

KARMAŞIK VE İÇİ BOŞ PARÇALARIN ÇAPRAZ KAMA HADDELEME İŞLEMİ: SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONLARI İLE KALIP TASARIMI

Cenk Kılçaslan¹

Makina Yüksek Mühendisi
cenkkilicaslan@iyte.edu.tr

İ.Kutlay Odacı¹

Makina Yüksek Mühendisi
kutlayodaci@iyte.edu.tr

¹ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü,
Dinamik Test ve Modelleme Lab.,
Gülbahçe Kampüsü, Urla/İzmir

Metin Çakırcalı

Makina Yüksek Mühendisi
German Research School for Simulation
Sciences, Room 307, Schinkelstr.
2a 52062 Aachen/Almanya
mcakircali@gmail.com

Mustafa Güden

Prof.Dr., İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü,
Rektörlük Binası,
Gülbahçe Kampüsü, Urla/İzmir
mustafaguden@iyte.edu.tr

ÖZET

Çapraz Kama Haddeleme (ÇKH), düz plakalar ya da merdaneler üzerine oluşturulmuş kamalar ile iş parçalarının deforme edildiği ve genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir metal şekil verme işlemidir. Ancak işlemde meydana gelen hasar yapısının karmaşık olması ve özellikle karmaşık geometriye sahip parçalar için kalıp tasarımının zor olması bu yöntem için dezavantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada içi boş ve karmaşık dış geometriye sahip iş parçasının sonlu elemanlar simülasyonları ile ÇKH kalıbı tasarımı ele alınmıştır. Tasarlanan kalıplar ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri, iş parçasının tam olarak şekillenip şekillenmediğini belirlemiş ve sonuca göre mevcut kalıp tasarımı eniyelenmiştir. Simülasyonlarda büyük genişletme açısının içi boş iş parçasında eğilmeye sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca iş parçası ile kalıp arasında sürtünmenin yetersiz olduğu bölgelerde çentiklerin kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çapraz kama haddeleme, kalıp tasarımı, simülasyon, LS-DYNA

Cross Wedge Rolling Process of Complex Geometries: Die Design with Finite Element Simulations

ABSTRACT

Cross Wedge Rolling (CWR) is a metal forming process in which work pieces are deformed by wedges located on flat plates or rolls and it is generally conducted at elevated temperatures. However, CWR method has disadvantages such as damage evolution during process and difficult tool design for complex parts. In this study, CWR tool design supported with finite element simulations for a hollow complex part is given. Finite element analyses are carried out with designed tools and tool geometry is optimised according to FE results. Simulations show that high stretching angles result in bending of hollow work pieces. It is also seen that serrations should be used in tool-work piece contact areas which have low friction.

Keywords : Cross wedge rolling, die design, simulation, LS-DYNA

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 02.11.2011
Kabul tarihi : 14.02.2012

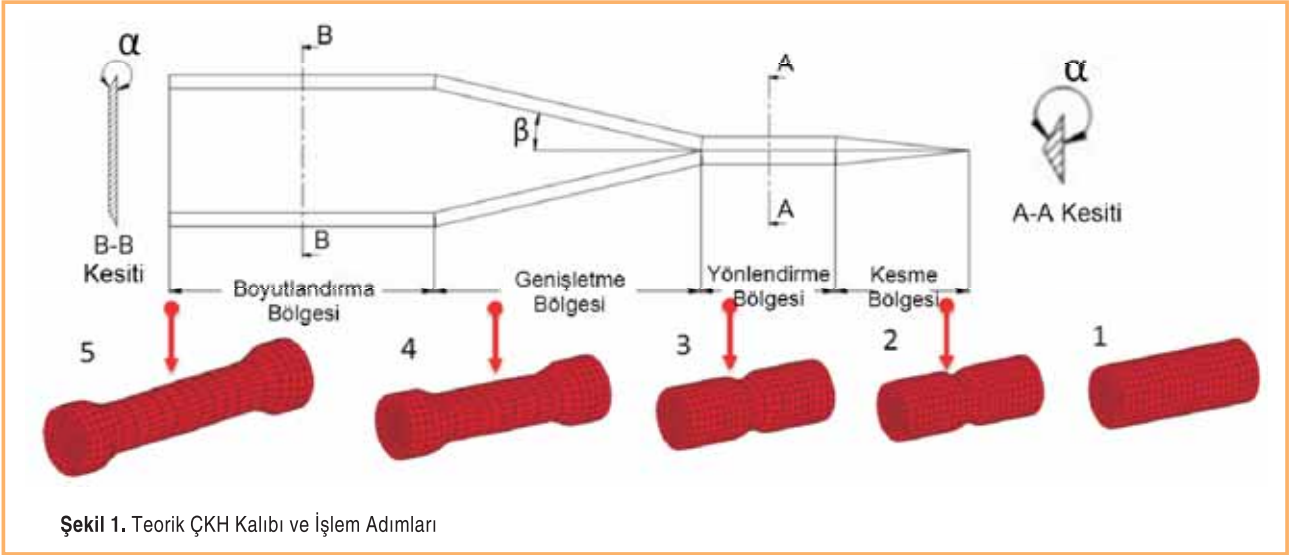
1. GİRİŞ

Çapraz kama haddemele (ÇKH), birbirine karşı hareket eden düz plakalar ya da merdaneler üzerine oluşturulmuş kamalar ile genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir metal şekillendirme işlemidir. ÇKH, yüksek üretim kapasitesi, kısa işlem süreleri, düşük işletme maliyeti, düşük ham madde kullanımı ve son ürünlerde yüksek mekanik özellikler sağlaması dolayısıyla diğer metal şekillendirme işlemlerine kıyasla daha çok tercih edilmesi gereken bir yöntemdir [1-4]. ÇKH işlemlerinde iki çeşit kalıp kullanılmaktadır: Basit geometriye sahip parçalar için teorik kalıplar ve karmaşık geometriye sahip parçalar için karmaşık işlem kalıplarıdır. Şekil 1'de teorik kalıp yapısı gösterilmektedir. Teorik kalıplarda dört ana şekillendirme bölgesi vardır. İş parçası ilk olarak kesme bölgesine gelir ve burada üzerine V şeklindeki bir kesik oluşturulur. Bu kesik yönlendirme bölgesi boyunca düzeltilerek devam ettirilir. İş parçası genişletme bölgesine geldiğinde aksiyal yönde deforme edilerek çapı istenilen değerlere (Δr değerine) düşürülür. Son bölge olan boyutlandırma bölgesinde ise iş parçasına son boyutlar verilir. ÇKH kalıbında üç ana değişken bulunmaktadır. Bunlar iş parçasının kesit alanında meydana gelecek deformasyon miktarını gösteren % alan indirilmesi ($\% \Delta r = 100[1 - (d/d_0)^2]$), aksiyal yönde deformasyon miktarını belirleyen genişletme açısı (β) ve omuz açısı (α)'dır.

Karmaşık geometriye sahip parçalar çok çeşitli profiller içerebilir.

kalıbında yönlendirme bölgesi bulunmamakta, iş parçası kesme bölgesinden hemen sonra genişletme işlemine tabi tutulmaktadır. İş parçasının tamamına ya da belirli bir kısmına verilecek farklı geometriler (örneğin küresel) genellikle kalıbın genişletme bölgesinde oluşturulur [5].

Literatürde yapılan çalışmalarda kalıp tasarımının, son ürünün geometrisine göre CAD programları ile otomatikleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmalarda Solidworks, ProEngineer gibi 3D-CAD programlarıyla çalışacak kullanıcı tanımlı kodlar yazılmaktadır. Yazılımlar iş parçasının son geometrisine göre kalıbın katı modelini oluştururken, kalıp değişkenlerini de eniyileyeabilmektedir [7]. Ancak yapılan çalışmalarda tasarlanan kalıpların hepsi merdane tipi kalıplardır. Mevcut kalıp tasarımını zorlaştıran diğer bir unsur ise içi boş iş parçalarının ÇKH işlemidir. İçi boş parçaların radyal dayanımları daha düşük olduğundan dolayı işlem sırasında tam olarak şekillendirilemeyebilirler [9]. İçi boş parçalarda genellikle çökme ya da kesitinde ovalizasyon görülmektedir [9,10]. Özellikle et kalınlığının düşük olduğu parçaların ÇKH işlemlerinde kesit bölgesinde oluşan ovalizasyonun giderilemediği görülmüştür [11]. Ayrıca içi boş parçaların haddelenmesinde kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünmenin yetersiz olması da işlemin tamamlanamamasına sebep olmaktadır. Sürtünme üstüne yapılan çalışmalarda içi dolu parçalar için belirlenen kritik sürtünme katsayılarının içi boş parçaların ÇKH işlemlerinde kullanılmasının uygun olmadığı görülmüştür [12].



Şekil 1. Teorik ÇKH Kalıbı ve İşlem Adımları

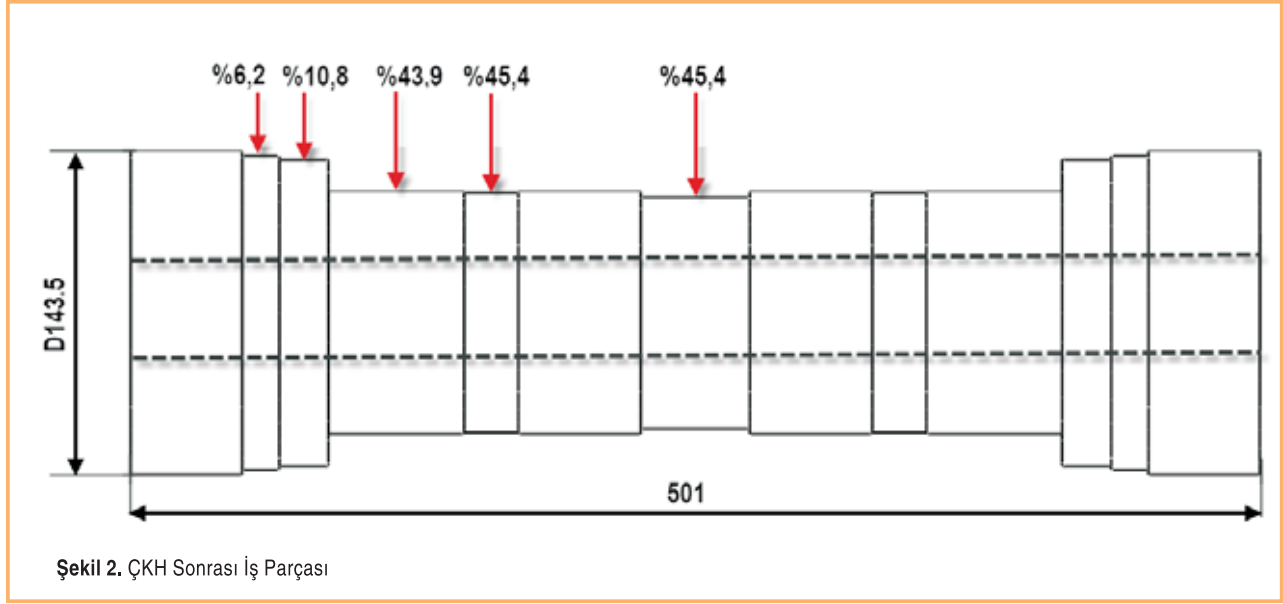
Bu sebeple kalıplarda iş parçasının dış geometrisine uygun olarak tasarlanırlar. Karmaşık işlem kalıplarında aynı bölgede birden fazla şekil verme işlemi gerçekleştirilebilir ki bu haddemele kuvvetlerinin artmasına ve işlemin kararsızlaşmasına sebebiyet verebilir. İşlem kararsızlığını engellemek için iş parçasında simetri kullanılması gerekir. Bu şekilde haddemele işlemi daha kararlı hâle gelirken, aynı anda iki adet parça üretilmiş olur. Ayrıca çoğu karmaşık işlem

Bu çalışmada içi boş ve karmaşık dış geometriye sahip iş parçasının sonlu elemanlar simülasyonu destekli ÇKH kalıp tasarımı ele alınmıştır. Tasarlanan kalıplarla gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ile iş parçasının tam olarak şekillenip şekillenmediği belirlenmiş ve sonuca göre mevcut kalıp tasarımı eniyilenmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonları ticari bir kod olan LS-DYNA programı kullanılarak yapılmıştır.

2. KALIP TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR SİMULASYONLARI

Şekil 2'de ÇKH işlemi sonrası istenilen bitmiş ürün şekli ve yüzde alan indirgemesi değerleri verilmiştir. Parçanın en dış çapı 143,5 mm boyu ise 250,5 mm'dir. ÇKH işleminde son parça simetrik olarak iki adet üretilmektedir. Bu nedenle toplam boy 501 mm'dir. Parça üzerinde toplam beş adet alan indirgemesi bulunmaktadır. Delik çapı ise 70 mm'dir. İş parçası malzemesi AISI 1045 çeliğidir.

olan etkisinin de işleme dâhil edilmek istenmesidir. Modellerde ısı analizler “implicit”, mekanik analizler ise “explicit” olarak çözülmüştür. Kalıpların sonlu elemanlar ağında üç düğümlü üçgen ve dört düğümlü dört kenarlı elemanlar bir arada kullanılmıştır (Şekil 4). Kalıpların ana deformasyon bölgeleri olan kamalar eleman nüfus etmesini engellemek amacıyla daha sık elemanlara ayrılmıştır. Analizlerde iş parçasına ait elemanların deformasyon sonucu bozulmasını engellemek amacıyla HOURGLASS kullanılmıştır. Programda katı



ÇKH kalıp tasarımından önce belirlenmesi gereken en önemli faktörlerden biri iş parçasının ilk boyudur. İş parçasının ilk boyunu belirlemek için empirik olarak geliştirilmiş formüller kullanılmaktadır. Bu formüller aşağıda verilmiştir [13]:

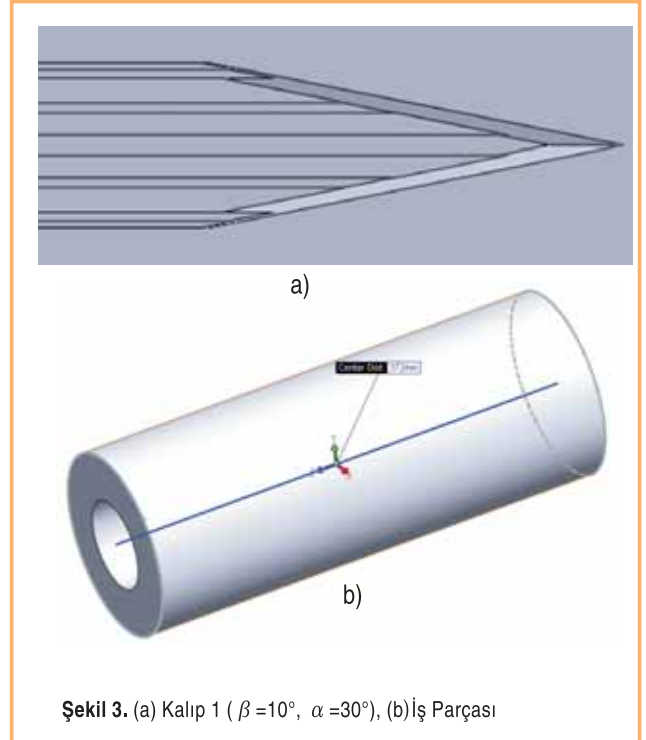
$$V_i = 1.01 V_0 \quad (1)$$

$$L_i = 1.27 (V_i / D^2) \quad (2)$$

Bu denklemlerde V_i , V_0 , L_i , D sırasıyla iş parçasının hacmi, bitmiş ürün hacmi, iş parçasının ilk boyu ve iş parçası çapıdır. Denklem 1 ve 2 kullanılarak yapılan hesaplamalarda iş parçasının ilk boyu 372 mm olarak bulunmuştur.

İş parçasının çapının büyük olması kalıp boyunun uzunluğunun artmasına neden olmaktadır. Kalıp boyunun minimum değerinde tutulması için büyük genişletme açısının kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle tasarlanan ilk kalıpta genişletme açısı 10° olarak alınmıştır. Omuz açısı 30° , kalıbın toplam boyu ise 1741 mm'dir. Bu kalıp “Kalıp-1” olarak adlandırılmıştır. Şekil 3(a) ve (b)'de kalıp ve iş parçası verilmiştir.

Isıl-mekanik sonlu elemanlar simülasyonları LS-DYNA V971 programıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ısı çözücünün kullanılması nedeni oluşan ısının 1045 çeliğinin akış gerilmesine

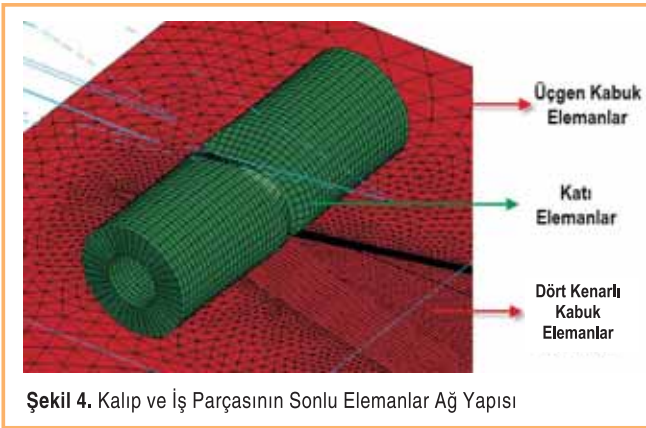


elemanlar için uygun olan 5.tip hourglass modeli kullanılmış ve hourglass katsayısı 0,05 olarak alınmıştır. İş parçası ile kalıplar arasında SURFACE_TO_SURFACE kontak algoritması kullanılmıştır. Bu kontak tipi Coulomb formülasyonunu kullanmaktadır [14]:

$$\mu = FD + (FS - FD)e^{-DC|V_{rel}|} \quad (3)$$

Bu denklemde FD dinamik sürtünme katsayısı, FS statik sürtünme katsayısı, DC üstsel bozulma katsayısı ve V_{rel} ise temas yüzeylerinin hızıdır. Simülasyonlarda statik ve dinamik sürtünme katsayısı 0,5 olarak alınmıştır.

Her bir kalıp 82.208 adet eleman içermektedir. İş parçasında homojen dağılıma sahip sekiz düğümlü katı elemanlar kullanılmıştır. Toplam hesaplama zamanını azaltmak amacıyla yapılan parametrik çalışmalar sonucunda iş parçasında kullanılacak olan en büyük eleman boyutu (yaklaşık 6-7 mm) belirlenmiştir. Çok büyük eleman boyutu (10-20 mm arası) kullanımı hesaplama zamanını azaltmasına karşın, sonuçların doğruluk payını önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. İş parçasında toplam 16.960 adet deforme olabilen eleman içermektedir. Haddemele işleminde iş parçası sıcaklığı 500°C, kalıp sıcaklığı 180 °C'dir. Simülasyonlardaki toplam ÇKH işlem süresi 5 sn'dir.



Şekil 4. Kalıp ve İş Parçasının Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

Simülasyonlarda kalıplar rijit kabul edilip MAT_RIGID malzeme modeli ile modellenmiştir. İş parçası için MAT_JOHNSON_COOK malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli denklem 4'te gösterilmektedir [15].

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) (1 - T^{*m}) \quad (4)$$

Burada σ , ϵ ve $\dot{\epsilon}$ sırasıyla, efektif gerilme, efektif gerinim ve efektif gerinim hızıdır. A, B, n, c, m model sabitleri ve $\dot{\epsilon}_0$ referans efektif gerinim hızıdır. T^* aşağıdaki denklemle ifade edilir;

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

Denklem 5'te verilen T, T_r ve T_m sırasıyla sıcaklık, oda ve ergime sıcaklıklarıdır.

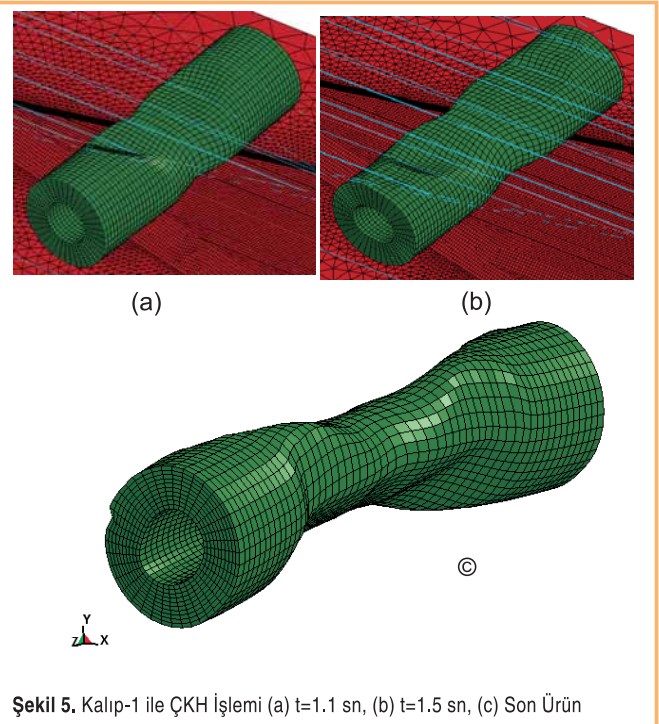
1045 çeliğinin JC katsayıları Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan malzeme ve sonlu elemanlar modelinin ÇKH deneyleriyle doğrulanması işlemi yazarların geçmiş çalışmasında verilmiştir [16]. Bu çalışmada ise yapılan işleme ait herhangi bir deney bulunmamaktadır. Ancak geçmiş çalışmada [16] kullanılan malzeme modelinin ve oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin öngörme kapasitesinin yüksek olması, tamamen nümerik olan bu çalışmayı mümkün kılmaktadır.

Tablo 1. AISI 1045 Çeliği JC Model Parametreleri

Malzeme modeli	A (MPa)	B (MPa)	c	n	m	$\dot{\epsilon}_0$	T_r (°C)	T_m (°C)
AISI 1045	105,84	198,61	0,085	0,331	0,52	1	25	1500

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

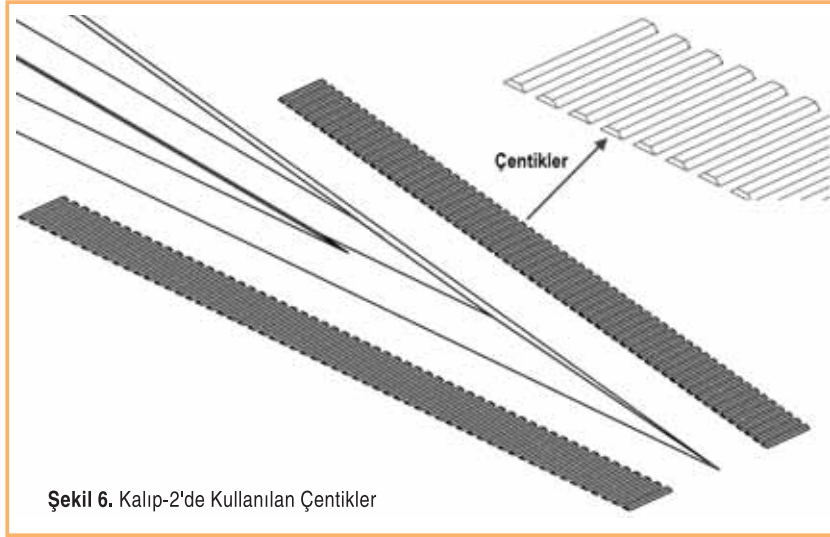
Şekil 5'te Kalıp-1 ile gerçekleştirilen ÇKH işlem sonucu gösterilmektedir. İş parçası kesme bölgesinde deforme edildiğinde kesiti neredeyse düzleşmiş, genişletme bölgesinin yirminci milimetresinde tamamen çökerek hasara uğramıştır. Kesme bölgesi ve genişletme bölgesinde iş parçasının dönmeden sürüklendiği görülmüştür. Kesitin çökmesinin ana nedenlerinden biri de budur. Bu nedenle iş



Şekil 5. Kalıp-1 ile ÇKH işlemi (a) t=1.1 sn, (b) t=1.5 sn, (c) Son Ürün

parçası ile kalıp arasındaki sürtünmenin artırılması gerektiği görülmüştür.

Yapılan analiz sonucunda Kalıp-1'in kesme ve genişletme bölgesinin belirli bir kısmına sürtünmeyi arttırmak amacıyla çentikler oluşturulmuştur (Şekil 6). Böylece işlem sırasında iş parçasının kalıba daha iyi tutunması amaçlanmıştır.



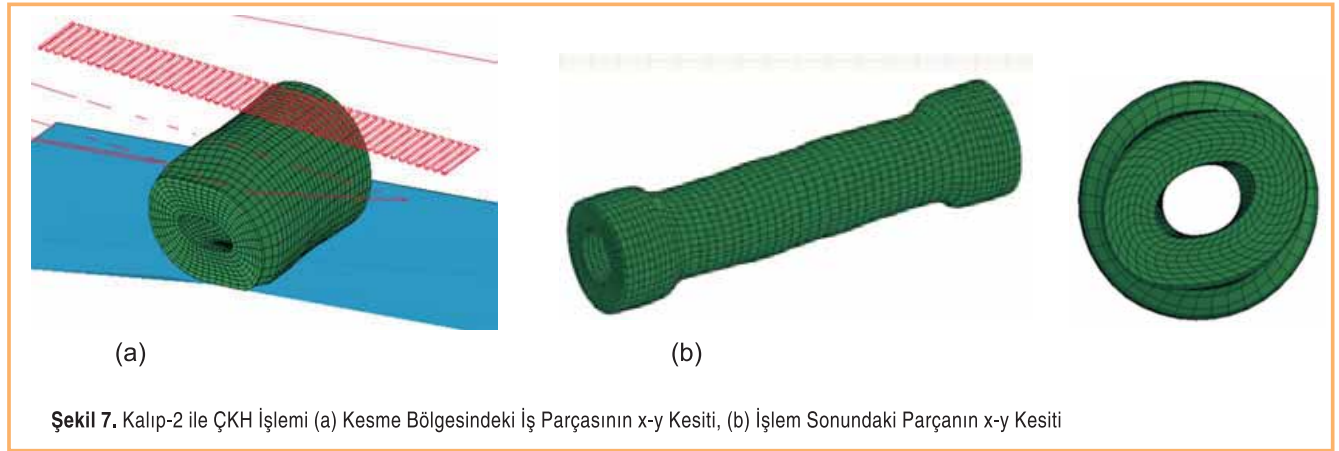
Şekil 6. Kalıp-2'de Kullanılan Çentikler

Literatürde yer alan bazı çalışmalarda ovalizasyonun giderilmesi konusu işlenmiştir. Celikov [13] ovalizasyonun engellenmesi için omuz açısının 45° olması gerektiğini ve boyutlandırma bölgesinin uzunluğunun artırılması gerektiğini belirlemiştir. Fang ve arkadaşları [17] ise işlemin daha dengeli olması için aşağıdaki denklemin sağlanması gerektiğini bulmuşlardır:

$$0,04 \leq \tan\beta \tan\alpha \leq 0,08 \quad (6)$$

Bu bilgilere göre tasarlanan ve Kalıp-3 olarak adlandırılan kalıp, 7° genişletme açısına ve 30° omuz açısına sahiptir. Kalıbın toplam boyutu 2344 mm'dir. Boyutlandırma bölgesi uzunluğu 200 mm kadar uzatılmıştır. Tasarlanan kalıp Şekil 8'de gösterilmektedir.

Kalıp-3 ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen iş parçası geometrisi Şekil 9'da gösterilmiştir. İş parçası işlem sonunda tam olarak şekillenmiş ve kesitinde ovalizasyon meydana gelmemiştir. İş parçası kesiti genişletme bölgesinin ilk kısımlarında eliptik şekilde olmasına rağmen, bu bölgenin sonunda dairesel forma yaklaşmış, boyutlandırma bölgesi boyunca ise tam daire

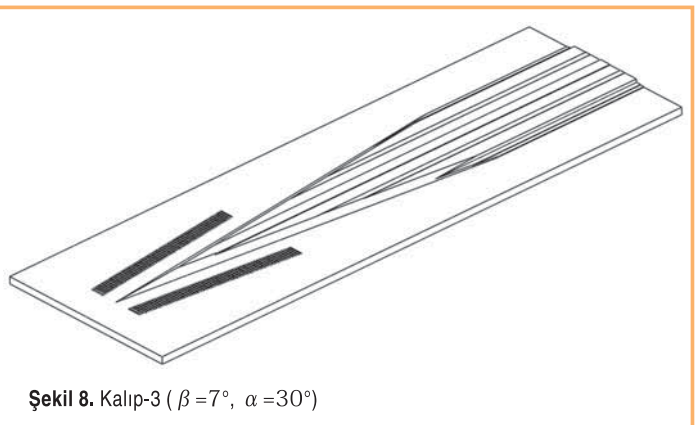


Şekil 7. Kalıp-2 ile ÇKH İşlemi (a) Kesme Bölgesindeki İş Parçasının x-y Kesiti, (b) İşlem Sonundaki Parçanın x-y Kesiti

Çentikler iş parçalarında kalıcı şekil değişikliklerine sebep olabileceğinden ve kalıp işleme maliyetlerini arttıracığından dolayı mümkün olan en az sayıda çentik kullanılmıştır. Bu kalıp, Kalıp-2 olarak adlandırılmıştır.

Şekil 7'de Kalıp-2 ile gerçekleştirilen ÇKH işlem sonucu gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kesme bölgesinde (Şekil 9(a)) iş parçasının kesiti neredeyse düz hâle gelmesine rağmen herhangi bir çökme görülmemiş, iş parçası dönmeye devam etmiştir. ÇKH işlemi sonunda meydana gelen iş parçası incelendiğinde; kesitinde ovalizasyon meydana geldiği görülmüştür.

Ovalizasyon ÇKH ürünlerinde istenmeyen bir hatadır.



Şekil 8. Kalıp-3 ($\beta = 7^\circ$, $\alpha = 30^\circ$)

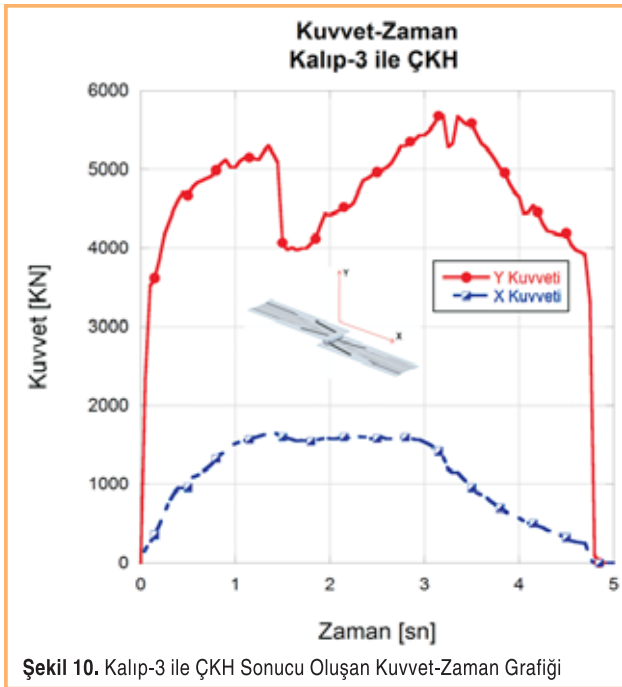
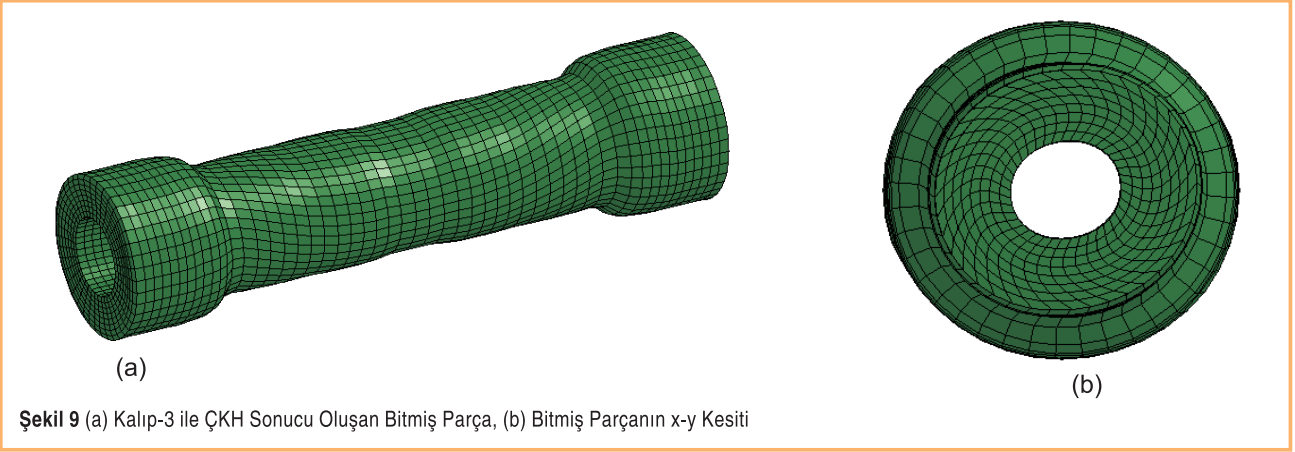
şekline gelmiştir. Genişletme açısının küçük olması durumunda bu bölgenin boyu artmakta, bu da iş parçasının kalıp içerisinde hem daha çok kalmasına hem de daha yavaş deforme edilmesine sebebiyet vermektedir. Bu nedenle kesitte meydana gelen istenmeyen deformasyon kalıbın ileriki bölümlerinde düzeltilebilmektedir.

Kalıp-3 ile yapılan ÇKH işlemi sonucunda oluşan kalıp kuvvetleri Şekil 10'da verilmiştir. Burada x kuvveti teğetsel kuvvet, y kuvveti ise dik kuvvettir. Teğetsel kuvvet kesme bölgesi boyunca hızla artmakta ve genişletme bölgesinde sabit kalmaktadır. Dik kuvvet ise kesme bölgesi boyunca hızla artmakta, iş parçasının çentiklerden çıkmasıyla ani olarak 4000 KN değerine düşmektedir. Genişletme bölgesi boyunca hızla artarak maksimum noktaya ulaşmakta, boyutlandırma bölgesinde ise düşmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada içi boş ve karmaşık dış geometriye sahip iş parçasının sonlu elemanlar simülasyonu destekli ÇKH kalıp tasarımı ele alınmıştır. Tasarlanan kalıplar ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleriyle iş parçasının tam olarak şekillenip şekillenmediği belirlenmiş, ulaşılan sonuca göre kalıp tasarımları değiştirilmiştir. Çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- İçi boş parçaların ÇKH işleminde çentik kullanılmasını gerektiği görülmüştür. Özellikle kesme bölgesinde ve genişletme bölgesinin belirli bir kısmında çentik kullanılması sürtünmeyi artırarak “dönmeden-kayma” problemini ortadan kaldırmakta ve iş parçasının işlem sırasında ezilmesini önlemektedir.
- İçi boş parçaların haddelenmesinde genişletme açısının iş



parçasının doğru şekillenmesi için yüksek değerlerde tutulmaması gerektiği görülmüştür. Ancak kalıp boyunun kontrol altında tutulması için mümkün olan en büyük genişletme açısı kullanılmalıdır. Bu nedenle kalıp tasarımlarının sonlu elemanlar ile desteklenmesi mecburidir.

SEMBOLLER

- d Son çap
- d_0 İlk çap
- β Genişletme Açısı
- α Omuz Açısı
- Δ_r Alan indirgemesi
- V_i İş parçası hacmi
- V_u Ürün hacmi
- L_i İş parçası boyu
- D İş parçası çapı
- t Zaman

KAYNAKÇA

1. **Dong, Y., Lovell, M., Tagavi, K.** 1998. "Analysis of Interfacial Slip in Cross-Wedge Rolling: an Experimentally Verified Finite-Element Model," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, p. 273-281,
2. **Fu, X. P., Dean, T. A.** 1993. "Past Developments, Current Applications and Trends in the Cross Wedge Rolling Process," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 33, p. 367-400.
3. **Hu, Z. H., Xu, X. H., Sha, D. Y.** 1985. "Skew Rolling and Cross Wedge Rolling Principles, Processes and Machines," Presented at the Metall. Ind. Press, Beijing, China.
4. **Pater, Z.** 1997. "Theoretical Method For Estimation of Mean Pressure on Contact Area Between Rolling Tools and Workpiece in Cross Wedge Rolling Processes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 39, p. 233-243.
5. **Pater, Z., Bartnicki, J., Samolyk, G.** 2005. "Numerical Modelling of Cross-Wedge Rolling Process of Ball Pin," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, pp. 1235-1240.
6. **Jing, Z., Xuedao, S., Zhenghuan, H.** 2007. "Computer Aided Design For Cross Wedge Rolling Tools of Automobile Semi-Axes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187-188, pp. 41-45.
7. **Wang, M. Li, Du, X. F., Zheng, Y.** 2005. "A Coupled Thermal-Mechanical and Microstructural Simulation of the Cross Wedge Rolling Process and Experimental Verification," *Materials Science and Engineering A*, vol. 391, p. 305-312.
8. **Li, Q., Lovell, M.** 2008. "Cross Wedge Rolling Failure Mechanisms and Industrial Application," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, p. 265-278.
9. **Urankar, S., Lovell, M., Morrow, C., Li, Q., Kawada, K.** 2006. "Establishment of Failure Conditions For the Cross-wedge Rolling of Hollow Shafts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, p. 545-549.
10. **Bartnicki, J., Pater, Z.** 2005. "Numerical Simulation of Three-Rolls Cross-Wedge Rolling of Hollowed Shaft," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, p. 1154-1159.
11. **Bartnicki, J., Pater, Z.** 2004. "The Aspects of Stability in Cross-Wedge Rolling Processes of Hollowed Shafts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155-156, p. 1867-1873,
12. **Urankar, S., Lovell, M., Morrow, C., Li, Q., Kawada, K.** 2006. "Development of a Critical Friction Model For Cross Wedge Rolling Hollow Shafts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, p. 539-544.
13. **Celikov, A. I.** 1982. *Cross Wedge Rolling in Metalworking*, Masinstroenie, Moscow, Russia.
14. **L, LS-DYNA Keyword User's Manual vol. II: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2007.**
15. **Johnson, W., Mamalis, A. G.** 1977. "A Survey of Some Physical Defects Arising in Metal Working Processes," Presented at the Proc 17th International MTDR Conference, London, U.K.
16. **Çakırcalı, M., Kılıçaslan, C., Güden M., Yardımoğlu, B., Shchukin, V., Petronko, V.** 2010. "Çapraz Kama Haddeme İşleminin Sonlu Elemanlar Simulasyonu ve Parametrik Çalışması," *MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, vol. 51., Sayı 608.
17. **Fang, G., Lei, L. P., Zeng, P.** 2002. "Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Simulation for the Two-roll Cross-Wedge Rolling Process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, p. 245-249.