

# Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı

Osman ANKET\*, Tuncer KORUVATAN, İrfan AY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kr.Hvcl.Okl.K.lığı, Ankara, Türkiye,

<sup>2</sup>Kara Harp Okulu Dekanlığı, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>B.Ü.M.M.F., Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

Geliş/Received : 15.10.2011, Kabul/Accepted : 25.05.2011

## ÖZET

Akma mukavemeti, çekme dayanımı veya mikroyapı gibi mekanik ve kimyasal özellikler tek başlarına sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini ifade etmeye yetmemektedir. Bu yüzden, üretim proseslerinde sac malzemeleri etkin olarak kullanabilmek için, şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlendiği yeni tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda sac malzemelerin şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlendiği yeni çalışmalar arasında “Şekillendirme Sınır Diyagramı” tekniği dikkat çekmektedir. Şekillendirme Sınır Diyagramı, sac malzemelerin derin çekme ve gererek şekillendirme şartlarında göstermiş olduğu davranışların gösterildiği bir diyagramdır. Şekillendirme Sınır Diyagramı ile, iki boyutta, çekme ve basma testleri uygulanan sac malzemelerin davranışları analiz edilebilir. Bu çalışmada, Şekillendirme Sınır Diyagramlarının teorisi, çizimi, okunması ve yorumlanması incelenmiş ve literatürdeki şekillendirme süreçleri adım adım irdelenerek bir Şekillendirme Sınır Diyagramı elde edilmiştir. Şekillendirme Sınır Diyagramlarının doğru olarak okunması ve yorumlanması, sac malzemelerin daha verimli kullanılmasında yol gösterici olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Şekillendirme Sınır Diyagramı, Derin Çekme, Plastik Şekil Değiştirme

## The Use of Forming Limit Diagrams in Forming Sheet Metal Materials

### ABSTRACT

Mechanical and chemical features of sheet metal materials such as yield strength, tensile strength, or microstructure are not alone sufficient to account for their formability. Therefore new techniques, by which the formability limits are determined, are needed to use the sheet metal materials effectively in production processes. In recent years, among the new studies in which the sheet metal material formability limits are determined, Forming Limit Diagram technique has been of concern. Forming Limit Diagram is a diagram where the behaviours of sheet metal materials -under the conditions of deep drawing and stretch forming- are shown. With the Forming Limit Diagram, the behaviours of sheet metal materials which are subjected to two-dimensional tensile and compression tests can be analyzed. In this study, the theory, drawing, reading, and interpretation of Forming Limit Diagrams were analyzed and a Forming Limit Diagram was generated by examining step-by-step the forming procedures in the literature. The correct reading and interpretation of Forming Limit Diagrams will be a guide to a more efficient use of sheet metal materials.

**Key words :** Forming Limit Diagram , Deep drawing , Plastic deformation

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sac malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı otomotiv ve havacılık alanında yoğunluğu düşük, yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direncine sahip sac malzemelere ve bu malzemelere ait şekillendirme verileri olan kırılma, kırışma ve şekillendirme sınır değerlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [1,2].

Kırışma, boğumlanma ve kırılma, sac malzemelerin şekillendirilmesinde en sık karşılaşılan problem tipleridir. Araştırmacılar ve imalatçılar sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında bu tür problemlerden kaçınmayı amaçlamaktadırlar. Bundan dolayı sac malzemelerin şekillendirilebilirliği son elli yıldan beri geniş ölçüde araştırılmaktadır. Şekillendirilebilirlik verileri, sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında ortaya çı-

kan problemleri çözmek için hem imalatçılar hem de kullanıcılar açısından önemlidir. Sac malzeme seçme işlemi ile uğraşan üretim mühendislerinin, üretimde doğru malzemeyi tercih edebilmelerinde malzemelerin şekillendirilebilirlik ve plastik şekil değiştirme özellikleri yol gösterici olmaktadır [3].

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biriside **Şekillendirme Sınır Diyagramı (SSD)**'dir. SSD, malzemelerin farklı şartlarda uzamalarını değerlendirmek için çok önemli bir araçtır. Bu kavram ilk olarak 1960'larda Keeler ve Goodwin tarafından ileri sürülmüştür [4]. Hecker [2,5] ise SSD'yi yorumlayabilmek için basitleştirilmiş teknikler geliştirmiştir.

Son yıllarda sac malzemelerin şekillendirilebilirliği çalışmalarında deneysel olarak değerlendirme yapabilmek ve teorik olarak tahmin yürütebilmek için birçok

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: osmananket@yahoo.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.1, 39-47

teknik geliştirilmiş ve bu konuda yeni bir teknik olan ŞSD'nın geniş ölçüde kullanılmasına başlanmıştır. Narayanasamy ve Narayanan [2] farklı kalınlıklarda, kaplanmış ve kaplanmamış, dokular arası çatlakları giderilmiş, düşük akma dayanımı ve yüksek anizotropi değerleri ile ekstra derin çekilebilirlik özelliğine sahip, düşük karbon içeren farklı kalınlıklarda çeliklerin şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırılma sınır diyagramlarını ortaya koymuşlardır. Derin çekmeye uygun düşük karbon içeren çeliklerin şekillendirilebilirlik verileri ile şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırılma diyagramları arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir.

Narayanasamy ve Narayanan [4] 2000 kN kapasiteli çift etkili hidrolik preste konik kalıp ve zimba şartlarını kullanarak, düşük karbon içeren 0.85 mm kalınlığındaki sac malzemenin ŞSD'nı çıkartmışlardır.

Hanggi [6] bir sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin çıkartılabilmesi için; derin çekme şartlarında çalışmaları temel alan Nakajima testinin bilinen en iyi metod olduğunu ileri sürmüş ve Nakajima testinin yapılışını ortaya koymuştur.

Malzeme üreticileri, malzemelerin şekil verme sınır eğrilerini Nakajima ya da Marciniak testlerine göre tespit etmektedirler. Böylece, müşterilerin doğru malzeme seçimlerine yardımcı olabilecek malzeme kaliteleri tanımlanabilecektir [6]. Nakajima testi, sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin belirlenmesinde sık kullanılan bir metottur. Nakajima testi, farklı geometrilerdeki malzemelerin; kırılma meydana gelinceye kadar küresel zimba kullanılarak şekil değiştirmesi prensibine dayanmaktadır. Farklı genişlikteki numunelerin kullanımı ile farklı çekme derinlikleri ve farklı şekillendirme şartları sac malzeme yüzeyinde meydana getirilir. Bu numuneler büyük uzama şartlarında sac malzemenin şekil değiştirmesine izin veren numunelerdir [7]. Bu uygulamanın özelliği malzemeye bağlı olarak en fazla şekil değişimi gerçekleştirmektedir.

Sene ve arkadaşları, çok ince sacların şekillendirilebilirliğini ortaya koymak için 16 mm çapında daire şeklinde parçalar kullanarak ŞSD'nın elde edilmesi üzerine çalışmışlardır. Marciniak testi için, 0,1 mm kalınlığında, 24 mm tam daireden 6 mm genişliğe kadar değişen yedi farklı numune kullanmışlardır. Bu numunelerdeki şekil değişimlerinin ölçümlerinden ŞSD elde edilmiştir [8].

Delijik ve Misoviç, otomobil gövde saclarında kullanılan alüminyum alaşımlarının çekilebilirlik özelliklerinde yüzey pürüzlülüğünün etkileri üzerine çalışmışlardır. Tek eksenli çekme testi, Erichsen Testi vb. gibi testler yardımıyla ŞSD'nın elde edilmesi ve yüzey pürüzlülüğünün bu diyagrama etkileri üzerinde durmuşlardır. 3 mm çapındaki dairelerin ölçümleri ile ŞSD elde edilmiştir [9].

ŞSD'nın gelişiminde sayısal tahminine yönelik çalışmalarda da yapılmıştır. İlk çalışma Marciniak ve Kuezyński tarafından yapılmış ve M-K (Marciniak ve Kuezyński) teorisi olarak literatüre geçmiştir [10].

Sac şekillendirme işlemlerinde ŞSD'nı elde etmek için sayısal simülasyonlara yönelik oldukça fazla sayıda çalışma mevcuttur. Jurko ve arkadaşları, deneysel olarak elde edilen ŞSD ile sayısal simülasyonlardan elde edilen ŞSD'nı mukayese etmişlerdir. Program, Hill ve Barlat'ın akma kriterlerinden ve Swift ve Voce'nin şekil değiştirme pekleşme kriterlerinden farklı olarak Hutchinson-Neale akma modeline dayanmıştır. Program başarılı sonuçlar elde etmiştir [11].

ŞSD ile aynı diyagram üzerinde malzemenin farklı uzama şartlarını değerlendirmek ve özel bir uzama kombinasyonu için kırılma sınırlarını kararlaştırabilmek mümkündür. Sayısal simülasyonlar kullanılarak malzemelerin şekillendirilebilirlik sınırlarını belirlemek, zaman ve maliyeti önemli ölçüde azaltmıştır [12].

Şekillendirilebilirlik ve ŞSD birçok faktöre ve malzeme özelliğine bağlı olduğu için farklı zamanlarda değişik kişiler tarafından farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [13-17].

Sac malzemeleri şekillendirme işlemi genellikle karmaşık bir işlemdir. Bir defa da bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme işlemleri parçaya birlikte uygulanır. Bu nedenle malzemenin çekme deneyi yardımı ile bulunan akma mukevemeti, çekme dayanımı, şekil değiştirme sertleşmesi üssü "n", anizotropi "r" gibi mekanik özellikleri tek başlarına şekillendirme özelliklerini ifade etmeye yetmezler. Sac malzemelerin özelliklerini daha iyi tanımlamak amacıyla, gererek şekillendirme işlemine benzediği için **Erichsen veya Olsen deneyi**, derin çekme işlemine benzediği için ise **Swift deneyi** son yıllarda büyük ölçüde kullanılmaktadır. Erichsen veya Olsen deneyinde **tümsek yüksekliği**, Swift deneyinde ise **derin çekme oranı** ölçü olarak kullanılır [18].

Sac malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler, belirli koşullar altında gerçekleştirilmektedir. Laboratuvar koşulları endüstriyel koşullardan farklıdır. Dolayısıyla bu deneyler, malzemenin deney şartları altındaki davranışı hakkında bilgi verir. Başka bir ifade ile, söz konusu deneyler malzeme sınıflandırma ve seçme konusunda yararlı olmaktadır. Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için ise plastik şekil değiştirme analizlerine ihtiyaç vardır.

## 2. ŞSD ELDESİNİN GENEL TANITIMI

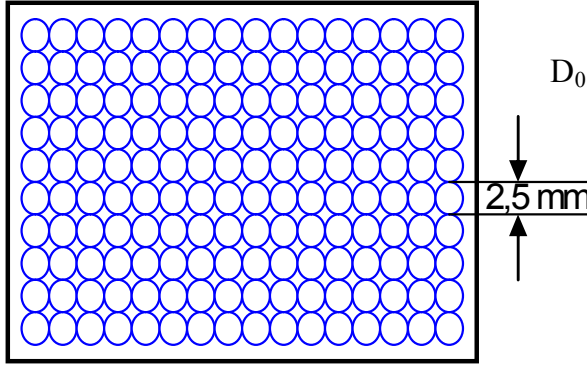
### (A GENERAL INTRODUCTION TO FLD)

Bu bölümde sac malzemelerin ŞSD'nın elde edilebilmesi için gerçekleştirilmesi gereken aşamaların teorisi üzerinde durulmuştur.

#### 2.1. ŞSD'nın Çizimi için Sac Malzemenin İşaretlenmesi ve Şekil Değiştirme İşleminin Uygulanması (Sheet Metal Material Marking for Drawing FLD and the Application of Forming Process)

Sac malzemelerin plastik şekil değiştirme analizlerini yapabilmek için öncelikle sac malzemenin yüzeyine Şekil 1'de görüldüğü gibi lazer tekniği elektro-

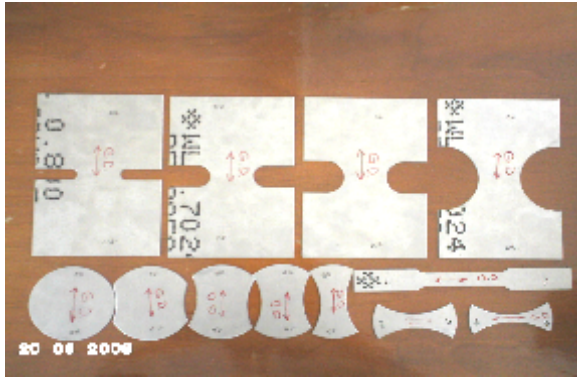
kimyasal teknik vb. yollarla dairelerden oluşan bir ağ çizilir.



Şekil 1. Sac Yüzeyine Çizilen Ağ [19].

Daha sonra deney numunesinin boyutları, yağlama yöntemi ve yağlayıcı türü değiştirilerek; çekme, Erichsen, Swift vb. deneyler yardımıyla plastik şekil değiştirme işlemi için farklı yük durumları oluşturulur. Bu yük koşulları altında, sac malzemede boğumlaşma veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme uygulanır.

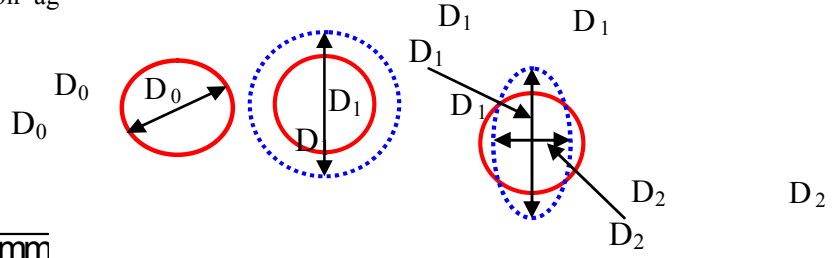
Şekil 2'deki Çekme Deneyi Numunesi, Erichsen Deney Numunesi ve Çentikli Çekme Deneyi Numunesi gibi numunelerin şekil değiştirmelerinin ölçülmesinden elde edilen büyük ve küçük uzama miktarları diyagram üzerine yerleştirilerek ŞSD elde edilir. Şekil 2'deki deney numuneleri, ŞSD elde etmek için kesilmiş örnek deney numuneleridir.



Şekil 2. Çentikli Çekme Deneyi Numunesi, Erichsen Deney Numunesi ve Çekme Deneyi Numunesi, [20].

## 2.2. Sac Malzemedeki Şekil Değişimlerinin Ölçülmesi ve Verilerin ŞSD'na Dönüştürülmesi (The Measurement of Sheet Metal Material Formings and the Conversion of the Data to FLD)

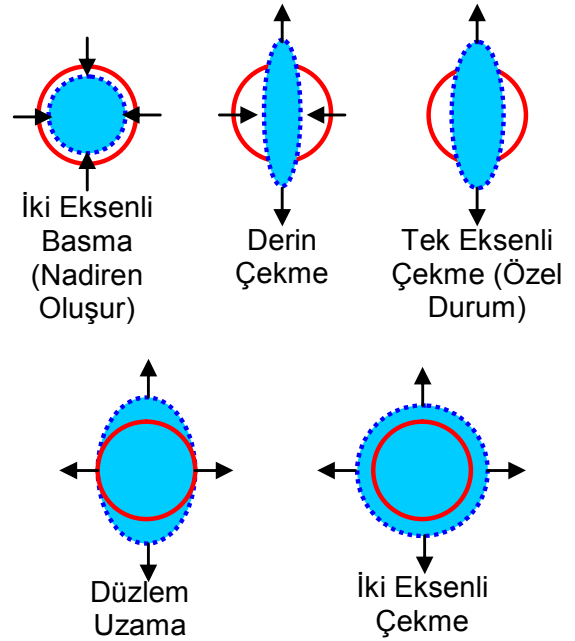
Numunelerin şekil değiştirmesi sonucunda, Şekil 3'de görüldüğü gibi, başlangıçta sac malzemenin yüzeyine işaretlenmiş olan dairenin çapında " $D_0$ ", ya büyüme olur (dengeli iki eksenli çekme gerilmesi durumu) veya daire elipse dönüşür. Şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksen " $D_1$ " ile, en küçük eksen " $D_2$ " ölçülerek, en büyük " $e_1$ " [ $e_1=(D_1-D_0)/D_0$ ] ve en küçük " $e_2$ " [ $e_2=(D_2-D_0)/D_0$ ] birim şekil değiştirme uzamaları bulunur.



Şekil 3. Başlangıç Dairesi ve Başlangıç Dairesinin Şekil Değişiminden Sonraki Durum.

" $e_1$ " ve " $e_2$ " değerleri mühendislik uzaması değerleridir. Literatürde gerçek uzama değerleri kullanılır. Gerçek uzama ise;  $\epsilon_{max}=\ln(D_1/D_0)$ ,  $\epsilon_{min}=\ln(D_2/D_0)$  formülleri ile bulunur.

Sac malzemenin işlevsel bir parçaya dönüştürülmesi sırasında, malzemede meydana gelebilecek yüklenme durumları Şekil 4'te verilmiştir.

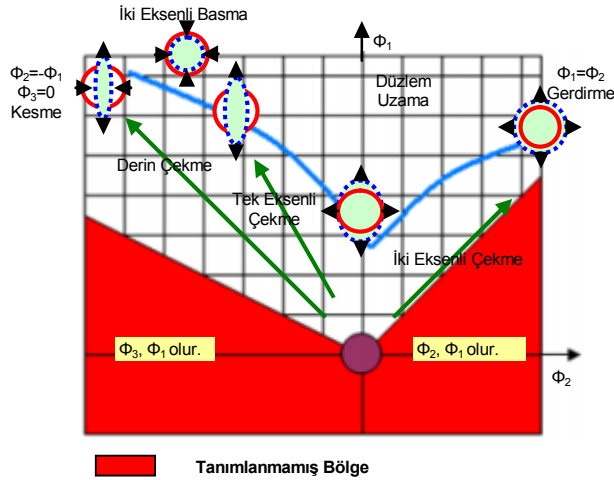


Şekil 4. Sac Malzemenin Şekillendirilmesinde Karşılaşılabilecek Yük Durumları [21]

Şekillendirme sırasında iki eksenli basma, derin çekme, tek eksenli çekme, düzlem uzama ve iki eksenli çekme şartları oluşmaktadır. Sacın üçüncü boyutta şekil değiştirmede kabul edilmektedir.

Farklı test yöntemleriyle, farklı farklı yükler altında sac malzemede meydana gelebilecek uzama durumları bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 5'te görülen ŞSD elde edilir. ŞSD incelendiğinde, şekil değişimlerinin derin çekme ve gererek şekillendirme bölgeleri arasında olduğu görülür.

Şekil değişimi iki eksenli olduğundan ve başlangıç dairelerinden oluşan uzama miktarlarının yönünün önemi olmadığından (uzama yönüne bakılmaksızın, şekil değiştirmiş dairenin büyük çapından elde edilen uzama büyük uzama, dairenin



Şekil 5. Sac Malzemelerdeki Uzama Miktarlarının ŞSD Üzerinde Temsil Edilen Bölgeleri [21].

küçük çapından elde edilen uzama küçük uzamadır.) diyagram üzerinde boyalı alanda şekillendirme tanımlanması yapılmamaktadır.

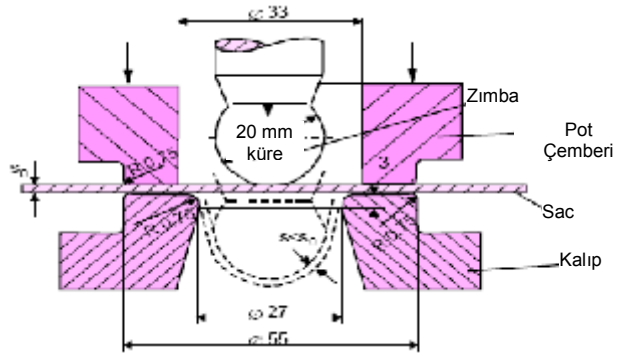
Şekillendirme sınır eğrisinin üst bölgesi tehlikeli bölge, alt bölgesi ise emniyetli bölgedir. Diyagram ayrıca germe-germe veya çekme-basma tipi şekil değiştirme türlerinin bulunduğu iki bölgeye ayrılır. Germe-germe bölgesinde "e<sub>2</sub>" pozitif işaretlidir, çekme-basma bölgesinde ise "e<sub>2</sub>" negatif işaretlidir. ŞSD'nda "e<sub>2</sub>"nin sıfır olduğu nokta, düzlemsel şekil değiştirmeyi belirleyen noktadır. Farklı malzemelerin birbiri ile karşılaştırılmasında bu noktaya ait değerler kullanılır.

### 2.3 Erichsen Testi (Erichsen Test)

Erichsen testi yardımıyla deney numunesinde hem derin çekme hem de gererek şekillendirme gerçekleştirilebildiğinden, ŞSD'nın hemen hemen her bölgesine ait veri elde etmek mümkün olmaktadır.

Uçak kanatlarında veya tekerlek göbeklerinde olduğu gibi, farklı şekillerde üretilmiş olan birçok parça şekillendirme esnasında germe işlemine tabii olmaktadır. Bu şartları elde etmek için malzeme; zımba, küre ya da yarıküresel başlık tarafından gerdirilir. Bu işlem **Olsen** ya da **Erichsen** testi olarak ta adlandırılır. Bu iki test birbirine benzer olmakla birlikte aralarındaki fark, aletlerin ölçülerindeki farktır. Özellikle Avrupa'da kullanılan Erichsen testinde 20 mm'lik küre, 27 mm'lik kalıp ve 0,75 mm'lik radius kullanılır. Şekil 6'da görülen Erichsen deneyinde, matrisle çember arasında 10 kN ile sıkıştırılan deney sacı 20 mm çapında çelik bilya ile yırtılıncaya kadar çökertilir. Çökertme işlemi genellikle yağlamanın olmadığı ortamda gerçekleştirilir. İnce bir yağlama tabakası test sonuçlarının dağılımını azaltır ve simule edilmiş şartlar ile gerçek şartları birbirine yaklaştırır. Yağlama yapılması kırılmadaki uzama germesini çok eksenli yapar. Birçok hatanın düzlem gerilme şartlarında meydana gelmesi sebebi ile yağlama, üretim simülasyonlarında istenmemektedir. Bilya'nın saca ilk temas ettiği noktadan yırtılmaya kadar olan "mm" cinsinden ilerlemesi "d" Erichsen Çökertme değeridir. "d" ne kadar büyükse malzemenin şekillendirilebilirliği de o

kadar büyüktür [22]. Deneylerde [23] kırılma başlangıcına kadar olan zımba yolu ölçülerek Erichsen değeri bulunmuştur



Şekil 6. Erichsen Kutu Testi [22].

Erichsen yükseklik değeri, sac malzemenin "n" değeri ile ilişkilendirilebilir, fakat aralarında zayıf bir ilişki vardır. Erichsen testi, üretim deneyiminde pek tercih edilmez bir yöntem değildir [3]. Literatürde Erichsen testine yönelik çalışmalar [24] mevcuttur ve bu çalışmalarda, şekil değiştirmiş malzemenin en büyük yükseklik değeri, zımba altında en büyük şekil değiştirmeyi ifade eder. Bu derin çekme yüksekliği malzemelerin şekillendirilebilirlik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla kullanılır. Çelik ve alüminyum gövde ve panellerin kalite kontrolü olarak kullanılabilirler.

Erichsen Testi, malzemenin şekillendirilebilirlik özelliklerini ifade etmekte yeterli bir veri olarak görülmesine de ülkemizde malzeme özelliklerini ortaya koyma açısından kullanılmaktadır. Bu husus standartlarımıza (TS 271, 07.07.1965) "**Metallik Sac ve Bandların Çökertme Muayenesi (Erichsen Muayenesi)**" olarak girmiştir [25].

Literatürde [26] 20 mm zımba ve 10 kN baskı yastığı kuvveti kullanılarak yapılmış olan bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada çatlak başlayıncaya kadar olan zımba yolu ölçülmüştür. Bu derinlik mm olarak ölçülür ve Erichsen sayısı olarak ifade edilen bir sayıyı bize verir. Aynı kaynaktan ölçümlerde kırılma kuvvetinden de bahsedilmektedir. Erichsen testinde yağlama yapılması, Erichsen sayısını ve şekil değiştirme kuvvetini etkilememiştir. Yağlama sadece aktif parçaların ömrünü etkilemek adına önemlidir. Erichsen yükseklik değeri genellikle düşük karbonlu çelikler için kullanılır. Daha yüksek derinlik değeri malzemenin daha yumuşak olduğu anlamına gelmektedir [27].

Marciniak testinde kullanılan yarı küresel silindirik zımba ucu ile 304 paslanmaz çelik deforme edilerek malzeme limitleri üzerine çalışılmış [28] kaynaklar gözlenmektedir. 75 mm zımba çapı ve 200 kN baskı yastığı kuvveti ile 200x200 mm'den 200x60 mm ebatlarına doğru değişen malzeme genişlikleri kullanılmıştır. Farklı genişliklerin kullanılması farklı uzama yolları elde etmek içindir. Yarı küresel zımba ile farklı malzemeler ile ilgili çalışmalar [1,29] bulunmaktadır.

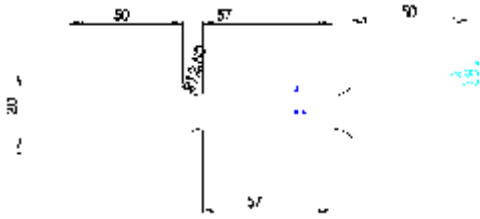
### 3. ŞSD'NİN ÇİZİMİ (DRAWING OF FLD)

Aşağıda sunulan adımlar izlenerek sac malzemenin ŞSD elde edilebilir.

#### 3.1. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of the Samples)

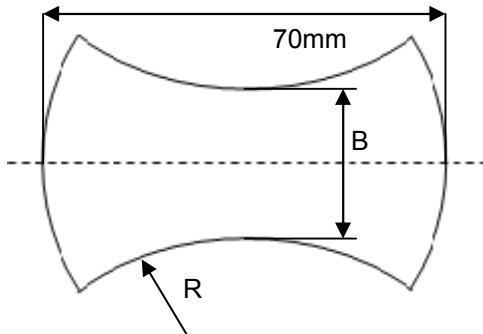
Bir sac malzemenin ŞSD'nı çizebilmek için, malzemenin farklı şartlarda (germe-germe, düzlem uzama ve çekme-basma) şekillendirilmelerine ihtiyaç vardır. Bu sebeple malzemenin farklı şartlarda şekil değişimine uğratılabilmesi için farklı şekillerde ve ölçülerde deney numunelerinin hazırlanmasına gereksinim vardır. Burada önemli olan, sac malzemenin yukarıda ifade edilen üç farklı tarzda şekil değiştirmesine sebep olabilecek deney ortamını hazırlayabilmektir. ŞSD'nın elde edilmesinde kesin olarak belirlenmiş ve tanımlanmış tek bir deney bulunmamaktadır. Daha önce açıklanmış olan Nakajima, Marciniak Testi veya Erichsen, Olsen Testleri yardımıyla bu şekil değişimlerinin malzemede oluşturulması sağlanır.

Birçok bilim adamı, birçok farklı deney prosedürü kullanarak, ŞSD'nın farklı bölgeleri üzerinde sac malzemenin plastik şekil değiştirme özelliklerini ortaya koyacak ŞSD'ları üzerine çalışmaktadırlar. Çekme deneyi numunesi ile derin çekme şartlarında, çentikli çekme deneyi numunesi ile düzlem uzama şartlarında, Erichsen deney numunesi ile derin çekme ve gererek şekillendirme şartlarında sac malzemede meydana gelebilecek plastik şekil değişimlerinin ŞSD'na aktarılması hedeflenmektedir. Bu numuneler Şekil 7, 8 ve 9'da görülmektedir



Şekil 7. Çekme Deneyinde Kullanılan Numunelerin Boyutları.

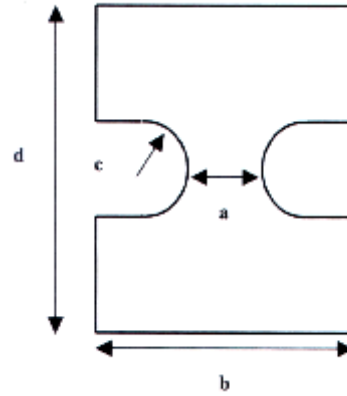
Numune	1	2	3	4	5	6	7
B (mm)	70	63	40	33	20	13	7



Şekil 8. Erichsen Deney Numunesi Boyutları [20].

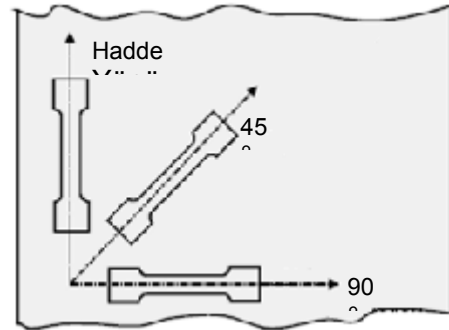
Bu numuneler ile yukarıda bahsi geçen farklı şartlarda şekil değiştirme işleminin gerçekleştirilmesi sağlanır. Deney numuneleri Şekil 10'da görüldüğü gibi belirli kalınlıktaki sac malzemelerden hadde yönüne göre üç farklı açıda ve en az üç seri olacak şekilde hazırlanmalıdır. Böylece ölçümlere karşılanacak hatalar en aza indirilecektir.

	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)
Numune 1	34	100	5	150
Numune 2	34	100	10	150
Numune 3	34	100	15	150
Numune 4	34	100	30	150



Şekil 9. Çentikli Çekme Testi Numune Ebatları [20].

Sac malzemelerin levhalardan kesilmesi esnasında malzemede oluşabilecek değişimleri önlemek için kesme işleminin su jeti ile yapılması tavsiye edilmektedir.



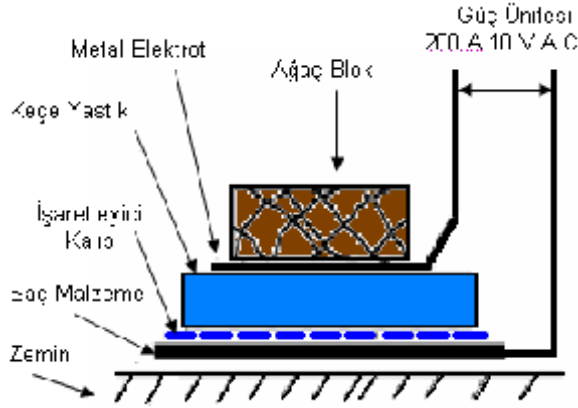
Şekil 10. Numunelerin Hazırlanması [30]

#### 3.2 İşaretleme (Marking)

Numuneler üzerindeki şekil değiştirme miktarlarını görebilmek için, hazırlanan 5 mm çaptaki daireler elektrokimyasal olarak, Şekil 11'de gösterilen yöntem ile sac malzemeye dağlama yapılarak oluşturulur. Söz konusu elektrokimyasal yöntemde 20 µm dağlama derinlikleri oluşabilmektedir. Dağlama işleminden sonra oksidasyonu önlemek için malzeme nötralite çözeltiye alınır [31]. Zaman zaman, dağlama yönteminin sac malzeme üzerindeki daireleri tam olarak işaretleyememesi gibi problemler yaşanabilmektedir. Bu sebeple daireler, sac malzeme yüzeyine lazer işaretleme yöntemi ile de çizilebilmektedir. Lazer işaretlemenin malzemeye



zarar verip vermediği ise, deney sonucunda oluşacak kırılmaların, işaretlenmiş dairelerin ortalarından geçip geçmediğinin belirlenmesiyle anlaşılabilir. Zira kırılmalar; işaretlenmiş dairelerin tam ortasından geçmiyor, işaretleri belirten çizgileri takip ediyor ise malzemeye önceden zarar vermiş demektir.



Şekil 11. Elektrokimyasal Yöntem [19].

Literatürde numuneler üzerine 1 mm ile 5 mm arasındaki daire modellerinin elektrokimyasal, lazer veya printer ile işaretlendiği uygulamalar mevcuttur [7,32]. Dairelerin işaretlenmesinde hem elektrokimyasal hem de lazer ile işaretleme kullanılabilir.

### 3.3 Şekillendirme (Forming)

Şekil 7’de görülen çekme çubuğu çekme deneyi makinesinde 3 mm/s hızla şekil değiştirme işlemine tabii tutulmuştur. Şekil 9’da görülen çentikli çekme numunesi ise aynı makinede serbest çekme hızında (makinenin kendi standartlarında) şekil değiştirmeye tabii tutulmuştur. Şekil değiştirme işlemi malzemede kopma gerçekleşinceye kadar devam etmektedir.

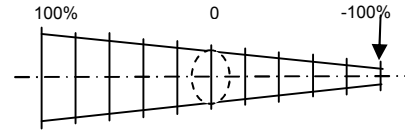
Erichsen deney numunesi ise, Erichsen test makinesinde baskı yastığı-kalıp arasına yerleştirilerek 1 mm/s hızda şekil değiştirmeye tabii tutulur. Çatlak oluşumunda şekil değiştirme işlemi durdurulur. Burada bir önemli bir husus şekillendirme esnasında uygulanan baskı yastığı kuvvetinin değeridir. Düşük baskı yastığı kuvvetlerinde sac malzemenin kalıp içerisine çekildiği görülecektir.

### 3.4. Şekil Değişimlerinin Ölçülmesi ve ŞSD Çizimi (The Measurement of the Formings and the Drawing of the FLD)

Çekme deneyi ve Erichsen deney numunelerinin şekil değiştirme işleminden sonra, daha önce sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerdeki uzama miktarlarının ölçülmesine geçilir.

Çekme, çentikli çekme ve Erichsen deney numunelerindeki şekil değiştirmeler ölçülerek, elde edilen uzama değerleri ŞSD’na aktarılır. Bu işlem esnasında iki daire ölçülür. Bu dairelerden birisi çatlağa en yakın olan bütün tam dairedir [30]. Bu daire sınır diyagramında kırılma eğrisini vermektedir. İkinci ölçülen daire ise, ilk ölçülen tam daireye en yakın dairedir. Bu ölçü ise boğumlanma başlangıcını vermektedir. Sac malzeme

yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerdeki şekil değişimlerinin ölçümleri “Mylar Bandı” ile gerçekleştirilmektedir. Bu band Şekil 12’de görülmektedir.

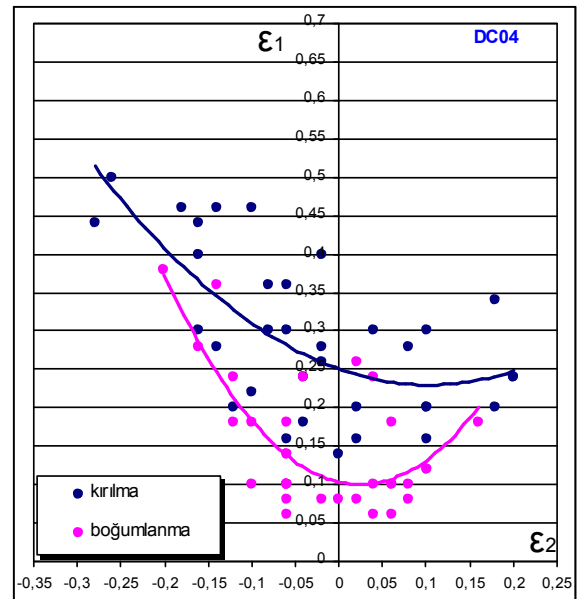


Şekil 12. Mylar Bandı [19].

Mylar bandında zaman zaman ölçme hataları gözlenmektedir. Literatür [32] benzer şekilde, Mylar bandında ölçme hatalarına rastlanacağına işaret etmektedir.

Mylar bandı ile gerçekleştirilen ölçümlerin ŞSD’ye aktarılmasından sonra bu ölçümleri en iyi ifade eden eğrinin belirlenmesi işlemi yapılır. Literatürde ölçüm noktalarını en iyi ifade eden eğrinin iki şekilde tanımlandığı görülmektedir. Bir tanesi tüm ölçüm noktalarının en altından geçen eğri, diğeri ise ölçüm noktalarının en iyi temsil eden eğridir. Şekil 13’te ölçüm noktalarının en iyi temsil edildiği **polinom eğrisi** görülmektedir. Numuneler üzerinden ölçülen büyük ve küçük uzama değerleri ŞSD’na aktarılmış ve ikinci dereceden fonksiyon kullanılarak boğumlanma ve kırılma eğrileri çizilmiştir. Benzer eğri çizimleri literatürde [33] kullanılmaktadır.

Bazı çalışmalar da; numunelerdeki şekil değişiklikleri “yüksek çözünürlüklü kameralar” ile kayda alınmaktadır. Böylece, boğumlanma ve kırılma noktaları daha hassas olarak ölçülebilmektedir. Hassas şekil değiştirme miktarlarının ölçülmesiyle deney numunesine ait ŞSD kolaylıkla çıkarılabilmektedir. Bu şekilde ölçümlerin en önemli avantajı; çatlak oluşumunun ve boğumlanmanın başladığı anın tespit edilebilmesidir. Kamera çözünürlüklerinin yüksek olması hassas ölçüm sağlamada önemli bir etkidir [7,34].



Şekil 13. DC04 (Erdemir Kalite No.7114) Deney Numunesi için Kırılma ve Boğumlanma Eğrileri.

#### 4. ŞSD'NİN OKUNMASI VE YORUMLANMASI (THE READING AND INTERPRETATION OF FLD)

Başarılı bir şekillendirme işleminin gerçekleştirilmesi için; malzeme özellikleri, kalıp geometrisi ve yağlama işleminin birbirlerine uyum sağlaması gerekir. Bu uyum, seri üretime geçilmeden önce deneme üretimi aşamasında sağlanmalıdır.

Seri üretim esnasında ŞSD'ndan faydalanılır. Yüzeyine dairesel ağ çizilmiş sac malzeme şekillendirilerek kritik bölgelerde şekil değiştirme analizi yapılır. Sınır eğrisine yakın değerlerin bulunması, seri üretimde çatlama ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Bu durumda, şekillendirme işlemini emniyetli bölgeye çekecek önlemler alınmalıdır.

Örneğin, iki eksenli çekme gerilmesinin hâkim olduğu çekerek şekillendirme işlemine uğramış bir parçada, plastik şekil değiştirme miktarları şekillendirme sınır eğrisinin üst bölgesinde kalıyorsa malzemede çatlama olacaktır. Çatlamayı önlemek için ya küçük şekil değiştirme miktarını artırmak veya büyük şekil değiştirme miktarını azaltma yoluna gidilmelidir. Küçük şekil değiştirme miktarını artırmak için malzemenin bu yöndeki hareketi sınırlandırılır. Bunun için sıkıştırma kalıbına girinti çıkıntı verilerek veya bu bölgedeki sürtünme artırılarak malzemenin hareketi zorlaştırılır. Büyük şekil değiştirme miktarını azaltmak için şekillendirme derinliğini azaltma veya bölgesel inceleme olayını önleme yoluna gidilir. Bölgesel incelemeyi önlemek için, erkek kalıbın bu bölge ile temas eden kısmında sürtünme artırılarak şekil değiştirme miktarı azaltılır. Bu anlatılanlar söz konusu örnek için geçerlidir. Her durum için önce bir şekil değiştirme analizi yapılarak, daha sonra çözüm yoluna gidilmelidir.

Genelde zımba veya erkek kalıp kuvvetini azaltacak önlemler, şekillendirme işleminin emniyetli bölgede kalmasına katkıda bulunacaktır. Belirli bir kalıp tasarımı ile koşulları değiştirerek, şekillendirme işlemini emniyetli bölgeye çekmek mümkün değilse daha kaliteli malzeme seçimi yoluna gidilir. Bunun tersine, deneme çalışmaları sonunda şekillendirme işlemine ait veriler, şekillendirme sınır diyagramının çok altında bulunuyorsa, daha düşük kalitelere malzeme kullanımına geçilerek, maliyet açısından ekonomi sağlanmalıdır.

Kalıp aşınmasını incelemek için ara kontrol işlemlerinde, yeni bir malzeme partisinin, yeni bir yağlayıcı partisinin davranışını belirleme işlemlerinde veya koşullarda değişiklik yapmak gerektiğinde, plastik şekil değiştirme analizi ve şekillendirme sınır diyagramından yararlanma yoluna gidilir.

Eğrinin sol tarafı çekme - basma şartlarındaki şekillendirme ile ilgilidir. Büyük ya da küçük uzama şekillendirilebilirlik sınırının üstüne düştüğünde boğulanma, uzamalar kırılma limitlerine ulaştığında ise kırılma görülür. Bu ifade, eğrinin hem sağ hem de sol tarafı için geçerlidir. Sabit bir küçük uzama değeri için şekillendirme ve kırılma sınır eğrileri arasındaki açıklığın büyük olması, sac malzemenin çekme-basma şartlarında (derin çekme) şekillendirilebilirliğe daha yakın

olduğunu göstermektedir. Küçük uzama arttığında şekillendirme ve kırılma arasındaki fark düşmektedir. Bu, küçük uzama seviyesine sahip sacı daha da güvenli kılar. Aradaki farkın büyük olması eğrilerin sola kaymasına sebep olur. Küçük uzamadaki aşırı artış kırılma değişiminin daha büyük olmasına neden olur. Normal anizotropinin büyük olması çekme- basma şartlarında büyük uzama miktarının daha büyük olmasını sağlar. Buradan, çekme-basma şartlarında sacın şekillendirilebilirliğinin düzlem gerilme ve germe-germe şartlarından daha iyi olduğu anlaşılır. Mekanik özelliklerin yüksek olması buruşmaya karşı olan direnci geliştirerek şekillendirilebilirliği artırmaktadır [5].

Literatür, [2,35] benzer olarak dikine anizotropi artışı ile şekillendirme ve kırılma eğrileri arasındaki açıklığın artacağına işaret etmektedir.

Kalınlık artışı kırılma eğrisinin yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Kırılma ve şekillendirme eğrileri arasındaki açıklığın yüksek olması malzemenin yüksek çekilebilirlik (çekilerek uzatmaya yatkın) sergileyeceğini göstermektedir. Kalınlık, derin çekilebilirliği artırır ve iki eğri arasındaki açıklığı büyütür. Kalınlık düştüğünde ise açıklık azalacaktır [36].

Sac malzemenin kalınlığının artması artışı eğrinin daha yüksek oluşmasını sağlar. "n" değerinin yüksek olması da şekillendirme sınır eğrisinin yüksek oluşmasını sağlamaktadır. Buradan; diğer faktörler aynı kalmak şartıyla, kalınlığı daha büyük veya "n" değeri daha büyük sac malzemenin şekillendirilebilirliğinin daha iyi olacağı düşünülür.

ŞSD, gererek ve derin çekerek şekillendirme işlemleri için geçerli olduğundan, diğer şekillendirme işlemleri için farklı plastik şekillendirme analizleri yapılarak farklı sınır diyagramları çizilebilir.

#### 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Mekanik özellikler, sac malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliklerini tanımlamada tek başlarına yeterli olmamaktadır. Sac malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliklerini tanımlamada yeni kullanılan tekniklerden birisi olan ŞSD üzerinde sac malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin ifade edilmesiyle, özellikle derin çekerek şekillendirme işlemi ile uğraşan üreticiler sac malzemeler hakkında daha fazla bilgiye sahip olacaklardır.

Sac malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin bilinmesi, doğru malzemenin seçiminde yol gösterici olacaktır. Doğru malzemenin seçilmesi, atık malzemenin en az olmasını, en az deneme işlemini ve en kısa zamanda üretim yapabilmeyi olanaklı hale getirecektir. Sac malzemenin doğru tanımlanması ve doğru malzeme seçimi, firmaların maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olacak ve rekabet güçlerini artıracaktır.

#### 6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Zhongqi Y., Zhongqin L., Yixi Z., Evaluation of fracture limit in automotive aluminium alloy sheet forming, *Materials and Design*, 28 (2007), 2003-2007

- 2) Narayanasamy R., Narayanan S., Forming, fracture and wrinkling limit diagram for IF steel sheets of different thickness, *Materials and Design*, 29 (2006) 1467-1475
- 3) Andersson R., Deformation characteristics of stainless steels, Doctoral Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Lulea University of Technology, 2005:12
- 4) Narayanasamy R., Narayanan S., Forming limit diagram for interstitial free steels supplied by Ford İndia Motors, *Materials and Design*, 28 (2007) 16-35
- 5) Narayanasamy R., Satheesh J. Narayanan S., Effect of annealing on combined forming, fracture and wrinkling limit diagram of aluminium 5086 alloy sheets, *Int.J. Mech Des.*, (2008), 4:31-43
- 6) Hanggi P., Determination of process limitations in sheet metal, *University of Erlangen-Nürnberg*, Chair of Manufacturing Technology
- 7) Galanulis K., Optical measuring technologies in sheet metal processing, GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7, Germany, (05/08.04.2005)
- 8) Sene N.A., Bolland P., Arrieux R., About necking detection to determine forming limit diagrams for mini stamping, *17.th International Scientific and Technical Conference*, Poznan-Wasowo, 2008
- 9] Delijic K., Misovic M., The influence of the surface roughness on the draing parameters of aluminium-alloy auto-body sheets, *Materiali in Tehnologije*, 35, (2001) 1-2
- 10) Campos H., Butuc M., Gracio J., Rocha J., Duarte J., Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel, *Journal Of Materials Processing Technology*, 179, (2008) 56-60
- 11) Jurco P., Banabic D., A user-friendly programme for calculating forming limit diagram, *Technical University of Cluj-Napoca*, Daicovicu 15, Cluj-Napoca, Romania
- 12) Pepelnjak T., Kuzman K., Numerical determination of forming limit diagrams, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engiineering*, Volume 20, Issues 1-2, 2007
- 13] Lee W.B., Chan K.C., Effect of local texture on the development of M-K groove in biaxial deformation, *Textures and Microstructures*, 1991, Vols 14-18, pp. 1221-1226
- 14) Wu H.Y., Zhou G.Z., Gao Z.W., Chiu C.H., Mechanical properties and formability of an Mg-6%Li-1%Zn alloy thin sheet at elevated temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (2008) 419-424
- 15) Wang Z., Li Y., Liu J., Zhang Y., Evaluation of forming limit in viscous pressure forming of automotive aluminium alloy 6k21-T4 sheet, *Trans. Nonferrous Met. Soc., China*, 17, (2007), 1169-1174
- 16) Narayanasamy R., Narayanan S., Sarma S., Forming limit diagram and crystallographic textures of annealed interstitial free steel sheets, *Materials and Design*, (2007)
- 17) Hong Y., Jian C., Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with prestrain induced backstress, Department of Mechanical Engineering, *Northwestern University*, Evanston, USA.
- 18) Kayalı S., Ensari C., Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları, *İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları*, İstanbul, 1986
- 19) Joshi A.M., Strain studies in sheet metal stamping, *B.E Mechanical, A.M.I. Prod. E.*
- 20) Svensson, C., The influence of sheet thickness on the forming limit curve for austenitic stainless steel, *Examensarbete, Örebro Ü.* Department of technology, 2004, Örebro, Sweden
- 21) Duddeck F., 9-Material Models, Department Of Engineering Queen Mary College, *London University*, Mile End Road, London E1 4ENS, UK
- 22) Çapan L., Metallere Plastik Şekil Verme, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 1999
- 23) Chino Y., Iwasaki H., Mabuchi M., Stretch formability of AZ31 alloy sheets at different testing temperatures, *Materials Science and Engineering*, 406 (2007) 90-95
- 24) Bedir F., Durak E., Delikanlı K., Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde uygulanabilirliği ve mekanik özellikleri, *Mühendis ve Makine*, Cilt:47, Sayı:555
- 25) Metalik Sac ve Bandların Çökertme Muayenesi (Erichsen Muayenesi), *TS 271*, 07.07.1965
- 26) Akrouf M., Amar B. M., Chaker C., Dommak F., Numerical and experimental study of stamping of the erichsen test for metal stamping, *Advances in Production Engiineering&Management*, 3 (2008) 2, 81-92
- 27) Meriç C., Köksal S., Karlık., An investigation of deep drawig of low carbon steel sheets and applications in artificial neural networks, *Mathematical &Computational Applications*, Vol 2.No.pp. 119-125.1997
- 28) Makkouk R., Burgeois N., Serri J., Bolle B., Martiny M., Teace M., Ferron G., Experimental and theoretical analysis of the limits to ductility of type 304 stainless steel sheet, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 27 (2008) 181-194
- 29) Korhonen A.S., Manninen T., Forming and fracture limits of austenitic stainless steel sheet, *Material Science and Engineering*, A 488 (2008) 157-166
- 30v K. Siegert K., Wagner S., Formability characteristics of aluminium sheet, *Training in Alüminium Application Technologies*, Lecture 3701, 1994
- 31) Erichsen Levha Metal İşaretleme Cihazı Kullanma Kılavuzu, Model 190
- 32) Hariharan K., Balaji C., Material optimization: a case study using sheet metal-forming analysis, *Journal Of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 324
- 33) Fundenberger j.J., Philippe M.J., Esling C., Lequeu P., Chenal B., Calculation of yield surfaces and determination of forming limit diagrams of aluminium alloys, *Textures and Microstructures*, 1993, Vol. 21, pp. 93-108
- 34) Improved determination of yield stres for sheet metal materials, *Novelis technology AG*. Neuhausen, *Switzerland and Hydro Aluminium Deutschland GmbH*, Bonn, Germany



- 35) Narayanasamy R., Narayanan S., Parthasarathi N.L., Some analysis on stress and strain limit for necking and fracture during forming of HSLA steel sheets, *Materials Science and Engineering*, A 445-446 (2007) 427-439
- 36) Narayanasamy R., Narayanan S., Some aspects on fracture limit diagram developed for different steel sheets, *Materials Science and Engineering* A 417 (2006) 197-224