

AL 5754-O SAC MALZEMENİN ŞEKİLLENDİRME SINIR GERİLME DİYAGRAMININ ELDE EDİLMESİ

Mevlüt TÜRKÖZ¹ (ORCID: 0000-0001-9692-5777)

Murat DİLMEÇ² (ORCID: 0000-0002-5345-9822)*

Hüseyin Selçuk HALKACI³ (ORCID: 0000-0001-5739-4862)

¹Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Konya

Geliş / Received: 25.05.2017

Kabul / Accepted: 24.01.2018

ÖZ

Sac şekillendirme proseslerinde, sacın istenen şekli alması bölgesel boyunlaşma ve yırtılma hasarları tarafından sınırlanır. Bu proseslerde malzeme davranışını tahmin etmek için bilgisayar modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin gerçek durumu temsil edebilmesi için malzeme parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu parametreler genellikle çekme deneyi ve şekillendirme sınırını belirten diyagramlar ile elde edilir. Şekillendirme sınırını belirten diyagramlar sınır birim şekil değiştirme değerlerini gösteren şekillendirme sınır diyagramı ve sınır gerilme değerlerini gösteren şekillendirme sınır gerilme diyagramıdır.

Şekillendirme sınır diyagramının hasar tahminini karmaşık ve birden fazla kademeli şekillendirme işlemlerinde doğru olarak tahmin edemediği, şekillendirme sınır gerilme diyagramının ise bu durumlarda da başarılı hasar tahminlerinde bulunduğu literatürde belirtilmektedir. Bu çalışmada Al 5754-O malzemeye ait şekillendirme sınır gerilme diyagramı hem teorik hem de sayısal yöntemle elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Şekillendirme sınır diyagramı, şekillendirme sınır gerilme diyagramı

CONSTRUCTION OF FORMING LIMIT STRESS DIAGRAM OF AA 5754-O SHEET MATERIAL

ABSTRACT

In sheet metal forming processes, local necking and fracture failures limit sheet metal form to desired shape. Computer models have been developed to estimate the material behavior in these processes. Material parameters are needed to represent the real forming processes. These parameters are generally obtained from tensile test and forming limit diagram. Diagrams that specify formability limit are forming limit diagram shows limit strains and forming limit stress diagram shows limit stresses.

In literature, it is remarked that while forming limit diagram cannot estimate the failures for complex and gradual forming processes, forming limit stress diagram can successfully.

Keywords: Forming limit diagram, forming limit stress diagram

1. GİRİŞ

Sac metaller şekillendirilirken malzemede yırtılma, bölgesel boyunlaşma ve buruşma gibi hasarlarla karşılaşmaktadır. Şekillendirme gerçekleştirilmeden önce bilgisayarda prosesi sonlu elemanlar yöntemi (FEM; Finite Element Method) ile modelleyerek ve analiz yaparak meydana gelebilecek hasarları ve geri yaylanmayı tahmin etmek ve önlemler almak mümkündür. Böylece parça üretiminde deneme yanılma sayısı en aza indirilerek zamandan ve parça üretim maliyetlerinden tasarruf sağlanabilir. Sonlu elemanlar (FE) programı ile

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 332 223 20 24; e-mail / e-posta: muratdilmec@konya.edu.tr

M. TÜRKÖZ, M. DİLMEÇ, H. S. HALKACI

analizlerin yapılabilmesi için programa malzemenin tanıtılması gerekir. Bunun için çekme deneyi ile elde edilen, akma eğrisine ait değerler FE programına girilerek parça üzerindeki her noktanın gerilme ve Birim Şekil Değiştirme (bşd) değeri bulunabilir. İş parçasında yırtılma veya boyunlaşmanın olup olmayacağını tahmin etmek için akma eğrisine ilave olarak malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetini gösteren grafiklerin de girilmesi gerekir.

Malzemelerin şekillendirilebilirliğini gösteren grafikler Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) ve Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramıdır (ŞSGD). ŞSD sac malzemelerde farklı asal bşd oranları için hasarın meydana geldiği minör bşd (ε_2) değerlerine karşılık gelen majör bşd'leri (ε_1) gösterir. Şekillendirilebilirliği belirlemede ve şekillendirme işleminin analizinde çokça kullanılan ŞSD'ler, şekillendirme işleminin başından sonuna kadar asal gerilmelerin oranının sabit olduğu orantılı yükleme durumunda, malzemelerin şekillendirilme sınırı hakkında doğru tahminler yapar [1]. bşd yolunun (minör bşd'nin majör bşd'ye oranı; $\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$) lineer olmadığı kompleks şekillendirme işlemlerinde (hidrolik şekillendirme, çok kademeli şekillendirme işlemleri, kenar bükme gibi) ŞSD geçerli değildir [2].

Son yıllarda ŞSGD'ler üzerinde, bşd yolundan bağımsız olduğu düşüncesiyle yoğun olarak çalışılmaktadır [3]. Malzemelerin şekillendirme sınırlarını belirlemede başka bir yöntem olan ŞSGD asal gerilmeler cinsinden formüle edilen bir hasar kriteridir [4]. ŞSGD, malzemenin pekleşmesi ve anizotropi durumu da dikkate alınarak Hill'in akma kriterindeki kabuller ile Levy-Mises akma kuralı kullanılarak hesaplanır. Yapılan çalışmalar ŞSGD'lerin karmaşık şekillendirme işlemlerinde şekillendirilebilirliği ŞSD'den daha iyi karakterize ettiğini göstermektedir [5].

ŞSGD'lerin hesaplanması için ŞSD'lerin elde edildiği Nakazima deneyinde, numunelerin yırtılma bölgesinin toplam deformasyon yolu bilinmelidir. Buradan gerilmeler Levy-Mises akma kuralına göre adım adım hesaplanmalıdır. Gerilmelerin hesaplanmasında başka bir yol FEM'dir. FEM ile ŞSD hasar kriteri kullanılarak hasar bölgesindeki gerilmeler hesaplanabilir.

Bu çalışmada, örnek bir uygulama olarak Al 5754-O malzemesine ait Nakazima deneyleri yapılarak elde edilen sınır bşd'lerin kullanılması ile ŞSGD'ler teorik ve sayısal olarak hesaplanıp karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramının Matematiksel Model ile Elde Edilmesi

Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramının (ŞSGD) elde edilebilmesi için malzemeye ait sınır bşd değerlerinin yani malzemeye ait Şekillendirme Sınır Eğrisinin (ŞSD) belirlenmesi gerekir. Bu nedenle çalışmada kullanılan Al 5754-O malzemeye ait ŞSD, yazarlardan birisi tarafından yapılan Türköz [6] çalışmasından alınmıştır ve bu eğri Şekil 1'de görülmektedir. Şekilde üç tekrarlı deneyler sonucunda elde edilen sınır bşd değerleri, bu değerler üzerinden geçen Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) ve tüm sınır bşd değerlerinin altından geçen güvenli ŞSE görülmektedir. ŞSGD'nin oluşturulmasında ŞSE'yi oluşturan sınır bşd değerleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, Al 5754-O malzemeye ait ŞSGD, iki farklı yöntemle elde edilmiştir. Bunlardan birincisinde, ŞSGD'ler, Arrieux ve ark. [7] ve Arrieux [8] çalışmalarında hem izotropik hem de anizotropik malzemeler için verdiği ŞSGD hesaplanma yöntemine göre elde edilmiştir. Başlangıç bşd yolu için efektif bşd artışı Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{(4/3)(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2)} \quad (1)$$

Efektif bşd artışı kullanılarak Eşitlik 2'de gösterilen pekleşme kuralı ile efektif gerilme hesaplanmıştır.

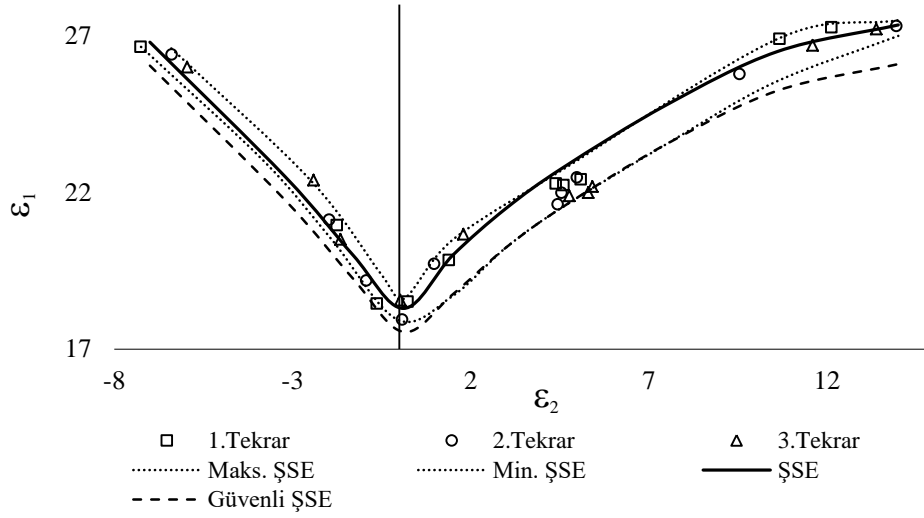
$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad (2)$$

Efektif bşd artışı ve efektif akma gerilmesi Prantl-Reuss denklemlerinde kullanılarak bunlara karşılık gelen gerilme artışları izotropik malzeme davranışı kabul edilerek Eşitlik 3 ve 4 ile hesap edilmiştir.

$$d\sigma_1 = \frac{4}{3}(d\varepsilon_1 + 0.5d\varepsilon_2) \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \quad (3)$$

$$d\sigma_2 = \frac{4}{3}(d\varepsilon_2 + 0.5d\varepsilon_1) \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \quad (4)$$

AL 5754-O SAC MALZEMENİN ŞEKİLLENDİRME SINIR GERİLME DİYAGRAMININ ELDE EDİLMESİ



Şekil 1. Al 5754-O Alaşımli alüminyum saca ait, hadde doğrultusunda elde edilen ŞSD [6]

ŞSGD’ler iki ve ya daha fazla kademeli şekillendirme işlemleri sonucunda elde ediliyorsa Eşitlik 3 ve 4 her bir kademe için tekrarlanır. ŞSGD’yi oluşturan σ_1 ve σ_2 gerilmelerini bulabilmek için toplam efektif bşd’nin hesaplanması gerekir. Toplam efektif bşd, Eşitlik 5 kullanılarak bşd yolunun integre edilmesi ile hesaplanır.

$$\bar{\epsilon} = \int_0^{\bar{\epsilon}} d\bar{\epsilon} \tag{5}$$

bşd yolu lineer olduğu zaman efektif bşd basitçe toplanabilir [9].

Anizotropik sac malzemelerde de benzer hesaplamalar kullanılabilir ancak Prantl-Reuss Eşitlikleri Hill’in anizotropik akma kuralı kullanılarak tekrar formüle edilmelidir. Hill’in anizotropik akma kuralı Eşitlik 3 ve 4’e uygulanırsa Eşitlik 6 ve 7 elde edilir.

$$d\sigma_1 = \left(\frac{d\epsilon_2 FH + d\epsilon_1 H^2 + d\epsilon_1 FG + d\epsilon_1 GH + d\epsilon_1 FH + d\epsilon_2 H^2}{FG + FH + GH} \right) \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} \tag{6}$$

$$d\sigma_2 = \left(\frac{d\epsilon_1 FH + d\epsilon_1 H^2 + d\epsilon_2 F^2 + 2d\epsilon_2 FH + d\epsilon_2 H^2}{FG + FH + GH} \right) \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} \tag{7}$$

Burada F , G ve H katsayıları anizotropik sac malzemeler için katsayılarıdır. Bu değerlerin bulunabilmesi için malzemenin hadde doğrultusuyla 0° , 45° ve 90° doğrultularda çekme deneylerinin yapıp akma mukavemetleri hesaplanır. F , G ve H değerleri Eşitlik 8’den elde edilir.

$$X^2 = \frac{1}{G+H} , \quad Y^2 = \frac{1}{H+F} , \quad Z^2 = \frac{1}{F+G} \tag{8}$$

Burada X , Y ve Z bahsedilen doğrultulardaki akma mukavemeti değerlerini gösterir.

2.2. Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramının Analiz ile Elde Edilmesi

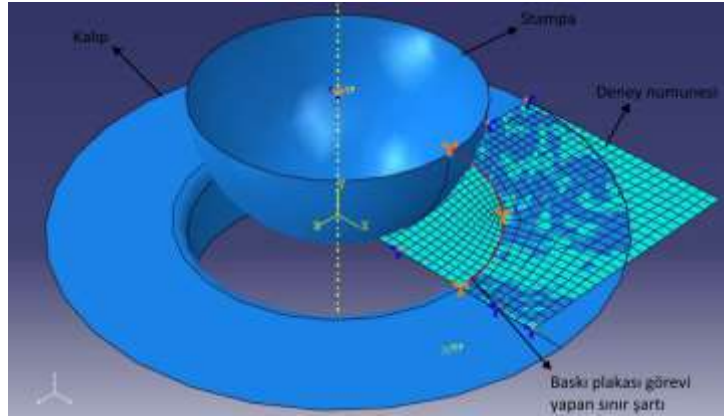
ŞSGD’leri elde etmenin başka bir yolu da ŞSD’nin elde edildiği Nakazima deneyinin FEM ile analizini yapmaktır. Uthaisangsuk ve ark. [5] farklı malzemeler için ŞSGD’leri bu yolla elde etmişlerdir. Bu yöntemde analiz sonucunda yırtılmanın olduğu kritik elemanlar sınır bşd değerlerine ulaştığı anda, bu elemanlardaki maksimum gerilme değerleri sınır gerilme olarak alınmıştır.

Bu çalışmada, ŞSGD’nin analiz yapılarak elde edilmesinde Nakazima deneyinde kullanılan kalıplar ve deney numuneleri Şekil-2’de görüldüğü gibi 3 boyutlu kabuk olarak Abaqus sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Bu modellemede kalıp ve stampa analitik rijit, deney numuneleri de deforme olabilir kabuk olarak modellenmiştir. Şekil 2’de, 8 farklı genişlikteki deney numunelerinden biri olan 175 mm genişliğindeki deney numunesi görülmektedir. Deney numunesi, eleman sayısını azaltarak analiz süresini kısaltmak amacıyla çeyrek olarak modellenmiştir. Nakazima deneylerinde, deney numunesi baskı plakası üzerinde bulunan

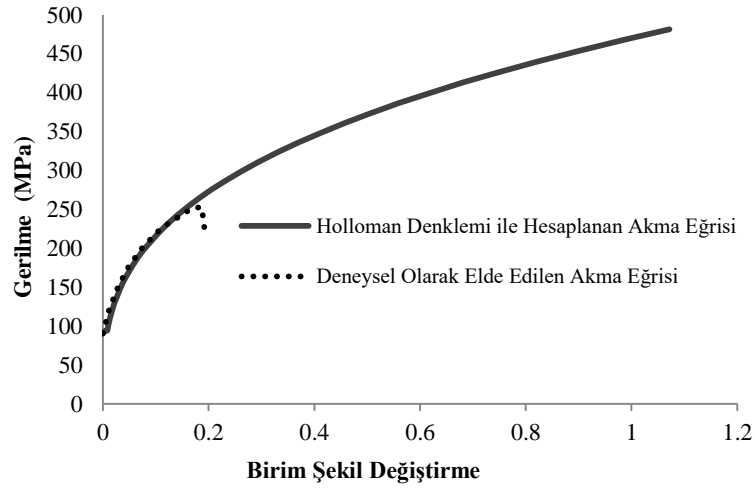
M. TÜRKÖZ, M. DİLMEÇ, H. S. HALKACI

süzdürme çubuğu ile şekillendirilme sırasında kalıp içerisinde akmayacak şekilde sabit olarak tutulmaktadır. Bu nedenle, analizde baskı plakasını modellemek yerine şekilde görülen çizgi boyunca ankastre sınır şartı uygulanmıştır. Analiz sonucunda her geometri için elde edilen majör ve minör bşd'ler ile deneylerden elde edilen sınır bşd'ler yaklaşık eşit olacak şekilde analizler yapılmıştır.

Al 5754-O malzemenin özellikleri, Türköz'ün [6] çalışmasından alınmıştır. Hadde doğrultusundaki akma eğrisi ile maksimum % 26 uzamaya kadar olan değerler elde edilmiştir. Bu değerler ile analiz yapıldığında, % 26'dan daha fazla uzama gösteren bölgelerde de gerilme değerleri yine bu uzama değerine karşılık gelen değerlerde çıkmıştır. Bunun için akma eğrisi pekleşme kuralı kullanılarak % 100 uzama değerine kadar tekrar hesaplanmış ve deneysel değerler ile uyumlu olacak şekilde düzeltilmiştir. Analiz programına Şekil 3'te görülen bu pekleşme kuralından elde edilen düzeltilmiş değerler girilmiştir. Bu olay iki eksenli gerilme durumunun analizlerinde tek eksenli çekme deneyinden elde edilen değerlerin kullanılmasının uygun olmadığını göstermektedir.



Şekil 2. Nakazima deneyinin modellenmesi



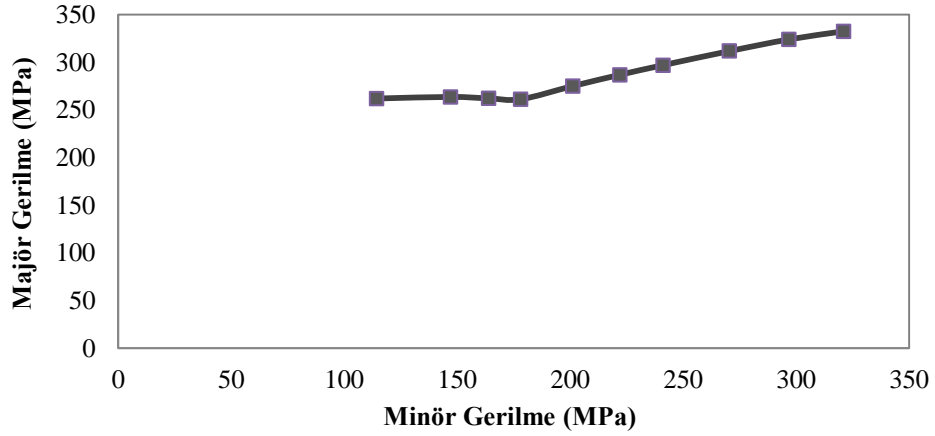
Şekil 3. Al 5754-O malzemenin akma eğrileri

Analiz ve deneylerden elde edilen majör ve minör bşd değerlerinin yaklaşık eşit olması için analizlerde sürtünme katsayısı ve stampa deplasmanı parametreleri ayarlanmıştır. Sürtünme katsayısının değiştirilmesiyle minör bşd'ler, stampa deplasmanının ayarlanması ile de majör bşd'ler, deneylerden elde edilen sınır bşd'ler ile eşitlenmeye çalışılmıştır.

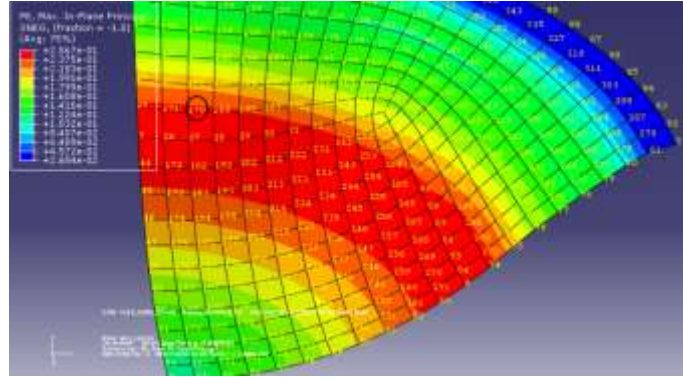
Analizde dört düğüm noktalı kabuk elemanlar kullanılmıştır. Eleman ve düğüm sayısı sırasıyla deney numunelerinin genişliğine göre 115-607 ve 144-657 arasında değişmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramının matematiksel model ile elde edilmiş eğrisi Şekil 4’te verilmiştir. Analiz sonucunda sınır gerilme değerinin bulunması, numune üzerinde herhangi bir elemanın majör ve minör bşd’si deneyden elde edilen sınır majör ve minör bşd değerine yaklaşık eşit elde edilmişse bu elemanın majör ve minör gerilme değeri bulunarak belirlenmiştir. Örneğin Şekil 5’te 200 mm genişliğindeki numunenin analizi sonucunda bulunan majör bşd dağılımı görülmektedir. Bu numuneden deney sonucunda % 24.8 majör ve % 7.5 minör sınır bşd değerleri elde edilmiştir. Analiz sonucunda 170 numaralı düğümde % 24.6 majör, % 7.66 minör bşd değeri elde edilmiştir. Bu düğümdeki 367 MPa majör ve 252 MPa minör gerilme değeri bu genişlik için sınır gerilme değeri olarak alınmıştır.



Şekil 4. Matematiksel model ile elde edilen ŞSGD

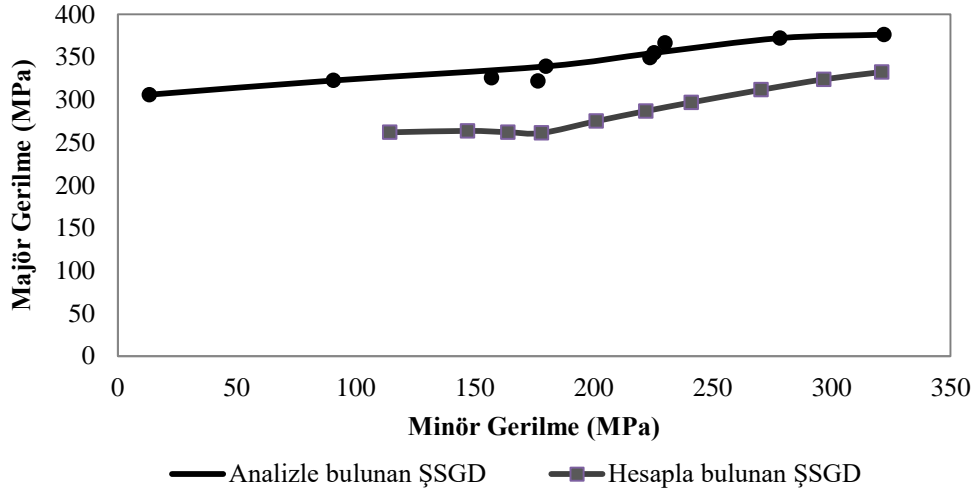


Şekil 5. 200 mm genişliğindeki numunenin şekillendirilme analizinden elde edilen majör bşd dağılımı

Analizler sonucu, 8 farklı genişlikteki numunenin ve 200 mm genişliğindeki numunenin farklı sürtünme katsayılarında analizinin yapılması sonucunda Al 5754-O malzemeye ait sınır gerilmeler bulunmuştur.

Analiz ve matematiksel model yoluyla elde edilen ŞSGD’ler Şekil 6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Eğrilerin karşılaştırılması sonucunda iki diyagram arasında ortalama 62 MPa değerinde gerilme farkı olduğu görülmektedir. Bu da ortalama % 18’lik bir farka karşılık etmektedir. Bu değerden analiz ve matematiksel modelden elde edilen diyagramların birbiriyle uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

M. TÜRKÖZ, M. DİLMEÇ, H. S. HALKACI



Şekil 6. Analiz ve matematiksel model ile elde edilen ŞSGD'ler

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada analiz programlarında malzemenin şekillendirilebilme sınırlarını daha iyi tanımlayarak, kalıplama performansını artırmak amacıyla, Al 5754-O malzemenin Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramı (ŞSGD) elde edilmiştir. Bu çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Şekillendirme sırasında bsd yolu değişen malzemeler için deformasyon sınırının doğru bir şekilde tahmin edilemediği, bu nedenle de karmaşık şekillendirme işlemlerinin analizinde ŞSD'lerin kullanılmayacağı iddia edilmektedir.
- Yapılan çalışmalarda ŞSGD'lerin karmaşık şekillendirme işlemlerinde şekillendirilebilirliği ŞSD'den daha iyi karakterize ettiği gösterilmiştir.
- Al 5754-O malzemenin ŞSGD'si hem teorik formüller ile hem de analiz programı yardımıyla bulunarak karşılaştırılmıştır. Benzer karakteristikler gösteren iki grafik arasında ortalama % 18 fark bulunmuştur. Dolayısıyla grafiklerin birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın devamında, durum çalışması yapılarak ŞSD'nin ve ŞSGD'nin hasar tahminindeki geçerlilikleri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] STOUGHTON T.B., "A general forming limit criterion for sheet metal forming", International Journal of Mechanical Sciences 42: 1-27, 2000.
- [2] LAUKONIS J.V., GHOSH A.K., "Effects of Strain Path Changes on the Formability of Sheet Metals", Metallurgical Transactions A: 1849-1856, 1978.
- [3] CHEN M.H., GAO L., ZUO D.W., WANG M., "Application of the forming limit stress diagram to forming limit prediction for the multi-step forming of auto panels", Journal of Materials Processing Technology 187-188: 173-177, 2007.
- [4] UTHAISANGSUK V., PRAHL U., MÜNSTERMANN S., BLECK W., "Experimental and numerical failure criterion for formability prediction in sheet metal forming", Computational Materials Science 43: 43-50, 2008.
- [5] UTHAISANGSUK V., PRAHL U., BLECK W., "Stress based failure criterion for formability characterization of metastable steels", Computational Materials Science 39: 43-48, 2007.
- [6] TÜRKÖZ M., "Al 2024 ve Al 5754 Alaşımli alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması", Selçuk Üniversitesi, Konya, 2009.
- [7] ARRIEUX R, BEDRIN C, BOIVIN M., "Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic metal sheets", Proceedings of the 12th Biennial Congress IDDRG, 61-71, 1982.

AL 5754-O SAC MALZEMENİN ŞEKİLLENDİRME SINIR GERİLME DİYAGRAMININ ELDE EDİLMESİ

- [8] ARRIEUX R., “Determination and use of the forming limit stress diagrams in sheet metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 53: 47-56, 1995.
- [9] VALETTA D.A., “In-Plane plane strain testing of sheet materials for multi-stage processes”, M.S. Thesis Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 2005.