterasyonlara dayanan ERC/NSM tekniğinde, söz konusu iterasyonlar, esas alınan $\sigma = K\varepsilon^n$ bağıntısındaki pekleşme üssü n değerine 0.001 düzeyinin altında bir yaklaşıma sağlanıncaya kadar sürmektedir [10].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR YÖNELİK MATERYAL VE YÖNTEM

Nominal kalınlığı 1.01 mm olarak verilen H 320 LA kalitesindeki çelik sac malzeme ele alınarak, söz konusu malzemeye tek eksenli çekme ve viskoz basınç ile şişirme deneyleri uygulanmıştır.

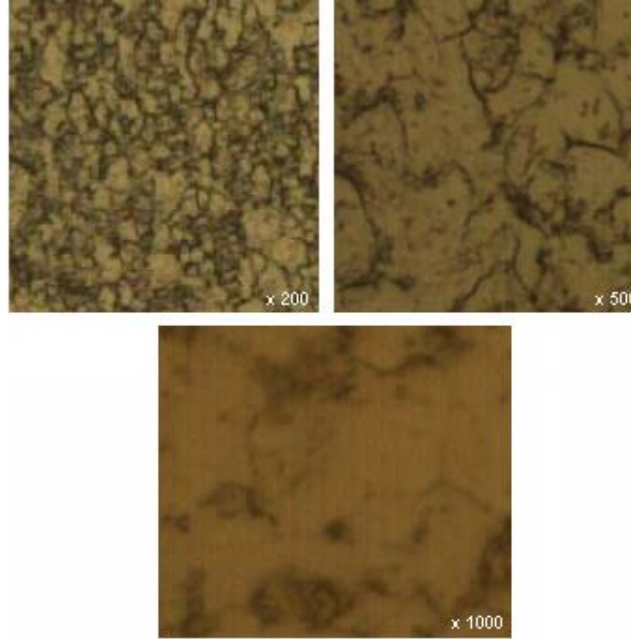
İncelemek üzere seçilen H 320 LA kalitesindeki sac malzeme, 7132 kalite numarası ile ERDEMİR firması tarafından, DIN EN 10268-99 “Soğuk Şekillendirmeye Uygun Yüksek Akma Dayanımlı Soğuk Haddelenmiş Çelikler” standardına göre üretilmiştir. Mikroalaşımlandırılmış çelik olarak da nitelendirilen, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (YDDA/HSLA çelikleri) sınıfında soğuk hadde ürünü olarak yer alan söz konusu malzeme, üretici firmadan tavllanmış ve kaplamasız rulo sac olarak temin edilmiştir.

Çalışmada ele alınan 1.01 mm’lik nominal kalınlığa sahip H 320 LA kalitesindeki çelik sac malzemenin SPECTROLAB M5 analiz cihazı ile belirlenen kimyasal bileşimi Çizelge 1’de görülmektedir [5].

Seçilen sac malzemenin kesitinde, ışık mikroskobu altında 200, 500 ve 1000 büyütme oranları ile görüntülenmiş olan mikroyapı ise Şekil 5’te verilmiştir. Söz konusu inceleme için çelik sacdan kesilen numune parçalar, sıcak presleme yöntemi ile bakalite gömülmüştür. Yüzey parlatma işlemleri, sırayla 240 – 320 – 800 numaralı zımparalar, bunun ardından sırayla 6 μm ve 3 μm ’lik elmas pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir; yapılan parlatmanın sonrasında incelenecek yüzey Nital 2 çözeltisi ile dağlanmıştır. Kimyasal analiz ve mikroyapı incelemelerinden, çelik sacın ince taneli ferritik bir yapıya sahip olduğu belirlenmiş ve söz konusu yapıda çökelmiş partiküller gözlenmiştir. Bu sacın sertlik değeri ise 71–72 HRB olarak ölçülmüştür [5].

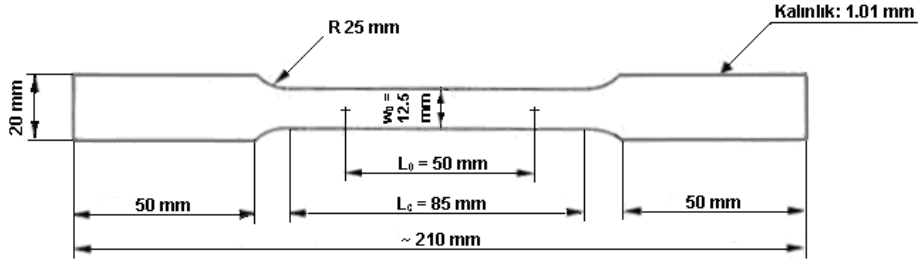
Çizelge 1. İncelenen H 320 LA kalitesindeki çelik sacın kimyasal bileşimi [5]

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Ti	Nb	
0.068	0.581	0.012	0.010	0.008	0.036	0.030	0.001	0.038	
% Ağırlık									
Cr	V	Mo	Ni	Co	Pb	Sn	Sb	W	Fe
0.044	0.032	0.029	0.001	0.008	0.002	0.011	0.002	0.005	Kalan
% Ağırlık									

**Şekil 5.** İncelenen H 320 LA kalitesindeki çelik sacın ışık mikroskobu ile 200, 500 ve 1000 kat büyütme altındaki mikroyapı görüntüleri [5]

Nominal kalınlık değeri 1.01 mm olarak verilen H 320 LA kalitesindeki çelik sacdan, haddeleme yönüne göre 0° , 45° ve 90° ’lik doğrultularda ve tel erozyon ile işleme tekniğinden faydalanılarak çıkartılan tek eksenli çekme deney numunelerinin boyutları, ASTM E 8M (1989) ve TS 138 EN 10002-1 (1996) standartlarının gereklerini sağlayacak şekilde seçilmiştir (Şekil 6). Tel erozyon ile kesme yönteminin, sac numunelerin şekil ve boyut hassasiyeti ile yüzey kalitesi bakımından, talaşlı işleme, lazer ile kesme ve kalıpta kesme gibi alternatif yöntemlere göre daha avantajlı olduğu açıktır. Ayrıca, lazer tekniğinde malzeme üzerinde ısıl etki; kalıpta kesmede ise numune kenarlarında pekleşmeye neden olan mekanik etki mevcut iken, tel erozyon ile işleme yönteminde bu etkiler gözlenmemektedir [5].

Tel erozyon yöntemi ile kesim işlemi sonrasında, deney numunelerinin yüzeylerinde bulunabilecek muhtemel oksit tabakası, ölçme uzunluğu işaretlemelerinden ve kesit alanının ölçülmesinden önce, 1000 numaralı zımpara kağıdı kullanılarak, sac numunelere hafif bir işlem uygulamak suretiyle temizlenmiştir. Söz konusu işlemin, tel erozyon ile kesme sürecinden gelen kalıntı gerilmelerin azaltılmasına ya da giderilmesine yardımcı olacağı; aynı zamanda, numune kesim yüzeylerinde bulunabilen mikroçatlakların deney esnasında oluşturacağı çentik etkisini gidermede fayda sağlayabileceği düşünülmüştür [5].



Şekil 6. Kullanılan tek eksenli çekme deney numunelerinin ASTM E 8M (1989) ve TS 138 EN 10002-1 (1996) standartlarına göre seçilen boyutları [5]

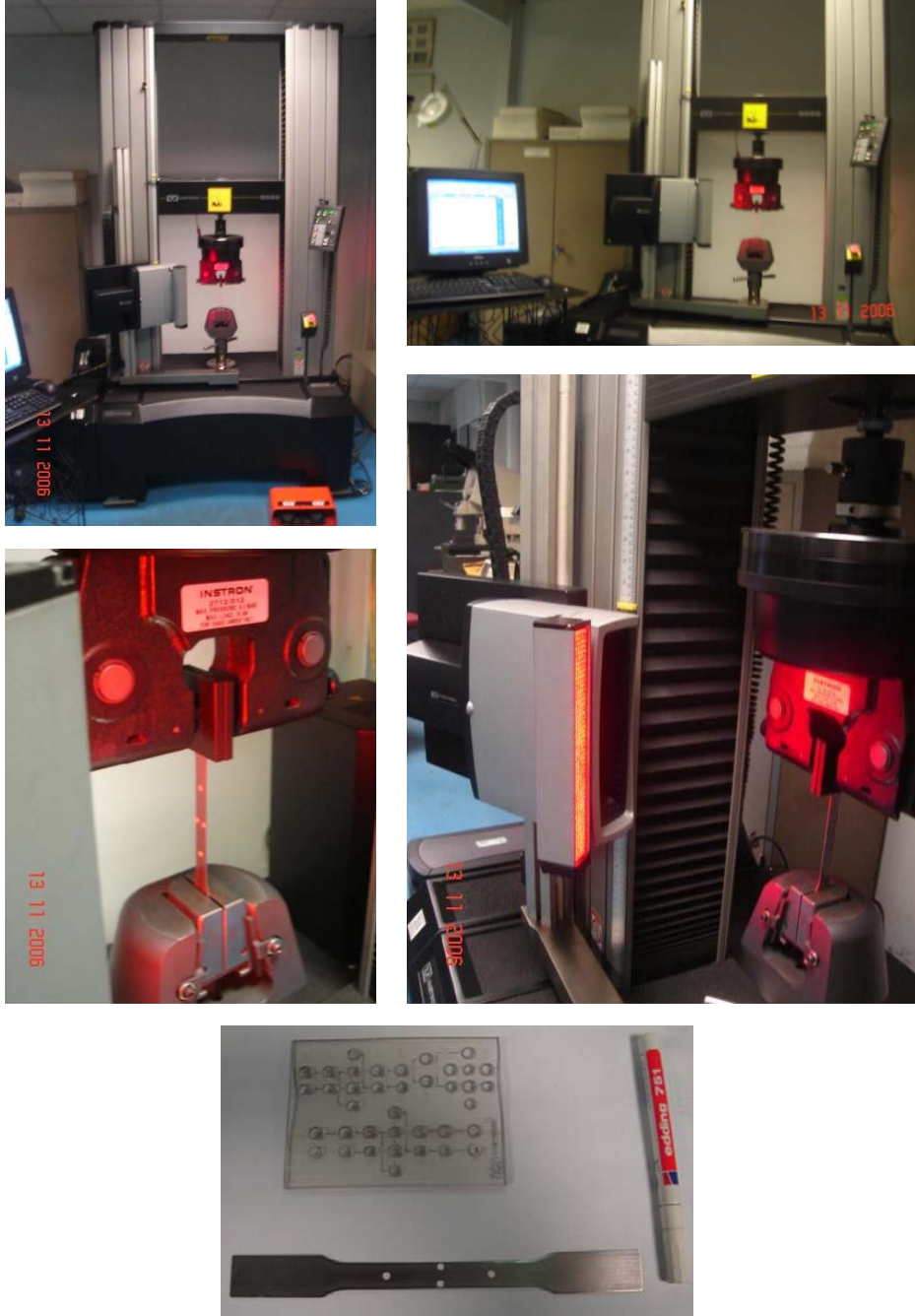
Tek eksenli çekme deneyleri, ERKALIP firmasının, Şekil 7’de görülmekte olan 100 kN kapasiteli INSTRON 5582 elektromekanik üniversal deney makinesi ve aparatları ile birlikte, Bluehill deney yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [5].

Deneylerde yük ölçümü için ± 10 kN kapasiteli yük hücresinden faydalanılmıştır. Sac numunelerin genişliği ve kalınlığı, hassasiyeti 1/1000 mm olan 0-25 mm’lik dijital mikrometre ile beş farklı noktadan ölçülmüş; söz konusu değerlerin ortalaması alınarak, gerilme hesaplamasında kullanılmıştır [5].

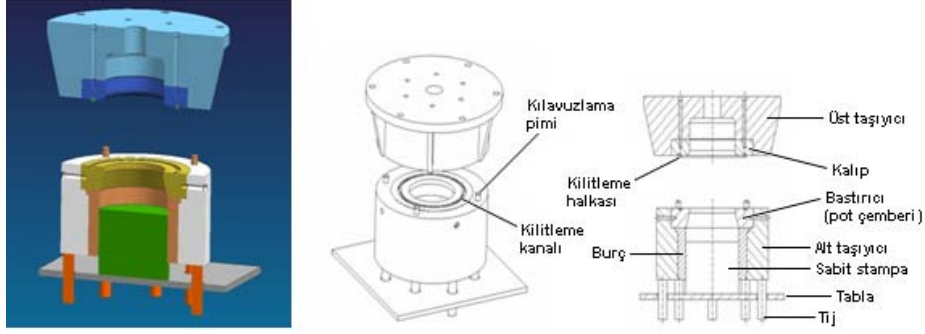
Sac numunelerdeki deformasyon ölçümü ise, iki eksenli özelliğe sahip INSTRON AVE gelişmiş (ileri) video ekstensometre (Advanced Video Extensometer) ile gerçekleştirilmiştir. Maksimum görüş alanı 200 mm olan bu sistemin deney esnasında ölçüm yapabilmesi için, numunelerin yüzeyine beyaz renkli özel bir kalem ve şablon ile çapı yaklaşık 4 mm olan dairesel noktalar işaretlenmiştir (Şekil 7). Sac numunelerin boyu doğrultusunda işaretlenen bu noktaların arasındaki mesafe, ilk ölçüm uzunluğunu ifade eden L_0 değerini vermektedir. Deney esnasında söz konusu noktalara odaklanan ekstensometre, iki nokta arasında ortaya çıkan deformasyonu 1/1000 mm’lik bir çözünürlük ile ölçebilmektedir [5].

Ele alınarak incelenen 1.01 mm’lik kalınlığa sahip H 320 LA kalitesindeki çelik saca viskoz basınç altında uygulanan şişirme (VPB) deneylerinde, ERKALIP firmasında boyutlandırıp imal edilen, çalışma prensibi ve ana elemanları ise şematik olarak Şekil 8’de verilen düzenek kullanılmıştır. Bu düzeneğin ana elemanları, sabit stampa, stampanın monte edildiği ve üzerinde tij delikleri bulunan tabla, tijler, alt ve üst taşıyıcılar, stampanın yataklığı burç, sızdırmazlık elemanları (o-ringler), üst gruba bağlanan kalıp, kalıbın üzerine monte edilen kilitleme halkası ile alt grupta yer alan ve üzerinde kilitleme kanalı bulunan bastırıcı (pot çemberi) ve alt taşıyıcıya yerleştirilen kılavuzlama pimleri olarak ifade edilebilmektedir. Söz konusu deneylerde, viskoz ortam olarak gres yağı kullanılmıştır [5].

Uygulanan VPB deneylerinde sac malzemeyi şişirmek amacıyla faydalanılan gres, alt tablaya bağlanan ve sabit durumda bulunan stampanın üzerindeki hazneye doldurulmakta; çapı 465 mm olarak seçilen dairesel sac taslak, alt grupta yer alan bastırıcının üzerine oturtulmaktadır. Kullanılan 1200 tonluk HİDROMODE hidrolik presinin üst tablasının deney esnasında aşağıya doğru hareketi ile birlikte alt ve üst grup kapanmakta; bunlar, sabit durumda bulunan stampanın çevresinde yataklanmış şekilde, beraberce aşağı inmektedir. Sac ile stampa ve bastırıcı yüzeyleri arasındaki gres ortamında oluşan basınç, dairesel kalıp boşluğuna denk gelen sacın orta kısmını serbest biçimde ve kubbe formunda şişirmektedir. Bu işlem esnasında, üst gruptaki kalıp ve alt gruptaki bastırıcı arasında kalan flanşın kalıba akışını frenlemek için, dikdörtgen kesitli bir kilitleme halkasından faydalanılmıştır. Deney süresince kilitleme kuvveti, presin tabanındaki dört adet hidrolik yastıktan biri ile temin edilmiş ve sekiz adet tij ile alt grubun tabanından sisteme etki ettirilmiştir. Yaklaşık 150 ton düzeyindeki bir bastırıcı kuvveti, flanş kilitlemeye ve flanşın kalıp boşluğuna akışını tamamen engellemeye yeterli olmuştur. Kullanılan deney düzeneği ve hidrolik pres Şekil 9’da görülmektedir [5].



Şekil 7. Tek eksenli çekme deneylerinde kullanılan 100 kN kapasiteli INSTRON 5582 elektromekanik üniversal deney makinesi ve aparatları ile üzerine ölçüm uzunlukları işaretlenmiş bir deney numunesi [5]

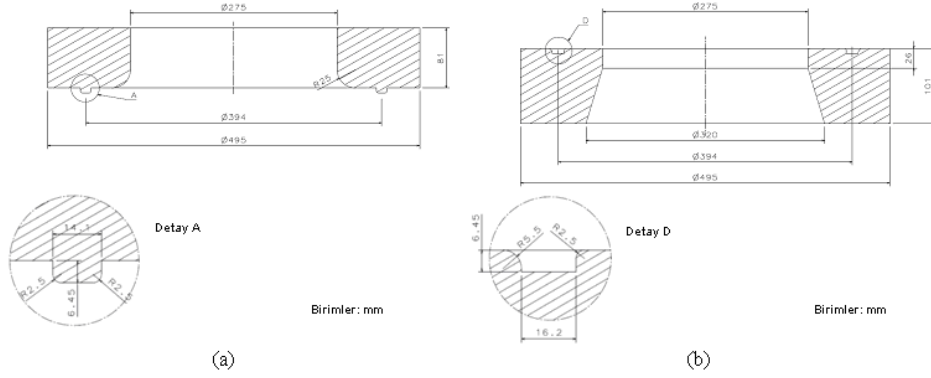


Şekil 8. Viskoz basınç ile sac şişirme deneylerinde kullanılan düzeneğin ana elemanları [5]



Şekil 9. Viskoz basınç ile sac şişirme deneylerinin yürütüldüğü düzenek [5]

Çalışma kapsamında tasarlanıp imal edilen VPB deney düzeneği, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM) birimi tarafından kullanılmakta olan düzeneğin benzeri durumundadır. Prensip itibarıyla aynı iki düzeneden, ERKALIP firmasında hazırlananın boyutları daha büyük seçilmiştir [5]. Anılan merkezdeki deney düzeneğinde kalıbın iç çapının 105.7 mm; kalıp profil yarıçapının ise 6.35 mm olduğu, Gutscher vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada görülmektedir. Çalışmamızda [5] uygulanan VPB deneylerine yönelik hazırlanan yeni düzenede ise, kalıbın iç çapı 275 mm; profil yarıçapı ise 25 mm olarak seçilmiştir. Düzeneğin diğer elemanları da bu boyutlara göre tasarlanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Hazırlanan viskoz basınç ile sac şişirme deney düzeneği elemanlarından kalıp (a) ve bastırıcı (b) ile bunların üzerinde yer alan sac kilitleme sisteminin boyutları [5]

Uygulanan VPB deneylerinde, şişme yüksekliği değerlerinin ölçümü için, 100 mm'lik kursa sahip OPKON LPT 100 lineer cetvelden; viskoz ortam olarak kullanılan gres yağında ortaya çıkan basıncın anlık ölçümü için ise, 100 bar değerinde ölçüm kapasitesine sahip olan PCB1502B41FB basınç sensöründen faydalanılmıştır. Bu deneylerde ölçülen basınç ve yükseklik verileri, ticari adı NATIONAL INSTRUMENTS “NI USB-9215 4 Channel 16-Bit Analog Input Modul” olarak geçen veri toplama kartı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneylerde pres üst tablasının şişme yüksekliğine göre kontrol edilmesi amacıyla, E3TAM firması tarafından bir elektriksel kontrol sistemi ve LABVIEW programı tabanında çalışan bir yazılım hazırlanmıştır. Bu sistem sayesinde, yazılıma tanımlanmış şişme yüksekliği değerine ulaşıncaya kadar otomatik olarak durdurulabilmektedir. Böylelikle deneyler, parçalarda arzu edilen şişme yüksekliği değerine kadar sürdürülürken; sacın yırtılmasına az bir mesafe kala tabla hareketi durdurularak, basınç ile çatlaktan fırlayacak gresin cetvele zarar vermesi engellenmiştir. Pres üst tablasının iniş hızı ise mümkün olan en düşük düzeyde, yaklaşık 8 mm/s değerinde tutulmuştur [5].

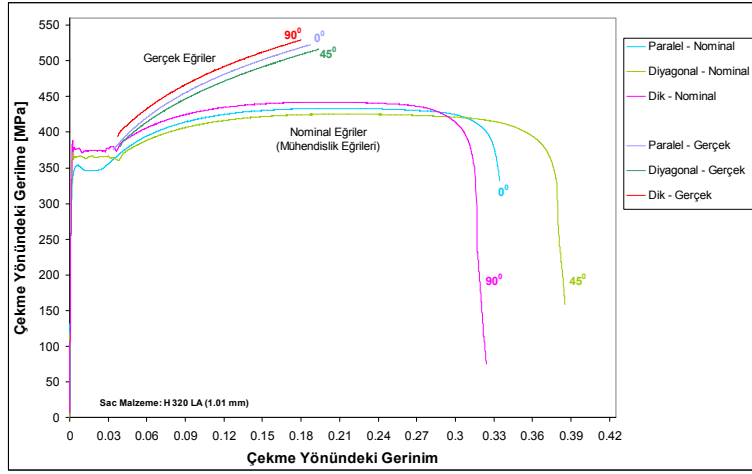
4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN ÇIKTILARI

Ele alınan 1.01 mm'lik nominal kalınlık değerindeki H 320 LA kalitesindeki çelik sac malzemeye 8.80 mm/dak'lık sabit çekme hızı (çene ayrılma hızı) altında; haddeleme yönüne paralel (0° 'lik), diyagonal (45° 'lik) ve dik (90° 'lik) doğrultularda tek eksenli çekme deneyleri uygulanmıştır [5].

Üç yönde uygulanmış olan üç adet deneyden yalnız birinde, çekme doğrultularında elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme bağıntısının yanısıra, belirgin akma davranışı ve akma (noktası) uzaması veya Lüders gerinimi sergilediği gözlenen sac malzemenin üniform deformasyon bölgesinde hesaplanan gerçek gerilme – gerçek gerinim bağıntısı da Şekil 11'de verilmiştir [5].

İncelenen çelik sac malzemeye üç farklı θ doğrultusunda uygulanan tek eksenli çekme deneylerinden nominal verilere göre saptanan üst akma dayanımı R_{eH} ve alt akma dayanımı R_{eL} , akma noktasındaki uzama yüzdesi YPE, çekme dayanımı R_m , maksimum üniform uzama yüzdesi e_u ve kopmadaki uzama yüzdesi A50 mm değerleri, her bir yöndeki üç deneyden elde edilmiş sonuçların ortalaması olarak Çizelge 2'de verilmiştir. Üniform deformasyon bölgesinde çekme doğrultularında elde edilen gerçek gerilme ve gerçek gerinim verileri kullanılarak, önce $\sigma = K \epsilon^n$ üslü bağıntısına göre regresyonlar yapılmıştır. Bu denklemin esas alınması suretiyle belirlenen pekleşme üssü n ve dayanım katsayısı K değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Ancak, söz konusu bağıntıdaki korelasyonlar yeterli görülmemiş, daha iyi korelasyonlar sunan $\sigma = K(c + \epsilon)^n$ bağıntısı esas alınmış; bu modele göre pekleşme üssü n , dayanım katsayısı K ve korelasyonları maksimize etmekte olan c değerleri de aynı çizelgede verilmiştir. Sac malzemenin plastik gerinim oranı veya

normal anizotropi faktörünü ifade eden r değerleri ise, üniform deformasyon bölgesinde, çekme doğrultularında yaklaşık % 3'lük gerinim artımları verilerek, farklı deformasyon düzeylerinde numunelerin genişlik ve kalınlığının mikrometre ile ölçülmesi yoluyla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin ortalaması da Çizelge 2'de yer almaktadır [5].



Şekil 11. Tek eksenli çekme deneylerinden çekme doğrultularında belirlenen nominal gerilme – nominal gerinim bağıntıları ve üniform deformasyon bölgesinde hesaplanan gerçek gerilme – gerçek gerinim eğrileri [5]

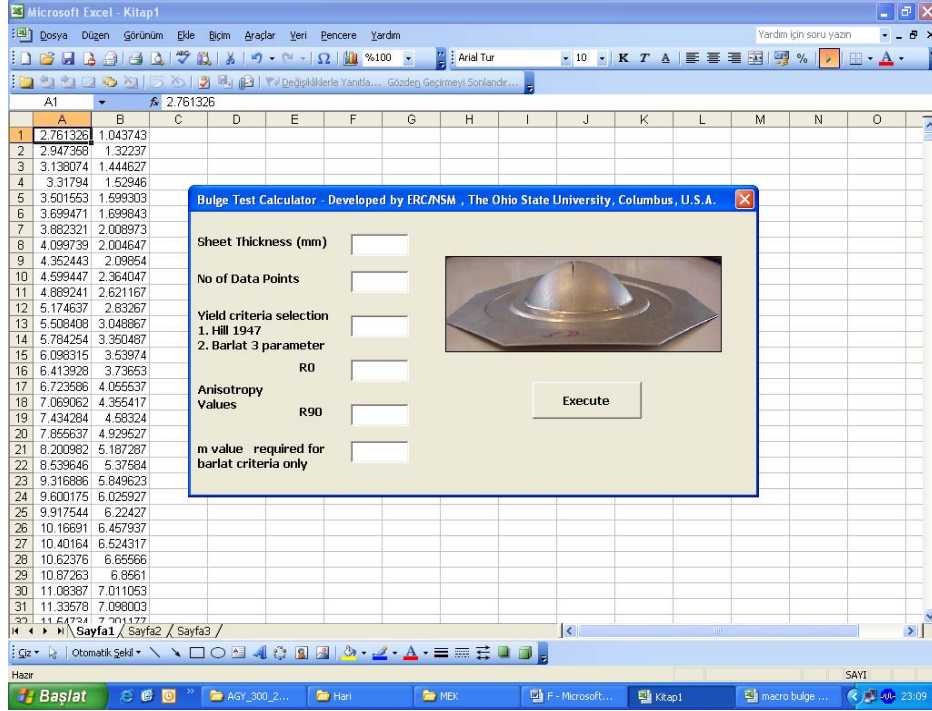
Çizelge 2. İncelenen H 320 LA kalitesindeki çelik sacın haddelene yönüne 0° , 45° ve 90° 'lik doğrultularda uygulanan tek eksenli çekme deneylerinden belirlenen mekanik özellikleri [5]

θ	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	YPE [%]	R_m [MPa]	e_u [%]	A50 mm
0°	343.9	337.6	2.2	431.8	20.3	% 34.0
45°	372.9	360.8	3.8	425.5	21.5	% 37.5
90°	392.8	377.1	4.1	441.9	19.8	% 33.1

θ	$\sigma = K\varepsilon^n$		$\sigma = K(c + \varepsilon)^n$			r
	n	K [MPa]	n	K [MPa]	c	
0°	0.193	722.148	0.184	711.566	-0.00349	0.741
45°	0.188	703.211	0.190	705.667	0.00172	1.155
90°	0.184	725.180	0.180	720.328	-0.00178	0.953

Seçilen 1.01 mm'lik nominal kalınlık değerine sahip H 320 LA kalitesindeki çelik saca uygulanan viskoz basınç ile şişirme (VPB) deneylerinden efektif gerilme – efektif gerinim bağıntısının belirlenmesi amacıyla, sonlu elemanlar analizi (FEA) ile oluşturulmuş veri tabanına dayanan bir tekniktan faydalanılmıştır. Tersine bir yöntemi ifade eden bu teknik, ERC/NSM adlı araştırma merkezi tarafından geliştirilmiştir. Sac şişirme deneyinden akma gerilmesi eğrilerini belirlemek amacıyla, ERC/NSM tarafından, kendi düzenekleri için PAM-STAMP 2G simülasyon yazılımı ve Aquadraw arayüzünden faydalanılarak, FEM veri tabanına göre oluşturulmuş bir Excel Macro programı kullanılmaktadır. Çalışmamız kapsamında hazırlanan deney düzeneği ile gerçekleştirilen VPB deneylerinden de efektif gerinim – efektif gerinim eğrisini belirleyebilmek üzere, bu düzenek için gereken benzer bir program yine ERC/NSM tarafından hazırlanmıştır. Sac

şişirme deneyinden efektif gerilme – efektif gerinim bağıntılarının elde edilmesi amacıyla yönelik hazırlanan Excel Macro programında, parametrelerin girişi için oluşturulmuş arayüz Şekil 12’de görülmektedir [5].

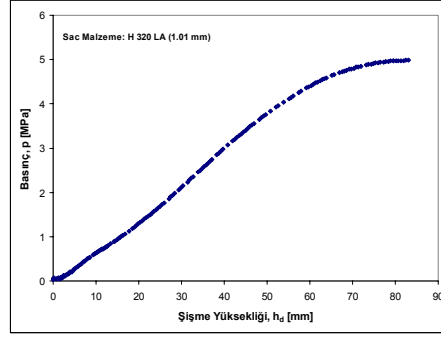


Şekil 12. Viskoz basınç ile sac şişirme deneylerinden efektif gerilme – efektif gerinim eğrilerinin elde edilmesi için FEM veri tabanından faydalanılarak ERC/NSM’de hazırlanan Excel programında parametrelerin girişine yönelik oluşturulmuş arayüz [5]

Şişirme deneylerinden efektif gerilme – efektif gerinim bağıntısını belirlemeye yönelik hazırlanan programa, deneylerden elde edilen basınç – şişme yüksekliği profili girilmekte; sacın kalınlığı ve eğriyi oluşturacak nokta sayısı atanmakta ve seçenekler arasında yer alan Hill-1948 kadratik akma kriteri veya üç parametrelili Barlat (YLD89) akma kriterinden biri seçilmektedir. Eğer Hill-1948 akma kriteri seçilecek olursa r_0 ve r_{90} değerlerinin; Barlat akma kriteri seçilecek olursa bu kriterde özgü m parametresinin tanıtılması istenmektedir.

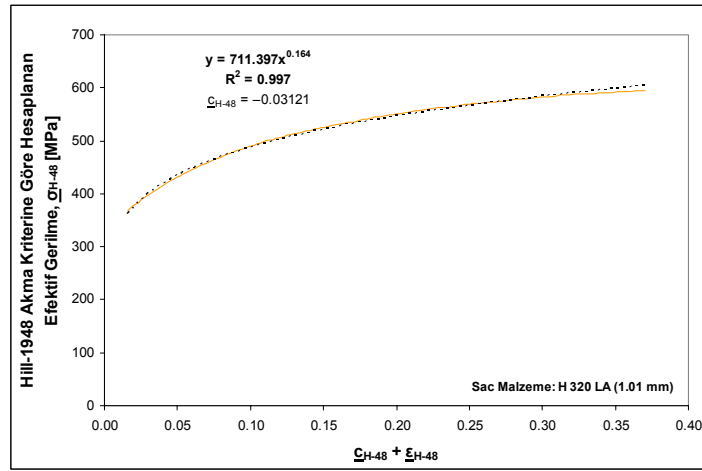
Kullanılan program, efektif gerilme – efektif toplam gerinim bağıntısına dair $\sigma = K \epsilon^n$ modelini esas almaktadır. Tanımlanan parametreler doğrultusunda belirlenen efektif gerilme ve efektif gerinim değerlerinden, daha iyi korelasyonlar sağlayabilen $\sigma = K(c + \epsilon)^n$ bağıntısına geçiş yapmak mümkündür.

İncelenen H 320 LA kalitesindeki çelik saca viskoz basınç altında uygulanan üç şişirme deneyinde ortaya çıkan basınç – şişme yüksekliği profillerinin ortalaması Şekil 13’te verilmiş; Excel Macro programına bu profil girilmiştir. Sacın kalınlığı, deneylerde ölçülenlerin ortalaması olarak, programa 1.019 mm değeri ile tanıtılmıştır. Veri noktalarının sayısı 75 olarak seçilirken; Hill-1948 akma kriteri esas alınmıştır. İki doğrultudaki plastik gerinim oranları da Çizelge 2’de verilen değerler ile programa sunulmuştur [5].



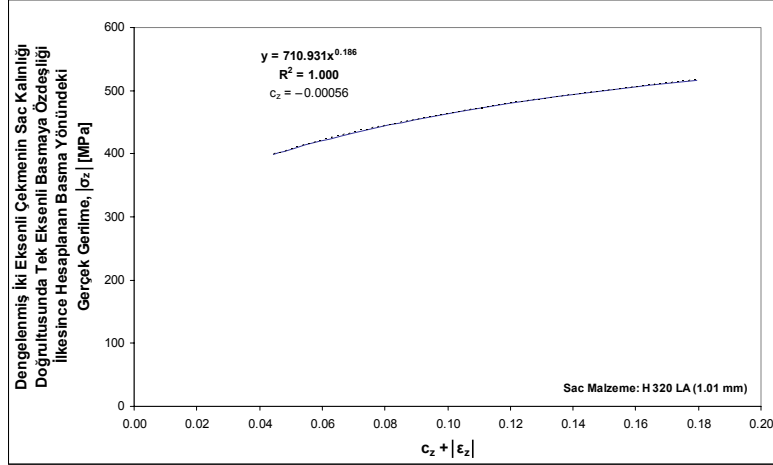
Şekil 13. Uygulanan viskoz basınç ile şişirme deneylerinden belirlenen basınç – şişme yüksekliği profillerinin ortalaması [5]

Tanımlanmış veriler ile program çalıştırıldığında, üniform deformasyon bölgesinde hesaplanan efektif gerilme ve efektif gerinim değerleri arasında Şekil 14’te görülen bağıntı elde edilmiştir [5].



Şekil 14. Viskoz basınç ile şişirme deneyinden FEM veri tabanına dayalı tekniğe göre Hill-1948 akma kriteri esas alınarak üniform deformasyon bölgesinde belirlenen efektif gerilme – efektif gerinim eğrisi [5]

Seçilen H 320 LA kalitesindeki çelik sac malzemenin ortalama normal anizotropisini ifade eden ortalama plastik gerinim oranı veya \bar{r} değeri 1.001 olarak hesaplanmıştır. Ortalama bir yaklaşıma göre söz konusu sacın normal izotropik özellikte olduğu değerlendirilebilir. Düzlemsel izotropiye dayalı yaklaşımı ifade eden \bar{r} değerinin ve Hill-1948 anizotropik akma kriterinin esas alındığı durumda, üç yöndeki tek eksenli çekme deneylerindeki üniform deformasyon bölgesi dahilinde ve çekme doğrultularında elde edilen gerçek gerilme ve gerçek gerinim verilerinin ortalamasından (8) ve (9) eşitlikleri ile hesaplanmış gerilme ve gerinimin mutlak değerlerine göre belirlenen akma eğrisi Şekil 15’te verilmiştir. Bu diyagramda görülen bağıntı, dengelenmiş iki eksenli çekmeye eşdeğer olan sac kalınlığı boyunca tek eksenli basma halinde, söz konusu doğrultudaki akma gerilmesi eğrisini temsil etmektedir.



Şekil 15. Üç yöndeki tek eksenli çekme deneylerinden Hill-1948 akma kriteri çerçevesinde ve ortalama plastik gerinim oranına dayanan düzlemsel izotropi yaklaşımına göre üniform deformasyon bölgesinde sac kalınlığı doğrultusunda öngörülen akma eğrisi

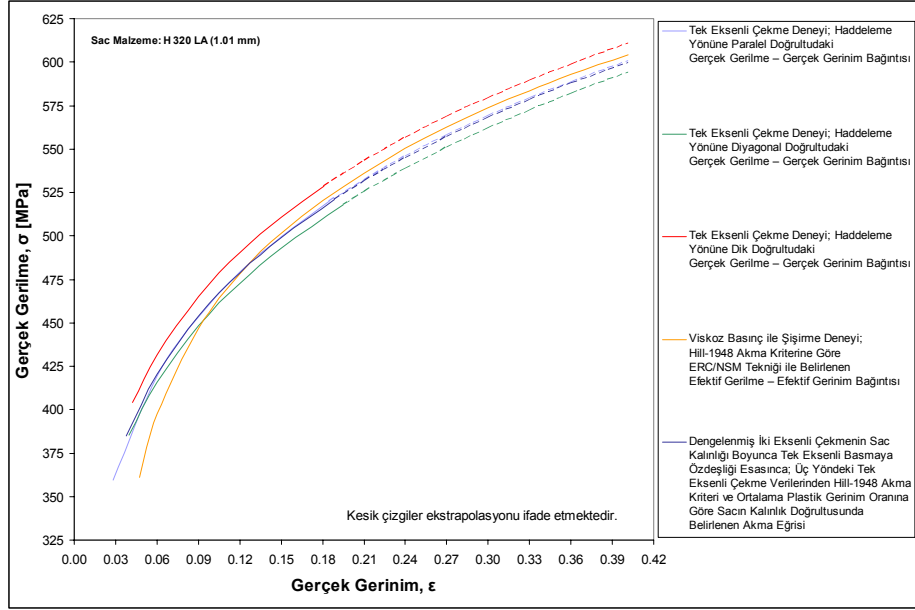
Seçilen H 320 LA kalitesindeki çelik sac malzemenin ortalama plastik gerinim oranı \bar{r} değeri 1.001 olarak hesaplandığından, ortalama bir yaklaşıma göre bu sac, normal izotropik özellikte kabul edilebilir. Ancak, söz konusu sacda düzlemsel anizotropi faktörü, $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2$ eşitliğine göre -0.308 değeri ile hesaplandığından, belli düzeyde düzlemsel anizotropinin mevcut olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada seçilerek incelenen 1.01 mm'lik nominal kalınlığa sahip H 320 LA kalitesindeki çelik saca uygulanan viskoz basınç ile şişirme deneyinden FEM veri tabanına dayalı tersine yöntem (ERC/NSM tekniği) ile ortaya konan efektif gerilme – efektif gerinim eğrisi, haddeleme yönüne 0° 'lik (paralel), 45° 'lik (diagonal) ve 90° 'lik (dik) doğrultularda uygulanan tek eksenli çekme deneylerinde çekme doğrultularında gözlenen gerçek gerilme – gerçek gerinim eğrileri ile ve dengelenmiş iki eksenli çekmenin sac kalınlığı yönündeki basmaya özdeşliğinden faydalanılarak, Hill-1948 akma kriteri çerçevesinde ve ortalama plastik gerinim oranının kullanıldığı düzlemsel izotropi yaklaşımına göre, üç yöndeki tek eksenli çekme verilerinden sac kalınlığı doğrultusunda hesaplanan gerçek gerilme – gerçek gerinim eğrisi ile Şekil 16'da karşılaştırılmıştır. Söz konusu diyagramda tek eksenli çekme deneylerine dayanan eğriler, üniform deformasyonun sona ererek boyunlanmanın başlamış olduğu dengesizlik anından sonra ekstrapole edilerek, şişirme deneyinde yüksek gerinimlerde elde edilen akma gerilmeleri ile karşılaştırma olanağı sağlanmıştır.

Yapılan karşılaştırmada, haddeleme yönüne paralel doğrultudaki tek eksenli çekme deneyinde çekme doğrultusunda elde edilen akma eğrisi ile üç yöndeki tek eksenli çekme deney verilerinden dengelenmiş iki eksenli çekme için ortalama yaklaşıma göre teorik olarak hesaplanan eğrinin artan gerinim ile birbirine çok yaklaştığı; düşük gerinim düzeylerinde ise, gerilme olarak aradaki farkın en fazla 2.9 MPa düzeyine eriştiği dikkat çekmektedir.

Tüm gerinim düzeyleri için en yüksek akma gerilmesi değeri, haddeleme yönüne 90° 'lik doğrultudaki tek eksenli çekme deneyinde elde edilmiş olup; yaklaşık 0.095 'lik gerçek gerinim düzeyinden önce en düşük akma gerilmesi VPB deneyinde; bu gerinim düzeyinden sonra ise haddeleme yönüne 45° 'lik doğrultuda uygulanan tek eksenli çekme deneyinde gözlenmiştir.



Şekil 16. Tek eksenli ve dengelenmiş iki eksenli çekme hallerinin oluştuğu farklı deneyler ve yöntemler ile üniform deformasyon bölgesinde elde edilen akma gerilmesi eğrileri

Şişirme deneylerinin tek eksenli çekme deneylerine göre avantajı, yüksek gerinim değerlerindeki akma gerilmesinin, tek eksenli çekme deneylerindeki eğrilere uygulandığı gibi bir ekstrapolasyon gerektirmeden saptanması olarak vurgulanmaktadır. Tek eksenli çekmede üniform deformasyonun biterek boyunlanmanın başladığı anda çekme doğrultusundaki gerçek gerinim, haddelenme yönüne 0° 'lik doğrultudaki deneyde 0.185 düzeyinde; 45° 'lik doğrultudaki deneyde 0.195 düzeyinde; 90° 'lik doğrultudaki deneyde ise 0.181 düzeyinde ölçülmüştür. Viskoz basınç altında uygulanmış olan sac şişirme deneylerinde ise, efektif gerinim olarak 0.402 değerine kadar ulaşılabilmektedir.

Ele alınarak incelenen H320 LA kalitesindeki çelik sac malzemeye üç yönde uygulanan tek eksenli çekme deneylerinde, çekme doğrultularındaki 0.20'lik gerçek gerinimden itibaren ekstrapole edilen akma eğrileri ile şişirme deneyinden ERC/NSM tekniği ve Hill-1948 akma kriterine göre hesaplanan efektif gerilme – efektif gerinim eğrisi karşılaştırıldığında, aynı gerinim düzeyleri için bu efektif bağıntının verdiği gerilmelere en yakın gerilme değerleri, haddelenme yönüne paralel doğrultudaki tek eksenli çekme deneyinde gözlenmiştir; iki eğrinin sunduğu akma gerilmesi arasındaki fark da en fazla 4.6 MPa düzeyinde belirlemiştir. Şişirme deneyinden saptanan eğri ile haddelenme yönüne göre 45° 'lik ve 90° 'lik doğrultulardaki tek eksenli çekme deney verilerine göre aynı gerinim düzeyinden itibaren ekstrapole edilmiş eğriler karşılaştırılırsa, eş gerinimlerdeki gerilme değerleri arasındaki farkın, 45° 'lik doğrultudaki eğri ele alındığında en fazla 11.6 MPa düzeyine; 90° 'lik doğrultudaki eğri ele alındığında ise en fazla 6.9 MPa düzeyine ulaştığı görülmüştür. Dengelenmiş iki eksenli çekme halinin sacın kalınlığı yönündeki basmaya özdeşliğinden faydalanılarak, Hill-1948 akma kriteri çerçevesinde ortalama plastik gerinim oranının ($\bar{\epsilon} \approx 1$) kullanıldığı düzlemsel izotropi yaklaşımına göre, üç yöndeki tek eksenli çekme verilerinden kalınlık doğrultusunda hesaplanan akma eğrisinin 0.20'lik gerinim düzeyinden itibaren ekstrapole edilmesi sonucunda, VPB deneyi ile belirlenmiş eğriden, eş gerinim düzeyleri için gerilme olarak en fazla 5.4 MPa düzeyinde sapma gözlenmiştir.

6. TARTIŞMA

Çalışmamızda ele alınarak incelenen yüksek dayanımlı düşük alaşım (HSLA) çelik sac malzeme üzerinde tek eksenli çekme deneyleri ile saptanmış olan verilerden 0.20'den daha yüksek gerinim düzeylerine ekstrapole edilmiş akma eğrileri içerisinde, şişirme deneyinden Hill-1948 anizotropik akma kriteri esas alınmak suretiyle, sonlu elemanlar veri tabanına dayalı yöntemden (ERC/NSM tekniğinden) faydalanarak belirlenen akma gerilmelerine en yakın değerlerin, en fazla %0.8'lik farklılaşma ile haddeleme yönüne paralel doğrultudaki tek eksenli çekme eğrisinde; en uzak değerlerin de en fazla %2.1'lik farklılaşma ile haddeleme yönüne 45⁰'lik doğrultudaki tek eksenli çekme deneyinde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu iki yöndeki tek eksenli çekme deneyinde ölçülen akma gerilmelerinin, şişirme deneyindekilere göre daha düşük değerler arz ettiği saptanmıştır. Haddeleme yönüne 90⁰'lik doğrultudaki tek eksenli çekme deneylerinde ortaya çıkan söz konusu farklılaşma ise, şişirme deneyinden elde edilen akma gerilmesi değerleri daha düşük olmak üzere, en fazla %1.3 düzeyine ulaştığı belirlenmiştir.

Gutscher vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı bir çelik (HSS) sac malzemenin tek eksenli çekme deneyinden ve viskoz basınç ile şişirme deneyinden elde edilen akma gerilmesi eğrileri karşılaştırılmış; iç çapı 105.7 mm olan bir kalıbın kullanılması suretiyle uygulanan şişirme deneyinden elde edilen akma gerilmesi değerleri daha yüksek olmak üzere, iki eğri arasındaki farkın en fazla %12 düzeyine ulaştığı bildirilmiştir. Çalışmamızda ele alınan sacda iki tip deneyden elde edilen akma eğrisinin birbirine daha yakın gözlenmesi, şişirme deneyinde düşük akma gerilmesi değerlerinin ortaya çıkması ile bağdaştırılmıştır. Söz konusu deneylerde düşük akma gerilmesinin ortaya çıkması ise, sac malzemenin kalitesi ile birlikte, Horta vd. (1970) tarafından yapılan gözlemlere ve yorumlara dayanarak, gerçekleştirdiğimiz çalışmada iç çapı daha büyük (275 mm) olan bir kalıbın kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şişirme deneyinden FEM veri tabanına dayalı yöntem (ERC/NSM tekniği) ile saptanan akma gerilmesi eğrisi, çalışmamızda efektif gerilme – efektif gerinim bağıntısı olarak ifade edilmişken; tek eksenli deneylere dayanan eğriler, bu deneylerin söz konusu olduğu eksenlerin doğrultusundaki gerçek gerilme – gerçek gerinim bağıntıları olarak sunulmuştur. Zira tek eksenli deneylerde efektif gerilme ve efektif gerinim değerlerinin seçilen Hill-1948 akma kriterine göre hesaplanabilmesi için, bu akma kriterini tanımlayan fonksiyonda, ilgili anizotropi katsayılarının belirlenip, deformasyon ile değişiminin de dikkate alınmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Ele alınan çelik sac malzeme üzerinde Erhuy (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada [5], söz konusu amaca da hizmet edecek şekilde, tek eksenli çekme deney sonuçlarından, birim malzeme hacmi için şekil değiştirme işine dayalı bir yaklaşım çerçevesinde, malzemeye uygulanan toplam deformasyonu temsil eden ve ortaya çıkan Lüders deformasyonunu da dikkate alan bir parametre tanımlanmış ve irdelenmiştir.

Teşekkür

Doktora tezi ile sonuçlandırılan çalışmalarımıza bir sanayi Ar-Ge projesi kapsamında destek vermiş olan TÜBİTAK/TEYDEB Başkanlığı'na, ERKALIP Kalıp Makine Metal Eşya Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasına ve katkılarından ötürü ERC/NSM merkezine teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Hosford, W.F., Caddell, R.M., “Metal Forming – Mechanics and Metallurgy”, Prentice-Hall, New Jersey, 1983.
- [2] Taylor, B., “Sheet Formability Testing”, Metals Handbook Vol. 8 – Mechanical Testing, Metals Park, Ohio, 1985.
- [3] Mielnik, E.M., “Metalworking Science and Engineering”, McGraw-Hill, New York, 1991.

- [4] Marciniak, Z., Duncan, J., "The Mechanics of Sheet Metal Forming", Edward Arnold, London, 1992.
- [5] Erhuy, C.G., "Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli Çelik Sac Üzerinde Geri Esnemenin Şekillendirmeye Etkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [6] Horta, R.M.S.B., Roberts, W.T., Wilson, D.V., "Effects of Plastic Anisotropy on the Biaxial Stretching Performance of Low-Carbon Steels", International Journal of Mechanical Sciences, 12, 231-243, 1970.
- [7] Ranta-Eskola, A.J., "Use of the Hydraulic Bulge Test in Biaxial Tensile Testing", International Journal of Mechanical Sciences, 21, 457-465, 1979.
- [8] Shang, H.M., Shim, V.P.W., "A Model Study of the Effect of the Size of the Die Shoulder in Hydroforming", Journal of Mechanical Working Technology, 10, 307-323, 1984.
- [9] Atkinson, M., "Accurate Determination of Biaxial Stress-Strain Relationships from Hydraulic Bulging Tests of Sheet Metals", International Journal of Mechanical Sciences, 39, 7, 761-769, 1997.
- [10] Gutscher, G., Wu, H.C., Ngaile, G., Altan, T., "Determination of Flow Stress for Sheet Metal Forming Using the Viscous Pressure Bulge (VPB) Test", Journal of Materials Processing Technology, 146, 1-7, 2004.
- [11] Dieter, G.E., "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill, Singapur, 1988.
- [12] Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press, Oxford, 1950.
- [13] Hill, R., "Constitutive Modelling of Orthotropic Plasticity in Sheet Metals", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 38, 3, 405-417, 1990.
- [14] Hosford, W.F., "Comments on Anisotropic Yield Criteria", International Journal of Mechanical Sciences, 27, 7-8, 423-427, 1985.
- [15] ASTM E 8M, "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]", Annual Book of ASTM Standards – Vol. 03.01 (Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography), American Society for Testing and Materials, 1989.
- [16] TS 138 EN 10002-1, "Metalik Malzemeler – Çekme Deneyi – Bölüm 1 – Ortam Sıcaklığında Deney Metodu", Türk Standartları Enstitüsü, 1996.