

# Sac Metal Şekillendirmesinde Plastik Kararsızlık ve Şekillendirme Limitlerinin Belirlenmesi

**Berkay Şanay**  
Mak. Yük. Müh.  
Aselsan A.Ş.  
Ankara

**Bilgin Kaftanoğlu**  
Prof. Dr.

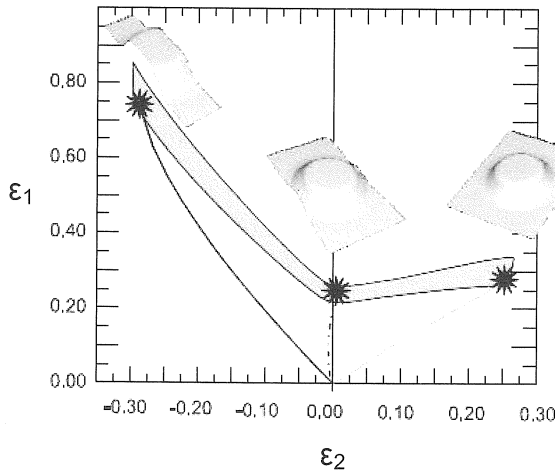
ATILIM Üniversitesi  
İmalat Mühendisliği Bölümü  
Ankara

*Bu çalışmada Nakazima testi ile elde edilen Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) bir sonlu elemanlar yazılımı ile simülasyonu yapılarak tahmin edilmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonunda sınır gerinmeleri ölçmek için gerinim yayılma kriteri kullanılmıştır. İki farklı anizotropik malzeme, AA2024-O ve SAE 1006, çalışma boyunca ŞSD'lerin değerlendirilmesinde ele alınmıştır ve her malzeme için 7 farklı numune geometrisi incelenmiştir. ŞSD'ler ayrıca, gerinim yayılma kriteri dışında teorik yaklaşımlar, Keeler, maksimum yük, Swift-Hill ve Storen-Rice kriteri, ile de tahmin edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda elde edilen ŞSD'ler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.*

*Anahtar Kelimeler: Şekillendirme Sınır Diyagramı, Sac Metal Şekillendirme, Nakazima Testi, Gerinim Yayılması, Sonlu Elemanlar Yöntemi*

## GİRİŞ

Sac metal şekillendirme işleminin bir bozukluk olmadan kontrol edilebilmesi için, güvenli, kritik ve kusurlu şekillendirme bölgelerini gösteren bir diyagram kullanılır. Bu diyagram Şekillendirme Sınır Diyagram'ı (ŞSD) olarak tanımlanır (Şekil 1). Sac metal endüstrisi ve çalışmalarında sıkça kullanılan bu yöntem, sac metallerin şekillendirilebilirliğinin belirlenmesinde en önemli araçlardan biri olarak kabul edilir. Her sac metalin kendi şekillendirilebilirliğini, gerinme limitlerini ve şekillendirme bölgelerini belirten bir ŞSD vardır.



Şekil 1. Şekillendirme sınır diyagramı

Yalnız kayma geriniminden eşit iki eksenli gerinmeye kadar değişen gerinme oranları için ŞSD çizilir. Gerinim oranı pozitif olduğunda, yani ikincil gerinme pozitif olduğunda, malzemede germe meydana gelmiş demektir. Negatif gerinim oranında ise, yani ikincil gerinme negatif olduğunda, çekmenin meydana geldiği söylenebilir. Bunlara ek olarak, diyagramda çizilen gerinmeler gerçek gerinmelerdir.

Sac metallerdeki kararsızlıkları analiz etmek ve ŞSD'leri oluşturmak için birçok deneysel ve teorik yaklaşım bulunmaktadır.

Farklı malzemelerin ŞSD'lerini elde edebilmek için literatürde çok sayıda deneysel yöntem sayılabilir. Tek eksenli çekme testi, hidrolik şişirme testi, zımbayla germe testi, Keeler testi, Hecker testi, Marciniak testi ve Nakazima testi bunlardan bazılarıdır [1]. Yukarıda belirtilen tüm bu testler içinden Nakazima testi en etkili ve en faydalı test olarak değerlendirilebilir. Bunun nedeni, test için kullanılan araçların basit olması, test edilecek numune geometrilerinin karmaşık olmaması ve ŞSD'nin tüm alanının belirlenebilir olmasıdır. Bugün Nakazima testi sac metallerin şekillendirme limitlerinin belirlenmesinde endüstride ve sac metal test laboratuvarlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Sac metal şekillendirilebilirliğinin değerlendirilmesi için yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalara ek olarak birçok araştırmacı, ŞSD'nin tahmin edilmesi üzerine teorik ve analitik çalışmalar yapmıştır. İlk olarak bazı teorik modeller geliştirilmiştir [2-3]. Sonradan, daha kesin teorik metotlara ihtiyaç duyulmuştur. Genellikle, teorik ve nümerik olarak ŞSD'nin belirlenmesi temel olarak

yerelleşme kriterine dayandırılmıştır. Maksimum yük prensibi [4-5], çatallanma analizi [6-8], sınır gerilim analizi [9-11] ve gerinim yayılmasını [12] temel alan yerelleşme kriterleri sakıncaları ve sınırlamalarıyla birlikte literatürde bulunmaktadır. Önerilen metodların uygunluğu birçok malzeme için incelenmiştir ve yeni yaklaşımlar teknolojinin ilerlemesiyle halen geliştirilmektedir.

Bu çalışmada, sac metallerin şekillendirilebilirliği, ticari bir sonlu elemanlar yöntemi yazılımı kullanılarak Nakazima testi simülasyonu ile tahmin edilmiştir. Kaftanoğlu'nun [12] gerinim yayılma kriteri, sonlu elemanlar çözümünden şekillendirme sınır gerinimlerini bulmada kullanılmıştır. Ayrıca, ŞSD'ler teorik olarak Swift-Hill [4-5], Storen-Rice [6-8], Keeler [2-3] ve maksimum yük [12] kriterleri ile de elde edilmiştir. Tüm analizlerde, Alüminyum (AA2024-O) ve Çelik (SAE 1006) malzemeler için malzemedeki anizotropi hesaba katılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve teorik modellerin ve sonlu elemanlar yöntemi çözümünün geçerliliği tartışılmıştır.

## TEORİK MODELLER

### Maksimum Yük Kriteri

Bu kriter, herhangi bir kesitteki net yükün zamanla maksimuma ulaştığındaki gerilim ve gerinme durumlarını, ölçüsel değişimleri de hesaba katarak inceler [12].

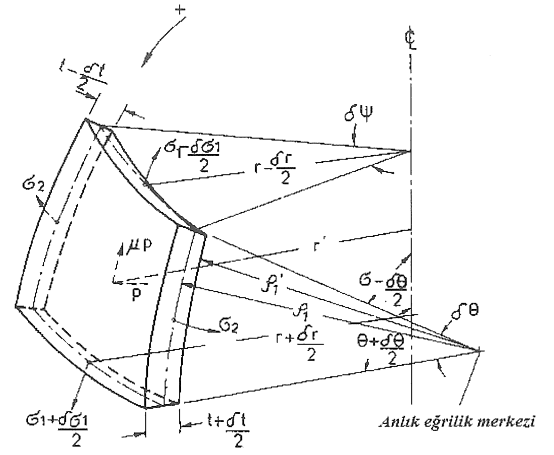
Gererek şekillendirme işleminde, Şekil 2(a)'da gösterildiği gibi büyük bir kabuk elemanı ele alınmıştır.

Orta yüzeye tanjant yönünde  $\partial\psi$  açısı olan bir dilim tarafından karşılanan yük:

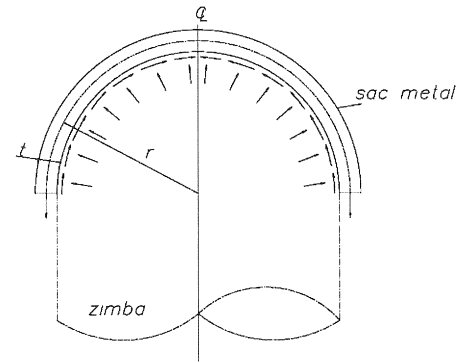
$$Q = 2\pi r \sigma_{1r} t \cdot \frac{\partial\psi}{2\pi} \quad (1)$$

(1) numaralı denklemde,  $Q$  yükü,  $r$  merkezden kabuk elemanın duvarına olan anlık yarıçapı,  $\sigma_{1r}$  dairesel gerilimi,  $t$  ise malzeme kalınlığını ifade etmektedir.

Maksimum yük kriterini kullanarak sınır gerinimlerini elde etmek için sonlu elemanlar çözümünden belirlenen boyun vermiş kritik elemanın yük-zaman grafiği çizilir ve Şekil 3'teki gibi tepe noktası olan bir eğri elde edilir. Matematiksel olarak eğrinin tepe noktası, (1) numaralı denklemin ilk türevinin sıfır olduğu noktayı temsil eder. Bu çalışmada (1) numaralı denklemdeki bilinmeyenler, sonlu elemanlar analizinden elde edilmiştir.

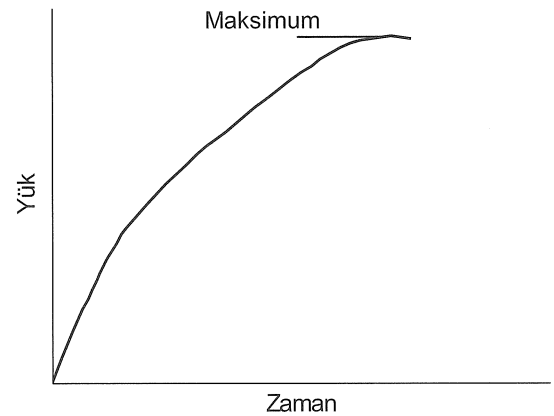


(a)



(b)

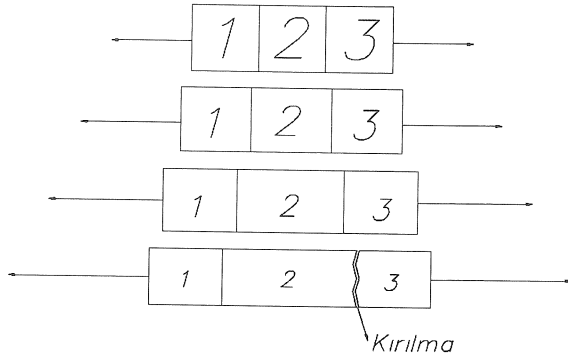
Şekil 2. Gererek şekillendirme işlemi, (a): kabuk eleman duvarının üzerindeki gerilimler [13], (b): yarıküresel zimba ve sac metal



Şekil 3. Yük-zaman grafiği

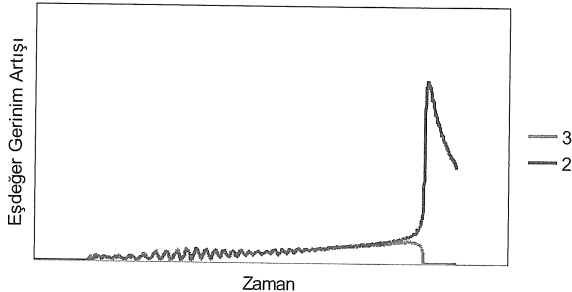
## Gerinim Yayılma Kararsızlığı

Kaftanoğlu'na [12] göre, plastik olarak deforme olan bir cisimdeki herhangi bir noktada, gerinim ve gerilme durumu aynı zamanda komşu noktadaki gerinim ve gerilmelere bağlıdır. Eğer malzeme bu noktalarda kararlı olmayı sürdürüyor ve kırılmıyorsa, ne kadar olursa olsun, bu noktalardaki herhangi bir gerinme artışı diğer noktalardaki gerilmelerin de artmasına neden olur. Ancak her noktanın birbirinden farklı belirli bir sınır gerinmesi vardır. Bu sınır gerinmesine ulaşıldıktan sonra bir noktadaki gerinme artışı komşu noktadaki gerinmenin daha fazla artmasına neden olmaz. Etkin biçimde gerinim yayılması durur ve bir noktadaki gerinme artış oranı sonsuza gider ve daha sonra burada kırılma görülür (Şekil 4).



Şekil 4. Gerinim yayılması

Gerinim yayılma kararsızlığı, sert bir zımbayla gerekerek şekillendirme işleminde parçanın herhangi bir tarafında görülebilir ve sürtünme ve gerinme geçmişinden etkilenir. Şekil 5'te görüldüğü gibi (2) ve (3) numaralı elemanların (Şekil 4) eşdeğer gerinme artışları bir noktaya kadar kademeli olarak artmaktadır. Ancak bir noktadan sonra boyun veren elemanın (2 numaralı eleman) gerinme artışı hala pozitif olup artmaya devam etmektedir; ancak komşu elemanın (3 numaralı eleman) eşdeğer gerinme artışı aniden sıfıra düşmektedir. Bu, elemanlar arasında kırılma meydana gelmesiyle sıfıra ulaşılan noktada daha fazla gerinme transferi gerçekleşmediği anlamına gelir.



Şekil 5. Eşdeğer gerinim artışı-zaman grafiği

Bu kriteri basit bir matematiksel formül ile ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle, elemanların gerinme geçmişleri sonlu elemanlar analizi simülasyonu ile izlenmiş ve sınır gerinmeleri tahmin edilmiştir.

## Swift-Hill Modeli

Swift [4], pozitif gerinme oranı artışı aralığındaki plastik gerinme kararsızlığı ile ilgili bir koşul geliştirmiştir. Plastik kararsızlık, yayılmış boyun verme halinde gerçekleşir ve ŞSD'nin sağ tarafı belirlenir. Bu teoriye göre sınır gerinmeler şu şekilde verilmiştir:

$$\varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right)^2} n \quad (2)$$

$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}\right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}\right)^2} n \quad (3)$$

(2) ve (3) numaralı denklemlerde  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$  asal gerilmeleri,  $f$  akma fonksiyonunu,  $n$  pekleşme üstelini,  $\varepsilon_1^*$  ve  $\varepsilon_2^*$  ise sınır gerinmelerini ifade etmektedir.

Hill [5], sac metallerdeki bölgesel boyun vermeyi gerilim ve gerinmelerdeki düzensizlikleri ele alarak incelemiş ve yerleşmiş kararsızlık analizini yayınlamıştır. Bölgesel boyun verme, yalnızca karakteristik yönler uzama olmayan yönde ise gerçekleşir. Bu nedenle, bölgesel kararsızlık sadece gerinme oranı artışının negatif olduğu durumda; yani ŞSD'nin sol tarafında meydana gelebilir.

Hill teorisine göre sınır gerinimleri şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\varepsilon_1^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2}} n \quad (4)$$

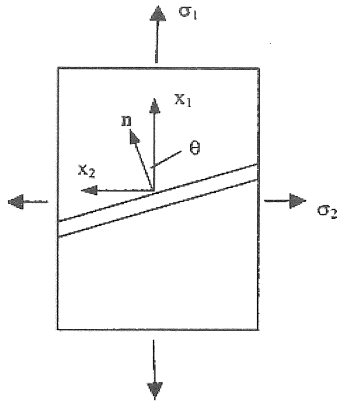
$$\varepsilon_2^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2}} n \quad (5)$$

## Storen-Rice Modeli

Storen ve Rice [6] plastik kararsızlık halini, bölgesel boyun vermenin baştan tekbiçimli ve homojen saclarda meydana geldiğini varsayarak

incelemiştir. Tüm ŞSD boyunca bölgesel boyun vermeyi, J2 plastisite deformasyon teorisini Hill'in klasik çatallanma analizi ile birleştirerek tahmin etmişlerdir.

Akma alanındaki noktasal tepe modelini sadeleştirerek ele almış ve aynı zamanda deformasyon teorisi denklemlerini, tüm aktif gerilim artışları için uygulamışlardır. Bölgesel boyun verme iki eksenli gerilmiş saclarda deneysel olarak gözlemlenir. Bulunan sonuçlar, plastik akım esnasında akma alanındaki tepe oluşumu hipotezini desteklemektedir. Düzenli akma alanını kullanan akma teorilerinde, boyun vermenin homojen saclar için iki eksenli germe işleminde oluşamayacağı da belirtilmiştir.



Şekil 6. Bölgesel boyun verme bandı

Chow ve Ji [8], Storen ve Rice [6] tarafından geliştirilen tepe teorisini daha basit hale getirmiş ve daha genelleştirilmiştir. Bölgesel boyun verme koşulunu ve şekillendirme sınır gerilmelerini Hill'in ikinci dereceli ve Hosford'un yüksek dereceli akma kriterini uygulayarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada Chow ve Ji'nin [8] formülasyonlarından yararlanılmıştır.

#### Keeler Modeli

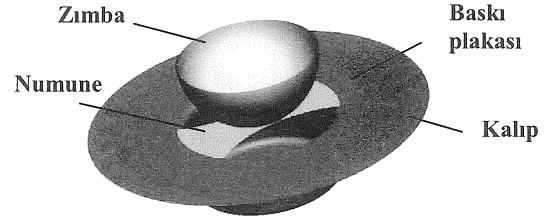
Bu modele göre [14], ŞSD düzlem gerinme durumundaki  $\epsilon_{10}$  noktasından geçen iki doğru tarafından oluşturulur. Bu doğruların eğimleri ŞSD'nın sol ve sağ tarafları için sırasıyla  $45^\circ$  ve  $20^\circ$ 'dir. Bu model ŞSD'leri, deneysel ve teorik yaklaşımları basitleştirerek daha kolay bir biçimde tahmin etmek amacıyla atölyelerde kullanılmaktadır.

$$\epsilon_{10}(\%) = (23.3 + 14.13 \cdot t) \frac{n}{0.21} \quad (6)$$

Yukarıdaki (6) numaralı eşitlikte,  $t$  sac metalin mm olarak kalınlığı,  $\epsilon_{10}$  mühendislik gerinmesi,  $n$  ise pekleşme üstelidir.

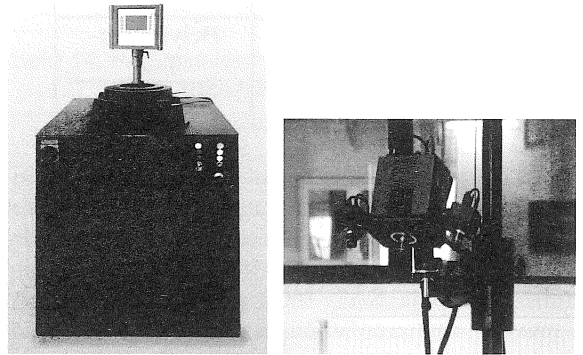
#### NAKAZIMA TESTİ

Nakazima testi sac metal malzemelerin ŞSD'lerini elde etmek için sıkça kullanılan deneysel metodlardan birisidir. Mümkün olduğu kadar geniş bir gerinme alanı elde etmek için birçok birincil ve ikincil gerinme çifti toplanır. Farklı gerinme kombinasyonları elde etmek amacıyla, birçok test numunesi değişen genişliklerde gerilir. Nakazima testi, numuneleri yarıküresel bir zimba ile dairesel bir kalıp üstüne çekme işlemiyle uygulanır (Şekil 7). Deneysel için, Şekil 8(a)'da gösterilen sac metal test tezgâhı kullanılır.



Şekil 7. Nakazima testi

Bugünün teknolojisi gerinmelerin belirlenmesinde daha kesin ve hızlı ölçüm araçları sunmaktadır. Şekil 8(b)'de görülen GOM/Aramis gibi optik bir ölçüm sistemi kullanarak numunelerin hazırlanması, şekillendirme işlemi ve deformasyonların belirlenmesi çok daha etkin bir biçimde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 8. (a): Zwick-Roell sac metal test makinesi, (b): GOM optik ölçüm sistemi

Nakazima testinde 7 adet test numunesi tek eksenli çekmeden eş iki eksenli çekme durumuna kadar gerilir. Test her numune için görülebilir bir boyun oluşana kadar devam ettirilir. Bu durumda, bozulan bölgenin yanındaki ana gerinmeler ölçülür. Her numune için ŞSD oluşturmak üzere bir veri noktası (birincil gerinme, ikincil gerinme) elde edilir. Bu prosedür 7 numune için de tekrarlandıktan sonra, ŞSD tamamen belirlenmiş olur.



## SONLU ELEMANLAR SİMULASYONU

Nakazima testi simülasyonlarında, numunelerdeki sınır gerinimleri bulmak için gerinim yayılması kriteri kullanılmıştır. Ölçü alınacak elemanlar şu şekilde seçilmiştir:

- Boyun verme görülen bölgenin komşu elemanları, ölçülecek eleman olarak rastgele seçilmiştir.
- Ölçü alınacak komşu elemanların eşdeğer gerinim artışları bölgesel boyun verme meydana geldikten sonra 0 olmalı, boyun veren elemanların eşdeğer gerinim artışları ise pozitif olmalıdır.

Tablo 1'de bu çalışmadaki sonlu elemanlar simülasyonlarında kullanılan parametreler gösterilmiştir.

Tablo 1. İşlem Parametreleri

Yarıküresel zımba yarıçapı:	50mm
Kalıp köşe yarıçapı:	5mm
Kalıp iç yarıçapı:	105mm
Zımba hızı:	4mm/s
Baskı plakası kuvveti:	100kN
Sürtünme katsayısı:	0.08 [13]
Birleşme noktası sayısı:	9
Eleman tipi:	Belytschko-Tsay
Sacın eleman boyutu:	2mm

İki farklı malzeme için sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde, Hollomon plastik akış kuralı seçilmiştir. Simülasyonlarda deneysel işlem parametreleri kullanılmıştır. Bundan sonraki bölümde SAE 1006 çeliği için örnek bir numunenin analizi anlatılmıştır.

### SAE 1006 Analizi

Simülasyonu yapılan SAE 1006 sacının kalınlığı 0.58mm'dir. SAE 1006'nın kimyasal kompozisyonu ve malzeme özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3 'te gösterilmiştir.

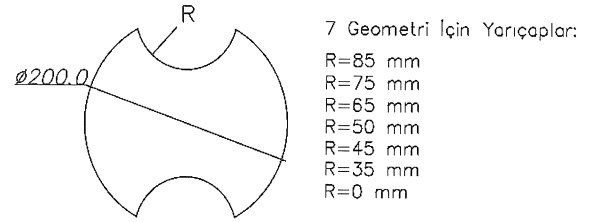
Tablo 2. SAE 1006 Kimyasal Kompozisyonu [16]

C%	Mn%	P%	S%	Fe%
<=0.08	<=0.45	<=0.25	<=0.15	kalan

Tablo 3. SAE 1006 Malzeme Özellikleri [15]

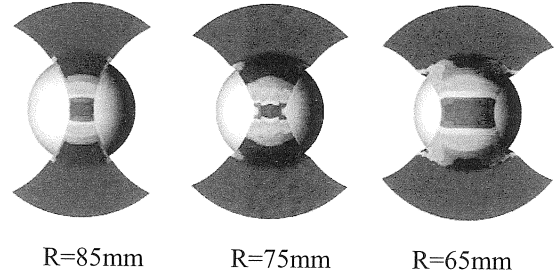
$R_0$	1.8
$R_{45}$	1.88
$R_{90}$	2.74
n	0.2609
E(GPa)	69.1
K(MPa)	580.86
UTS(MPa)	315.5
$\sigma_y$ (MPa)	189.7
v	0.3
$\rho$ (g/mm <sup>3</sup> )	7.8e-6

Toplamda, tek eksenli çekmeden iki eksenli çekme durumuna kadar olan 7 farklı numune test edilmiştir. Numunelerin geometrileri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. SAE 1006 çeliğinin Nakazima geometrisi

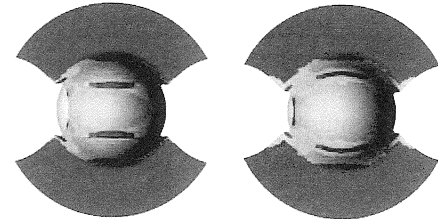
7 numunenin deforme olmuş durumları Şekil 10'da gösterilmiştir.



R=85mm

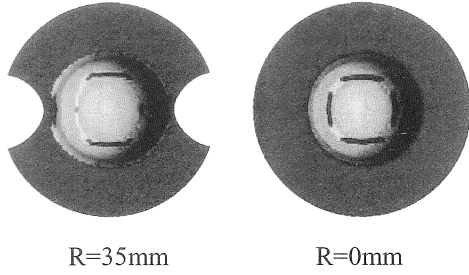
R=75mm

R=65mm



R=50mm

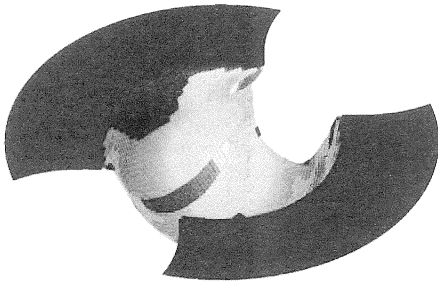
R=45mm



Şekil 10. SAE 1006 numunelerinin deforme olmuş durumları

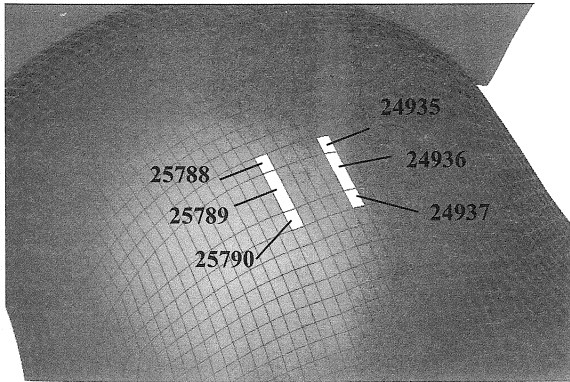
#### SAE 1006 Yarıçap=50mm Numunesi

Deforme olmuş R=50mm numunesinin geometrisi Şekil 11'de gösterilmiştir. Boyun veren elemanların, zımbanın yarıçapı boyunca oluştuğu görülmektedir.



Şekil 11. Deforme olmuş R=50mm numunesi

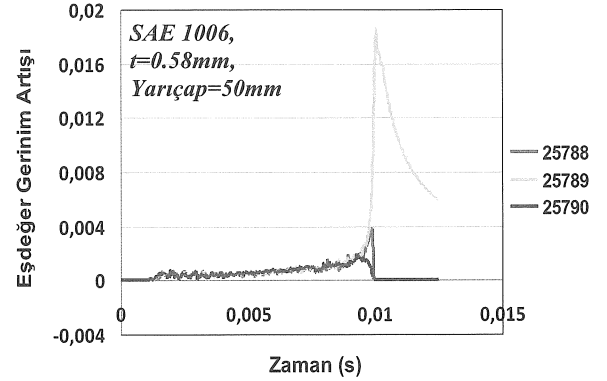
Numunede meydana gelen boyun vermiş bölge Şekil 12'de görülmektedir. Toplamda 6 tane referans eleman 2 grup halinde incelenmiştir. 1.grup 25788-25789-25790 numaralı elemanlar, 2.grup ise 24935-24936-24937 numaralı elemanlardır.



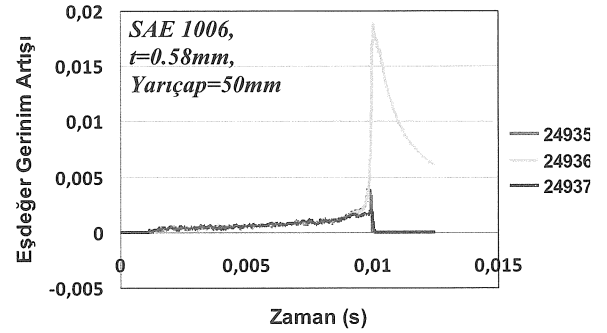
Şekil 12. R=50mm numunesi için referans elemanlar

Deformasyon devam ettikçe, tüm referans elemanlarının eşdeğer gerinim artışları izlenmiş ve kararsızlık anı bulunmuştur. Gerinim yayılması

prensibinde, gerinim artışının 0 olması kararsızlık anını temsil eder; çünkü komşu elemanlar arasında daha fazla gerinim transferi gerçekleşmemektedir. Şekil 13 ve 14'te iki grup referans elemanlarının eşdeğer gerinim artışlarının zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 13. R=50mm numunesinin 1.grup elemanları için eşdeğer gerinim artışı

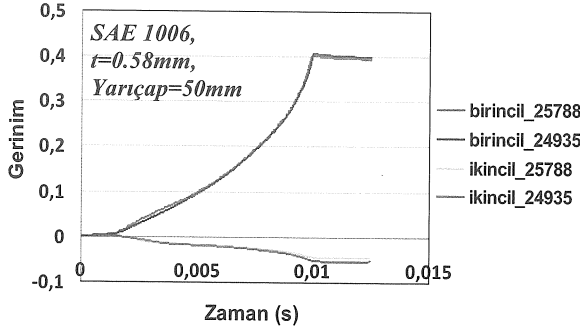


Şekil 14. R=50mm numunesinin 2.grup elemanları için eşdeğer gerinim artışı

Şekil 13'te de görüldüğü gibi, gerilme periyodunun başlangıcında, 1.gruptaki tüm elemanların eşdeğer gerinimleri zamanla yükselmektedir; çünkü tüm eşdeğer gerinim artışları pozitifdir. Ancak  $t=0.0093s$  anından sonra, 25790 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı azalmaya başlamıştır. 25788 numaralı elemanın da  $t=0.0098s$  anında gerinim artışının azaldığı görülmektedir.  $t=0.0099s$  anında belirtilen iki elemanın da eşdeğer gerinim artışları sıfıra gelmiştir. Oysaki 25789 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı hala pozitifdir. Eşdeğer gerinim artışının 0 olduğu anda, 25788 numaralı elemanın birincil ve ikincil gerinimleri kaydedilmiştir ve bu gerinimler ŞSD oluşturmak için R=50mm numunesinden elde edilen ilk sınır gerinim noktasıdır.

Şekil 14'te görüldüğü gibi, gerilme periyodunun başlangıcında, 2.gruptaki tüm elemanların eşdeğer gerinimleri zamanla yükselmektedir; çünkü tüm eşdeğer gerinim artışları pozitifdir. Ancak  $t=0.0099s$

anından sonra, 24935 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı azalmaya başlamıştır. 24937 numaralı elemanın da  $t=0.00995s$  anında gerinim artışının azaldığı görülmektedir.  $t=0.01s$  anında belirtilen iki elemanın da eşdeğer gerinim artışları sıfıra gelmiştir. Oysaki 24936 numaralı elemanın eşdeğer gerinim artışı hala pozitiftir. Eşdeğer gerinim artışının 0 olduğu anda, 24935 numaralı elemanın birincil ve ikincil gerinimleri kaydedilmiştir ve bu gerinimler ŞSD oluşturmak için  $R=50mm$  numunesinden elde edilen ikinci sınır gerinim noktasıdır.



Şekil 15.  $R=50mm$  numunesinin 1.grup referans elemanlarının birincil ve ikincil gerinimleri

Şekil 15'te SAE 1006 malzemesi için  $R=50mm$  numunesinin asal sınır gerinim geçmişleri gösterilmiştir. Burada, bölgesel boyun vermenin meydana gelmesinden sonra, boyun vermiş referans elemanların birincil ve ikincil gerinimlerinin artık yükselmediği görülmektedir. Böylece, elemanlar arasında gerinim transferinin artık gerçekleşmediği sonucuna varılmaktadır.

#### AA2024-O Analizi

Simülasyonu yapılan alüminyum AA2024-O sacının kalınlığı  $0.81mm$ 'dir. AA2024-O'nun kimyasal kompozisyonu ve malzeme özellikleri Tablo 4 ve Tablo 5 'te gösterilmiştir.

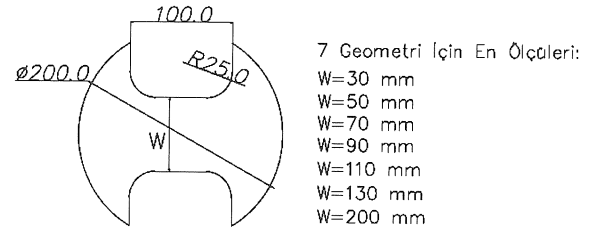
Tablo 4. AA2024-O Kimyasal Kompozisyonu [17]

Si%	0.5
Fe%	0.5
Cu%	3.8-4.9
Mn%	0.3-0.9
Mg%	1.2-1.8
Cr%	0.1
Zn%	0.25
Ti%	0.15
Belirtilmeyen diğer elementler %	0.15
Al%	kalan

Tablo 5. AA2024-O Malzeme Özellikleri [15]

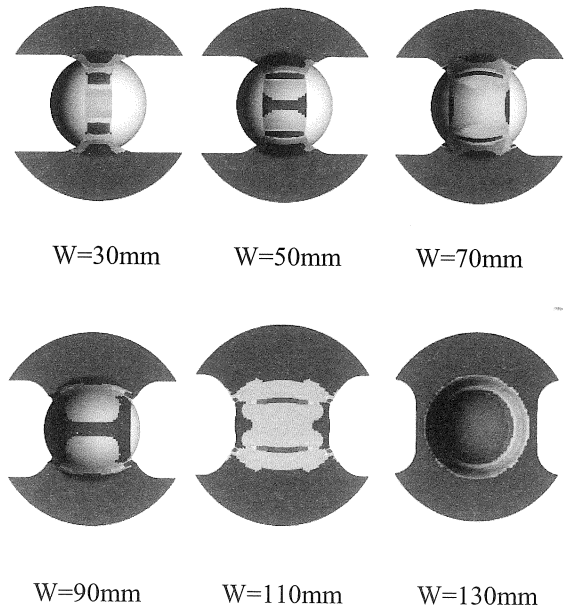
$R_0$	0.59
$R_{45}$	0.8
$R_{90}$	0.73
n	0.2528
E(GPa)	59.4
K(MPa)	344.37
UTS(MPa)	176.81
$\sigma_y$ (MPa)	69.59
$\nu$	0.33
$\rho$ (g/mm <sup>3</sup> )	2.73e-6

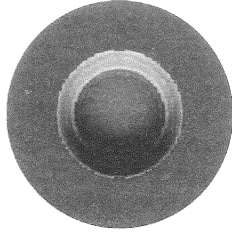
Tek eksenli çekmeden iki eksenli çekme durumuna kadar olan 7 farklı numune, SAE 1006 malzemesinde olduğu gibi test edilmiştir. Numunelerin geometrileri, sanayi kuruluşunun farklı standard kullanması nedeni ile çelik numunelerden farklı olarak Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Alüminyum Nakazima geometrisi

Toplamda 7 numunenin deforme olmuş durumları Şekil 17'de gösterilmiştir.

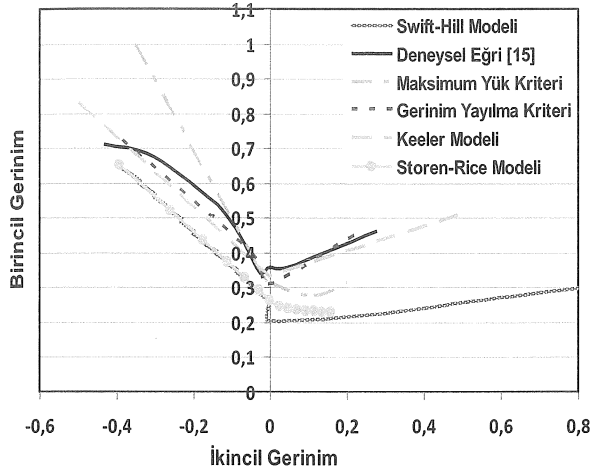




W=200mm

Şekil 17. AA2024-O numunelerinin deforme olmuş durumları

#### Tahmin Edilen Şekillendirme Sınır Diyagramları



Şekil 18. SAE 1006 için ŞSD'ler

Şekil 18'de SAE 1006 çeliği için tahmin edilen şekillendirme sınır eğrileri gösterilmiştir. Özellikle ŞSD'nin sağ tarafı için, sadeleştirilmiş Keeler modeli oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Her ne kadar, Keeler formülasyonu yalnızca malzeme kalınlığına ve pekleşme üsteline bağlı olsa da, elde edilen sonuç kayda değerdir.

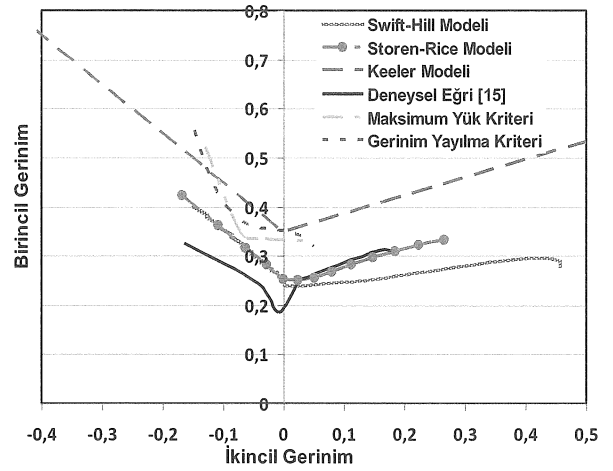
Hollomon'un sertleşme denkleminin kullanıldığı Swift-Hill modeli ise deneysel eğrinin altında sonuçlar vermiştir. Diyagramın sol tarafında deney sonucu ile benzeşme biraz daha fazla; ancak sağ tarafında çok az olduğu görülmüştür.

Storen-Rice modelinden de Swift-Hill modelinde olduğu gibi SAE 1006 için sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Genelde, ikincil gerinimin negatif olduğu bölgeden pozitif olduğu tarafa geçilirken şekillendirme eğrisinde yükselen bir davranış beklenir; ancak böyle bir davranış Storen-Rice modeli sonucunda görülemedi. Sonuç olarak, bu model de şekillendirme sınırlarını düşük göstermiştir.

Maksimum yük kriteri kullanılarak bulunan şekillendirme eğrisi düz gerinim durumunda benzer bir davranış göstermiştir. Tek eksenli çekme

durumundan düz gerinim durumuna geçişte birincil gerinimde sert bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni R=65mm numunesinde elde edilen birincil sınır geriniminin 0.999 olması ve R=50mm numunesi için 0.375 olmasıdır. Buna ek olarak R=75mm ve R=85mm numuneleri için çok yüksek sınır gerinimleri elde edildiğinden eğriye dâhil edilememiştir.

Gerinim yayılması kriteri ile tahmin edilen şekillendirme sınır eğrisinin, tüm eğriler arasındaki en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Şekil 18'de görüldüğü gibi ŞSD'nin sağ tarafı deneysel sonuçla neredeyse çakışık bulunmuştur. ŞSD'nin sol tarafında ise, düzlem gerinim durumundan tek eksenli gerilmeye doğru ilerlerken, tahmin edilen eğri deneysel eğriye oldukça yakın bir davranış göstermektedir. Sonuç olarak, gerinim yayılma kriteri sonlu elemanlar analizi ile beraber uygulanırsa, SAE 1006 çeliğine benzer özellikteki malzemeler için çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 19. AA2024-O için ŞSD'ler

AA2024-O malzemesi için tahmin edilen eğriler Şekil 19'da incelendiğinde tüm tahmin metodlarının şekillendirme limitlerinin üzerinde sonuçlar verdiği görülmüştür.

Keeler modeli, birincil gerinim değerlerini neredeyse deneysel sonucun 2 katı olarak tahmin etmiştir ve güvenilir bir tahmin elde edilememiştir.

Hollomon'un sertleşme denkleminin kullanıldığı Swift-Hill modeli de AA2024-O için Keeler modelinden daha iyi; ancak şekillendirme limitlerinin üzerinde bir tahmin yapmıştır. Grafiğin sağ tarafında birincil gerinim 0.23 iken Swift-Hill eğrisi ve deneysel eğrisinin kesiştiği görülmektedir. Swift-Hill modeli, diyagramın sol tarafında şekillendirme limitlerinin altında; sağ tarafında ise üzerinde bir tahmin yapmıştır.

Storen-Rice modelinin Swift-Hill modeline yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. diyagramın sol tarafında eğri, Swift-Hill eğrisiyle çakışık; sağ

tarafında ise deneysel sonuca oldukça yakındır. AA2024-O için Storen-Rice modeli SAE 1006 çeliğinden daha iyi sonuç vermiştir.

Deneysel sonuç ile karşılaştırıldığında maksimum yük kriteri de diğer kriterler gibi şekillendirme limitlerinin üzerinde bir sonuç vermiştir ve daha önceden belirtildiği gibi bazı numuneler için sınır gerinmeler bulunamamıştır.

AA2024-O malzemesi için, gerinim yayılma kriteri kullanılarak yapılan tahminde de diğer metotlar gibi tatmin edici bir sonuç bulunamamıştır. Maksimum yük kriterinde olduğu gibi yalnızca 4 numune için sınır gerinmeler elde edilebilmiştir. Şekil 19'da gösterildiği gibi diyagramın hem sol ve hem de sağ tarafında şekillendirme limitleri deney sonucunun üzerinde tahmin edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerinim yayılması kriteri kullanılarak AA2024-O malzemesine benzer özellikteki malzemeler için sağlıklı sonuçlar elde edilemeyebilir.

## SONUÇ

Bu çalışmada sac metallerin şekillendirilebilirliği, özellikle gerilme nedeniyle meydana gelen bozulmalar, teorik ve nümerik metotlarla tahmin edilmiştir. ŞSD'lerin belirlenmesi için Nakazima testi yönteminin, gerinim yayılma kriterinin sonlu elemanlar yöntemine uygulanması ile simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca, Swift-Hill, Storen-Rice, Keeler, ve maksimum yük kriterleri de SAE 1006 çeliğinin ve AA2024-O alüminyumunun şekillendirme sınır eğrilerinin bulunmasında kullanılmıştır. Tahmin edilen ŞSD'leri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

SAE 1006 çeliği için farklı geometrideki 7 numune, sonlu elemanlar yöntemi ile başarıyla analiz edilmiş ve boyun verme bölgeleri açık bir şekilde görülmüştür. Şu sonuçlar çıkarılabilir:

- ŞSD'yi tahmin etmek için en uygun kriter, Şekil 18'de görüldüğü gibi sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerinim yayılma kriteridir.
- Keeler modeli de deneysel sonuçla uyum içinde olduğu görülmüştür.
- SAE 1006 için Swift-Hill, Storen-Rice ve maksimum yük kriteri kullanılarak tahmin edilen ŞSD'lerin şekillendirme sınırlarının altında sonuçlar verdiği bulunmuştur. Bu metotlar, SAE 1006 benzeri malzemeler için güvenilir sonuçlar vermeyebilirler.

AA2024-O alüminyumunu için 7 farklı numune arasından plastik kararsızlık ya da boyun verme, en ölçüsü 90mm, 130mm ve 200mm olan numuneler için elde edilememiştir. Bu nedenle, ŞSD'nin tüm alanı, gerinim yayılması ve maksimum yük kriterleri kullanılarak elde edilememiştir. Aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Şekil 19'da da görülebileceği gibi hiçbir yöntem şekillendirme sınırlarını tamamen belirleyememiştir.
- Swift-Hill ve Storen-Rice modelleri özellikle ŞSD'nin sağ tarafı için yakın sonuçlar vermiştir.
- Keeler modeli, maksimum yük kriteri ve gerinim yayılma kriteri AA2024-O için şekillendirme sınır limitlerinin üzerinde sonuçlar vermiştir.
- Daha önce de vurgulandığı üzere, bazı numuneler için bölgesel boyun verme gözlenmemiştir. Bunun nedeni, AA2024-O malzemesinin malzeme özellikleri ( $n$ ,  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ ), sonlu eleman boyutu ya da sürtünme koşulları olabilir.

Son olarak, çalışma boyunca şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Şekillendirme sınırlarını teorik olarak tahmin etmek, incelenen malzemenin cinsine oldukça bağlıdır. Ayrıca, bu teorik modeller birçok varsayımı içerdiğinden, dikkatli kullanılmalıdır.
- Gerinim yayılma kriteri, çok daha farklı malzemelerin sınır gerinmelerini bulmada kullanılıp geçerliliği deneysel sonuçlarla karşılaştırılmalıdır.
- Bugünün gelişmiş sonlu elemanlar analiz yöntemlerini şekillendirme sınırlarının tahmininde kullanmak, deneysel yöntemlerde harcanan malzeme ve zaman kayıplarını büyük oranda azaltabilir. Kullanılan sürtünme katsayıları yaklaşık olup deneylerden veya simülasyonlardan bulunmaktadır. Bu nedenle teori ve uygulama arasında küçük farklar olabilir.
- Herhangi bir imalat yöntemi için, uygun malzeme ve işlem parametreleri seçimi başarılı sonuçlar almak için çok önemlidir.

## PREDICTION OF PLASTIC INSTABILITY AND FORMING LIMITS IN SHEET METAL FORMING

In this study, FLD's are predicted by simulating Nakazima test using a commercial finite element software. Strain propagation criterion is used to evaluate the limit strains from the finite element simulations. Two different anisotropic materials, AA2024-O and SAE 1006, are considered throughout the study and for each material, 7 different specimen geometries are analyzed. Furthermore, FLD's are predicted by theoretical approaches namely; Keeler's model, maximum load criteria, Swift-Hill model and Storen-Rice model. At the end of the study, the

obtained FLD's are compared with the experimental results.

**Keywords:** Forming Limit Diagram, Sheet Metal Forming, Nakazima Test, Strain Propagation, Finite Element Method

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, ATILIM Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne, deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve araştırma görevlisi Gökhan Çelik'in sağladığı destek için teşekkür ederler.

## KAYNAKÇA

1. Banabic, D.; Bunge, H.-J; Pöhlndt, K.; Tekkaya, A. E.: Formability of Metallic Materials, Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/ New York/ Tokyo, 2000.
2. Keeler, S., P., and Backhofen W., A., Trans.ASM, 1963, vol.56, pp.25-48.
3. Keeler, S., P., Sheet Met. Ind., 1965, vol.42, pp. 683-91.
4. Swift, H., W., "Plastic Instability Under Plane Stress", J. Mech. Phys. Solids, 1 1952, pp. 1-18.
5. Hill, R., J. Mech. Phys. Solids, 1952, vol.1, pp. 19-30.
6. Storen, S., Rice, J., R., "Localized Necking in Thin Sheets", J. Mech. Phys. Solids, 1975, vol.23, pp.421-41.
7. Zhu, X., Weinmann, K., and Chandra, A., "A Unified Bifurcation Analysis of Sheet Metal Forming Limits", ASME J. Eng. Mater. Technol., 2001, 123, pp. 329-333.
8. Chow, C., L., Jie, M., Hu, S., J., "Forming Limit Analysis of Sheet Metals Based on a Generalized Deformation Theory", Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME 2003; 125; 260-5. Johnson W., Mellor P.B., "Engineering Plasticity", Ellis Horwood Ltd., 1983.
9. Sing, W., M., Rao, K., P., Swaminathan, K., "Influence of Limit Stress States and Yield Criteria on the Prediction of Forming Limit Strains in Sheet Metals", Metallurgical and Materials Transactions 1997, 28A (11), 2323-33.
10. Sing, W., M., Rao, K., P., "Role of Strain-Hardening Laws in the Predictions of Forming Limit Curves", Journal of Materials Processing Technology 63, 1997, 105-110.
11. Sing, W., M., Rao, K., P., "Study of Sheet Metal Failure Mechanism Based on Stress-State Conditions", Journal of Materials Processing Technology 67, 1997, 201-206.
12. Kaftanoğlu, B., Alexander, J.M., "On Quasistatic Axisymmetrical Stretch Forming", International Journal of Mechanical Sciences, 12, 1970, 1065-1080.
13. Kaftanoğlu, B., "Determination of Coefficient of Friction Under Conditions of Deep-Drawing and Stretch Forming", Wear, 25, 1973, 177-188.
14. Keeler, S., P., Brazier, W., G., "Relationship Between Laboratory Material Characterization and Press-Shop Formability", Micro Alloying, 1975, 21-32.
15. Metal Forming Center of Excellence-Atılım University, Ankara, TURKEY.
16. "ASM Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", ASM International Handbook Committee, USA, 1992.
17. "ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys", ASM International Handbook Committee, USA, 1993.