

## AISI 4140 ÇELİĞİ İÇİN KÜRESELLEŞTİRME TAVI SÜRESİNİN DÖVÜLEBİLİRLİĞE ETKİSİ

Nuray ALPAY, Erdal KARADENİZ

**Özet** - Yüksek mukavemetli cıvataların imalatında, soğuk işlemle cıvata kafasının şekillendirilmesi sonrası istenen sertleştirilebilirliği sağlayabilecek alaşımlar kullanılır. Bu nedenle araştırmada AISI 4140 çeliği kullanılmıştır.

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğine normalize edilmiş başlangıç koşulu sonrası 700°C de 4-8-12-24-48-72 saat olmak üzere 6 farklı süre için ayrı ayrı küreselleştirme tavi uygulanmıştır. Her bir durum için sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama, % kesit daralması değerleri bulunmuştur. Çentikli çekme deneyi kopma kesit daralması değerleri kullanılarak dövülebilirlik değişimi incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler** - Soğuk dövülebilirlik, soğuk dövme, cıvata, küreselleştirme, çentikli çekme.

**Abstract** - In high strength bolts' manufacturing, enough alloys to achieve the required hardenability after the forming of bolt heading by cold process are used. Therefore, the AISI 4140 steel was used in present research.

In this study, the specimens which were normalized before the experiments were exposed to spherodization annealing with six different times as 4-8-12-24-48 and 72 hours at 700 °C.

The hardness, yield strength, the ultimate tensile strength, % elongation and % reduction of area values were determined for each situation and the forgeability was investigated according to notched tensile test values obtained by reduction of area at fracture.

**Keywords** - Cold forgeability, cold forging, bolt, spherodization, notched tensile test.

N. Alpay, İnci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı, Arifiye, Sakarya  
E. Karadeniz, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, Sakarya

### I. GİRİŞ

Metallere şekil verme, genel olarak döküm, kaynak, plastik şekil verme, talaşlı imalat, toz metalürjisi yöntemlerinin biri veya birkaçının uygulanması ile gerçekleştirilir. Plastik şekil verme; dövme, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme, derin çekme, sıvama, bükme ve kesme gibi çeşitli işlemleri içerir. Bu işlemler şekil verme biçimine göre kütle şekil verme ve levha biçimlendirme işlemleri olarak sınıflandırılır. Buna göre, dövme, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme, kütle şekil verme işlemleri, derin çekme, sıvama, eğme, levha biçimlendirme işlemleri olarak tanımlanır. Dövme, metallere katı durumda akış sağlayacak mertebelerde basınç uygulayarak metalin istenilen biçimi almasını sağlayan bir üretim yöntemidir. Dövme yöntemiyle şekil verilmek istenen metal malzemelerin şekillendirilmelerini sınırlandıran etkenler vardır. Bir dövme işlemini hasarsız gerçekleştirebilmek için şekil verilmek istenen malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetinin bilinmesi istenir. Bu nedenle, dövme işlemlerinde malzemeyi hasara uğratmadan istenilen şekli verebilmek için "Dövülebilirlik" terimi tanımlanmıştır.

Bir metalin dövülebilirliği, dövmede çatlamadan şekil değiştirme kabiliyeti olarak tanımlanır [1-3]. Düşük kuvvetlerde, çatlamaksızın dövülerek şekillendirilebilen bir malzeme için "Dövülebilirliği iyi" denir [1,4].

Dövülebilirliğin değerlendirilmesinde kırılma plastik şekil değiştirme miktarı (süneklik) ve gerilme elemanları kullanılır. Bu nedenle bir malzemenin dövülebilirliğinin tanımı çeşitli değişkenlere bağlı olarak belirlenir [5]. Bu değişkenler, malzeme değişkenleri ve işlem değişkenleri olarak iki ana başlık altında toplanmıştır. Birim şekil değiştirme ( $\epsilon$ ), birim şekil değiştirme hızı ( $\dot{\epsilon}$ ), sıcaklık, sürtünme ve gerilme hali işlem değişkenleri, ikinci faz partikülleri, inklüzyonlar ve tane boyutu ise malzeme değişkenleridir. Bu nedenle, dövülebilirlik malzeme ve işlem değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir [6].

$$\text{Dövülebilirlik} = f_1 (\text{malzeme}) \times f_2 (\text{işlem})$$

Metalik malzemelerin yapısında bulunan ikinci faz partiküllerinin yapısına bağlı olarak dövülebilirlik farklılık gösterir [5,7,8]. Bu nedenle çeliklerin dövülebilirliğine ikinci faz partiküllerinin etkisi yapısındaki karbürlerin küreselleştirilme miktarı ile ilişkisi şeklinde de incelenir [7].

Yüksek mukavemetli cıvata imalat endüstrisinde % 0,35 - 0,5 C ve istenen sertleştirilebilirliği sağlayabilecek alaşımı içeren, alaşımli çelikler kullanılır.

Soğuk işlem ile şekillendirilen cıvata hammaddeleri tel çubuk (kangal) şeklindedir. Tel çubuk sıcak haddeleme işlemi ile cıvata ölçülerine indirilir, soğutulur ve kangal şeklinde sarılır. Oksit giderme ve kaplama (kireç) işlemlerini takiben, kangallar gerekli şekil alabilme özelliğini sağlamak için, küreselleştirme işlemine tabi tutulur. Daha sonra kesme ve soğuk işlemle cıvata kafasının şekillendirilmesi ve gövde kısmına dış açılması işlemleri yapılır. Son olarak bitirme işlemleri ve takiben ostentleme, soğutma ve temperleme işlemleri yapılır [7].

Soğuk işlemle cıvata kafasının şekillendirilmesinde gövde kısmı kontrol altında tutulur. Eğer malzeme yeteri kadar sünek değilse burulmalar oluşur. Küreselleştirme soğuk işlem için gerekli sünekliği sağlar [9].

Küreselleştirme işleminin kinetiği ile ilgili bir çok makale bulunmaktadır. Fakat çok azında ısı işlemlerinin detayından bahsedilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, kangal şeklindeki hammaddelere iki farklı şekilde küreselleştirme işlemi uygulandığı tespit edilmiştir [7]. Bunlardan birisi A<sub>1</sub> sıcaklığının üzerine bir süre tavlama ve A<sub>1</sub>' in hemen altında uzun süre tavlama şeklinde olan interkritik yöntem ve A<sub>1</sub>' in hemen altında uzun süre tavlama şeklinde olan subkritik yöntemdir. Laboratuvar çalışmaları subkritik yöntemin daha avantajlı olduğu sonucunu vermiştir [7,10]. Bunun nedeni tel çubuk çekme prosesi sonucu ince taneli yapının interkritik yöntemde bozulmasıdır. Cıvata imalatçıları için kangal malzeme üretim prosesinde sıcak dövmeden sonra, hava ile güçlendirilen soğutma ile çok hızlı bir şekilde küreselleşebilen çok ince perlitler meydana gelir. İnterkritik proses; interkritik bölgeye ısıtma ile bu ince perlitleri yok eder ve alt kritik sıcaklığın altında yerine çok kaba perlitlerin oluşmasını sağlar. Yapılan çalışmalar subkritik proseste küreselleşmenin daha hızlı olduğunu doğrulamaktadır [7].

Başlangıç perlitinin çok ince lamelli olması, küreselleşmeye yardımcı olur ve daha kısa sürede yumuşak tavlama arzu edilen yapıya ulaşılır [11]. Sertleştirilmiş (martenzitik) yapıdan başlayan subkritik yöntem küreselleştirme araştırmalarında uygulanmıştır [12].

Bu çalışmada, ince taneli perlitlik ( normalize edilmiş) ilk yapıyı subkritik yöntem kullanılarak küreselleştirme

süresinin soğuk dövülebilirliğe etkisi incelenmiştir. İncelemede, sertlik, çekme deneyi ve çentikli çekme deneyi verileri kullanılmıştır. Sertlik, çekme deneyi % kesit daralması ve çentikli çekme deneyi kesit daralması değerlerindeki değişim soğuk dövülebilirlik değerlendirmelerinde esas alınmıştır.

## II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar için Asil Çelik üretimi sıcak haddelenmiş  $\phi$  22 mm AISI 4140 çelik seçilmiştir. Bu malzemenin spektral analiz cihazında kimyasal analizleri yapılarak standartlara uygunluğu görülmüştür. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kimyasal analiz sonuçları

Malz.	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
AISI 4140	0,409	0,228	0,765	0,010	0,021	1,080	0,176

AISI 4140 çeliği, cıvata üretiminde, istenen yüksek mukavemet değerlerini sağlayabilecek Cr ve Mo alaşımlarını içeren bir çeliktir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 4140 malzemeden farklı mekanik özellikler elde edilerek şekillendirme için gerekli gerilme değerleri değişimi araştırılmıştır. Bu farklı mekanik özellikler ısı işlem çalışmaları ile elde edilmiştir. Bu nedenle, 28 adet deney numunesinin tamamına normalizasyon işlemi uygulanmış, normalizasyon koşulları literatürden belirlenmiştir [13]. Normalizasyon tavlama için numunelerin her biri 870°C'de 45 dk. tavlandıktan sonra sakın havada (fırın dışı) soğutulmuştur. Normalizasyon işleminden sonra 24 adet numune ayrılarak küreselleştirme tavı 4, 8, 12, 24, 48 ve 72 saat tavlama süreleri için 700°C'de uygulanmıştır. Isıl işlem çalışmaları için  $\phi$  18 mm ve 124 mm uzunluğunda numuneler talaşlı imalat yöntemi ile elde edilmiştir. Isıl işlemler 35 kW'lık Dr. Scmmith APELT marka ısı işlem fırınında numuneler kendi talaşına gömülerek gerçekleştirilmiştir.

Sertlik değerleri 7 farklı ısı işlem durumu için numunelerin eksene paralel olmak üzere ikiye bölünmüş yüzeylerinden Brinell sertlik ölçme yöntemi ile alınmıştır. Sertlik ölçümleri DIA TESTOR 751 cihazında 187,5 kg yükün 20 sn 2  $\mu$ 'luk elmas pasta ile parlatılmış yüzeylere 2,5 mm'lik bilye uç kullanılarak uygulanmıştır. İki ölçüm noktası arasında 3 mm mesafe esas alınarak çalışılmıştır.

Çekme deneyleri 1994 model 200 kN kapasiteli Dartec marka çekme cihazında 0,35 mm/dakika çekme hızında ve oda sıcaklığında ASTM E8 standardı esas alınarak hazırlanan numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Numuneler CNC torna tezgahında işlenmiştir.

## III. DENEYSEL SONUÇLAR

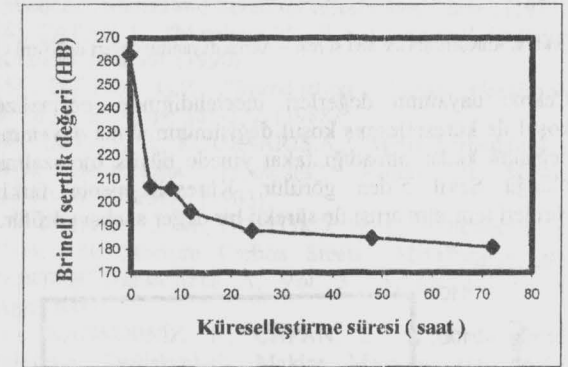
### III.1 Sertlik Deneyi Sonuçları

Normalize edilmiş ve farklı süreler için küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin sertlik değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Normalize edilmiş ve farklı süreler için küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin sertlik değerleri

Süre (saat)	0	4	8	12	24	48	72
BSD	263	207	206	196	188	185	181

Tablo 2'deki sonuçlardan ve Şekil 3'deki grafikten küreselleştirme ısı işleminin sertlik değerlerinde büyük bir azalmaya neden olduğu, küreselleştirme tavı süresinin ise etkisini 8 saat'ten sonra daha belirgin gösterdiği ve tavlama süresi artışı ile sertlik değerlerinin azalan değerler şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Küreselleştirme tavı süresi - Brinell sertlik değeri değişimi.

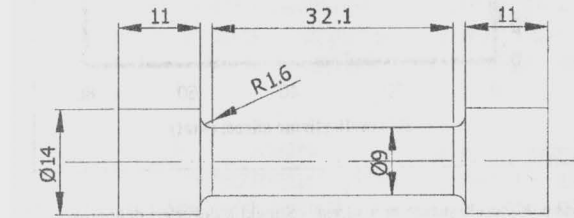
### III.2 Çekme Deneyi Sonuçları

Normalize edilmiş ve farklı süreler için küreselleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin çekme deneyi değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çekme deneyi sonuçları.

Süre (saat)	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	% $\epsilon_f$	% $\eta$
0	754,9	993,16	14,24	47,03
4	374,3	682	24,7	61,97
8	354,64	675,32	27,7	57,02
12	339,7	655,5	24,2	58,47
24	332,06	635,68	25,17	59,18
48	344,26	615,71	26,35	61,28
72	456,87	615,71	26,35	61,28

7 farklı ısı işlem durumu için yapılan deneyler ile değerlendirmeler üçer adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilerden akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama, % kesit daralması değerleri her bir ısı işlem durumu için hesaplanmıştır.



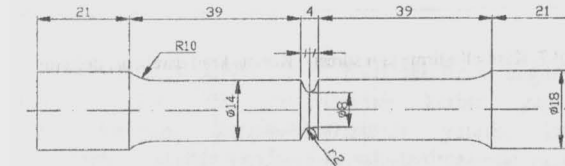
Şekil 1. Çekme deney numunesi

Çekme deneyinden saptanan şekil değiştirme miktarı boyun verme nedeniyle güvenilir değildir [14]. Çentikli çekme deneyleri sürekli üç eksenliliğin etkisi altında gerçekleşir. Bundan dolayı, çentikli çekme deneyleri ile şekil değiştirme miktarı incelenmiştir.

Çentikli çekme deneyleri 2 mm yarı çapında çentik açılmış (Şekil 2) [15] numunelerin 500 kN kapasiteli Zwick 1498 marka çekme cihazında 2 mm/dakika çekme hızında ve oda sıcaklığında çekilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kesit daralması 0,01 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Numuneler CNC torna tezgahında işlenmiştir.

Deneylerden elde edilen  $\phi$   $d_k$  değerlerinde dövülebilirlik değerlendirmesi için kopma uzama ( $\epsilon_k$ ) değerleri aşağıdaki denklem ile bulunmuştur [15]. Çentikli çekme deneyinde kullanılan numune ölçüleri Şekil 4.2'de görülmektedir.

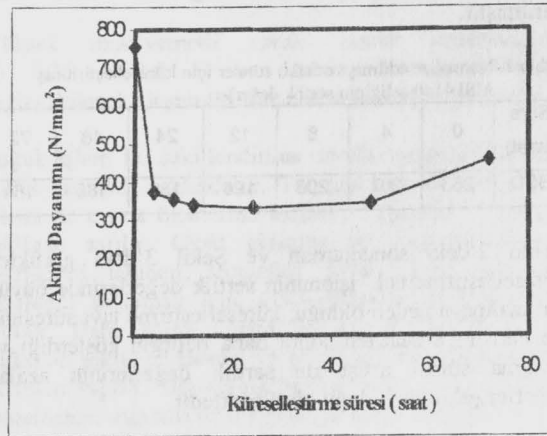
$$\epsilon_{k_{max}} = 2 \ln d_0 / d_{k_{min}}$$



Şekil 2. Çentikli çekme deney numunesi

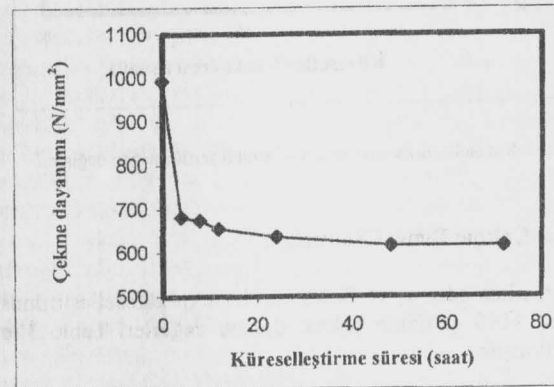


Şekil 4'den küreselleştirme ısıl işleminin normalize koşula göre akma dayanımını yarı yarıya düşürdüğü, farklı küreselleştirme sürelerinin ise akma dayanımına 24 saatte azalan bir eğilim daha sonra artan bir eğilim şeklinde etkidiği görülür.



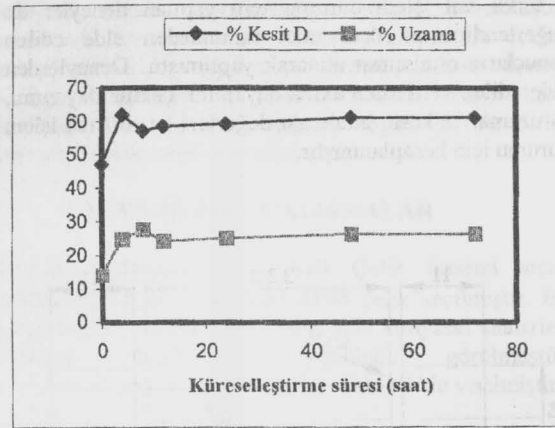
Şekil 4. Küreselleştirme tavlı süresi - Akma dayanımı değeri değişimi

Çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, normalize koşul ile küreselleştirilmiş koşul değişiminin akma dayanımı değişimi kadar olmadığı fakat yine de büyük bir azalma olduğu Şekil 5'den görülür. Küreselleştirme farklı süreleri için süre artışı ile sürekli bir değer azalışı görülür.



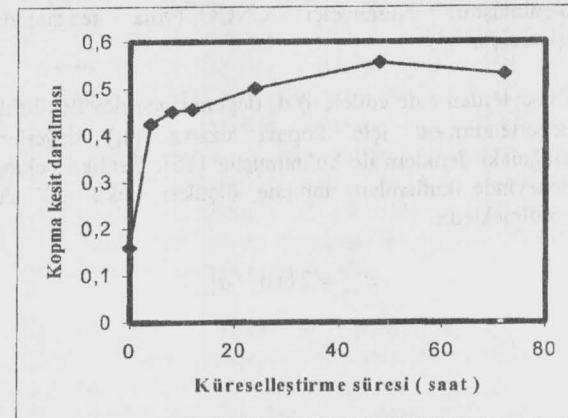
Şekil 5. Küreselleştirme tavlı süresi - Çekme dayanımı değeri değişimi

Şekil 6'da küreselleştirme süresinin % uzama ve % kesit daralmasına etkisi görülmektedir. Normalize koşulların küreselleştirilmiş koşullara göre daha küçük % uzama ve % kesit daralması değerlerinde koptuğu açıkça görülmektedir. Küreselleştirilmiş koşullarda % uzamanın 8 saate kadar hızla arttığı, 12 saate hızlı bir düşme ve bundan sonra ki sürelerde daha yavaş arttığı görülmektedir. Benzer durum % kesit daralması eğrisinde 4 saat için görülmektedir.



Şekil 6. Küreselleştirme tavlı süresi - Süneklik değerleri değişimi

Bu çalışmanın amacını oluşturan küreselleştirme süresinin, AISI 4140 çeliğinin soğuk dövülebilirliğine etkisi Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde normalize koşullardan küreselleştirilmiş koşullara geçildiğinde dövülebilirliğin çok büyük miktarda arttığı görülür. Küreselleştirilmiş koşulların kendi aralarındaki değişim miktarı, normalize ile küreselleştirilmiş durumdaki farklılık kadar büyük miktarda değildir. 12 saate kadar küreselleştirmede küçük artış eğilimi görülmekte, 12 saatten sonraki 24 ve 48 saatlik küreselleştirmelerde artış eğiliminin yükseldiği görülmektedir. 72 saatlik küreselleştirmede dövülebilirlik azalması meydana gelmiştir.



Şekil 7. Küreselleştirme tavlı süresi - Kopma kesit daralması değişimi

#### IV. İRDELEME

Sertlik deneyi sonuçları, küreselleştirme ısıl işleminin çeliğin sertliğini azalttığı ve tavlama süresi artışı ile sertlikteki azalmanın küçük değer değişimleri ile azalmaya devam ettiğini göstermiştir. Bu sonuçlar literatürdekilere benzer sonuçlardır [7-10]. Sertlik değerleri dövülebilirlik değerleri hakkında genel bir değerlendirme yapmak için yararlıdır. Fakat yeterli değildir. Elde edilen sonuçlardan küreselleştirme dövülebilirliği artırdığı, küreselleştirme süresi artışı ile dövülebilirliğin de artış eğilimini sürdürdüğü ifade edilebilir.

Çekme deneyi % uzama ve % kesit daralması malzemelerin dövülebilirliği hakkında genel bir fikir vermekle beraber boyun vermenin deney koşullarındaki değişime sebep olması nedeniyle güvenilir değildir. Çekme deneyi sonuçlarından, % uzama ve % kesit daralması değerleri normalize ile küreselleştirme dövülebilirlik karşılaştırması hakkında belirgin sonuçlar vermesine karşılık küreselleştirilmiş koşulların karşılaştırılmasında belirgin sonuçlar vermemektedir.

Çentikli çekme deneyi kopma kesit daralması sonuçları, diğer mekanik deney sonuçlarına benzer şekilde normalize ile küreselleştirme dövülebilirliği karşılaştırması hakkında belirgin sonuçlar vermiştir. Çentikli çekme deneyi kopma kesit daralması sonuçları, küreselleştirilmiş koşullar arasındaki dövülebilirlik karşılaştırması için yeterli farklılığa sahip değerleri vermiştir. Sürekli üç eksenliliği etkisi altında gerçekleşen bu deney sonuçları, küreselleştirme süresi artışı ile soğuk dövülebilirliğin artmakta olduğu sonucunu ifade eder.

72 saatlik küreselleştirme sonucu dövülebilirlik değerlerinde azalma, küreselleştirilmiş yapıda bozulma olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Bu durum akma dayanımı değerlerindeki değişimde de görülmüştür.

#### V. SONUÇ

Sertlik değerleri değişimi ile çentikli çekme deneyi kopma kesit daralması değerleri değişimi soğuk dövülebilirlik değerlendirmeleri için benzer sonuçlar vermiştir. Sertlik deneyi soğuk dövülebilirlik değerlendirmelerinde genel bir deney olarak kabul edilebilir.

Çekme deneyi % uzama ve % kesit daralması değerleri lamelli karbür ile küreselleştirilmiş karbür yapının dövülebilirliğinin karşılaştırılmasında yararlı, fakat küreselleştirilmiş karbür yapıların karşılaştırılmasında yararlı sonuçlar vermemiştir. Bundan dolayı, küreselleştirme etkisini incelemede çekme deneyinin uygun bir deney olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çentikli çekme deneyleri kopma kesit daralması sonuçları soğuk dövülebilirlik değerlendirmeleri için yararlı sonuçlar vermiştir. Bundan dolayı, soğuk dövülebilirlik değerlendirmeleri için tavsiye edilmektedir.

Plastik şekil verme işlemleri; çekme, basma ve kayma gibi üç temel şekil değişiminden biri veya birkaçının etkisinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, soğuk dövülebilirlik birden fazla deney ile incelenmelidir. Bu çalışma sonucunda, çentikli çekme deneyinin soğuk dövülebilirlik incelenmesi deneylerinden biri olarak güvenilir sonuç vereceği neticesine varılmıştır.

#### KAYNAKLAR

- [1]. KALPAKJIAN, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Addison-Wesley, (1984)
- [2]. SHERIF, D. E. W., "Processes and Design Manufacturing", Prentice-Hall Inc., (1989)
- [3]. ALTAN, T., "Forging Equipment, Materials and Practices", Metals and Ceramics Information Center, (1973)
- [4]. ÇAPAN, L., "Metallere Plastik Şekil Verme", Çağlayan Kitabevi, İstanbul, (1990)
- [5]. DIETER, G.E., "Introduction", Metals Handbook, 9. Ed., Vol. 14, pp. 363-372, (1988)
- [6]. ULVAN, E., KOURSARIS, A., "Metal Formability in Bulk Deformation Processes", Journal of Metals, pp. 20-26, December (1983)
- [7]. O'BRIEN, J. M., HOSFORD, W. F., "Spheroidization Cycles for Medium Carbon Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33 A, pp. 1255-1261, April 2002
- [8]. KARADENİZ, E., ÇAPAN, L., "Dövülebilirliği Etkileyen Değişkenler", Makine Magazin, syf. 46-54, Mart (1998)
- [9]. G. KRAUSS, "Steel; Heat Treatment and Processing Principles"; ASM INTERNATIONAL, Materials Park, OH, (1990)
- [10]. KARADENİZ, E., ÖZGİRGİN, M.C., FINDIK, F., OĞUR, A., "Ötektoid Altı Çeliklerin Küreselleştirilmesi Isıl İşleminin Çeşitli Yöntemler ile İncelenmesi", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, syf. 170-176, Denizli, (1995)
- [11]. TOPBAŞ, M. A., "Isıl İşlemler", syf. 152, İstanbul, (1993)
- [12]. ZHOU, F., WANG, J.N., LIAN, J.S., "An Investigation of The Plastic Failure of Spheroidized Steels", Materials Science and Engineering, pp. 117-122, (2002)
- [13]. Stahlschlüssel, (2001)
- [14]. KARADENİZ, E., "Çeliklerle Dövülebilirliğin Bırma, Bırma ve Çekme Deneyleri ile İncelenmesi", Doktora, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, syf.39, Şubat 1997
- [15]. GELIN, J.C., OUDIN, J., RAVALARD, Y., "Influence de Quelques Parametres Metallurgiques sur la Rupture Ductile des Aciers a bas et Moyen Carbone", MES Revue de Metallurgie, pp. 169-179, April (1984)