

## FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLME SINIR DİYAGRAMININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Süleyman KILIÇ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-1681-9403)\*

İlyas KACAR<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-5887-8807)

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik -Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye

<sup>2</sup> Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 22.10.2018

Kabul / Accepted: 25.12.2018

### ÖZ

Sac metal şekillendirme endüstrisinde önemli bir parametre olan şekillendirilebilirlik ve şekillendirme sınır diyagramı incelenmiştir. Seri üretime başlamadan önce bir dizi deneyler yapılarak malzemenin istenilen şekli alıp alamayacağı, kusurların oluşup oluşmayacağı, kalıpların veya modelin hangi bölgesinin riskli olduğu gibi durumlar detaylı olarak araştırılır. Bu çalışmada kullanılan eğriye de şekillendirilebilirlik sınır diyagramı denilmektedir. Bu eğrinin deneysel olarak elde edilmesi çok zahmetli ve oldukça maliyetli bir süreçtir. Bu çalışma kapsamında da havacılık ve uzay sanayi için önemli bir malzeme olan 7075 alüminyum alaşımının farklı ısıl işlem uygulanmış durumları için şekillendirilebilirlik sınır diyagramı eğrileri deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. 7075 alüminyum alaşımı yaşlandırmanın etkisini en çok gördüğü alaşımlardandır. Alaşımın en mukavemetli hali olan T6 temperinde, malzemenin şekillendirilebilirliği oldukça kötüdür. Bu nedenle, alaşımı önce solüsyona alarak şekil verme işlemi yapıp daha sonra yapay yaşlandırma uygulandığında hem şekil verme kolaylaşmakta hem de malzemenin mukavemetinin artması sağlanmış olmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** AA7075-T6, Şekillendirme sınır diyagramı, Yaşlandırma

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FORMING LIMIT DIAGRAMS OF AA7075 ALLOY HAVING DIFFERENT HEAT TREATMENTS

### ABSTRACT

Formability and forming limit diagrams are important parameters in sheet metal forming industry, have been investigated. Before beginning mass production, a series of experiments on sheet specimens are carried out to determine whether the material may be formed to desired shape or whether defects will occur, which areas on blank will be in danger. One method is to use formability curves called the forming limit diagrams. The experimental studies to obtain these curves include a troublesome and costly process. In this study, forming limit curves are determined experimentally for different heat treatment of 7075 aluminum alloy which is an important material for aerospace industry. 7075 aluminum alloy is one of the alloys that heat treatment is the most effective method on their mechanical properties. In the T6 tempered 7075 alloy, which is the most strengthful form of the alloy, the formability of the material is quite poor. For this reason, solution heat treatment was made firstly to the alloy and then artificial aging is applied. Deformation is applied between these two processes. Eventually, the blank is deformed easier and the strength of the alloy is increased.

**Keywords:** AA7075-T6, Forming limit diagram, Aging

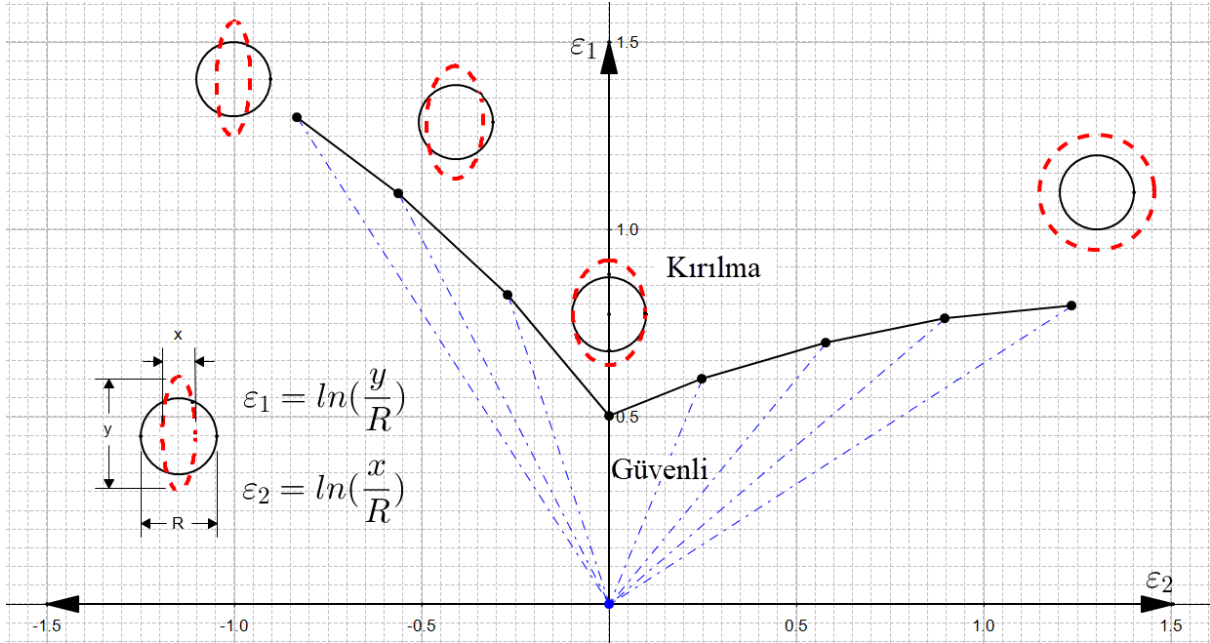
\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.:0386 280 3812; e-mail / e-posta: suleymankilic@ahievran.edu.tr

## FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLENDİRİLEBİLME SINIR DİYAGRAMININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

### 1. GİRİŞ

7075 alüminyum alaşımı havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmakta olan önemli bir alaşım serisidir. Düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti sayesinde hafifletme çalışmalarında tercih edilmektedir. Ayrıca yaşlandırma işlemi uygulanabilmekte olup, yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisinin en fazla görülebildiği bir Al alaşım serisidir.

Şekillendirilebilme sınır diyagramları (SSD, FLD), parçaya farklı yük kombinasyonları uygulandığında yapıda çatlama/kırışma vb. sorunlar oluşmadan güvenli/sorunsuz bir üretim için uygulanması gereken deformasyon kombinasyonunun sınır değerlerini vermektedir. Şekil 1.'de şematik olarak bir SSD eğrisi verilmiştir. Dikey eksen majör şekil değişimini ifade ederken yatay eksen ise minör şekil değişimini ifade etmektedir. Her imalat sürecinde olduğu gibi bu eğrinin değeri, malzemenin mekanik özelliklerine, şekillendirilebilme hızına, baskı plakası kuvvetine, yağlayıcı vb. etkilere göre değişiklik göstermektedir [1]. Sac metal şekillendirilebilirliği hakkında çok önemli olan bu eğrinin deneysel olarak elde edilmesi oldukça pahalı ve zahmetli bir işlemdir. Çünkü eğriyi elde edebilmek için sol uçtan itibaren tek eksenli çekme deneyi ile başlayıp, sağ uca da iki eksenli gerdirme işlemine kadar aradaki her nokta için ayrı bir şekil değiştirme kombinasyonu uygulamak gerekmektedir.



Şekil 1. Şematik bir SSD eğrisi

Kumlu ve arkadaşları [2], DP600 çeliği için deneysel olarak elde edilen Şekillendirme Sınır Eğrisi (SSE) sonlu elemanlar analiz programı sonucu elde edilen SSD eğrisiyle karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar analiz programlarında SSD tahmini için Keeler- Brazier modeli kullanmışlardır. Model kullanılarak elde edilen eğrinin değerleri, deneysel eğriye göre daha büyük çıkmıştır. Bu farkın DP600 ile HSLA çeliğinde kabul edilebilir tolerans değerlerinde olmasına rağmen AA2021, QP980 ve DP980 malzemelerinde ise toleransı aştığı ve hasar tahmininde başarısız olduğu görülmüştür.

Şekillendirme sınır gerilme diyagramları (SSGD, FLSD)'da malzemenin şekillendirilebilirliği hakkında bilgi veren diğer bir hasar kriteridir [3]. Levy-Mises akma kriterinde ise hesaplama için malzemenin pekleşme ve anizotropi gibi özellikleri kullanılmaktadır [4]. Türköz ve arkadaşları da [4], şekillendirme sınır diyagramı ile şekillendirme sınır gerilme diyagramlarını 5754-O alüminyum alaşımında incelemişlerdir. Karmaşık şekillendirme işlemlerinde hasar bölgesi sınırını tanımlamada SSGD'lerin SSD'den daha iyi olduğunu ve karmaşık parçalarda SSD'nin kullanılamayacağını vurgulamışlardır.

Oda sıcaklığında şekil verilebilirliği zor olan malzemelere sıcak şekillendirme uygulandığında şekillendirilebilme kabiliyeti artmaktadır. 7075-T6 alüminyum alaşımında oda sıcaklığından 475 °C ye kadar olan sıcaklıklarda SSD değişiminin incelendiği bir çalışmada sıcaklığın artmasının SSD eğrisinin sınır değerlerini artırdığı görülmüştür [5]. Çünkü malzemenin akma mukavemeti çokça düşmekte ve uzama miktarı da oldukça artmaktadır.

S. KILIÇ, İ. KACAR

ŞSD eğrileri elde edilirken kullanıcı hatalarından (okuma, grid vb.) veya malzemenin kırılmasından sonra meydana gelen değişikliklerden dolayı ŞSD eğrisi yanlış oluşturulabilmektedir. Bu kapsamda Koçar ve arkadaşları [6], tersine mühendislik yaklaşımı kullanarak daha az hata ile ŞSD eğrisi elde edilebileceğini göstermişlerdir.

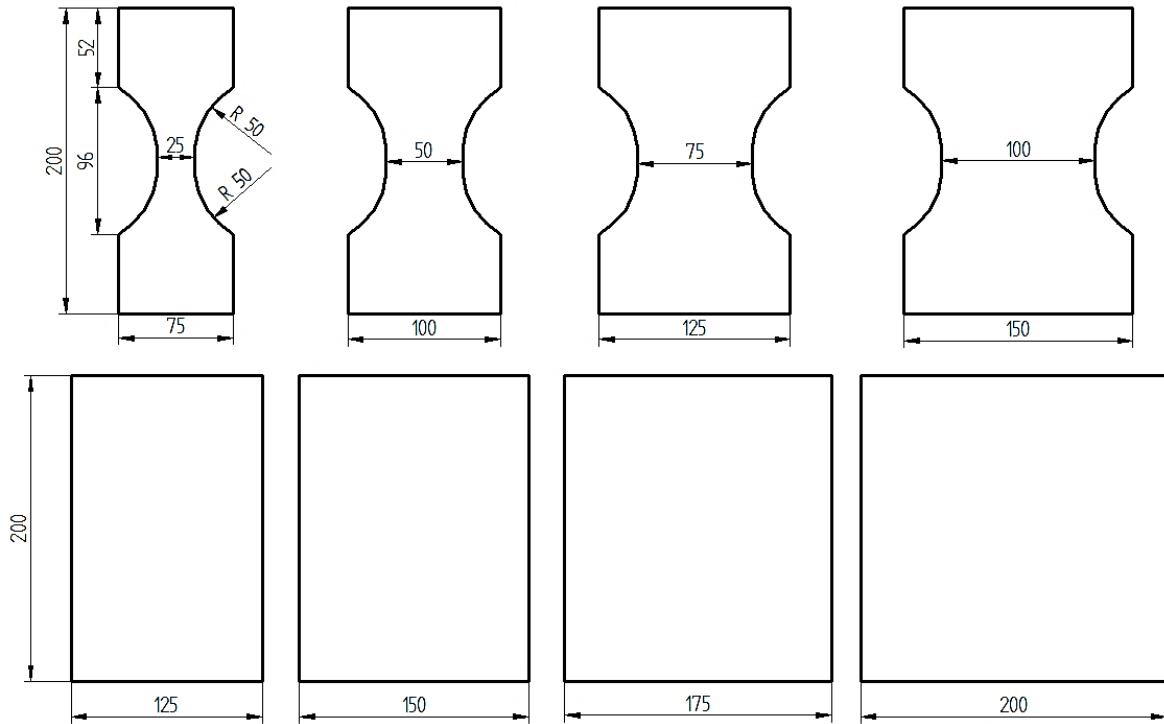
Uysal ve Öztürk [7], HSLA300 çeliğinde deneysel olarak ŞSD eğrisi incelemiştir. Yaptıkları çalışmada farklı ölçüm yöntemlerinin (kırılma arkası, kırılma bölgesi ve boyun verme bölgesi) etkisini incelemişler ve boyun verme bölgesinin ölçümde kullanılması ile elde edilen ŞSD eğrisinin diğerlerinden üstte olduğunu göstermişlerdir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında 2 mm kalınlığındaki levha şekilli numuneler kullanılarak;

- 7075-T6 temperine sahip alüminyum alaşımının,
- 500 °C de 2 saat boyunca solüsyona alınıp (çözünmeye bırakılıp) daha sonra oda sıcaklığında su verilmiş 7075-T6 alaşımının

şekillendirilebilme sınır diyagramları incelenmiştir. Şekillendirilebilme sınır diyagramının çizilebilmesi için, diyagram üzerindeki her bir noktayı oluşturmak üzere, sac levha Şekil 2’de verilen ölçülerde su jeti yardımıyla kesilmiştir. Şekilden görüleceği üzere numune geometrileri farklıdır. Böylece, aynı deney presinde, her farklı geometri üzerinde farklı sınır/yük şartları ve dolayısıyla da farklı deformasyon kombinasyonları elde edilmiştir. Her bir deney iki tekrarlı olarak yapılmıştır.



Şekil 2. Şekillendirme sınır diyagramı için kullanılan numune ölçüleri [8].

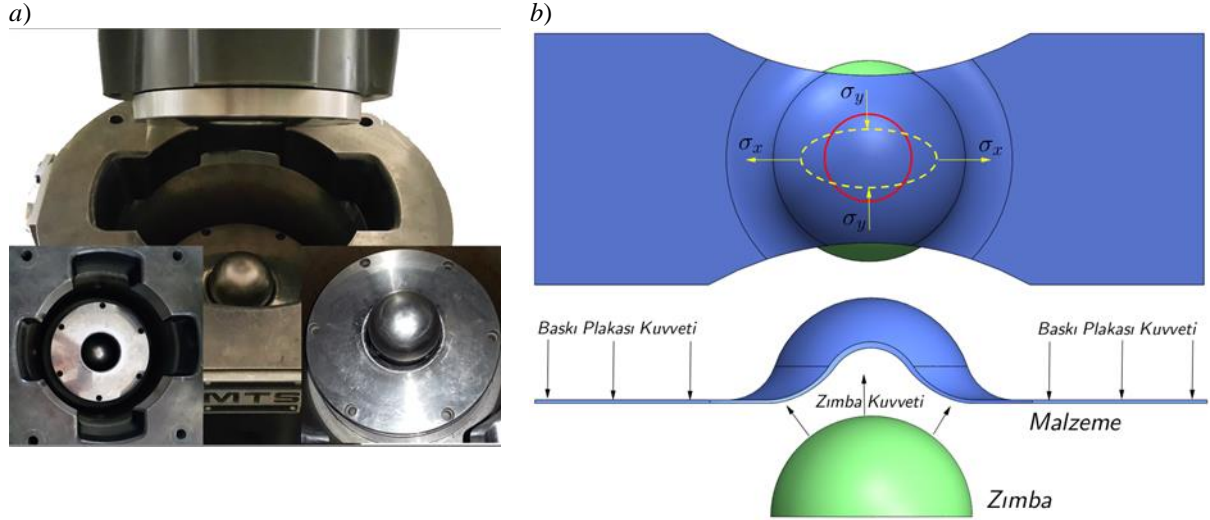
Bu çalışma kapsamındaki baskı plakası kuvveti de deneme yanılma yoluyla belirlenmiş ve en uygun değer olarak AA7075, T6 temperli (çözünmemiş) numuneler için 10 kN, 500 °C de 2 saat boyunca çözünmeye bırakılıp daha sonra oda sıcaklığında su verilmiş numuneler için 30 kN olarak seçilmiştir. Deneyler Şekil 3’te gösterilen MTS model şekillendirme presinde, 10 mm/dak zımba hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak bir nakazima test düzeneğinde kalıp/zımba’nın yanı sıra baskı plakası ve süzdürme çubuğu da kullanılmaktadır. Zımba, taslak parçasını kalıp boşluğuna iterken, baskı plakaları ve süzdürme çubuğu ise sac malzemeye belli oranda sıkıştırma kuvveti uygulamaktadır. Bu durum derin çekme esnasında sac malzemesinin çepçevre istenen değerde gergin olarak tutulabilmesine yol açmakta, katlanma hatalarını ortadan kaldırmaktadır. Fakat baskı plakası kuvveti gereğinden daha fazla verilirse de, yırtılma hataları ortaya

**FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLME SINIR DİYAGRAMININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

çıkılmaktadır. Numuneler çok gevrek olduğundan dolayı her iki tipte de pot çemberi kullanılmamış, baskı plakaları yeterli olmuştur.

Kullandığımız deney presinin baskı plakaları tek parça ve çepeçevre olduğundan dolayı deney esnasında eğer 200x200mm kare şekilli numune kullanılıyorsa numune üzerinde iki eksenli gerilme oluşurken, kenarı gittikçe daha ince olan numunelerde, gittikçe tek eksenli yükleme haline dönen bir yükleme kombinasyonu elde edilmiş olmaktadır. Dikkat edilirse aynı deney düzeneğinde farklı geometriye sahip numuneler kullanılarak, numuneler üzerinde farklı sınır/yük şartları ve dolayısıyla da farklı gerilme kombinasyonları elde edilmiştir.



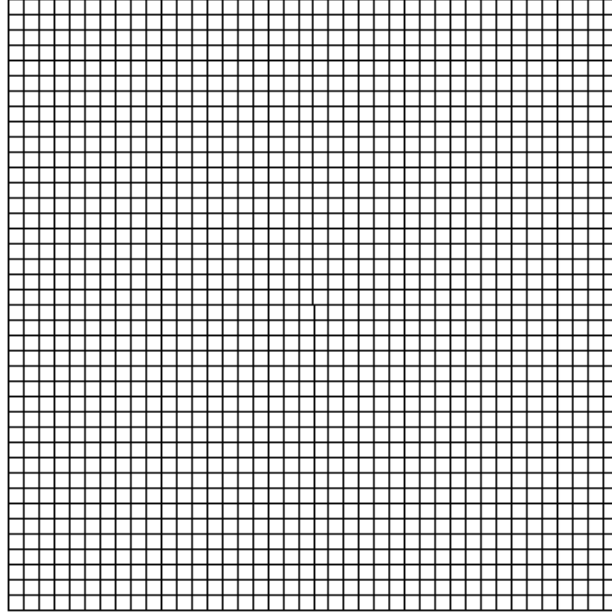
**Şekil 3.** a) MTS şekillendirme presi, b) Derin çekme işlemi elemanlarının şematik gösterimi

Şekillendirme sonrası deformasyonların görüntü işleme teknikleri ile belirlenebilmesi için, deney öncesinde serigrafî (ipek baskı) yöntemi kullanılarak numunelerin yüzeylerine 2,5x2,5 mm'lik kare motifler işlenmiştir. Deformasyona uğramış bölgelerdeki kare motiflerin ölçülmesinde ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment) [9] yazılımının deformasyon ölçme teknolojisi kullanılmıştır. Şekil 4'de deformasyon öncesi ve sonrası gridlerdeki değişim şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 5'de ise referans küp yardımıyla grid ölçümünün nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Burada referans küp hareket ettirilmeden, küpün iki ve üç yüzeyini göreceğ şekilde iki adet fotoğraf çekilerek şekil değiştirme değerleri elde edilmektedir. Kullanılacak iki fotoğrafta da aynı grid elemanları seçilmek zorundadır.

Bu işlemden dikkat edilecek önemli hususlardan birisi de, derin çekme koşullarının uygun olması halinde, hasar oluşumlarının kubbenin üst kısımlarında beklenmesidir (Şekil 6). Bu da optimum baskı plakası kuvvetinin uygulanması ile ancak elde edilebilmektedir. Eğer baskı plakası kuvveti gereğinden daha fazla verilirse hasar, numunenin kubbesinde değil alt kısımlarda meydana geleceğinden doğru bir ŞSD eğrisi elde edilemez. Ayrıca baskı plakası kuvvetinin gereğinden daha az olması durumunda da kırışma/katlanma türü hatalar meydana gelebilmektedir.

S. KILIÇ, İ. KACAR

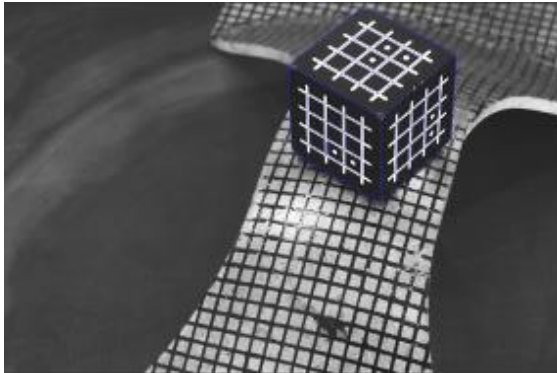
a)



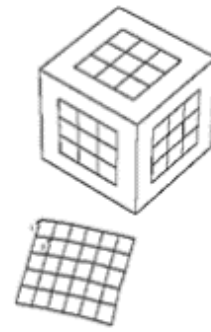
b)



Şekil 4. a) Deformasyon öncesi 2,5x2,5 mm kare gridler (üst görünüm), b) iki eksenli gerdirme işlemi neticesinde deformasyona uğramış gridler (yan görünüm)



(a)



(b)

Şekil 5. (a) Deformasyona uğramış numunenin referans küp ile çekilen fotoğrafı ve (b) deforme olmuş gridlerin incelenecek kısmının görüntü işleme ile ayırtılması

*FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLME SINIR DİYAGRAMININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ*



**Şekil 6.** Muhtelif hasar oluşum yerleri, (a) ve (b) AA7075, 500 °C de 2 saat çözünmüş (c) AA7075, T6 temperli

Numune üzerinde çekme gerilmelerinin en aktif olduğu en ince kenarlı numunelerde kırılma yüzeyleri incelenmiş olup fotoğrafları Şekil 7 de verilmiştir. T6 temperli AA7075 numunenin yüksek derecede gevrek hasara uğradığı, 500 °C de 2 saat çözünmüş-su verilmiş numunenin ise nispeten daha sünek davrandığı görülmektedir zira yüklem eksenine 45° açıda ve daha lifli kırılma yüzeylerine sahiptir.



(a) AA7075, 500 °C de 2 saat çözünmüş numune kırılma yüzeyi yandan ve üstten görünüm



(b) AA7075, 500 °C de 2 saat çözünmüş numune kırılma yüzeyinin lifli ve taneli görünümü.



(c) AA7075-T6 numunesinin kırılma yüzeyi yandan ve üstten görünüm



(d) AA7075-T6 numunesinin kırılma yüzeyinin daha çok taneli görünümü.

**Şekil 7.** Kırılma yüzeyi fotoğrafları

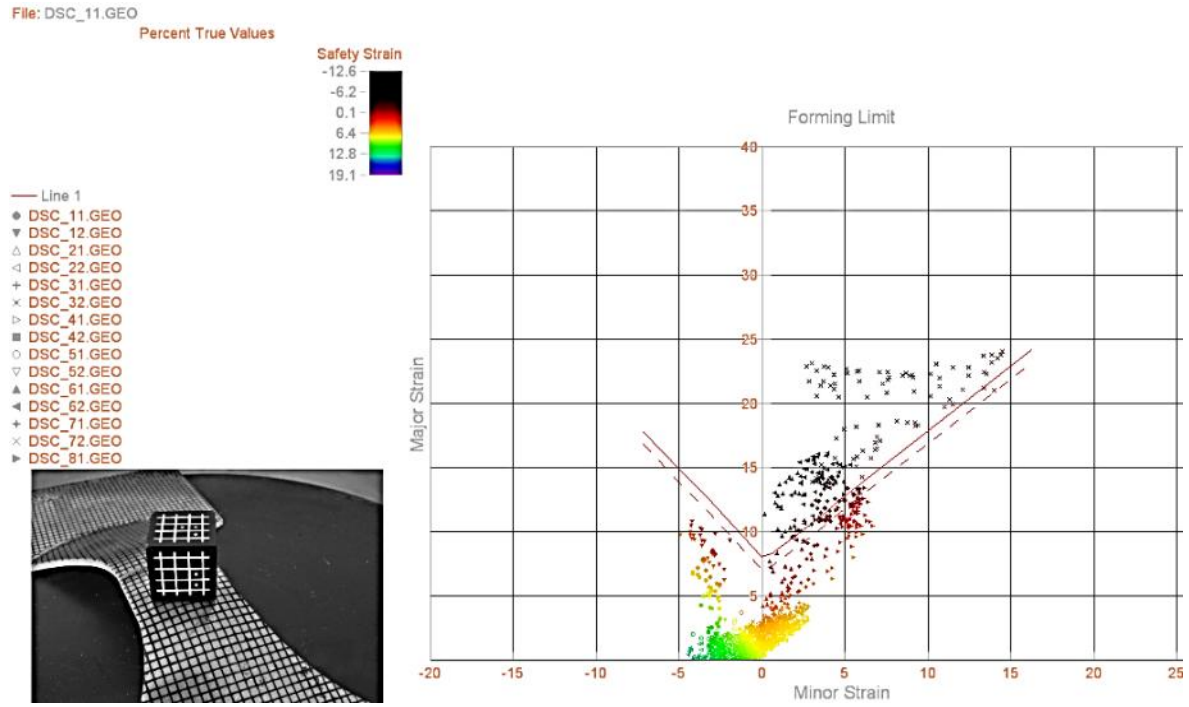
10 kg ağırlık ile 10 saniye süresince yapılan Vickers sertlik ölçümleri neticesinde 500 °C de 2 saat çözünmüş, su verilmiş numunenin sertlik değeri 155 HV ve AA7075-T6 numunesininki ise 185 HV olarak bulunmuştur. Gevrek kırılmanın gözlemlendiği numune, sertliğin yüksek olduğu numunedir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

8 farklı numuneden oluşan ŞSD seti, deformasyona uğratıldıktan sonra bir yüksek çözünürlüklü kamera yardımıyla fotoğraflanmaktadır. Daha sonra ASAME programı yardımıyla her numunenin ikişer fotoğrafı işlenmekte ve böylece her numuneden ŞSD diyagramında bir nokta elde edilmektedir. 8 farklı numuneden çekilen fotoğraflar işlenerek değişik bölgelerde farklı noktalar elde edilmiştir. Daha sonra kırılma/hasar oluşum bölgeleri değerlendirilerek ŞSD eğrisi Şekil 8’ deki gibi elde edilmiştir.

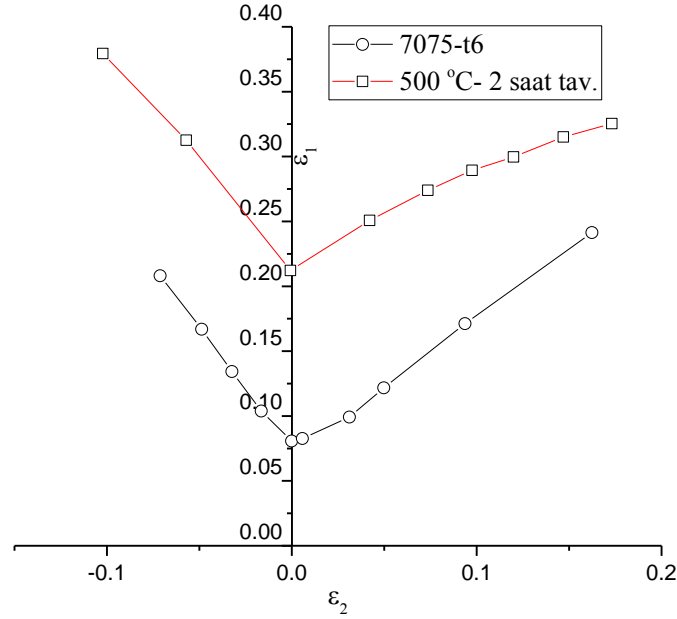
Şekil 9’da deneysel olarak elde edilen ŞSD eğrileri görülmektedir. T6 temperi bu malzeme için en yüksek mukavemet değerine sahip bir alaşımdır. Bu yüzden şekillendirilebilirliği çok düşüktür. Fakat 500 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle solüsyona alınıp oda sıcaklığında su verilen numune daha düşük bir mukavemet sahip olduğundan ŞSD eğrisi daha yukarıdadır. Dolayısıyla T6 olarak zor şekil verilen bir parçaya solüsyona alma işlemi uygulanıp şekil verilirse daha kolay şekillendirilebilme sağlanacaktır. Aynı zamanda parça şekillendirildikten sonra yaşlandırma işlemi uygulandığında da parçanın mukavemeti artmış olacaktır. Bu işlem genelde üretilen parçaların boya fırınlanması esnasında kolaylıkla kendiliğinden oluşmaktadır. Bu yüzden boya fırınlanmasının en çok uygulandığı otomotiv, havacılık sektörlerinde kullanım alanı bulmaktadır.

Elde ettiğimiz ŞSD eğrisi, literatürde yer alan çalışmalar ile de benzer sonuçlar göstermektedir. Davies ve Rohatgi [10] nin yaptıkları proje çalışmasında 7075-T6 ve W temperindeki (480 °C sıcaklıkta 30 dakika solüsyona alma ve 1-6 gün doğal yaşlandırma) alüminyum alaşımının ŞSD eğri değişimleri incelenmiştir. T6 temperi için bulunan ŞSD ile bu çalışma kapsamında bulunan ŞSD eğrileri yaklaşık olarak aynıdır. W temperinin ŞSD eğrisinin daha yukarıda olduğu dolayısıyla şekillendirilebilirliğinin daha iyi olduğu gösterilmiştir.



Şekil 8. Farklı noktalardan geçen ŞSD eğrisi

*FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ŞEKİLENDİRİLEBİLME SINIR DİYAGRAMININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ*



Şekil 9. Deneysel olarak elde edilen ŞSD eğrileri

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 7075 serisi alüminyum alaşımında şekillendirilebilme kabiliyeti incelenmiştir. Bu seri aynı zamanda yaşlandırma işlemi uygulanabilen ve yaşlandırmanın mekanik özelliklere etkisinin en fazla olduğu alaşım serisidir. En yüksek mukavemete sahip T6 temperi ile solüsyona alınmış malzemenin ŞSD eğrileri deneysel olarak elde edilmiştir. T6 olarak şekil verilmesi zor olan parçaların solüsyona alınarak daha kolay şekil verilebileceği görülmüştür. Üretilen parçaların boyanması işleminden sonra boya fırınlanması işlemi (120-200 °C sıcaklık ve 10-30 dakika boyunca) yapılmaktadır. Burada ayrıca yaşlandırma işlemi yapmayarak boya fırınlama sürecinde şekillendirilmiş parçanın istenilen mukavemet seviyesine çıkarılacağı da söylenebilmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: **MMF.A4.18.005**. (This work was supported by Kırşehir Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: **MMF.A4.18.005**.)

#### KAYNAKLAR

- [1] KIM S.B., HUH H., BOK H.H., MOON M.B., "Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming", Journal of Materials Processing Technology, 211, 851-862, 2011.
- [2] KUMLU C., ESENER E., FIRAT M., "Şekillendirme sınır eğrisinin teorik model ile tahmin performansının değerlendirilmesi", 9th International Automotive Technologies Congress (OTEKON 2018), 269-276. Bursa, Türkiye, 2018.
- [3] UTHAISANGSUK V., PRAHL U., MUNSTERMANN S., BLECK W., "Experimental and numerical failure criterion for formability prediction in sheet metal forming", Computational Materials Science, 43, 43-50, 2008.
- [4] TÜRKÖZ M., DİLMEÇ M., HALKACI H.S., "Al 7075 o sac malzemenin şekillendirme sınır gerilme diyagramının elde edilmesi", Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7, 864-870, 2018.
- [5] Wei-min Z., De-chuang C., Hui Y., "Prediction of FLD for AA7075 under hot stamping based on continuum damage mechanics", Journal of Jilin University (Engineering And Technology Edition), 2, 409-414, 2014.



S. KILIÇ, İ. KACAR

- [6] KOÇAR O., KARAYEL D., ELDOĞAN O., ÖZKAN S.S., Tersine Mühendislik Yaklaşımı Kullanarak Sac Metalin Şekillendirme Sınır Diyagramının Belirlenmesi, in: 1st international symposium on innovative technologies in engineering and science Sakarya, Türkiye, 2013, pp. 538-547.
- [7] UYSAL E., ÖZTÜRK F., "Örnek bir uygulama ile yüksek mukavemetli çeliklerde şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesi", 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi 387-395. Balıkesir, 2010.
- [8] OZTURK F., LEE D., "Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test", Journal of Materials Processing Technology, 170, 247-253, 2005.
- [9] Asame Co., Automated Strain Analysis and Measurement Environment, in, 2015.
- [10] DAVIES R., ROHATGI A., Enhanced Room-Temperature Formability in High-Strength Aluminum Alloys through Pulse-Pressure Forming (PPF), in, 2015 DOE Vehicle Technologies Office Annual Merit Review, 2015.