

Alüminyum Ekstrüzyonu Üzerine Sayısal ve Deneysel Bir İnceleme

Hakan Kalkan
Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bu çalışmada endüstriyel boyutta alüminyum ekstrüzyon işlemi nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Proses parametreleri ve kalıp geometrisi ASAŞ Alüminyum tarafından sağlanmış ve model Sonlu Elemanlar ve Sonlu Hacimler yöntemlerine dayalı farklı yazılım paketlerinde hazırlanmıştır. Gerekli malzeme karakterizasyonu Al 6082 malzeme için tek eksenli basma deneyiyle elde edilmiş ve bu test için yüksek sıcaklıklarda da kullanılabilen bir test düzeneği geliştirilip imal edilmiştir. Ölçülen kuvvet-yer değiştirme ve çıkış sıcaklığı ile ilgili grafikler nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İlaveten Sonlu Elemanlar ve Sonlu Hacimler yöntemleri de kendi içlerinde karşılaştırılmışlardır. Bu sonuçlar göstermiştir ki, doğru malzeme karakterizasyonu ile Sonlu Elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar gerçek işlemde ölçülen değerlere yakın çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Ekstrüzyon, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sonlu Hacimler Yöntemi, Tek Eksenli Basma Testi.

1. GİRİŞ

Ekstrüzyon işlemi blok metalin yüksek basınçla bir kalıptan geçirilerek kalıp şekline bağlı kesitler elde edilen metal şekillendirme işlemidir [1]. Dairesel kütük malzeme kovan içerisine yerleştirildikten sonra zımbanın kütüğü kalıptan geçirmesi ile sabit kesit alanlı profiller elde edilebilir. Malzeme olarak alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve değişik plastik malzemeler kullanılabilir. Alüminyum yüksek süneklik özelliğine sahip olduğundan ekstrüzyon işlemlerinde en yaygın kullanılan malzemelerdendir.

Ekstrüzyon işleminden dairesele kütük, kovana yerleştirilerek kalıp kesiti ile merkezlenir. Zımbanın kütüğü kalıp içine ittirilmesiyle kalıp içinden geçen malzeme sabit kesitli profillere dönüşür. Kalıp çıkış hızı profil şekline etki eden önemli bir parametre olduğu için, zımba hızı ile dengelenmelidir.

Ekstrüzyon işlemi akma mukavemetini düşürmek için genellikle yüksek sıcaklıklarda yapılır ancak bazı durumlarda soğuk olarak da yapılabilir. Akma mukavemetinin düşmesiyle yüksek oranda kesit daralması sağlanır işlem zamanı kısalır ve enerji gereksinimleri düşer.

Genelde ekstrüzyon işleminde ön ısıtma yapılmış kütükler işlem boyunca sabit zımba hızıyla kullanılır. Ön ısıtma aynı zamanda yüzey hatalarını önlemek içinde yapılır.

Ekstrüzyon işleminde mekanik enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşür, az bir kısmı ise iş parçası tarafından tutulur. İş parçasının kalıpta hareketi sonucu kalıp-iş parçası ara yüzeyinde oluşan sürtünme bu bölgede sıcaklığın artmasına neden olur. Sıcaklık artışının elde edilen ürünün mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve boyutsal toleransları etkilediği bilinmektedir [2]. Bu yüzden oluşabilecek maksimum sıcaklık artışının önceden tahmin edilmesi önemlidir. İşlem boyunca çıkış sıcaklığının ve çıkış basıncının sabit olması izotermal ekstrüzyon işlemi olarak adlandırılır. Eğer işlem izotermal şartlarda yapılırsa, sıcaklık artışı engellenerek yüksek kaliteli ürünler elde edilebilir. Ayrıca, izotermal durum yüzey hatalarının ve boyutsal tolerans problemlerinin en aza indirilmesinde çok etkilidir.

Ekstrüzyon işleminde kütüğün zımba ile aynı yönde akıtıldığı direkt ekstrüzyon ve kütüğün zımba yönünün tersine akıtıldığı indirekt ekstrüzyon olmak üzere 2 ana yöntem vardır [2].

Ekstrüzyon kalıpları çıkan profilin türüne tek çıkışlı, çoklu çıkışlı ve içi boşluklu gibi değişik şekillerde sınıflandırılabilir.



Şekil 1. Ekstrüzyon Kalıp Örnekleri.

Pratikte kalıp tasarımı deneme yanılma yöntemi ile yapılmaktadır. Bu yüzden kalıp tasarımında tasarımcının deneyimi önemlidir. İstenilen ürün profilinin karmaşıklığına göre tasarım aşamasında kalıplara bir kaç defa düzeltme gerekebilir. Bu yüzden genellikle kullanılan deneme yanılma yöntemi iş gücü hammadde ve diğer giderlerden dolayı maliyetli bir yöntemdir.

Genellikle sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı nümerik yöntemler farklı ekstrüzyon senaryolarının uygulanmasıyla deneme yanılma yöntemine alternatif olarak kullanılmaya başlamıştır. Kullanılan bu nümerik yöntemler sayesinde şekillendirme işlemi optimize edilerek zaman ve maliyet bakımında kazanç elde edilebilir.

Ekstrüzyon işlemi ile ilgili geçmiş yıllarda önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan ekstrüzyon işlemi için gerekli minimum enerjinin araştırılması bu konudaki ilk yapılan çalışmalardandır [3]. Sürtünme gibi bazı parametrelerin ihmal edildiği çalışmada ise işlem boyunca oluşan basınç ve akış miktarı hesaplanmaya yöneliktir [4]. Sonraki yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile 3 boyutlu analizlerin yapılması mümkün hale gelmiştir. Ekstrüzyon işlemindeki parametrelerin malzeme akışına, sıcaklık değişimine olan etkileri incelenmiştir [5]. Yapılan çalışmalarda "Sonlu Elemanlar" yönteminin yanın da "Sonlu Hacimler" yöntemi de kullanılmıştır. Daha çok akışkanlar mekaniği konularında kullanılan bu yöntem özellikle daha karmaşık kalıp geometrileri için alternatif olmuştur [6].

Bu çalışma ile alüminyum ekstrüzyonu üzerine deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada yüksek sıcaklıklarda malzeme karakterizasyonu tasarlanan tek yönlü basma test düzeneğiyle yapılmıştır. Bu testlerden elde edilen veriler hem sonlu elemanlar hem de sonlu hacimler

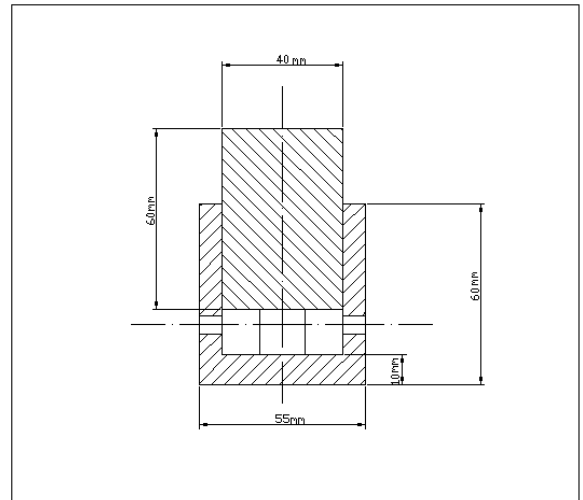
yöntemli yazılımlarda kullanılmış ve elde edilen basınç-yer değiştirme ve sıcaklık ölçümleri karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Tek yönlü basma testi metal şekillendirme işlemlerinde yaygınlıkla kullanılan malzeme karakterizasyon testlerindedir. Ekstrüzyon işleminde oluşan kesit daralmasından dolayı yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Yüksek orandaki şekillendirme işlemlerinde akma gerilmesini düşürmek için işlem yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu nedenle malzeme karakterizasyon testleri de işlem sıcaklığına uygun yüksek sıcaklıklarda yapılmıştır.

2.1 Tek Yönlü Basma Testlerinin Yapılması

Asaş Alüminyum tarafından elde edilen deney sonuçları neticesinde basma testlerinin 450°C , 500°C ve 550°C olmasına karar verilmiştir. Şekil 2 de görülen sıcak iş çeliğinden imal edilmiş kalıp yüksek sıcaklıklarda basma testi için imal edilmiştir.

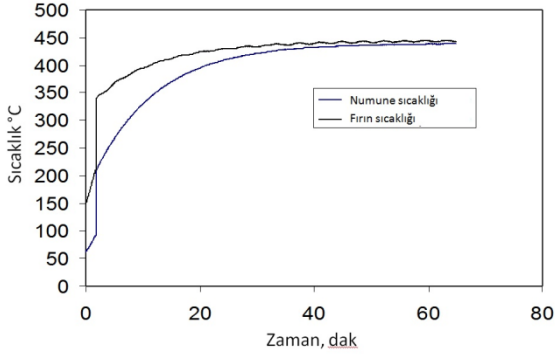


Şekil 2. Basma Testi Kalıp Kesit Görüntüsü.

Basma testlerinde 15 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde numuneler kullanılmıştır. Test esnasında ısı kaybını en aza indirmek için numune basma test kalıbı ile birlikte fırın içerisinde ısıtılmıştır. Test esnasında kalıp-numune ara yüzeylerinde oluşacak sürtünmenin azaltılması için bu yüzeylerde yüksek sıcaklıklara dayanıklı grafit esaslı yağlayıcı kullanılmıştır.

Basma testleri için belirlenen sıcaklıklara kadar numunelerin ısıtılması için bazı denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde fırın sıcaklığı ve kalıp içerisindeki numune sıcaklığı ayrı ayrı ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termokuppler kullanılmıştır.

Sonuçlar Datataker DT-85 veri toplama cihazı ile bilgisayarda kaydedilmiştir. Fırın 450 °C'de ayarlandığında 60 dakika boyunca alınan ölçüm grafikleri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. 450 °C'deki sıcaklık ölçümleri

Bu ölçümler sonucunda 60 dakikalık ısıtma süresince fırın sıcaklığı ve kalıp içindeki numune sıcaklığı 450 °C mertebesine çıkmaktadır. Tablo 1'de her 3 test sıcaklığı için elde edilen sonuçlar görülebilir.

Tablo 1: Sıcaklık -Zaman Ölçümleri

Fırın Sıcaklığı	Isıtma Süresi	Ölçülen Fırın Sıcaklığı	Ölçülen Numune Sıcaklığı
450 °C	60 dk	446 °C	439 °C
500 °C	60 dk	498 °C	483 °C
550 °C	60 dk	549 °C	540 °C

Burada elde edilen sonuçlar "Sonlu elemanlar" ve "Sonlu hacimler" yöntemi kullanan analiz programlarında kullanılacağı düşünülürse sıcaklıkların yakın mertebede olması problem olmayacaktır.

Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra fırın içerisinde ısıtılmış basma kalıp seti Zwick/Roell basma test cihazına her defasında 2 saniye içinde taşınarak testler gerçekleştirilmiştir.

2.2 Akma Eğrilerinin Elde Edilmesi:

Belirlenen her sıcaklık için 3 test olmak üzere toplamda 9 ayrı basma testi yapılmıştır. Bu testlerden kuvvet- basma mesafesi grafikleri elde edilmiştir. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlara ilişkin örnek değerler Tablo 2'de görülebilir.

Burada h_0 test numunesinin başlangıç boyu, $h(u)$ ise test esnasındaki anlık boyudur. Elde edilen veriler kullanılarak Al 6082 malzeme için aşağıdaki formüller yardımıyla akma eğrileri elde edilebilir.

$$\text{Gerçek gerinim: } \varepsilon_{(u)} = \ln \left(\frac{h_u}{h_0} \right)$$

$$\text{Gerçek gerilme: } \sigma_{f(u)} = \frac{F}{A_{(u)}}$$

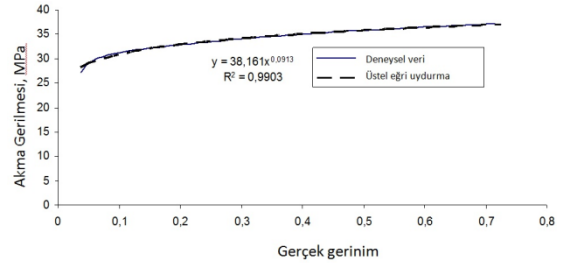
$$\text{Mühendislik gerinmesi: } \varepsilon_E = \frac{h_{(u)} - h_0}{h_0}$$

$$\text{Mühendislik gerilmesi: } \sigma_E = \frac{F}{A_0}$$

Bu eşitlikler yardımıyla elde edilen gerçek gerilme-gerçek gerinme grafikleri $y = ax^b$ formunda bir eşitlik ile ifade edilerek malzemenin plastik bölgesine ait davranış modelenmiş olacaktır.

Tablo 2: 450 °C 'de Basma Test Sonuçları

Mesafe	Kuvvet	h_0	$h_{(u)}$	A_0	A
mm	N	mm	mm	mm ²	mm ²
0.100237	153.574	15	14.8997	176.717	177.903
0.219866	1056.82	15	14.7801	176.717	179.343
0.323382	2944.82	15	14.6766	176.717	180.608
0.432391	4300.82	15	14.5676	176.717	181.959
0.558245	5001.82	15	14.4417	176.717	183.545
0.686907	5318.82	15	14.3130	176.717	185.195
0.81386	5526.82	15	14.1861	176.717	186.852
0.939593	5674.57	15	14.0604	176.717	188.523
1.06398	5794.95	15	13.9360	176.717	190.206
1.18727	5903.7	15	13.8127	176.717	191.904

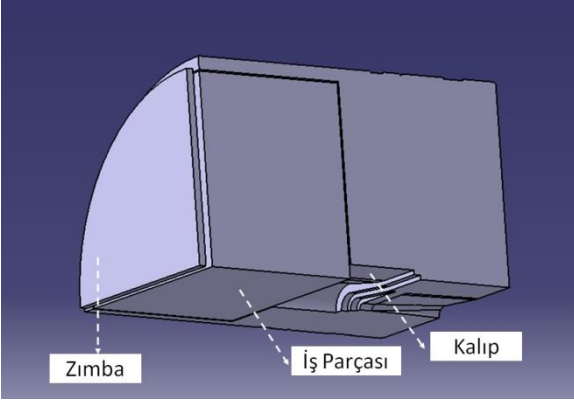


Şekil 4: Al 6082 malzeme için 450 °C'de elde edilen akma eğrisi.

3. PROSES SİMULASYONU VE SONUÇLAR

3.1 Geometri:

Asaş Alüminyum tarafından kullanılan ekstrüzyon kalıbı Şekil 5'de görülmektedir. Kalıp ilki 50 mm diğerleri 5 mm olan toplam 3 kademedden oluşmaktadır.



Şekil 5: Asaş tarafından kullanılan kalıp ölçülerine göre hazırlanan ekstrüzyon kalıbının 3 boyutlu görüntüsü.

Catia'da 3 boyutlu olarak modellenen kalıp, zimba ve iş parçası geometrileri analizlerde .

3.2 Malzeme ve Sürtünme Parametreleri:

Sonlu elemanlar ve sonlu hacimler analizinde kullanılmak üzere oluşturulan Al 6082 malzemeye ait veriler aşağıdaki gibi modellenmiştir.

$$\sigma_y = C \varepsilon^N$$

Burada C katsayısı akma mukavemeti, ε şekil değiştirme hızı ve N üstel olarak şekil değiştirme hassasiyet katsayısı olarak açıklanabilir. Basma testleri sonucunda farklı sıcaklıklardaki malzeme karakterizasyonu bu ilişkiye göre modellenmiştir. Kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünmenin sabit olduğu varsayılarak aşağıdaki gibi modellenmiştir.

$$\tau = m \tau_{yield}$$

Bu çalışmada direkt ekstrüzyon yağlayıcısız durum için $m = 0.5$ olarak alınmıştır.

3.3 Proses Parametreleri:

Asaş tarafından sağlanan verilere testlerde kullanılan zimba hızı 4 mm/s , zimbanın toplam stroku 30 mm dir. Diğer parametreler Tablo 3 de görülebilir.

Tablo 3: Simülasyonlarda Kullanılan Proses Parametreleri

İş parçasının uzunluğu	100 mm
İş parçası çapı	260 mm
İş Parçası başlangıç sıcaklığı	450 °C
Kovanın başlangıç sıcaklığı	430 °C
Toplam stroke	30 mm

3.4 Eleman Türü Ve Mesh:

Sonlu elemanlar ve sonlu hacimler analizinde eleman büyüklüğüne bağlı olarak çözüm hassasiyeti ve çözüm süresi değişmektedir. Kalıp geometrisi düşünüldüğünde profil çıkışının daha küçük elemanlara bölünmesi daha hassas sonuçlar elde etmeye imkan verecektir. Bunun için her iki analiz türünde de elemanları ikiye bölerek küçülten hacimler tanımlanmıştır.

Sonlu hacimler yöntemini kullanan analiz Simufact programı ile tetrahedral elemanlar ile, sonlu elemanlar yöntemini kullanan analiz ise Simufact programında brick elemanlar ile, Deform programında tetra hedral elemanlar ile yapılmıştır.

3.5 Sonuçlar ve Karşılaştırma

Sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemiyle elde edilen sonuçların Asaş alüminyum tarafından yapılmış gerçek testlerden elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılması mümkündür.

Tablo 4'de Asaş Alüminyum tarafından elde edilen sonuçlar görülebilir. Zimba basıncı ve profil çıkış sıcaklığı karşılaştırma için uygun parametrelerdir.

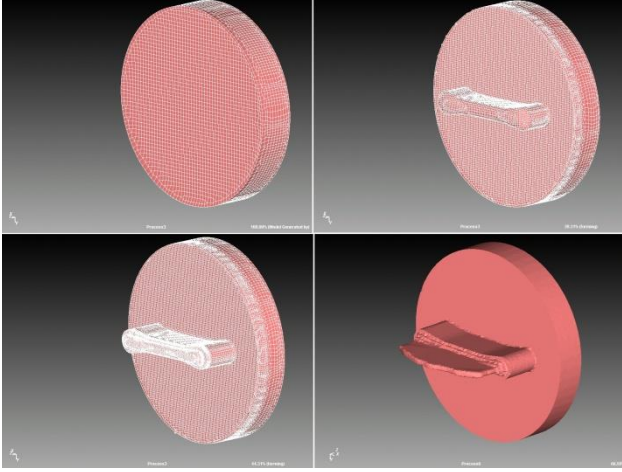
Tablo 4: Asaş Alüminyum tarafından elde edilen örnek deneysel sonuçlar:

	Zimba Basıncı-bar	Zimba Hızı-mm/s	Çıkış Sıcaklığı-°C	Kovan Basıncı-bar
1	54	0	521	244
2	119	0	519	244
3	105	0	510	232
4	123	0,7	508	246
5	150	2,5	508	248
6	180	2,7	505	248
7	198	2,6	504	248
8	210	2,6	505	248
9	227	2,9	511	248

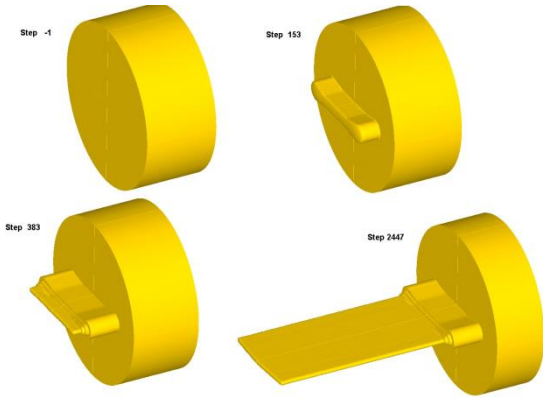
Şekil 6 ve Şekil 7'de farklı analizlerden elde edilmiş farklı aşamalardaki analiz görüntüleri görülebilir.

Şekil 8'de deneysel ve simülasyonlardan elde edilen zimba kuvveti değerlerinin karşılaştırılması mümkündür. Analiz sonuçlarına göre zimba kuvveti ile deneysel sonuçlar aynı mertebede bir birine yakındır.

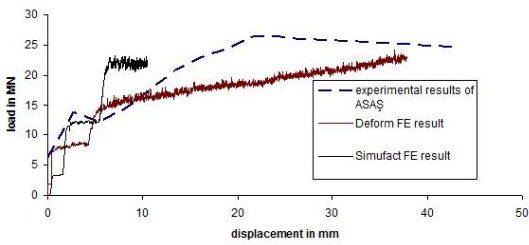
Asaş Alüminyum tarafından elde edilen deneysel sonuçlarda zimba kuvvetinin yanısıra profil çıkış sıcaklığı da mevcuttur. Analizlerden elde edilen sıcaklık değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması mümkündür.



Şekil 6: Simufact analizine ait değişik aşamadaki görüntüler.

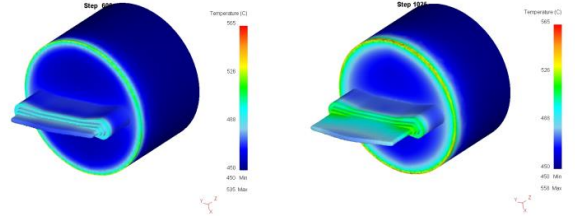


Şekil 7: Deform analizine ait değişik aşamadaki görüntüler.



Şekil 8: Deneysel ve Simulasyondan elde edilen zımba kuvveti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 9'da ve Tablo 5'te de görüleceği üzere analizlerden elde edilen çıkış sıcaklığı değerleri deneysel sonuçlara oldukça yakındır.



Şekil 9: Deform Analizinden elde edilen çıkış sıcaklık dağılımları

Tablo 5: Asaş test sonuçları ile Deform simülasyon çıkış sıcaklıklarının karşılaştırılması:

Ölçüm	Asaş Ölçümü	Deform Analizi
1	504	490
2	511	500
3	527	515
4	533	520
5	549	535

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada gerekli malzeme karakterizasyonu yapılarak endüstriyel boyuttaki ekstrüzyon işlemi nümerik olarak sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleriyle modellenmiş ve elde edilen sonuçlar gerçek deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Tek yönlü basma testleri yeni geliştirilen test kalıp düzeneği ile yapılmıştır. Testler esnasında sıcaklık ölçümleri için deneme testleri yapılmış ve gerekli ısıtma süreleri belirlenmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlara daha yakındır.

Sonuç olarak gerekli malzeme karakterizasyonu ve sürtünme koşulları belirlendiğinde sonlu elemanlar yöntemi ekstrüzyon işleminin nümerik modellenmesinde kullanılabilir uygun yöntemdir.

A COMBINED EXPERIMENTAL-NUMERICAL INVESTIGATION ON ALUMINIUM EXTRUSION

This study focuses on an industrial size aluminum extrusion process and consists of both experimental and computational parts. On the basis of process parameters and die geometry supplied by ASAS Aluminum Company, full scale computational models of the process have been constructed by using

different commercial Finite Element and Finite Volume software packages. The necessary material characterization has been done by compression tests for which a new uni-axial compression test set-up suitable for high temperatures has been designed and manufactured. The measured load-displacement diagrams and exit temperatures are compared with the computational results. In addition to that, Finite Element and Finite Volume results are also compared. These results indicate that reasonable good agreement between the measured data and computational results can be achieved provided that the Finite Element Method is used and proper material characterization is conducted.

Keywords: Aluminum Extrusion, Finite Element Method, Finite Volume Method, Uni-axial Compression Test.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki katkılarından ötürü Doç. Dr. İzzet ÖZDEMİR'e, Dr. Öğr. Üyesi Besim BARANOĞLU'na, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne ve ASAŞ Alüminyum A.Ş.'ne teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

1. J.Zhou, L. Li, J. Duszcyk, 3D FEM simulation of the whole cycle of aluminum extrusion throughout the transient state and the steady state using the updated Lagrangian approach, *Journal of Materials Processing Technology*, 134 (2003), 383-397.
2. Avitzur B., *Handbook of Metal-Forming Processes*, John Wiley & Sons, (1983).
3. L.Lİ, J. Zhou, j. Duszcyk, A 3D FEM simulation study on isothermal extrusion of a 7075 aluminum billet with a predetermined non-linear temperature distribution, *Modeling and Simulating in Material Science and Eng.*, 11, (2003), 401-416.

4. Gang Fang, Jie Zhou, Jurek Duszcyk, FEM simulation of aluminum extrusion through two-hole multi-step pocket dies, *Journal of Material Processing Technology*, 209, (2009), 1891-1900
5. Amin Farjad Bastani, Trond Aukrust, Sverre Brandal, Optimization of flow balance and isothermal extrusion of aluminum using finite-element simulations, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, (2011), 650-667.
6. Shumei Lou, Gougun Zhao, Rui Wang, Xianghong Wu, Modeling of aluminum alloy profile extrusion process using finite volume method, *Journal of materials Processing Technology* 206 (2008) 481-490.
7. Lange K., *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, (1985).
8. Bathe, K.J., *Finite Element Procedures*, 1996, Prentice Hall.
9. *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, W.F. Hosford, R.M. Caddell, Cambridge University Press, (2007).
10. MARC AutoForge, *Command Reference*.Palo Alto, CA, Marc Analysis Research Corporation, (1998).
11. Wriggers, P., *Computational Contact Mechanics*, Wiley (CCM), (2002).