



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi

## *Evaluation of formability criteria for sheet metal materials*

Yazar(lar) (Author(s)): Fatih CİVELEK<sup>1</sup>, Ahmet ÖZDEMİR<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-6397-3836

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-9919-8149

**To cite to this article:** Civelek F. ve Özdemir A., “Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi”, *Journal of Polytechnic*, 27(4): 1617-1631, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Civelek F. ve Özdemir A., “Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1617-1631, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1392287

# Sac Metal Malzemelerin Şekillendirilebilirlik Kriterlerinin Değerlendirilmesi

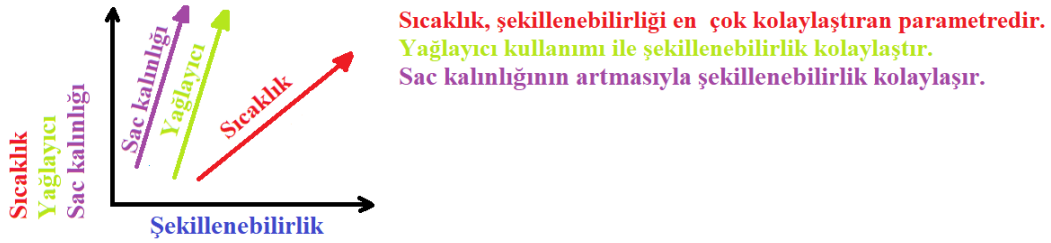
## Evaluation of Formability Criteria for Sheet Metal Materials

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Şekillendirme sınır diyagramını etkileyen faktörler incelenmiştir. / Factors affecting the forming limit diagram have been examined.
- ❖ Erichsen Sabitine etki eden parametreler araştırılmıştır. / Parameters affecting the Erichsen Index have been investigated.
- ❖ Sac metallerin deformasyon davranışları incelenmiştir. / Deformation behaviors of sheet metals have been examined.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Sac metal malzemelerin şekillenebilme kabiliyetlerine etki eden parametreler incelenmiştir. / Parameters affecting the formability of sheet metal materials have been examined.



Şekil. Şekillenebilirliği kolaylaştıran parametreler. /Figure. Parameters facilitating formability.

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, çalışma kapsamında incelenen sac malzemelerin şekillendirme sınır diyagramına ve Erichsen sabitine etki eden parametrelerin incelenmesi ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to examine and evaluate the parameters affecting the forming limit diagram and Erichsen index of the sheet materials examined within the scope of the study.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sac metallerin şekillendirme sınır diyagramını ve Erichsen sabitini etkileyen faktörler derlenmiş, kategorilere ayrılmış ve etkileri incelenmiştir. / Factors affecting the forming limit diagram and Erichsen index of sheet metals are compiled, categorized and their effects have been examined.

### Özgünlük (Originality)

Literatür incelendiğinde derin çekme, sac bükme gibi sac şekillendirme yöntemleri üzerine derleme çalışmaları yapılmış iken Erichsen şişirme testi ile ilgili yapılmış derleme çalışmaları olmamıştır. / When the literature is examined, it has been seen that while there are review studies on sheet metal forming methods such as deep drawing and sheet metal bending, there is no review study on the Erichsen cupping test.

### Bulgular (Findings)

Literatürde sıcaklık, yağlayıcı kullanımı, sac kalınlığı ve deformasyon hızı gibi parametrelerinin sac malzemelerin şekillenebilirliğine etkilerinin incelendiği görülmüştür. / In the literature, it is seen that the effects of parameters such as temperature, lubricant use, sheet thickness and deformation speed on the formability of sheet materials are examined.

### Sonuç (Conclusion)

Sac malzemelerin şekillenebilirliğinin, sıcaklık ve sac kalınlığının artması ve yağlayıcı kullanımı ile arttığı tespit edilmiştir. / It has been detected that the formability of sheet materials increases with increasing temperature and sheet thickness and the use of lubricants.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Sac Metal Malzemelerin Şekillendirilebilirlik Kriterlerinin Değerlendirilmesi

*Derleme Makalesi / Review Article*

Fatih CİVELEK<sup>1\*</sup>, Ahmet ÖZDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 17.11.2023 ; Kabul/Accepted : 20.12.2023 ; Erken Görünüm/Early View :20.03.2024 )

## ÖZ

Sac metal malzemelerden parçalar imal edilirken olası hataların öngörülmesi ya da sacın biçimlendirilebilirlik sınırlarının bilinmesi, kalıpların ekonomik tasarımı ve imalatı, ürün kalitesi, imalat hızı ve maliyet açısından son derece önemlidir. Diğer taraftan, sac metallerin deformasyon kabiliyetini değerlendirmek için Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) yaygın olarak tercih edilmektedir. Sac malzemelerin gererek şekillendirme kabiliyetini ölçmek için faydalanılan önemli yöntemlerden biri Erichsen şişirme testidir. Bu testte kalıp ile baskı plakası arasına sıkıştırılan sac küresel uçlu bir zımba ile şekillendirilir, sac yüzeyinde çatlak oluşumu başlayana kadar zımbanın aldığı mesafe Erichsen Sabiti (ES) olarak tanımlanır. Bu çalışmada, malzeme özelliklerinden ve deney şartlarından kaynaklanan faktörlerin ŞSD'ye ve ES değerine olan etkilerine yönelik yapılmış çalışmalar derlenmiş ve değerlendirilmiştir. Genel olarak pekleşme üsteli (n) değerinin büyümesi ve sıcaklığın yükselmesiyle sac malzemelerin şekillenebilirliğinin kolaylaştığı tespit edilmiştir. Literatürde sac kalınlığının ve zımba çapının artması ve ayrıca yağlayıcı kullanılması ile ES değerinin büyüdüğü saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sac metal şekillendirme, Şekillendirme Sınır Diyagramı, Erichsen Sabiti.

## Evaluation of Formability Criteria for Sheet Metal Materials

### ABSTRACT

Predicting potential failures while manufacturing parts from sheet metal materials or knowing the forming limits of the sheet is extremely important in terms of economic design and manufacturing of molds, product quality, production rate and cost. On the other hand, the Forming Limit Diagram (FLD) is widely preferred to evaluate the deformation ability of sheet metals. One of the important method used to measure the stretch forming ability of sheet materials is the Erichsen cupping test. In this test, the sheet metal clamped between the die and the blank holder is formed with a spherical punch, and the distance taken by the punch until crack formation begins on the sheet surface is defined as the Erichsen Index (EI). In this study, researches related to the effects of the factors arising from material properties and experimental conditions on FLD and EI values were compiled and evaluated. In general, it has been detected that the formability of sheet materials enhances with the increase of the strain hardening exponent (n) and the temperature. In the literature, it was found out that the EI value got larger with the increase in sheet thickness and punch diameter, as well as with lubrication.

**Keywords:** Sheet metal forming, Forming Limit Diagram, Erichsen Index.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde sac metal malzemeler başta otomotiv, havacılık ve beyaz eşya sektörü olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde bükme, hidrolik akışkan basıncıyla şekillendirme, sıvama ve derin çekme gibi sacın plastik deformasyonu ile gerçekleştirilen imalat metotları yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim esnasında oluşabilecek hataların tahmin edilebilmesi ve bu doğrultuda imalat için kalıp tasarımının yapımı ve de işlem parametrelerinin (baskı plakası basıncı, yağlayıcı seçimi, zımba hızı vb.) belirlenmesi için sacın deformasyon kabiliyetinin (şekillendirilebilirliğinin) bilinmesi son derece önemlidir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fatihcivelek@cuhuriet.edu.tr

Sac metaller için şekillendirilebilirlik genellikle metalin yırtılmadan ve boyun vermeden istenilen şekle deforme olma yeteneği olarak tanımlanır [1]. Sac metallerin biçimlenebilirliğini tespit etmek için sınırlayıcı yükseklik testi (LDH testi), Swift derin çekme testi, hidrolik şişirme testi ve Erichsen şişirme testi gibi test yöntemleri mevcuttur [2]. Sac şekillendirme işlemlerinin çoğunda sac malzeme iki eksenli gerilme altındadır ve tek eksenli çekme testi sonucunda elde edilen veriler sac malzemelerin şekillenebilirlik kabiliyetini değerlendirmek için yetersiz kalmaktadır, iki eksenli gerilme durumlarında şekillendirme sınır diyagramından (ŞSD'den) faydalanılır [3].

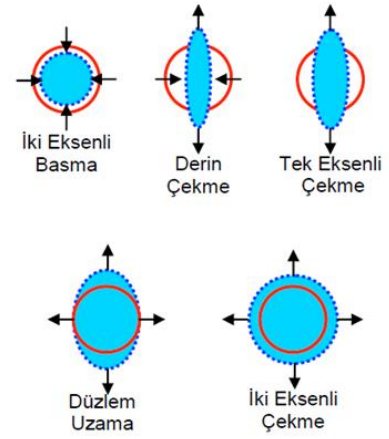
Bu çalışmada, sac malzemelerin şekillendirme sınır diyagramına ve Erichsen sabitine etki eden parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde, derin çekme ve sac bükme gibi sac şekillendirme

yöntemleri üzerine derleme çalışmalar yapılmış iken Erichsen şişirme testi ile ilgili yapılmış derleme çalışması olmadığı tespit edilmiştir dolayısıyla bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

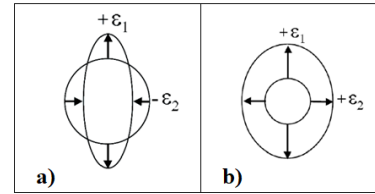
## 2. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI (FORMING LIMIT DIAGRAM)

Sac malzemelerin şekillendirme sınır eğrileri bir diğer ismi ile şekillendirme sınır diyagramı ilk olarak 1960'lı yıllarda Keeler [4] ve Goodwin [5] tarafından sac metallerin biçimlenebilirliğini değerlendirmek amacıyla öne sürülmüştür. ŞSD, lokal boyun vermenin başlangıcında küçük (minör) gerinime ( $\epsilon_2$ ) karşı gelen büyük (majör) gerinimin ( $\epsilon_1$ ) grafiğidir. Bu eğri minör gerinime karşı izin verilebilen en büyük majör gerinimin belirlenmesini sağlar ve bu gerinim üzerine çıktığında sacda yırtılmanın olabileceğini ifade etmektedir [6].

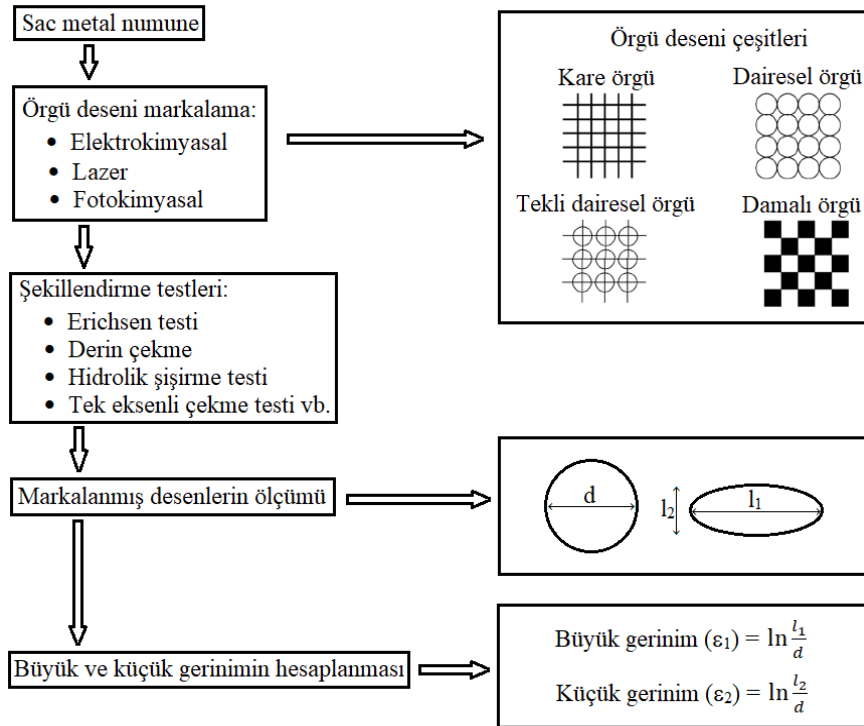
Sac şekillendirme işleminden önce elektrokimyasal, lazer veya fotokimyasal gibi yöntemler ile dağlama yapılarak daire ya da kare şekilli örgü deseni sac yüzeyine markalanır (Şekil 1). Şekillendirme prosesi esnasında örgü deseni sac metalde lokal olarak meydana gelen deformasyonlara göre biçim değiştirir (Şekil 2). Sac metalin deformasyonu sonucu eğer eş iki eksenli gerilme durumu söz konusu değil ise markalanmış daireler elips formunu alır. Elipsin büyük çapı doğrultusundaki gerinim büyük gerinim, elipsin küçük çapı doğrultusundaki gerinim ise küçük gerinim (Şekil 3) olarak adlandırılır [9].



Şekil 2. Sac malzemenin şekillendirilmesi esnasında oluşabilecek yük durumları (Load conditions that may occur during the forming of sheet material) [8].

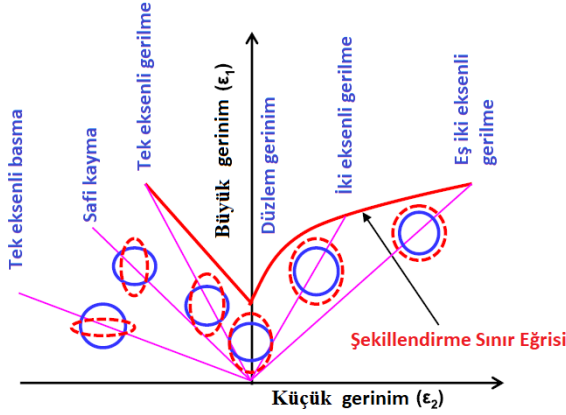


Şekil 3. Deformasyon sonucu dairelerin elips formuna dönüşümü; a) çekme, b) gererek şekillendirme (Transformation of circles into ellipse form as a result of deformation; a) drawing, b) stretch forming) [9].



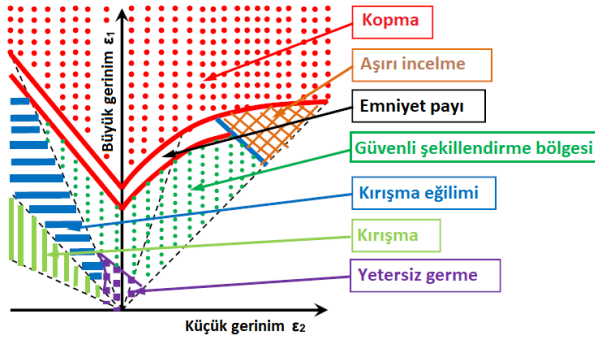
Şekil 1. Sac metal malzemelerde örgü deseni ile büyük ve küçük gerinimlerin elde edilmesi (Obtaining major and minor strains with the grid pattern in sheet metal materials) [7]

Tekrar edilen deneyler sonucunda lokal boyun vermenin gerçekleştiği elipslerden elde edilen veriler birleştirilerek ŞSD çizilir (Şekil 4).



Şekil 4. Şekillendirme sınır diyagramının şematik gösterimi (Schematic representation of forming limit diagram) [10].

Büyük ve küçük gerinim değerlerine göre sacın düzgün bir biçimde şekillendirilebileceği ya da sac metalde meydana gelebilecek olan kusurlar şekillendirme sınır diyagramında bölgesel olarak gösterilmiştir (Şekil 5). Küçük gerinim değerinin negatif olduğu durumlarda (derin çekme işlemi gibi) sac malzemede kırışıklıklar oluşabilir. Büyük gerinim değerinin eğriler ile belirlenen sınırları aşması durumunda aşırı incelleme veya yırtılma meydana gelir.



Şekil 5. Şekillendirme sınır diyagramında deformasyon bölgelerinin gösterimi (Representation of deformation zones in the forming limit diagram) [10].

ŞSD elde etmek için yapılan deneyler genellikle ASTM E2218-02 [11] ve ISO 12004-2 [12] standartlarına göre gerçekleştirilir [13].

## 2.1. Şekillendirme Sınır Diyagramını Etkileyen Parametreler (Parameters Affecting the Forming Limit Diagram)

Denklem (1) (Holloman-Ludwig denklemi) ile gerçek gerilme ( $\sigma$ ), mukavemet katsayısı, gerçek gerinim ( $\epsilon$ ) ve pekleşme üsteli arasındaki ilişki verilmiştir [14].

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1)$$

Toplam uzama miktarı, pekleşme üsteli ( $n$ ), mukavemet katsayısı ( $K$ ), gerinim hızı duyarlılığı üsteli ( $m$ ), düzlemsel anizotropi ( $\Delta r$ ) ve ortalama normal anizotropi ( $r_{ort}$ ) gibi malzeme özelliklerinin yanı sıra yağlama durumu, sac kalınlığı, gerilme hali (çekme-çekme, çekme-basma vb.), deformasyon hızı ve sıcaklık gibi deney parametreleri de sac metallerin biçimlenebilirliğini ve dolayısıyla şekillendirme sınır diyagramının biçimini etkilemektedir.

Toplam uzama miktarının büyük olması malzemenin tek eksenli gerilme durumunda deformasyon kabiliyetinin yüksek olduğunu gösterir fakat iki eksenli gerilme hali için toplam uzama değeri malzemenin şekillenebilirlik kapasitesi hakkında yeterli bilgiyi sağlayamaz [15]. Pekleşme üsteli iki eksenli gerilme halinde boyun vermeden uzamanın artmasını sağlar,  $n$  ve  $K$  değerlerinin artması ile malzemenin deformasyon kabiliyeti artar [16]. Plastik gerinim oranı ( $r$ ) tek eksenli çekme testinde genişlik doğrultusundaki gerçek gerinimin ( $\epsilon_w$ ) kalınlık gerinimine ( $\epsilon_t$ ) oranıdır. Plastik gerinim oranı numune ekseninin sacın hadde yönü ile yaptığı açıya göre değişmektedir, bu nedenle hadde yönünde ( $r_{0^\circ}$ ), hadde yönüne  $45^\circ$  açı doğrultusunda ( $r_{45^\circ}$ ) ve hadde yönüne dik doğrultuda ( $r_{90^\circ}$ ) plastik gerinim oranları bulunur ve ortalama normal anizotropi değeri aşağıda verilen Denklem (2) ile hesaplanır [17].

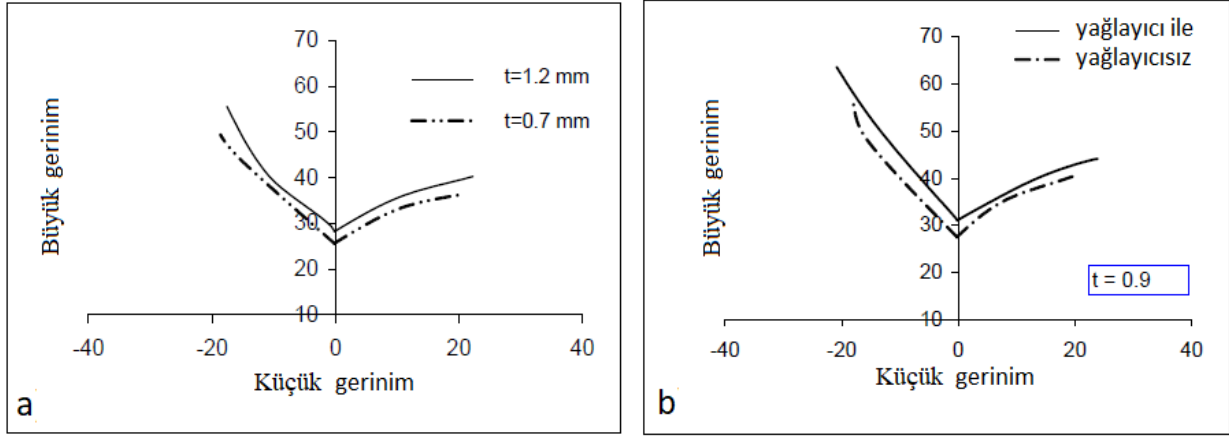
$$r_{ort} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (2)$$

Düzlemsel anizotropi derin çekme işlemi ile üretilen parçada kulaklanma oluşumu ile ilişkilendirilen bir sac malzeme özelliğidir, Denklem (3) ile hesaplanarak elde edilen [18]  $\Delta r$  değeri arttıkça kulakların yüksekliği artmaktadır [19, 20].

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (3)$$

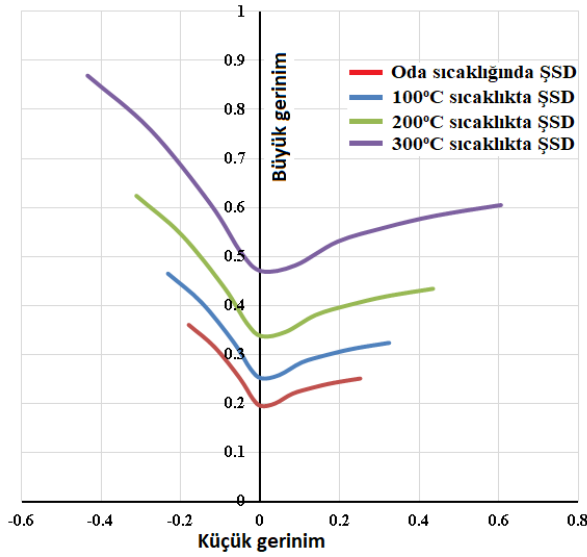
Ortalama normal anizotropi değeri derin çekme işleminde önemli bir parametredir ve  $r_{ort}$  değerinin artması ile genellikle sac malzemelerin çekilebilirlikleri artmaktadır [21, 22].

Djavanroodi ve Derogar [23] Ti6Al4V ile Al6061-T6 metal sacların biçimlendirilebilirliğini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir, pekleşme üsteli ( $n$ ) değerlerinin yükselmesi sonucu kopma uzamasının büyüdüğü ve de şekillendirme sınır eğrilerinin diyagramda yukarı yönde kaydığı görülmüştür. Jahromi vd. [24] düşük karbonlu çelik saclar için sac kalınlığının ve sürtünme koşullarının şekillenebilmeye olan etkilerini araştırmışlardır. Sac kalınlığının artmasıyla ve yağlayıcı kullanılması durumunda sacların deformasyon yeteneğinin arttığı (Şekil 6) tespit edilmiştir. Narayanasamy ve Narayanan [25] çeşitli kalınlıklardaki arayer atomuz (IF) çelik sacların şekillendirme sınır diyagramını ve kırışıklık sınır çizgisini deneysel yöntem ile elde etmişlerdir. Çekme-basma gerilme halinde çekme-çekme gerilme durumuna nazaran IF çelik



**Şekil 6.** St14 çelik sac için ŞSD a. Sac kalınlığının etkisi b. Yağlamanın etkisi (FLD for St14 steel sheet a. Effect of sheet thickness b. Effect of lubrication [24].

saclarının deformasyon kabiliyetinin arttığı, sac kalınlığının ve normal anizotropi değerlerinin yükselmesiyle şekillendirme sınır eğrisi ile kırışıklık oluşum çizgisi arasındaki boşluğun büyüdüğü bir başka ifade ile biçimlenebilirliğin arttığı görülmüştür. Balod ve Aljarjees [26] sıcaklığın Al6061 sacın şekillenebilirliğine olan etkilerini incelemişlerdir, sıcaklığın (Şekil 7) ve gerinim hızı duyarlılığı üstelinin yükselmesi ile deformasyon kapasitesinin arttığı görülmüştür.



**Şekil 7.** Sıcaklığın ŞSD üzerine etkisi (Effect of temperature on FLD) [26].

Özek ve Taşdemir AA5754 alüminyum alaşımı sacların farklı sıcaklıklarda (25°C, 100°C, 175°C ve 250°C) şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Yapılan ılık derin çekme deneyleri sonucunda limit çekme oranının 250°C sıcaklıkta oda sıcaklığına kıyasla %28.5 arttığı ve zımba kuvvetinin ise yaklaşık %23 düştüğü tespit edilmiştir [27]. Tisza ve Kovács [28] farklı kalınlıklardaki DC04, DC05 ve DD14 çelik sacların şekillenebilirliklerini deneysel ve teorik yöntemler ile incelemişlerdir.

Pekleşme üsteli ve anizotropi katsayısı değerlerinin büyümesi ile biçimlenebilirliğin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sac kalınlığının artmasının şekillendirme sınır diyagramlarına önemli ölçüde olumlu katkı yaptığı, güvenli şekillendirme bölgesini genişlettiği görülmüştür. Şen vd. [29] yüksek mukavemetli HC300LA ve HC420LA çelik sac malzemelerinin (1.2 ve 1.5 mm kalınlığında) ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi sırasında yağlayıcı türünün limit çekme oranına ve çekme kuvvetine etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde grafit sprej ve grafit sprej ile teflon karışımının beraber uygulandığı iki farklı yağlayıcı tercih edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda, grafit sprej ile teflon karışımı kullanıldığında çekme oranının sadece grafit sprej uygulandığı deneylere nazaran arttığı (yaklaşık %11.5), çekme kuvvetinin ise azaldığı görülmüştür. Naka vd. [30] sıcaklık ve deformasyon hızının 5083-O Al-Mg alaşımı sacın şekillendirme sınır diyagramına olan etkilerini araştırmışlardır. 423 ile 573 K sıcaklık aralığında şekillendirme hızının azalmasıyla (dakikada 200 mm'den 0.2 mm değerine düşmesiyle) sınır gerinim değerlerinin ciddi oranda (%340'a kadar) arttığı fakat oda sıcaklığında ŞSD'nin deformasyon hızına duyarlılığının çok daha az olduğu gözlemlenmiştir. 573 K sıcaklığında düşük hızlarda şekillenebilirlikteki artışın daha çok yüksek gerinim hızı duyarlılığı üstelinden kaynaklandığı, 475 K altındaki sıcaklıklarda ise biçimlenebilirliğin pekleşme üsteli (n) değerinden de fazlasıyla etkilendiği belirtilmiştir [30]. Zımba hızının 304L östenitik paslanmaz çelik sacın biçimlenebilirliğine ve ŞSD'ye olan etkilerinin deneysel ve sonlu elemanlar simülasyonları ile incelendiği çalışmada, 75 mm çapındaki zımba ile 3, 30 ve 300 mm/dk. zımba hızlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Düşük deformasyon hızlarında şekillendirme sınır diyagramındaki güvenli deformasyon bölgesi alanının büyüdüğü görülmüştür [31]. Düşük gerinim hızlarında daha çok martenzit dönüşümünün gerçekleşmiş olabileceği [31] ve bu nedenle lokal boyun vermenin geciktirilerek sacın biçimlendirilebilirliğinin artmış [31-33] olabileceği ifade edilmiştir. Cheng ve Lee [34], tane boyutunun ve zımba hızının 0.5 mm kalınlığındaki

A5052 H32 sacın biçimlenebilirliğine etkilerini araştırmışlardır. Ticari olarak temin edilen ve T/D oranı (sac kalınlığının ortalama tane çapına oranı) 27.17 değerinde olan sac numune ile birlikte farklı sıcaklık ve sürelerde tavlama yapılarak 10.29, 9.45, 7.20 ve 6.99 T/D oranlarıyla üretilen toplam beş sac numune 0.012 m/s, 3.61 m/s, 7.22 m/s ve 11.04 m/s olmak üzere dört farklı zımba hızı için testlere tabi tutulmuştur. T/D oranı büyümesiyle şekillenebilirliğin arttığı [34-36]; T/D oranı 9.45 iken maksimum olduğu; T/D oranı bu değeri aştığında ise şekillenebilirliğin azaldığı görülmüştür. A5052 alüminyum alaşımı için 9.45 T/D oranının ve 7.22 m/s zımba hızının biçimlenebilirlik için en ideal değerler olduğu tespit edilmiştir [34].

### 3. ERİCHSEN ŞİŞİRME TESTİ (ERICHSEN CUPPING TEST)

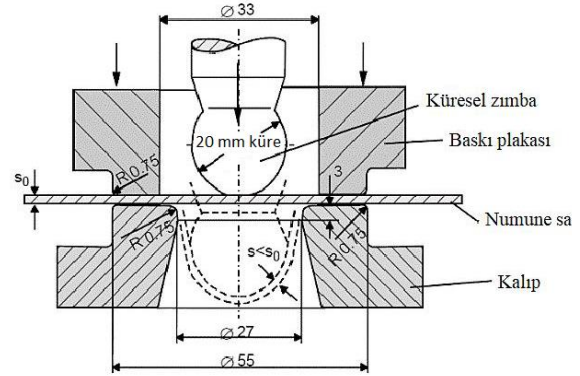
Erichsen şişirme testi, sac metallerin iki eksenli gerilme halindeki gererek şekillendirme kapasitesini ölçmek için günümüzde artan oranda tercih edilmektedir. Erichsen testinde sac metal, kalıp ve sac tutucu arasında sağlam bir şekilde sıkıştırılarak sacın deney esnasında kayarak deformasyon bölgesine akması engellenir [37]. Erichsen testinin uygulaması ISO 20482:2013 [38] standardı ile tanımlanmıştır. Erichsen testinde sac numune, tüm kalınlığı boyunca uzanan ve yeterince geniş olan çatlak görülene kadar çekilir ve çatlak oluşum anında şişirme derinliği ölçülür. Çatlak belirene kadar zımbanın aldığı yola karşılık gelen ölçüm derinliği Erichsen Sabiti (ES) olarak tanımlanır [39]. Erichsen şişirme testinde 20 mm çapında küresel zımba; 27 mm çapında boşluğa ve 0.75 mm radyüse sahip kalıp kullanılır (Şekil 8). Deneylerde baskı plakası yardımıyla sac numuneye 10 kN kuvvet uygulanır ve genellikle yağlama işlemi yapılmaz. Erichsen testi sonucunda elde edilen Erichsen Sabiti ne kadar büyükse malzemenin biçimlenebilirliği o denli fazladır [8].

#### 3.1. Erichsen Sabitine Etki Eden Faktörler (Factors Affecting Erichsen Index)

Erichsen Sabiti, sac numuneye uygulanan ısıtma işlemleri, alaşımlama, kaynak işlemi, sac numunenin imalat yöntemi (soğuk haddeme, sıcak haddeme vb.) gibi nedenlerle değişen malzeme mikro yapısından etkilendiği gibi zımba hızı ve çapı, sac numune genişliği ve kalınlığı, sıcaklık ve yağlama gibi deney parametrelerinden de etkilenmektedir.

##### 3.1.1. Sac malzemeye uygulanan işlemlerin Erichsen sabitine etkileri (Effects of processes applied to sheet material on Erichsen index)

Zhang vd. [40] düşük silisyum (Si) içeriğine sahip dört farklı dönüşüm kaynaklı plastisite (TRIP) çeliği (Çizelge 1) ve referans için ağırlıkça %1.19 Si içeren TRIP çeliğinin sürekli soğuma dönüşüm diyagramlarını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Karbon (C) elementinin içeriğinin, titanyum (Ti) ve vanadyum (V) ile yapılan mikro alaşımlamanın ve de karbon eşdeğerliğinin (CE) sürekli soğuma dönüşüm diyagramına ve mekanik özelliklere etkisi çalışmada



Şekil 8. Erichsen şişirme testinin şematik gösterimi (Schematic representation of the Erichsen cupping test [37]).

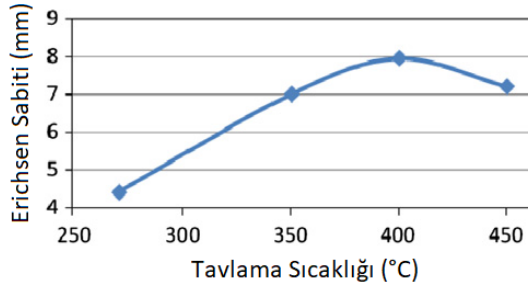
araştırılmıştır. Çekme testi ve Erichsen testi için numunelerin 1 mm kalınlık değeri elde edilinceye kadar soğuk haddelendiği; C oranının artmasıyla çekme dayanımının yükseldiği ve en büyük çekme dayanımına % 0.46 silisyum içeren (J) çeliğinin sahip olduğu görülmüştür. Vanadyum içeren çeliklerin akma dayanımının yükseldiği, uniform birim uzama miktarının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Erichsen test sonuçları, karbon içeriğinin artmasıyla şekillenebilirliğin kısmen azaldığını; % 0.46, % 0.39 (S) ve % 0.27 (Z) silisyum içeren çelik sacların yaklaşık 8 ile 10 mm aralığında ES değerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çalışılan mikroalaşım TRIP çeliklerinin mekanik dayanımının (800-1000 MPa) ve şekillenebilirliğin (%20 toplam uzama) mükemmel kombinasyonuna sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of the steels used in the experiments (weight %)) [40].

Malzeme Kodu	C	Mn	Al	Si	P	Ti	V	CE
P	0.11	1.67	0.038	1.19	0.013	-	-	0.44
O	0.21	1.64	1.37	0.31	0.081	-	0.073	0.55
Z	0.24	1.51	1.12	0.27	0.082	-	-	0.54
S	0.26	1.64	1.35	0.39	0.049	0.099	0.053	0.61
J	0.34	1.75	1.32	0.46	0.055	0.12	0.033	0.71

Tajally ve Emadoddin [41] soğuk haddelenmiş ve sonrasında farklı sıcaklıklarda tavllanmış 7075 alüminyum alaşımının şekillenebilirliğini araştırmışlardır. Derin çekme ve Erichsen testlerinde kullanılmak üzere ilk kalınlığı 3.9 mm olan 7075 Al alaşımı numuneleri soğuk haddeme işlemi ile 1.1 mm kalınlık değerine indirilmiştir. Sonrasında soğuk haddelenmiş saclar 270-450 °C aralığındaki farklı sıcaklıklarda 5 dakika süresince tavllanmış ve havada soğutulmuşlardır. Soğuk haddelenmiş numune için çekme dayanımı/akma dayanımı oranı 1.11 değerinde bulunurken tavlama sıcaklığının artmasıyla bu değerin

arttığı ve 450 °C'de tavllanmış numune için bu oranın 2.15 değerine kadar yükseldiği tespit edilmiştir [41]. Çekme dayanımı/akma dayanımı oranının yükselmesiyle şekillenebilirliğin arttığı belirtilmiştir [41-44]. Normal anizotropi değerinin tavlama sıcaklığıyla doğru orantılı olarak yükseldiği, 400 °C sıcaklık değerinde en büyük değerine ulaştığı ve 400 °C'den sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Bu nedenle 400 °C tavlanan 7075 Al alaşımı sacın çekilebilirliğinin diğer sac numunelere göre daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Erichsen testleri, 400 °C sıcaklıkta tavllanmış 7075 Al alaşımı sac numunenin en büyük ES değerine (7.95 mm) sahip olduğunu göstermiştir. ES değerinin tavlama sıcaklığı artışı ile önce yükseldiği, 400 °C sıcaklık değeri aşıldıktan sonra ise azaldığı (Şekil 9) gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, 7075 alüminyum alaşımı sacların şekillenebilirliğinin, tavlama sıcaklığının 350-400 °C sıcaklık aralığına yükseltilmesiyle iyileştirilebileceği ortaya konmuştur [41].



**Şekil 9.** Al7075 alaşımı için tavlama sıcaklığının Erichsen sabitine olan etkisi (Effect of annealing temperature on Erichsen index for Al7075 alloy) [41].

Mg alaşımlarının kullanımı, özgül ağırlıklarının düşük ve mukavemetlerinin yüksek olması sebebiyle otomotiv, uzay ve haberleşme gibi endüstriyel alanlarda artmaktadır [45]. Bai vd. [46] Mg-2Zn-0.2Mn alaşımına kalsiyum (Ca) ve samaryum (Sm) elementlerinin eklenmesinin magnezyum (Mg) alaşımının mikro yapısına, mekanik özelliklerine ve şekillenebilirliğine olan etkilerini araştırmışlardır. Şekillenebilirliği incelemek için 60 mm x 60 mm x 1 mm ölçülerindeki Mg alaşımı sac numunelere Erichsen testi uygulanmıştır. Mg-Zn bazlı alaşımların ortalama tane boyutunun alaşıma Ca [46-48] ve Sm [49] katılmasıyla ciddi oranda (%82'ye kadar) küçüldüğü ve Ca elementinin tane inceltme etkisinin Sm'a göre daha fazla olduğu görülmüştür [46]. Tavllanmış Mg alaşımının bazal dokusunun Ca ve Sm ilavesi ile önemli ölçüde zayıfladığı ve Sm elementinin Ca'a nazaran daha güçlü doku zayıflatma kabiliyetinin olduğu tespit edilmiştir. Mg-2Zn-0.2Mn alaşımına Ca ve Sm eklenmesinin alaşımın mekanik özelliklerini ve şekillenebilirliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ca miktarının ağırlıkça %0.5'ten %1'e yükseltilmesinin sünekliği ve şekillenebilirliği olumsuz etkilediği, alaşımdaki Sm miktarının yükseltilmesinin ise şekillenebilirliği arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları, Mg alaşımının mekanik özelliklerini ve şekillenebilirliğini dikkate değer biçimde geliştiren Ca ve

Sm elementlerinin nadir toprak elementlerinin yerine kullanılabileceğini göstermiştir [46]. Sekhar [50] 1 mm kalınlığındaki AA5052 alüminyum sacın biçimlenebilirliğini Erichsen testi ve tek eksenli çekme testi yardımıyla araştırmıştır. H32 kondisyonunda temin edilen saclara ve 345 °C sıcaklıkta 10 dakika süresince tavllanmış sac numunelere Erichsen şişirme testi uygulanmıştır. Tavlama işlemi neticesinde şekillendirme sınır diyagramının yukarı yönde kaydığı; şekillenebilirliğin arttığı gözlemlenmiştir. Erichsen testleri sonucunda numune genişliğinin azalmasıyla yırtılmanın sac numune merkezinden kenarlara doğru yoğunlaştığı görülmüştür.

Son yıllarda, lazer kaynaklı DP çelik sacların şekillenebilirliğini inceleyen çalışmaların sayısı giderek artmaktadır [51-56]. Huan vd. [55] çalışmalarında farklı oranda martenzit içeren üç çeşit çift fazlı çelik sac malzemeye (DP590, DP780 ve DP980) lazer kaynağı uygulamışlardır. Her biri 1.5 mm kalınlığında olan metal sac numunelerin deformasyon ve yırtılma davranışları Erichsen testi ile araştırmıştır. DP590, DP780 ve DP980 sac malzemelerin martenzit içeriği sırasıyla %19, %36 ve %45 oranlarındadır. Tek eksenli çekme testleri sonrasında üç malzeme için de kopmanın esas metal bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Kaynaklı numunelerin çekme ve akma dayanımları esas metalinki ile benzer olmasına rağmen toplam uzamanın kaynak nedeniyle azaldığı gözlemlenmiştir. DP590, DP780 ve DP980 kaynaklı malzemelerin Erichsen sabitleri sırasıyla 8.4, 8.7 ve 8.1 mm değerlerinde ölçülmüştür. Kaynaklı DP590, DP780 ve DP980 için bulunan Erichsen sabitlerinin esas metallerin Erichsen değerlerinin sırasıyla yaklaşık %81, %92 ve %85'i kadar olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, kaynak nedeniyle şekillenebilirliği en çok azalan sac malzemenin DP590 olduğu tespit edilmiştir. Wang vd. [56] farklı ısı girdileri ile fiber lazer kaynağı yapılmış çift fazlı DP780 çelik sacların mikro yapısını ve kopma davranışlarını incelemiştir. Soğuk haddelenmiş 1.5 mm kalınlığındaki DP780 çelik saclar 6, 18, 24, 30, 42, 66 J/mm ısı girdileri ve 0.3 mm ışın çapı kullanılarak kaynak edilmiştir. Tek eksenli çekme testleri sonucunda ısı girdisinin artmasıyla numunelerin akma dayanımının, çekme dayanımının ve toplam uzama miktarının ilk önce arttığı fakat ısı girdisi 66 J/mm iken azaldığı gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen Erichsen testleri sonucunda ısı girdisinin yükselmesiyle Erichsen sabitinin önce arttığı sonra ise azaldığı tespit edilmiştir (Çizelge 2). Isı girdisi 6 J/mm iken ES, esas metalin Erichsen sabitinin sadece %38.8'ine denk gelen 3.382 mm değerinde bulunmuştur. Isı girdisi 18-42 J/mm iken şekillenebilirliğin arttığı ve Erichsen sabitinin esas metalinkinin yaklaşık %95'i kadar olduğu görülmüştür. Isı girdisi 66 J/mm'ye çıkarıldığında ise Erichsen sabitinin azaldığı tespit edilmiştir. DP780 sac malzemenin lazer kaynağı ile tam olarak birleştirildiği durumlarda martenzit içeriğinin azalması nedeniyle oluşan yumuşamış bölgenin ortadan kaldırılmasının ısı girdi ayarı ile mümkün olmadığı belirtilmiştir.



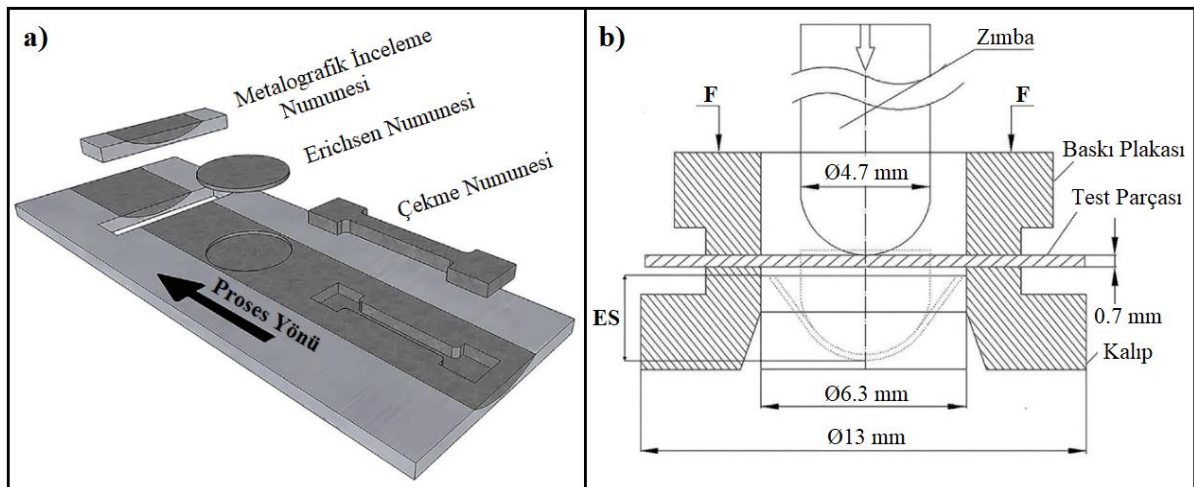
Yumuşamış bölgenin genişliği 539  $\mu\text{m}$  değerini aşmadığı sürece kaynaklı sac malzemenin şekillenebilirliğinin esas metalinkine son derece (%95) yakın olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı ısı girdileri için Erichsen test sonuçları (Erichsen test results for different heat inputs) [56].

Isı girdisi (J/mm)	Erichsen Sabiti (mm)	Çatlak başlangıç bölgesi
Esas metal	8.718	Esas metal
6	3.382	Kaynak bölgesi (Paralel)
18	8.345	Kaynak bölgesi (Dik)
24	8.194	Kaynak bölgesi (Dik)
30	8.292	Kaynak bölgesi (Dik)
42	8.537	Kaynak bölgesi (Dik)
66	7.058	Yumuşak bölge (Paralel)

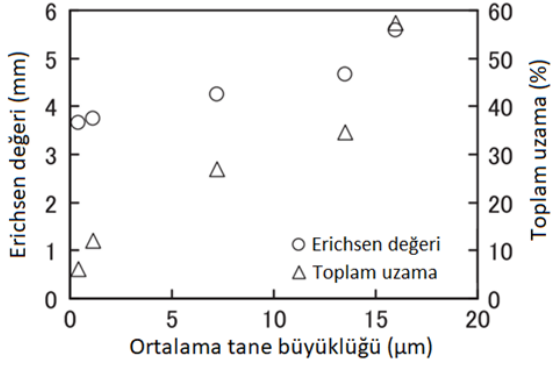
Sekban vd. [57] sürtünme karıştırma prosesinin gemi yapımında yaygın olarak tercih edilen düşük karbonlu çelik sac malzemenin şekillenebilirliğine olan etkilerini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma prosesi sonrası malzemede karıştırma bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olmak üzere iki farklı bölge oluştuğu ifade edilmiştir. Proses öncesi mikro yapının kaba ferrit taneleri ve taneler arasına yerleşmiş perlit fazında oluştuğu gözlemlenmiştir. Sürtünme karıştırma işlemi sonrasında karıştırma bölgesindeki ferrit tanelerin ortalama boyutunun 25 $\mu\text{m}$ 'den 3  $\mu\text{m}$  değerine düştüğü görülmüştür. Biçimlenebilirliği araştırmak için standart Erichsen testinde kullanılan kalıp takımının %25 boyutlarına sahip kalıp seti tercih edilmiş ve deneylerde kullanılan sac numuneler karıştırılmış bölgeden çıkartılmıştır (Şekil 10). Sürtünme karıştırma prosesinin çelik sac malzemenin şekillenebilirliğine etkisini kıyaslamak için sürtünme karıştırma işleminin uygulanmadığı düşük karbonlu çelik sac numunelere de Erichsen testleri uygulanmıştır. Çekme testi neticesinde

sürtünme karıştırma işlemi uygulanan numunelerin akma ve çekme dayanımlarının arttığı [58], sünekliliğinin ise az da olsa düştüğü gözlemlenmiştir. Dayanımdaki artışın temel nedeninin tane incelenmesi olduğu belirtilmiştir [57]. Ayrıca sürtünme karıştırma işlemi sırasında dislokasyon yoğunluğunun artmasının da düşük karbonlu sac malzemenin mukavemetinin yükselmesine katkı sağladığı çalışmada ifade edilmiştir. Proses sonrası üniform uzamanın %18'den %14'e, toplam uzamanın ise %44'ten yaklaşık %32 değerine düştüğü tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma işlemi sonrasında Erichsen sabitinin az miktarda azaldığı, zımba kuvvetinin ise yükseldiği görülmüştür. İşlem sonrası Erichsen sabitinin 2.73 mm değerinden 2.66 mm değerine düştüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak sürtünme karıştırma prosesinin çelik sac malzemenin mikroyapısında tane incelenmesine neden olduğu böylelikle dayanım ve şekillenebilirliğin dengeli olarak birlikte elde edilebildiği görülmüştür. Ayrıca tane incelenmesi sayesinde sac numunelerin yüzey kalitesinin arttığı ve Erichsen testi sonrası sac yüzeyinde oluşan portakal kabuğu görünümünün azaldığı tespit edilmiştir [57]. Yoda vd. [15] birikimli haddelenmiş (ARB) ve tavllanmış ultra ince taneli arayer atomsuz (IF) çelik sacların şekillenebilirliğini incelemişlerdir. Ortalama tane büyüklüğü farklı olan numuneler elde etmek için ARB işleminden sonra çeşitli sıcaklık ve sürelerde tavlama yapılmıştır. Bu sıcaklık ve süreler sırasıyla, 500 °C 0.5 saat; 600 °C 0.5 saat; 600 °C 20 saat ve 850 °C 20 saat olarak belirlenmiştir. Başlangıç sacı, ARB işlemi uygulanmış numuneler ve ARB işlemi sonrası tavllanmış olan numuneler ile oda sıcaklığında tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. ARB işlemi uygulanmış ve tavllanmış 20 mm x 20 mm x 1 mm ölçülerindeki sac numuneler ile Erichsen deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve tavlama süresinin artmasıyla ortalama tane boyutunun büyüdüğü gözlemlenmiştir. Erichsen deneyleri sonucunda başlangıç sacının Erichsen sabiti 5.6 mm değerinde ölçülmüştür. Ortalama tane boyutunun küçülmesiyle Erichsen sabiti değerinin düşme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Fakat ortalama tane boyutunun



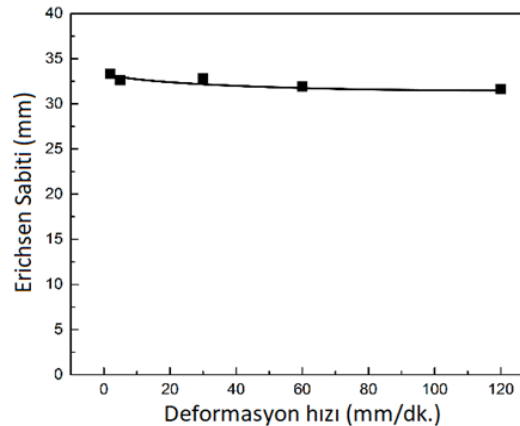
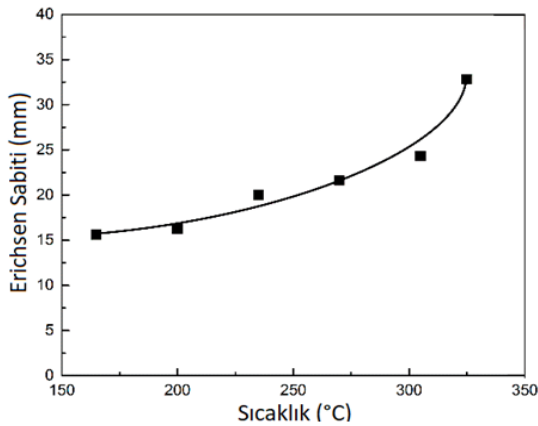
**Şekil 10.** a. Sürtünme karıştırma prosesinin ve numunelerin yerlerinin şematik görünümü b. Küçültülmüş Erichsen kalıp seti (a. Schematic view of the friction stir process and position of samples b. Miniaturized Erichsen die set) [57].

0.44  $\mu\text{m}$  olduğu durumda dahi Erichsen sabitinin 3.7 mm olduğu görülmüştür. 0.44  $\mu\text{m}$  ortalama tane boyutuna sahip sacın toplam uzama miktarının başlangıç sacının toplam uzama miktarının yaklaşık %10'u kadar, Erichsen değerinin ise başlangıç sac numunenin Erichsen sabitinin %66'sı kadar olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen test sonuçları doğrultusunda ultra ince taneli IF çelik sacların düşük çekme uzamasına sahip olduğu durumlarda bile çok eksenli deformasyon kabiliyetinin oldukça yüksek olabileceği (Şekil 11) görülmüştür.



**Şekil 11.** Ortalama tane boyutunun Erichsen sabitine ve toplam uzamaya olan etkisi (Effect of average grain size on Erichsen index and total elongation) [15].

Çapraz haddelenme işlemi ile üretilmiş AZ31 Mg alaşımı sacların dokusu ile şekillenebilirliği arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmada haddelenme işlemi, hadde silindiri ekseninin hadde yönüne dik eksene (TD) göre  $7.5^\circ$  kaydırılması ile gerçekleştirilmiştir. Çapraz haddelenmiş ve karşılaştırma yapmak için normal haddelenme ile hazırlanmış AZ31 Mg saclara 433, 473 ve 493 K sıcaklıklarında Erichsen testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, Erichsen sabiti çapraz haddelenmiş Mg alaşımı sac için 433 K sıcaklıkta 6.4 mm, 473 K'de 8.7 mm ve 493 K sıcaklığında 14.4 mm; normal haddelenmiş sac için ise 433 K'de 3.5 mm, 473 K'de 5.4 mm ve 493 K sıcaklığında ise 8.0 mm değerlerinde bulunmuştur.

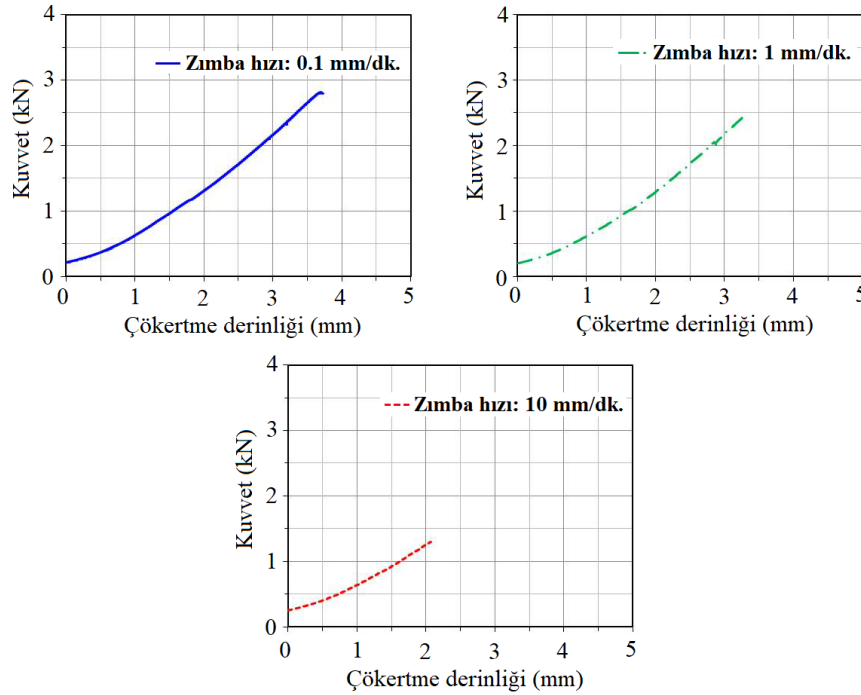


**Şekil 12.** Sıcaklığın ve deformasyon hızının Erichsen sabitine etkisi (Effect of temperature and deformation rate on Erichsen index) [61].

Çapraz haddelenmiş saclar ile normal haddelenmiş sacların mekanik özellikleri arasındaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. (0002) düzlem dokusunun çapraz haddelenmiş numunelerde normal haddelenmişlere kıyasla düşük doku yoğunluğu ve hadde yönünde daha dar bazal düzlem yayılımı sergilediği gözlemlenmiştir [59]. Çapraz haddelenme işleminin AZ31 Mg alaşımı sacların şekillenebilirliğini arttırdığı görülmüştür [59, 60].

### 3.1.2. Test koşullarının Erichsen sabitine olan etkileri (Effects of experimental conditions on Erichsen index)

Gao vd. [61] örgü karbon fiber (CF) takviyeli polieter eter keton (PEEK) kompozit sacların ısıllı şekillendirme işlemi esnasında biçimlenebilirliğini incelemişlerdir. 138 mm çapında ve 0.9 mm kalınlığındaki kompozit numuneler ile 5 mm/dk. zımba hızında 165, 200, 235, 270, 305, 325  $^\circ\text{C}$  sıcaklık değerlerinde; 325  $^\circ\text{C}$ 'de 2, 5, 30, 60, 120 mm/dk. deformasyon hızlarında Erichsen şişirme testleri yapılmıştır. Sıcaklık 165  $^\circ\text{C}$ 'den 325  $^\circ\text{C}$ 'ye yükselirken Erichsen sabitinin ciddi ölçüde (%210) arttığı; zımba hızı yükselirken ise Erichsen sabitinin az miktarda (%5) azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 12). 165  $^\circ\text{C}$  sıcaklıkta yapılan testlerde Erichsen sabiti 15.6 mm; 325  $^\circ\text{C}$ 'de ise 32.8 mm değerinde ölçülmüştür. Erichsen sabiti zımba hızı 2 mm/dk. iken 33.3 mm ve hız 120 mm/dk değerine yükseltildiğinde ise 31.6 mm değerinde bulunmuştur. Sıcaklığın CF/PEEK kompozit sacların şekillenebilirliğine etkisinin deformasyon hızından çok daha fazla olduğu yapılan deneyler ile tespit edilmiştir. CF/PEEK kompozit sac malzeme için en büyük Erichsen sabitine 325  $^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ve 2 mm/dk. zımba hızında ulaşılmıştır. Sıcaklığın yükselmesi ile kompozit sacın matrisinin yumuşadığı ve tokluğunun arttığı bu sayede şekillenebilirliğin kolaylaştığı belirtilmiştir. Luo vd. [62] sürtünme karıştırma yöntemiyle üretilen AZ61 magnezyum alaşımı sacların oda sıcaklığında şekillenebilirliğini Erichsen testi yardımıyla incelemişlerdir. Erichsen deneyleri sırasında oluşan kuvvet-çökertme derinliği eğrilerinin zımba hızına bağlı olarak değişimlerini araştırmışlardır. Deformasyon

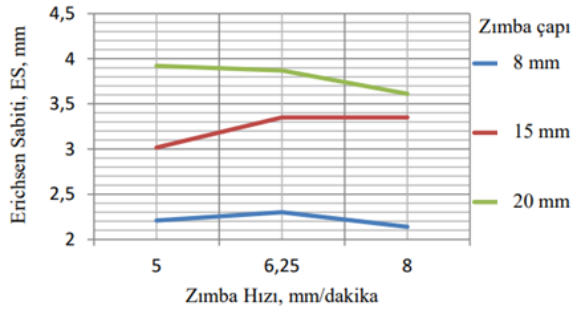


**Şekil 13.** Farklı zımba hızlarında Erichsen testi sırasında oluşan kuvvet-çökertme derinliği eğrileri (Force-displacement curves formed during the Erichsen test at different punch speeds) [62].

hızının artmasıyla Erichsen Sabitinin azaldığı (Şekil 13); ES değerinin 0.1 mm/dk. zımba hızında 3.7 mm ve zımba hızı 10 mm/dk. iken 2.1 mm olduğu tespit edilmiştir.

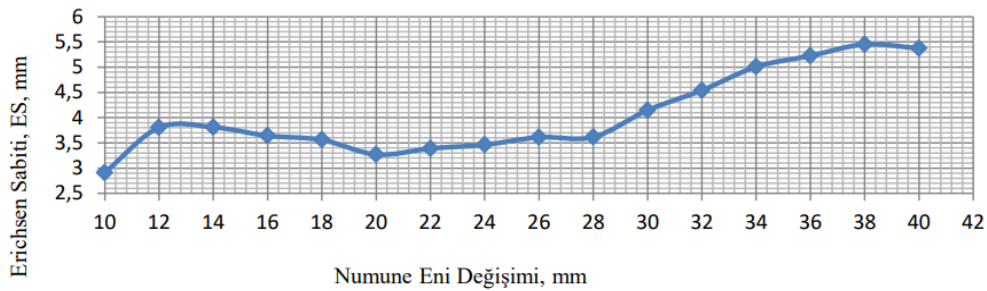
Günümüzde, özellikle alüminyum alaşımları başta olmak üzere sac metallerin kriyojenik sıcaklıklarda biçimlenebilirliklerinin araştırılmasına yönelik yapılan çalışmalar artmaktadır [63-69]. Yi vd. [63] 2A14 alüminyum alaşımının kriyojenik sıcaklıklarda şekillenebilirliğini ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 2 mm kalınlığındaki sac numunelere 113 K, 203 K ve 298 K sıcaklıklarında Erichsen testleri uygulanmıştır. Tek eksenli çekme testleri sonucunda 113 K sıcaklığında çekme dayanımının ve toplam uzamanın 298 K sıcaklığında elde edilen değerlere göre sırasıyla yaklaşık %27 ve %51 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Erichsen Sabitinin 298 K sıcaklığında 7.87 mm değerinde olduğu; 113 K sıcaklığında ise 9.53 mm'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Kriyojenik sıcaklıklarda dislokasyon yoğunluğunun ciddi miktarda (yaklaşık %61) artmasından dolayı çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin baskılandığı ve böylelikle alaşımın şekillenebilirliğinin arttığı ifade edilmiştir. 203 K ile 298 K sıcaklık aralığında gerilme-uzama eğrilerinin girintili yapıda olduğu, dinamik gerinim yaşlanmasının 203 K sıcaklık değerinin altında baskılanması sayesinde ise eğrinin daha yumuşak olarak elde edilebildiği belirtilmiştir. Kisko vd. [70] yüksek oranda mangan içeren üç çeşit TWIP çeliği (6C22Mn, 2C21Mn2N ve 21Mn3Al3Si) sacın yüksek hızda gerçekleştirilen Erichsen testi ile şekillenebilirliğini incelemişlerdir. Erichsen deneyleri sırasında gerinim hızı değerinin yaklaşık  $1000 \text{ s}^{-1}$  olduğu belirtilmiştir. Deneyler sonucunda 6C22Mn ve 2C21Mn2N sacları için Erichsen

Sabiti sırasıyla 12.8 mm ve 12.5 mm değerlerinde bulunmuş ve bu değerlerin düşük hızlarda yapılan geleneksel Erichsen testinde elde edilenlere çok yakın olduğu ifade edilmiştir. Yüksek deformasyon hızının bu çeliklerin şekillenebilirliğine önemli bir etkisinin olmadığı ortaya konmuştur. 6C22Mn ve 2C21Mn2N çelik sacların yüksek deformasyon hızlarında Erichsen Sabitinin azalmamasının nedeni yoğun mekanik ikizlenmeye atfedilmiştir. 21Mn3Al3Si çelik sacın yüksek hızlı Erichsen testi sonrası ölçülen ES değerinin (10.6 mm) diğer ikisininkinden daha düşük olduğu görülmüştür ve bu durum 21Mn3Al3Si çeliğinin çift fazlı olmasından dolayı içerdiği östenit/ferrit ara yüzeylerinin kırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Çalışmada, 6C22Mn ve 2C21Mn2N çelik sacların yüksek hızlı Erichsen testleri sonrası kopma gerinimlerinin yüksek hızlı tek eksenli çekme testinde elde edilen uzama değerlerinden düşük olduğu bu nedenle TWIP çeliklerinin gerinim şekillendirilmesi sırasında yırtılmanın yayılmış boyun vermeden gerçekleşmiş olabileceği ileri sürülmüştür. Çakış vd. [71] çalışmalarında Al 1050 sacın, numune genişliğine, zımba çapına ve zımba hızına bağlı olarak çekilebilirliğini incelemişlerdir. Deneyler, tasarımı, imalatı ve kalibrasyonu yapılan tam otomasyonlu Erichsen şişirme test cihazı kullanılarak 8 mm, 15 mm ve 20 mm çapındaki küresel uçlu zımbalar ile yapılmıştır. Zımba çapının artmasıyla Erichsen Sabitinin büyüdüğü tespit edilmiştir. 20 mm çaplı zımba kullanıldığında, zımba hızının yükselmesiyle ES değerinin azaldığı; 8 mm çapa sahip zımba ile yapılan testlerde ise Erichsen Sabitinin 6.25 mm/dk. zımba hızında en büyük değeri aldığı gözlemlenmiştir (Şekil 14). Yapılan deneyler sonucunda; numune genişliğinin zımba çapının yaklaşık

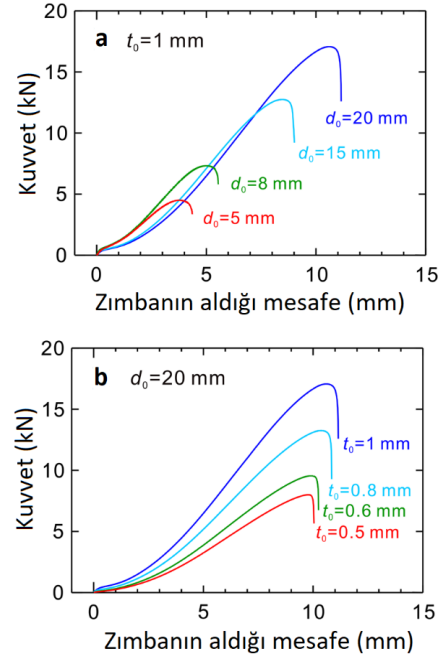


**Şekil 14.** Zımba hızı ve çapına göre Erichsen sabitinin değişimi (Variation of Erichsen index according to punch speed and diameter) [71].

1.5 katı değerine ulaştığı andan itibaren genişliğinin artması ile Erichsen sabitinin düzenli artmaya başladığı, numune genişliği zımba çapına eşit olduğunda ise (Şekil 15) Erichsen Sabiti ve zımba yükü değerlerinin azaldığı görülmüştür. Soren vd. [72] alüminyum ile deoksit edilmiş 2 mm kalınlığındaki AISI 1040 çelik saclara 20 mm çaplı zımba ile Erichsen testleri uygulamışlardır. Numunelerin uzunluğu sabit ve 75 mm; numune genişlikleri ise 15 mm, 21 mm, 38 mm, 56 mm ve 75 mm değerlerinde seçilmiştir. Numune genişliği 75 mm olduğunda Erichsen Sabiti 11.95 mm değerinde ölçülmüştür. Sac genişliği 56 mm iken ES'nin en küçük değeri aldığı (11.82 mm); numune genişliği azalmaya devam ettikçe Erichsen değerinin yükseldiği ve 15 mm genişliğinde numune kullanıldığında Erichsen Sabitinin en büyük değere (22.17 mm) ulaştığı görülmüştür. Kamikawa ve Morino [73] zımba çapı ve sac kalınlığının Erichsen testi ile elde edilen kuvvet-mesafe eğrilerine olan etkilerini araştırmışlardır. Zımbanın deney başlangıcından maksimum kuvvete kadar aldığı mesafe (uniform uzama) ve bu noktadan sac metalde çatlak oluşumu görülene kadar aldığı mesafe (uniform olmayan) olmak üzere toplam mesafe iki bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Sac kalınlığının ve zımba çapının artmasıyla maksimum kuvvetin yükseldiği gözlemlenmiştir (Şekil 16). Uniform uzamanın zımba çapının artmasıyla büyüdüğü fakat sac kalınlığından bağımsız olduğu; uniform olmayan uzamanın ise sacın kalınlaşmasıyla arttığı ve zımba çapının değişiminden fazla etkilenmediği tespit edilmiştir. Bu çalışmada düşük



**Şekil 15.** Numune eni-Erichsen sabiti ilişkisi (20 mm çaplı zımba ile 6.25 mm/dk. zımba hızında) (Sample width-Erichsen index relationship (with punch diameter of 20 mm and 6.25 mm/min punch speed)) [71].



**Şekil 16.** Erichsen testi sırasında kuvvet-mesafe eğrilerinin değişimi a. Zımba çapı ile b. Sac kalınlığı ile (Change in force-displacement curves during Erichsen test a. with punch diameter b. with sheet thickness) [73].

karbonlu sac malzemenin Erichsen Sabitinin zımba çapının ve sac kalınlığının artmasıyla büyüdüğü görülmektedir. Çalışmada, Erichsen Sabitini normalize etmek için bir yöntem ileri sürülmüştür, önerilen yöntemle ES'nin zımba çapına bölünmesiyle elde edilen değer ile sac kalınlığının zımba çapına oranı arasında lineer bir ilişki olduğu ortaya koyulmuştur. Toros vd. [74] ferritik paslanmaz çelik sacların katı oksit yakıt pillerinde kullanıma uygunluğunu araştırmak için farklı kalınlıklardaki sacların şekillendirilebilirliklerini incelemişlerdir. Sac kalınlığının artması ile biçimlenebilirliğin arttığı görülmüştür ve sac kalınlığı 0.2 mm iken Erichsen Sabiti 7.0 mm; sac kalınlığı 1.0 mm olduğunda ise Erichsen Sabiti 9.8 mm değerlerinde ölçülmüştür. Sac kalınlığı 0.2 mm olduğunda dâhil şekillenebilme kabiliyetinin sac malzemenin katı oksit yakıt pili imalatında kullanımı için yeterli olduğu tespit

edilmiştir. Ayrıca üç nokta eğme testlerinde, destekler arası mesafe 50 mm iken yapılan deney sonucunda çelik sacların negatif geri yaylandığı, sac kalınlığının artmasıyla geri yaylanma açısının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Reddy vd. [75] farklı kalınlıklardaki paslanmaz çelik, bakır, pirinç ve alüminyum sac malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetlerini incelemişlerdir. Numunelere modifiye edilmiş Erichsen testi, gres yağı, hint yağı ve lanthax gres kullanılarak uygulanmıştır. Sac kalınlığının artması ile Erichsen Sabitinin arttığı görülmüştür. Yağ kullanımının Erichsen Sabitini arttırdığı gözlemlenmiştir ve gres yağı, hint yağı ve lanthax gres yağına kıyasla Erichsen Sabitinin en fazla artmasını sağlayan yağ olmuştur. Erichsen testi sonrasında sac metalde lokal olarak incelenen gerçeğe geçtiği halka şekilli bölgenin çapı ile Erichsen Sabiti arasında yakın bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir, halka çapının küçük olduğu durumlarda Erichsen Sabitinin daha büyük olduğu görülmüştür. Şener ve Kayalı [76] çok düşük karbonlu çelik sacların (galvaniz kalıplı olmayan arayer atomsuz ve galvanizli) şekillenebilirliğini Erichsen testleri ile incelemişlerdir. Erichsen testi 1 kN baskı plakası kuvveti ve 2.4 mm/dk. zımba hızı ile gerçekleştirilmiştir. Teflon, PVC, polietilen film ve madeni yağın Erichsen Sabitine olan etkileri belirlenmiştir. İki sac malzeme türü için de PVC'nin en etkili yağlayıcı olduğu tespit edilmiştir. Ramadass vd. [77] SL320 sentetik yağlayıcının 0.5 mm, 1.0 mm ve 1.5mm kalınlığındaki Ti-Gr2 alaşımı sacların biçimlenebilirliğine etkilerini araştırmışlardır. Yağlayıcı kullanımı 1.0 mm kalınlıktaki titanyum alaşımı sacın Erichsen değerinin 17.02 mm'den 18.02 mm'ye yükselmesini sağlamıştır. Yağlayıcının, 0.5 mm ve 1.5 mm kalınlığındaki sac numunelerin Erichsen Sabitine kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yoshimura vd. [78] buğday ununun su ile oluşturduğu süspansiyonun yağlayıcı olarak kullanılmasının, ticari saf titanyum (CP Ti-1), paslanmaz çelik (SUS304) ve karbon çeliği sacların şekillenebilme kabiliyetine olan etkilerini incelemişlerdir. Farklı oranlarda un içeren (% 5 - % 30) süspansiyonlar ile gerçekleştirilen Erichsen testleri sonucunda Erichsen Sabitinin un oranının artmasıyla büyüdüğü görülmüştür. Tüm sac malzeme türleri için %30 un içeren süspansiyon kullanıldığında gres yağıyla elde edilenden daha yüksek ES değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Sac numune yüzeylerinin Erichsen testi öncesi ve sonrası taramalı elektron mikroskopu ile elde edilen görüntülerinden yola çıkılarak protein ve lipit kaplı nişasta parçalarının kalıp ve sac numune arasındaki sürtünmeyi azalttığı öne sürülmüştür. Çalışma sonucunda, geri dönüştürülebilir ve çevreye zararı olmayan yağlayıcının (un ile su süspansiyonu) ticari olarak kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sac metaller günümüzde havacılık, otomotiv, beyaz eşya vb. sektörlerde geniş ölçüde tercih edilmektedir. Sac metal malzemelerin şekillenme kabiliyetinin bilinmesi imalat sırasında oluşabilecek kusurları önceden tahmin

etmek için son derece önemlidir. Sacların şekillendirme kabiliyetinin belirlenmesinde şekillendirme sınır diyagramı yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzemenin mekanik özelliklerinin ve deney koşullarının sac malzemelerin biçimlenebilirliğine olan etkileri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Pekleşme üsteli katsayısının (n) ve mukavemet katsayısı (K) değerlerinin büyümesi ile malzemenin plastik şekillenme kabiliyeti iyileşir.
- Düzlemsel anizotropi ( $\Delta r$ ) değeri büyüdükçe derin çekme işlemi ile üretilen parçalarda kulakların yüksekliğinin arttığı görülmektedir.
- Sac malzemenin ortalama normal anizotropi değeri yükseldikçe çekilebilirliklerinin genellikle arttığı gözlemlenmektedir.
- Sıcaklığın ve gerinim hızı duyarlılığı üstelinin (m) yükselmesiyle biçimlenebilirliğin arttığı görülmektedir.
- Sac kalınlığının artmasının ve yağlayıcı kullanılmasının sac metallerin (çelik, alüminyum alaşımları, bakır, magnezyum alaşımları) şekillenebilme kabiliyetlerini yükselttiği tespit edilmiştir.
- Deformasyon hızının sac malzemelerin (çelik, bakır, alüminyum, vb.) şekillendirilmesinde etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Etkisinin sac malzeme türü ve işlem uyulama sıcaklığına göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Sac malzemelerin iki eksenli gerilme halindeki gererek şekillendirme kapasitesini ölçmek için tanımlanan Erichsen Sabitininin sac numune ve deney parametreleriyle olan ilişkisi aşağıda sunulmuştur.

- Tavlama gibi ısı işlemleri ve çapraz haddeleme gibi özel işlemler ile sac metallerin Erichsen Sabitinin yükseltildiği çalışmalar literatürde mevcuttur.
- Sn ve Ca gibi tane inceltme etkisi olan elementler ile alaşımlama yapılarak magnezyum alaşımı sac metallerin ES değerinin artırılabilirliği görülmüştür.
- Çok küçük ortalama tane boyutuna sahip sac malzemenin yetersiz çekme uzaması sergilediği durumlarda dahi yüksek ES değerine sahip olabileceği literatür araştırması sonucu tespit edilmiştir.
- Genel olarak Erichsen testi esnasındaki uygulama sıcaklığının yükselmesiyle ES değerinin arttığı; bazı sac malzemeler için ise kriyojenik sıcaklıklarda Erichsen Sabitinin yükseldiği tespit edilmiştir.
- Zımba hızının Erichsen Sabitine olan etkisi sac malzeme özelliklerine ve diğer test parametrelerine bağlı olarak değişmektedir.
- Sac kalınlığının ve zımba çapının artmasıyla ES değerinin büyüdüğü gözlemlenmiştir.
- Yağlayıcı kullanılarak yapılan testlerde kuru sürtünme durumuna göre Erichsen Sabitinin yükseldiği tespit edilmiştir.

Literatür incelendiğinde Erichsen Sabitini arttırmak için ise genellikle çeşitli yağlayıcılar kullanılmış ya da malzemenin mikro yapısı değiştirilmeye çalışılmıştır. Malzemenin mikro yapısını değiştirmek ekstra bir maliyet ve zaman gerektirmektedir. Literatürde sac kalınlığı, zımba hızı ve çapı gibi deney parametrelerinin ES değerine olan etkileri yaygın olarak çalışılmıştır. Fakat kalıp ve sac tutucu tasarımları üzerine yeterli çalışma mevcut değildir, baskı plakası ve kalıp tasarımının Erichsen Sabitine olan etkilerinin incelenmesinin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Fatih CİVELEK:** Literatür taraması yapmış ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir. / Conducted a literature review and wrote the article.

**Ahmet ÖZDEMİR:** Literatürdeki makaleleri derlemiş ve değerlendirmiştir. / Compiled and evaluated articles in the literature.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Oh K. S., Oh K. H., Jang J. H., Kim D. J. and Han K. S., "Design and analysis of New Test Method for evaluation of Sheet Metal formability", *Journal of Materials Processing Technology*, 211(4): 695-707, (2011)
- [2] Kahraman F., Külekci M. K. and Küçük M., "Experimental investigation of stretchability and Bendability Characterization of AISI 1020 Steel", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2): 135-140, (2019)
- [3] Kotkunde N., Krishna G., Shenoy S. K., Gupta A. K. and Singh S.K., "Experimental and theoretical investigation of forming limit diagram for Ti-6Al-4 V alloy at warm condition", *International Journal of Material Forming*, 10: 255-266, (2017)
- [4] Keeler S. P., "Determination of forming limits in automotive stampings", *SAE Transactions*, 74: 1-9, (1966)
- [5] Goodwin G.M., "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop", *Sae Transactions*, 77(1): 380-387, (1968).
- [6] Darabi R., Azodi H. D. and Bagherzadeh S., "Bagherzadeh, Investigation into the effect of material properties and arrangement of each layer on the formability of bimetallic sheets" *Journal of Manufacturing Processes*, 29: 133-148, (2017)
- [7] Hou Y., Myung D., Park J. K., Min J., Lee H. R., El-Aty A. A. and Lee M. G., "A Review of Characterization and Modelling Approaches for Sheet Metal Forming of Lightweight Metallic Materials", *Materials*, 16(2): 836, (2023)
- [8] Anket O., Koruvatan T. ve Ay İ., "Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı", *Politeknik Dergisi*, 14(1): 39-47, (2011)
- [9] Ozturk F., Dilmec M., Turkoz M., Ece R. E. and Halkaci H. S., "Grid marking and measurement methods for sheet metal formability", *5th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS*, Aydin, Turkey, (2009)
- [10] Paul S. K., "Controlling factors of forming limit curve: A Review", *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2: 100033, (2021)
- [11] ASTM E2218-02, "Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves", (2008).
- [12] ISO Standard No. 12004-2, "Metallic Materials-Sheet and Strip, Determination of Forming-Limit Curves-Part 2: Determination of Forming-Limit Curves in the Laboratory", (2008).
- [13] Dilmec M., Halkaci H. S., Ozturk F. and Turkoz M., "Detailed investigation of forming limit determination standards for aluminum alloys", *Journal of Testing and Evaluation*, 41(1): 10-21, (2013)
- [14] Cao J., Li F., Ma X. and Sun Z., "Tensile stress-strain behavior of metallic alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(11): 2443-2453, (2017)
- [15] Yoda R., Shibata K., Morimitsu T., Terada D. and Tsuji N., "Formability of ultrafine-grained interstitial-free steel fabricated by accumulative roll-bonding and subsequent annealing", *Scripta Materialia*, 65(3): 175-178, (2011)
- [16] Gao T., Liu Y., Chen P. and Wang Z., "Analysis of bulging process of aluminum alloy by overlapping sheet metal and its formability", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(4): 1050-1055, (2015)
- [17] Erhuy C. G., Yurci M. E. and Altan T., "Determining the effective stress-effective strain curve of a high-strength low-alloy steel sheet from the viscous pressure bulge test", *Sigma*, 26(4): 281-300, (2008)
- [18] Goud R. R., Prasad K. E. and Singh S. K., "Formability limit diagrams of extra-deep-drawing steel at elevated temperatures", *Procedia Materials Science*, 6: 123-128, (2014)
- [19] Wu D., Chen R. S. and Han E. H., "Excellent room-temperature ductility and formability of rolled Mg-Gd-Zn Alloy Sheets", *Journal of Alloys and Compounds*, 509(6): 2856-2863, (2011)
- [20] Lee W. B., To S., "Computer modelling of the effect of rolling schedule on the plastic anisotropy of cold-rolled aluminium sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 48(1-4): 173-178, (1995)

- [21] Narayanasamy R., Ravi Chandran M. and Parthasarathi N. L., "Effect of annealing on formability of aluminium grade 19000", *Materials & Design*, 29(8): 1633-1653, (2008)
- [22] Hajizadeh K., Tajally M., Emadoddin E. and Borhani E., "Study of texture, anisotropy and formability of Cartridge Brass Sheets", *Journal of Alloys and Compounds*, 588: 690-696, (2014)
- [23] Djavanroodi F., Derogar A., "Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and AL6061-T6 aluminum alloys sheets", *Materials & Design*, 31(10): 4866-4875, (2010)
- [24] Jahromi S. A. J., Nazarboland A., Mansouri E. and Abbasi S., "Investigation of formability of low carbon steel sheets by forming limit diagrams", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering*, 30: 377-385, (2006)
- [25] Narayanasamy R., Narayanan C. S., "Forming, fracture and wrinkling limit diagram for if steel sheets of different thickness", *Materials & Design*, 29(7): 1467-1475, (2008)
- [26] Balod A. O., Aljarjees A. Y., "The combining effect of changing forming path and heating effect during stretch forming process to enhance the formability of Al 6061 sheet", *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(3): 314-321, (2021)
- [27] Özek C. ve Taşdemir V., "Alüminyum alaşımının derin çekilmesine sıcaklığın etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 21(1): 193-199, (2018)
- [28] Tisza M., Kovács Z. P., "New methods for predicting the formability of sheet metals", *Journal of Production Processes and Systems*, 6(1): 45-54, (2012)
- [29] Şen N., Kurgan N., Karağaç İ. ve Uluer O., "İlk Derin Çekme Prosesinde Yağlayıcı Etkisinin Şekillendirilebilirlik Açısından Deneysel Araştırılması", *Politeknik Dergisi*, 19(2): 185-193, (2016)
- [30] Naka T., Torikai G., Hino R. and Yoshida F., "The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet", *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3): 648-653, (2001)
- [31] Fathi H., Emadoddin E., Mohammadian Semnani H. R. and Mohammad Sadeghi B., "Effect of punch speed on the formability behavior of austenitic stainless steel type 304L", *Metals and Materials International*, 22(3): 397-406, (2016)
- [32] Rodríguez-Martínez J. A., Pesci R. and Rusinek A., "Experimental study on the martensitic transformation in AISI 304 steel sheets subjected to tension under wide ranges of strain rate at room temperature", *Materials Science and Engineering: A*, 528(18): 5974-5982, (2011)
- [33] Fischer F. D., Reisner G., Werner E., Tanaka K., Cailletaud G. and Antretter T., "A new view on transformation induced plasticity (TRIP)", *International Journal of Plasticity*, 16(7-8): 723-748, (2000)
- [34] Cheng T. C., Lee R. S., "The influence of grain size and strain rate effects on formability of aluminium alloy sheet at high-speed forming", *Journal of Materials Processing Technology*, 253: 134-159, (2018)
- [35] Gau J. T., Principe C. and Wang J., "An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminum and brass for microforming", *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3): 42-46, (2007)
- [36] Vollertsen F., Biermann D., Hansen H. N., Jawahir I. S. and Kuzman K., "Size effects in manufacturing of metallic components", *CIRP annals*, 58(2): 566-587, (2009)
- [37] Talapatra A., Choudhary V. R., Malhotra K., Vyas M., Jamal A. and Singhi M. K., "Formability Characteristics of Different Sheet Metals By Erichsen Cupping Testing With NDT Methods", *i-manager's Journal on Material Science*, 1(1): 14-18, (2013)
- [38] ISO Standard No. 20482, "Metallic materials-Sheet and strip- Erichsen cupping test", (2013).
- [39] Kocańda A., Jasiński C., "Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(2): 211-216, (2016)
- [40] Zhang M., Li L., Fu R. Y., Krizan D. and De Cooman B. C., "Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels", *Materials Science and Engineering: A*, 438-440: 296-299, (2006)
- [41] Tajally M., Emadoddin E., "Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets", *Materials & Design*, 32(3): 1594-1599, (2011)
- [42] Salihu S. A., "Assessment of Advanced High Strength Steels used in Auto Industry—A Review", *Int. J. Sci. Res. Sci*, 2(4): 565-571, (2016)
- [43] Song H., Wang Z. J. and Gao T. J., "Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(1): 87-92, (2007)
- [44] Irie T., Satoh S., Hashiguchi K., Takahashi I. and Hashimoto O., "Metallurgical factors affecting the formability of cold-rolled high strength steel sheets", *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 21(11): 793-801, (1981)
- [45] Gül C., Albayrak S., Çömez N. ve Durmuş H., "WE43 Magnezyum Alaşımının Soğuk Sprey Kaplama Yöntemi ile Al/Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kaplanması ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 25(4): 1791-1798, (2022)
- [46] Fan W. X., Bai Y., Li G. Y., Chang X. Y. and Hao H., "Enhanced mechanical properties and formability of hot-rolled Mg-Zn-Mn alloy by Ca and Sm alloying", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(4): 1119-1132, (2022)
- [47] Akbaş A. ve Zeren M., "Investigation of the effect of various Ca content on microstructure and mechanical properties of as-cast ZK60 Magnesium alloys", *Politeknik Dergisi*, 26(3): 1061-1069, (2023)
- [48] Ding H. L., Zhang P., Cheng G. P. and Kamado S., "Effect of calcium addition on microstructure and texture modification of Mg rolled sheets", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(9): 2875-2883, (2015)
- [49] Zhang T., Cui H., Cui X., Chen H., Zhao E., Chang L., Pan Y., Feng R., Zhai S. and Chai S., "Effect of addition of small amounts of samarium on microstructural

- evolution and mechanical properties enhancement of an as-extruded ZK60 magnesium alloy sheet”, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1): 133-141, (2020)
- [50] Sekhar R. A., “Determining the formability of AA5052 sheets in annealed and H32 condition”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1355: 012044, (2019)
- [51] Bandyopadhyay K., Lee M. G., Panda S. K., Saha P. and J. Lee J., “Formability assessment and failure prediction of laser welded dual phase steel blanks using anisotropic plastic properties”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 126: 203-221, (2017)
- [52] Li J., Nayak S. S., Biro E., Panda S. K., Goodwin F. and Zhou Y., “Effects of weld line position and geometry on the formability of laser welded high strength low alloy and dual-phase steel blanks”, *Materials & Design*, 52: 757-766, (2013)
- [53] Xia M. S., Kuntz M. L., Tian Z. L. and Zhou Y., “Failure study on laser welds of dual phase steel in formability testing”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(4): 378-387, (2008)
- [54] Bandyopadhyay K., Panda S. K., Saha P., Baltazar-Hernandez V. H. and Zhou Y. N., “Microstructures and failure analyses of DP980 laser welded blanks in formability context”, *Materials Science and Engineering: A*, 652: 250-263, (2016)
- [55] Huan P. C., Wang X. N., Yang L., Zheng Z., Hu Z. R., Zhang M. and Chen C. J., “Effect of Martensite Content on Failure Behavior of Laser Welded Dual-Phase Steel Joints During Deformation”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3): 1801-1809, (2019)
- [56] Wang X. N., Sun Q., Zheng Z. and Di H. S., “Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs”, *Materials Science and Engineering: A*, 699: 18-25, (2017)
- [57] Sekban D. M., Akterer S. M., Saray O., Ma Z. Y., and Purcek G., “Formability of friction stir processed low carbon steels used in shipbuilding”, *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1): 237-244, (2018)
- [58] Xue P., Xiao B. L., Wang W. G., Zhang Q., Wang D., Wang Q. Z. and Ma Z. Y., “Achieving ultrafine dual-phase structure with superior mechanical property in friction stir processed plain low carbon steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 575: 30-34, (2013)
- [59] Chino Y., Sassa K., Kamiya A. and Mabuchi M., “Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet” *Materials Science and Engineering: A*, 441(1-2): 349-356, (2006)
- [60] Kim D. G., Son H. T., Kim D. W., Kim Y. H., Lee K. M., “Effect of cross-roll angle on microstructures and mechanical properties during cross-roll rolling in AZ31 alloys”, *Materials Transactions*, 52(12): 2274-2277, (2011)
- [61] Zheng B., Gao X., Li M., Deng T., Huang Z., Zhou H. and Li D., “Formability and Failure Mechanisms of Woven CF/PEEK Composite Sheet in Solid-State Thermoforming”, *Polymers*, 11(6): 966, (2019)
- [62] Luo X., Liu H., Kang L., Lin J., Liu Y., Zhang D., Li D. and Chen D., “Stretch Formability of an AZ61 Alloy Plate Prepared by Multi-Pass Friction Stir Processing”, *Materials*, 14(12): 3168, (2021)
- [63] Huang K., Huang S., Yi Y., Dong F. and He H., “Flow behavior and forming characteristics of 2A14 aluminum alloy at cryogenic temperatures”, *Journal of Alloys and Compounds*, 902: 163821, (2022)
- [64] Yuan S., Cheng W., Liu W. and Xu Y., “A novel deep drawing process for aluminum alloy sheets at cryogenic temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 284: 116743, (2020)
- [65] Schneider R., Grant R. J., Schlosser J. M., Rimkus W., Radlmayr K., Grabner F. and Maier C., “An investigation of the deep drawing behavior of automotive aluminum alloys at very low temperatures”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51: 1123-1133, (2020).
- [66] Liu W., Cheng W. and Yuan S., “Analyses on formability and flow stress of an Al-Cu-Mn alloy sheet under biaxial stress at cryogenic temperatures”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 195: 106266, (2021)
- [67] Dong F., Huang S., Yi Y., Huang K., Jia Y., Yu W. and Zhao Z., “Comparative study on the formability and microstructure evolution of different tempered Al-Cu-Li alloy sheets during room and cryogenic temperature forming process”, *Journal of Materials Research and Technology*, 25: 3137-3150, (2023)
- [68] Yuan S., Cheng W. and Liu W., “Cryogenic formability of a solution-treated aluminum alloy sheet at low temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 298: 117295, (2021)
- [69] Kumar M., Sotirov N., Grabner F., Schneider R. and Mozden G., “Cryogenic forming behaviour of AW-6016-T4 sheet”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(6): 1257-1263, (2017)
- [70] Hamada A. S., Kisko A., Khosravifard A., Hassan M. A., Karjalainen L. P. and Porter D., “Ductility and formability of three high-Mn TWIP steels in quasi-static and high-speed tensile and Erichsen tests”, *Materials Science and Engineering: A*, 712: 255-265, (2018)
- [71] Çakış Y., Özdemir A., Şeker U. ve Çiftçi İ., “Al 1050 Sac Metal Malzemenin Çekilebilirliğinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 1001-1010, (2023)
- [72] Parida A. K., Soren S., Jha R. N. and Sadhukhan S., “Formability of Al-killed AISI 1040 Medium Carbon Steel for Cylindrical Cup Formation”, *ISIJ International*, 56(4): 610-618, (2016).
- [73] Kamikawa N., Morino H., “Quantitative Analysis of Load-Displacement Curves in Erichsen Cupping Test for Low Carbon Steel Sheet”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(11): 5023-5037, (2019)
- [74] Timurkutluk B., Toros S., Onbilgin S. and Korkmaz H. G., “Determination of formability characteristics of Crofer 22 APU sheets as interconnector for solid oxide fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31): 14638-14647, (2018)
- [75] Reddy M. R. N., Theja M. S. and Tilak M. G., “Modified Erichsen Cupping Test for Copper, Brass, Aluminium and Stainless Steel”, *The SIJ Transactions on Industrial, Financial & Business Management*, 01(02): 52-57, (2013)



- [76] Sener B. and Kayali E. S., "Effectiveness of Stamping Lubricants in Erichsen Test", *Key Engineering Materials*, 549: 325-332, (2013)
- [77] Ramadass R., Sambasivam S., Nagaraj V. V., "Formability Studies on Titanium Grade 2 Sheet Using Erichsen Cupping Test", *International Journal of Mechanical Engineering*, 6(3): 667-675, (2021)
- [78] Yoshimura H., Torikai S., Nishihara T., Nonishi T. and Inouchi N., "Application of wheat flour lubricants to the press-forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 125: 375-378, (2002)