



## 16MnCr5 ESASLI ROT PARÇASININ SOĞUK DÖVME İŞLEMİ İLE ÜRETİM SİMULASYONU VE ÜRETİM SÜREÇLERİNİN OPTİMİZASYON PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

*(SIMULATION OF COLD FORGING PROCESS SIMULATION FOR  
16MnCr5 BASED ROD PIECE AND INVESTIGATION OF  
OPTIMIZATION PARAMETERS)*

Ömer KARADAĞLI<sup>1</sup>, Osman ÇULHA<sup>2</sup>

### ÖZET/ABSTRACT

Günümüzde metal şekillendirme sanayisinde soğuk dövmenin payı arttıkça, soğuk dövme işlemi için gereken AR-GE ihtiyacı artmaktadır. Ancak AR-GE çalışmalarını gerçek üretim yöntemleri ile yürütmek zaman ve maliyet gerektiren bir süreçtir. Bu çalışmada, 16MnCr5 esaslı bir rot parçasının soğuk dövme ile üretimi, sonlu elemanlar yöntemi kullanan 3 boyutlu benzetim ortamına aktarılması ve daha sonra üretimdeki pres hızı ve sürtünme katsayısı parametreleri değiştirilerek, üretim sırasındaki basma kuvvetlerindeki değişimler ve üretim sonunda iş parçasında gerilmeler incelenmiştir. Çalışmaların sonucunda, pres hızının ve sürtünme katsayısının, gerilme ve basma kuvveti değerlerine olan etkisi incelenmiştir.

*Today, as the share of cold forging in metal forming industry grows, the need for cold forming R&D demand is increasing. However, running R&D works with the actual production method is a business that requires time and cost. In this paper, cold forging production of a rod part with using 16MnCr5 material, transferred to 3D simulation that uses Finite Element Method, and then, by shifting press speeds and coefficient of friction of forging process, changes in press forces during forging production and stress values at the end of forging process were examined. As a result of study, effects of the press speed and coefficient of friction to stress values and press forces were examined.*

### ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Soğuk dövme, Sonlu elemanlar, Benzetim  
*Cold forging, Finite-elements, Simulation*

<sup>1</sup> Celal Bayar Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. Böl., 45140 MANİSA

<sup>2</sup> Celal Bayar Ün., Mühendislik Fak., Malzeme Müh. Böl., 45140 MANİSA, e-posta: osman.culha@cbu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Belirli bir hacime sahip katı cismin başlangıç kesitini başka bir kesite dönüştürmek amacıyla uygulanan ve bu işlem sırasında cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan yöntemler, genel olarak plastik şekil verme yöntemleri olarak tanımlanmaktadır. Plastik şekil verme işlemleri sac ve kütle şekillendirme olmak üzere 2 grupta sınıflandırılmaktadır. Sacların plastik olarak şekillendirilmesinde, belli bir cidar kalınlığına sahip içi boş hacimlerin elde edilmesi esasına dayalı bir kalıcı deformasyon uygulanırken kütle şekillendirmesinde; yarı mamul olan iş parçasının, etkiyen farklı yönlere yüksek gerilmeler ile karmaşık geometrilere sahip kalıpların şeklini alması sağlanmaktadır. Ayrıca, plastik şekillendirme yöntemleri uygulanan gerilme çeşidine göre 5 farklı gruba ayrılmaktadır. Basma türü şekillendirme; iş parçası veya hammaddenin esas olarak tek veya çok eksenli basma gerilmelerinin etkisi altında şekil değiştirdiği, birleşik çekme ve basma türü şekillendirme; iş parçasının şekil değişiminin esas olarak birleşik tek veya çok eksenli çekme ve basma gerilmelerinin etkisiyle sağlandığı, çekme türü şekillendirme; iş parçası şekil değişiminin tek veya çok eksenli çekme gerilmeleri etkisinde olduğu, eğme türü şekillendirme; iş parçasının eğilme gerilmeleri ile şekil değiştirdiği, kesme türü şekillendirme de ise yeniden şekillenen iş parçalarının kayma ve kesme gerilmelerinin daha etkin olmasından kaynaklanan şekillendirme yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır (Callister, 2007; Dieter, 1988).

Kütle şekillendirme yöntemlerinden olan Dövme Prosesi ise çok eski bir üretim tarzıdır. İş parçasının kalıp adı verilen takımlar yardımıyla darbe veya basınç altında kontrollü olarak plastik şekil değiştirdiği, tane boyunu küçültme ve mekanik özelliklerini iyileştirme amacıyla uygulanan bir yöntem olup kalıp özelliklerine göre açık ve kapalı kalıpla dövme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dövmede, dövülen iş parçasının yan yüzeylerinin serbest olarak hareket ettiği hale açık kalıpla dövme olarak tariflenirken, genellikle boyut ve şekil hassasiyeti aranmadan basit ve düz şekilli kalıplarla yapılan bir işlemdir. Karmaşık şekilli parçaları açık kalıpta dövme yöntemi ile elde etmek çoğu kez mümkün değildir. Çünkü açık kalıpta dövme işleminde malzeme en az bir doğrultuda serbest şekil değişimine uğrar. Karmaşık şekilli parçaların dar toleranslar içinde elde edilebilmesi için birbiri üstüne kapanan ve elde edilecek parçanın negatif şekline sahip kalıplar kullanılmaktadır (Callister, 2007; Dieter, 1988). Ayrıca soğuk şekillendirme prosesine göre daha az deformasyon enerjisi gereksinimi duymaktadır. Birçok sıcak şekillendirme uygulamasında da, malzeme kaybı ve kalitesiz yüzey özellikleri oluşumuna neden olan yüzey oksidasyonu ve son ürün ölçülerinde yüksek işleme toleransı payı ortaya çıkmaktadır. Soğuk gerçekleşen şekillendirme prosesinde ise yüksek deformasyon enerjisine gereksinim duyulmakta, yüksek yüzey kalitesi (çatlaksız ve minimum yüzey pürüzlülüğüne sahip) ve son ürün ölçüsüne en yakın değerlerde iş parçası üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Dövme işleminde iş parçasının ağırlığı ve üretim sıcaklığına bağlı parametreler Çizelge 1’de verilmiştir.

Bu makale konusu olan otomotiv rot parçasının performansı kriterleri dikkate alındığında; öncelikle farklı eksenlerden gelen yüklerin yaratacağı gerilmelere mukavemet göstermeli ve dinamik yükler altında standartlar dahilinde ömre sahip olmalıdır. Bu özelliklerin fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak karşılayan parametreler, üretim, yapı ve özellik matrisidir. Üretim yöntemi doğrudan yapıyı ve özelliği etkileyen başlangıç parametresidir. Bilindiği üzere çok kristalli metalik malzemelerin soğuk plastik deformasyonu sonucunda, standart eş eksenli tane boyutu dağılımına sahip olan mikroyapı, deformasyon yönünde yeralan malzeme akış çizgilerine sahip olmaktadır. Tanelerin yönlenmesi ve küçülmesi sayesinde mikroyapı değişmekte ve özelliklerin deformasyon yönünde maksimum değerlere sahip olması sağlanmaktadır. Ayrıca oda sıcaklığında soğuk olarak gerçekleştirilen bu proseste, çok

kristalli malzemenin birim hacminde bulunan dislokasyon sayısı artırılmakta ve deformasyon sertleşmesi meydana gelmektedir. Böylece soğuk deforme olan malzemenin başlangıç durumuna göre duktilitesinde azalan, sertliğini ve mukavemetinde artan bir özellik kompozisyonu ortaya çıkarılmaktadır.

Çizelge 1. Dövme işlemlerinin işlem karakteristiklerinin karşılaştırılması (Sheljaskov, 1994)

	Sıcak	Ilık	Soğuk
İş Parçasının Ağırlığı	<60 kg	<10 kg	<2 kg
Çelik Sınıfı	Herhangi	C istenilir, Diğer alaşım elementleri < %10	Düşük alaşım çelikler (C < %0,45, diğerleri < %3)
Şekil	Alttan kesme olmadan herhangi	Alttan kesme olmadan dönel-simetrik	Alttan kesme olmadan dönel-simetrik
Yüzey Kalitesi	Düşük	Orta	Yüksek
Ara İşlemler	Gerekli değil	Normalde yüzey işlemi yok	Tavlama ve fosfat kaplama
Deformasyon Basıncı	Düşük	Orta	Yüksek
Enerji Maliyeti	Yüksek	Orta	Düşük
Toleranslar	Bol	Yakın	En Yakın
Takım Maliyeti	En düşük	Yüksek	Yüksek

Proses dizaynı açısından soğuk dövme yönteminde kullanılan presler büyük önem taşımaktadır. Soğuk dövme prosesini diğer yöntemlerden ayıran en önemli özelliği nihai ürün şeklinin düşük toleranslarda elde edilmesi ve ikinci bir işleme tabi tutulmamasıdır. Dövme yöntemi ile üretilen parçaların geometrik doğruluğu hammadde boyutlandırması, ısıl işlemi, tufal uzaklaştırması ve yüzey işlemi, kalıp geometrisi, tasarımı, kalıp-hammadde arasındaki sürtünme katsayısı, kalıbın elastik deformasyonu ve prosesin uygulandığı pres gibi üretimden kaynaklı bir çok parametreden etkilenmektedir. Bu parametrelerin içinde pres çeşidi ve kapasitesi iş parçasının doğruluğunu yakından etkileyen faktörlerdir. Malzemeye istenen fiziksel ve mekanik özellikler malzeme akışı ve kontrollü deformasyon sayesinde kazandırılmaktadır. Proses dizayn edilirken pres yükü, kalıp merkezlenmesi ve deformasyonun sürekli kontrol edildiği (flow control forming) çoklu süreç sürekli şekillendirme işlemlerindeki dövme makinelerinin parça etkisi tartışılmış ve parça doğruluğunu artırıcı yeni tasarımlar geliştirilmiştir Proses dizayn edilirken bir diğer hususta önceden belirlenmiş proses durum parametreleri ve takım geometrisine dayalı çok aşamalı soğuk şekillendirme süreçlerinin analizinin yapıp benzetim ve yapay sinir ağları modeli kullanmanın kazandırdığı tasarım avantajlarıdır (Ishinaga, 1997; Hsu ve Lee, 1997; Hyunkee ve Taylan, 1996). Kim Hyunkee ve Taylan Altan 1996 yılında yaptıkları çalışmada, literatürde bulunan soğuk dövülmüş parçalar ile dövme endüstrisi hakkında sektör bilgileri yer almaktadır. Örnek bir soğuk dövme parçası için her bir istasyonda ortaya çıkan boyutlar ve süreç dizileri hakkında bilgiler verilmiş ve bir bilgisayar programının kütüphanesine

eklenmiştir. Proses dizaynı sırasında kullanılan bu asistan program sonlu elemanlar model benzetim, desteği ile herbir ürün için dizayn çevrim süresini ve soğuk dövme dizilerinin tasarımını gerçekleştirmektedir.

Şekillendirme prosesi üretim parameterlerini etkileyen bir diğer parametere de kullanılan lubrikantlardır. Soğuk şekillendirme prosesinde kullanılan farklı lubrikantlar yağlayıcı olarak görev yapmakta ve formasyon farklılığına göre doğrudan sürtünme katsayısına etki ederek uygulanan kuvvet değerini değiştirmektedir. Sektörde kullanılan bazı katı yağlayıcıların uygulanan kuvvete olan etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, lubrikantlar katı film ve sıvı akışkan esaslı olacak şekilde sınıflandırılarak soğuk deformasyona olan etkileri araştırılmıştır. Hyunok ve arkadaşları tarafından dört farklı katı film esaslı yağlayıcı ile bir sıvı yağlayıcı kullanılarak yapılan derin çekme şekillendirmesinde sonlu elemanlar model benzetiminin ters algoritmalarını kullanarak sürtünme katsayısı ve kalıba uygulanan kuvvete etkisi belirlenmiştir (Hyunok vd., 2007).

Bu süreçteki üretim kalitesini yükseltmek ve maliyeti düşürmek için en önemli kısıtlardan biri de üretim öncesi ARGE çalışmalarıdır. Bu ARGE çalışmalarında yeni bir parça tasarlamak ve o parçayı çeşitli deneme üretimlerinden ve testlerden geçirip seri üretim haline getirmek, zaman ve maliyet gerektiren bir iştir. Ancak günümüzde bilgisayar destekli benzetim çalışmaları ile bu zaman ve maliyet azaltılabilmekte ve tasarımın veya deneme üretimlerinin ilk aşamaları benzetim yardımıyla sanal ortamda yapılarak iş kolaylaştırılabilmektedir. Bu nedenle sanayide benzetime giderek artan bir ilgi bulunmakta ve benzetim ile yapılan çalışmalar gün geçtikçe önem kazanıp, yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmanın konusu olan soğuk dövme işlemi kısaca belli bir hacme sahip malzemenin oda sıcaklığında ön ısıtma veya ara ısıtma yapılmadan dövülmesi veya şekil verilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Oda sıcaklığında süneklik gösteren bütün metaller soğuk dövülebilir. Bu grup, çoğunlukla çelik ve alüminyum alaşımlarından oluşmaktadır (Altan vd., 2005). Soğuk dövme işleminde; malzeme kullanımı yüksek seviyede olur, yüksek yüzey kalitesi elde edilir, sıcak dövmede olduğu gibi uygun tane akışı sağlanabilir ve parçanın istenilen son haline en yakın şekil verilebilir. Ancak; karmaşık şekilli parçaları üretmek zordur ve diğer dövme türlerine göre kalıp maliyetleri daha pahalıdır (Witt, 2011).

## 2. YÖNTEM

Günümüzde, metal üretim sektöründe benzetimlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Kullanılan bu benzetimlerdeki var olan en geçerli ve yaygın yöntemlerden birisi de sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, karmaşık bir problemin daha basit olanıyla değiştirilerek çözümünün bulunmasıdır (Rao, 2011). Sonlu elemanlar yöntemini temel alarak yazılan benzetim programları metal şekillendirmede büyük deformasyonları ve termal olarak etkilenmiş malzeme akışını tahmin edebilirler. Böylece, şekillendirme mekanikleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlayabilirler. Yeni çıkan sonlu eleman analiz araçlarını kullanan işlem benzetimleri, endüstride önemli maliyet ve kalite iyileştirmeleri sağlamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi benzetimleri, kalıp üretimi öncesinde yapılan endüstriyel şekillendirme işlemlerinin performans tahmininde pratik ve etkili araçlar haline gelmişlerdir. Bugün, sonlu eleman analizi endüstriyel uygulamalarda ve akademik çalışmalarda son derece etkili bir araçtır. Piyasada dökme metal şekillendirme uygulamaları için özel hazırlanmış birkaç ticari sonlu elemanlar yöntemi kodu mevcuttur. Bu kodlar, örnek vermek gerekirse, DEFORM, FORGE, simufact.forming ve Q-FORM'dur. ANSYS ve ABAQUS gibi diğer ticari kodlar da bu amaç için başarılı bir şekilde kullanılabilir (Valberg, 2010).

Çalışmada, İzmir-Kemalpaşa'da faaliyet gösteren EKO Endüstri Kalıp Otomotiv Plastik ve Spor Aletleri San. Dış.Tic.Ltd.Şti.'nin yakın zamanda üretmeye başladığı rot parçasına ait kesit, benzetim optimizasyonu yapılacak iş parçası olarak belirlenmiştir. Bu parçanın benzetim üretimi sonucundaki hali Şekil 1'de verilmiştir. ham iş parçası  $\varnothing 35,9 \times 19,5$  mm ölçülerinde olacak şekilde, kalıplar da Eko Endüstri'nin üretimde kullandığı kalıpların teknik resimlerine uygun olarak AutoCAD ve Solidworks® kullanılarak çizilmiştir. Yapılan bu çizimler dövme benzetimi gerçekleştirilmesi için simufact.forming yazılımı girdisi olarak hazırlanmıştır. Benzetimlerde üretim parametreleri değiştirilip sonuçları inceleneceğinde dolayı, karşılaştırma yapmak amacıyla gerçek üretimin parametre değerlerinin birebir aynı olan bir adet benzetim yapılmış ve bu benzetime temel benzetim olarak tanımlanmıştır. Temel benzetimde, iş parçası için malzeme 16MnCr5, hidrolik presin basma hızı 5 mm/s, sürtünme katsayısı 0,08 Coulomb, kalıp ve iş parçası başlangıç sıcaklığı ile çevre sıcaklığı da 20°C seçilmiştir. Bu süreçte kullanılan hem iş parçası hemde kalıp malzemenine ait özellikler çizelge 2 ve 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 16MnCr5 malzeme özellikleri

Malzeme Adı	DIN 16MnCr5		AISI 5115		1.7131
<b>Kimyasal Kompozisyon (%)</b>	C 0,14- 0,19	Si en fazla 0,40	Mn 1,15		Cr 0,95
<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	7,81				
<b>Elastisite Modülü (10<sup>3</sup>xN/mm<sup>2</sup>)</b>	210				
<b>Isıl Genleşme Katsayısı (10<sup>-6</sup>°C<sup>-1</sup>)</b>	11,1 (20-100 °C)	12,1 (20-200 °C)	12,9 (20-300 °C)	13,5 (20-400 °C)	13,9 (20-500 °C)
<b>Isıl İletim Katsayısı (W/m*K)</b>	41				
<b>Özgül Isı Sığası (J/g*K)</b>	0,46				

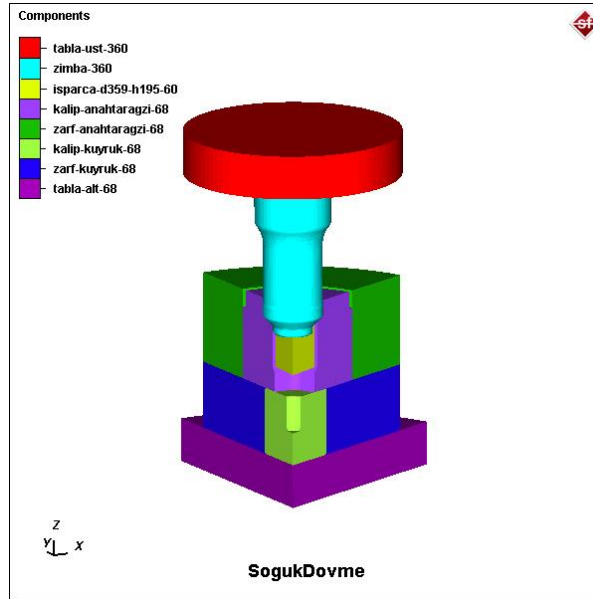
Çizelge 3. Uddeholm Vanadis 4E malzeme özellikleri

Malzeme Adı	Uddeholm Vanadis 4 Extra					
<b>Kimyasal Kompozisyon (%)</b>	C 1,4	Si 0,40	M n 0,4	Cr 4,7	M o 3,5	V 3,7
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7700					
<b>Elastisite Modülü (N/mm<sup>2</sup>)</b>	206000 (20 °C)		200000 (200 °C)		185000 (400 °C)	
<b>Isıl Genleşme Katsayısı (°C<sup>-1</sup>)</b>	10,9x10 <sup>-6</sup> (20-200 °C)			11,7x10 <sup>-6</sup> (20-400 °C)		
<b>Isıl İletim Katsayısı (W/m*C)</b>	30 (200 °C)			30 (400 °C)		
<b>Özgül Isı Sığası (J/kg*C)</b>	460					

Simufact.forming yazılımında çizimler ile girdilere ait offset tamamlandıktan sonra, benzetimdeki model Şekil 1 deki gibi temsil edilmektedir. Örnek kesite baktığımızda anahtar ağzına sahip bir uç ve silindirik devam eden bir alt kesitin akıtma sürecinden geçtiği görülmektedir. Bu kesit 3D olarak çözüm ağı oluşturmak yerine iş parçası 60°, kalıplar ise 68° olacak şekilde modellenmiştir. Bu süreçteki amaç, fazla eleman sayısı ve çözüm hızındaki yavaşlamanın önüne geçmek, snlu elemanlar benzetimdeki muhtemel matrisin küçültülmesi ile 1/6 oranında proses çıktısı, kuvvet, gerilme, vs. özellikleri elde etmektedir. Yazılım 1/6 olarak tanımlanan kesitin şekillendirilmesi sonucunda elde edilen benzetim çıktıları 6 katımı olarak vermektedir.



Şekil 1. İş parçasının benzetim sonundaki hali



Şekil 2. Simufact.forming'de benzetimin tüm parçaları ile görünümü

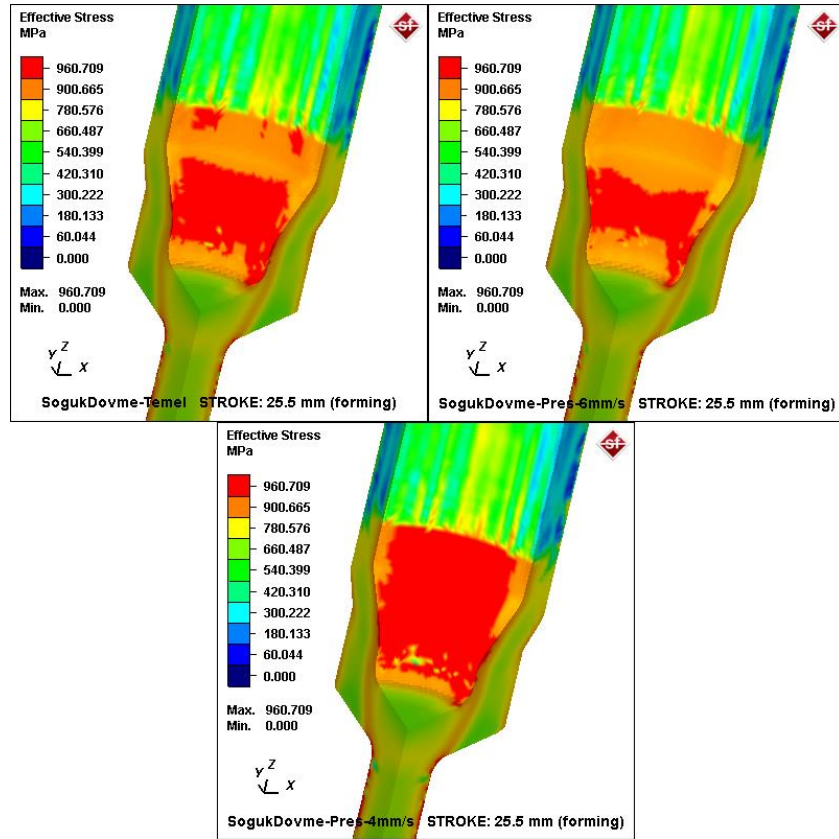
Üretim parametrelerinin değiştirildiği benzetimlerde, tek parametre dışındaki tüm değerler temel benzetim ile aynı tutulmuştur. İlk grup çalışması olarak pres hızı 6 mm/s olan bir benzetim ile, pres hızı 4 mm/s olan bir benzetim yapılmış ve benzetim sonuçları temel benzetim ile karşılaştırılmıştır. Diğer proseste ise sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb ve sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb olan benzetimler yapılarak benzetim sonuçları temel benzetim ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalarda, üretim parametrelerinin değişimlerinin sadece iş parçası üzerine olan etkileri incelenmiştir.

### 3. SİMULASYON SONUÇLARI

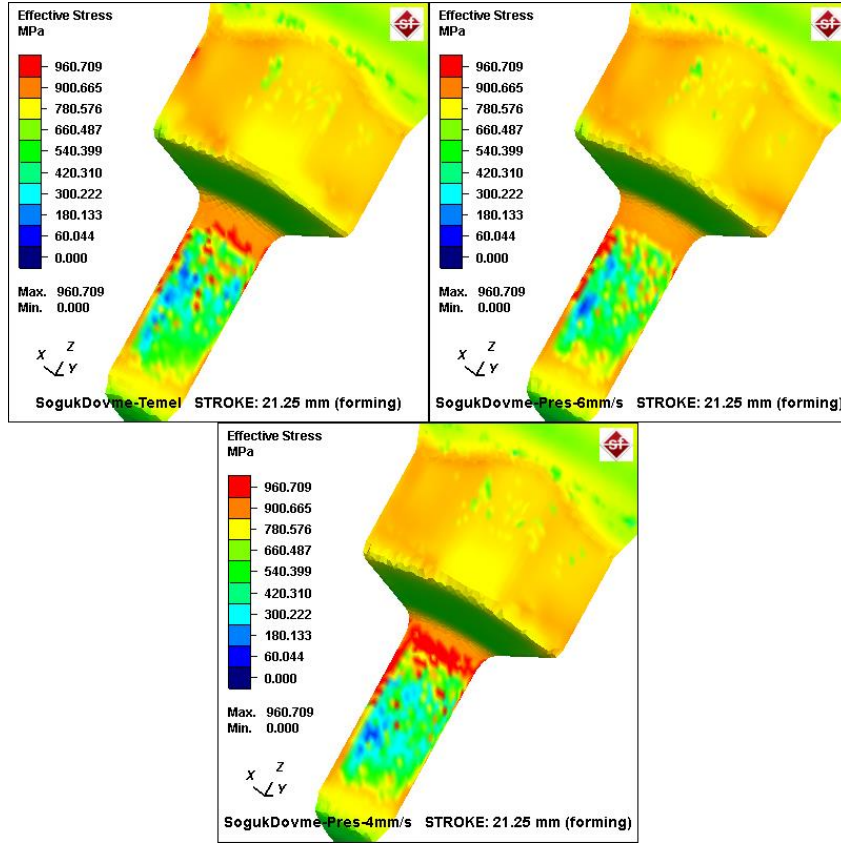
Bu çalışmada, üretim parametrelerinin değişimi iki grupta toplandığı için benzetim sonuçları da iki grupta incelenmiştir.

#### 3.1. Pres Hızı Değişiminin Benzetim Sonuçlarına Etkisi

Pres hızının 6 mm/s ve 4 mm/s seçildiği benzetimlerin, gerilme değerleri sonuçlarının temel benzetimdeki gerilme değerleri sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 3'te pres zımbasının basma yaptığı ve parçanın zımba ile temas ettiği iç yüzeylerdeki gerilmeler görülürken, Şekil 4 te ise iş parçasındaki anahtar ağız kısmının yüzeyindeki ve kuyruk kısmındaki gerilmeler görülmektedir. Şekillerdeki skalalar karşılaştırmanın daha sağlıklı olabilmesi için en düşük gerilme değerinin görüldüğü benzetimin değerleri ile karşılaştırma yapılacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3. Pres hızının değiştirildiği benzetimler ile temel benzetim arasında, pres zımbasının basma yaptığı iç yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması



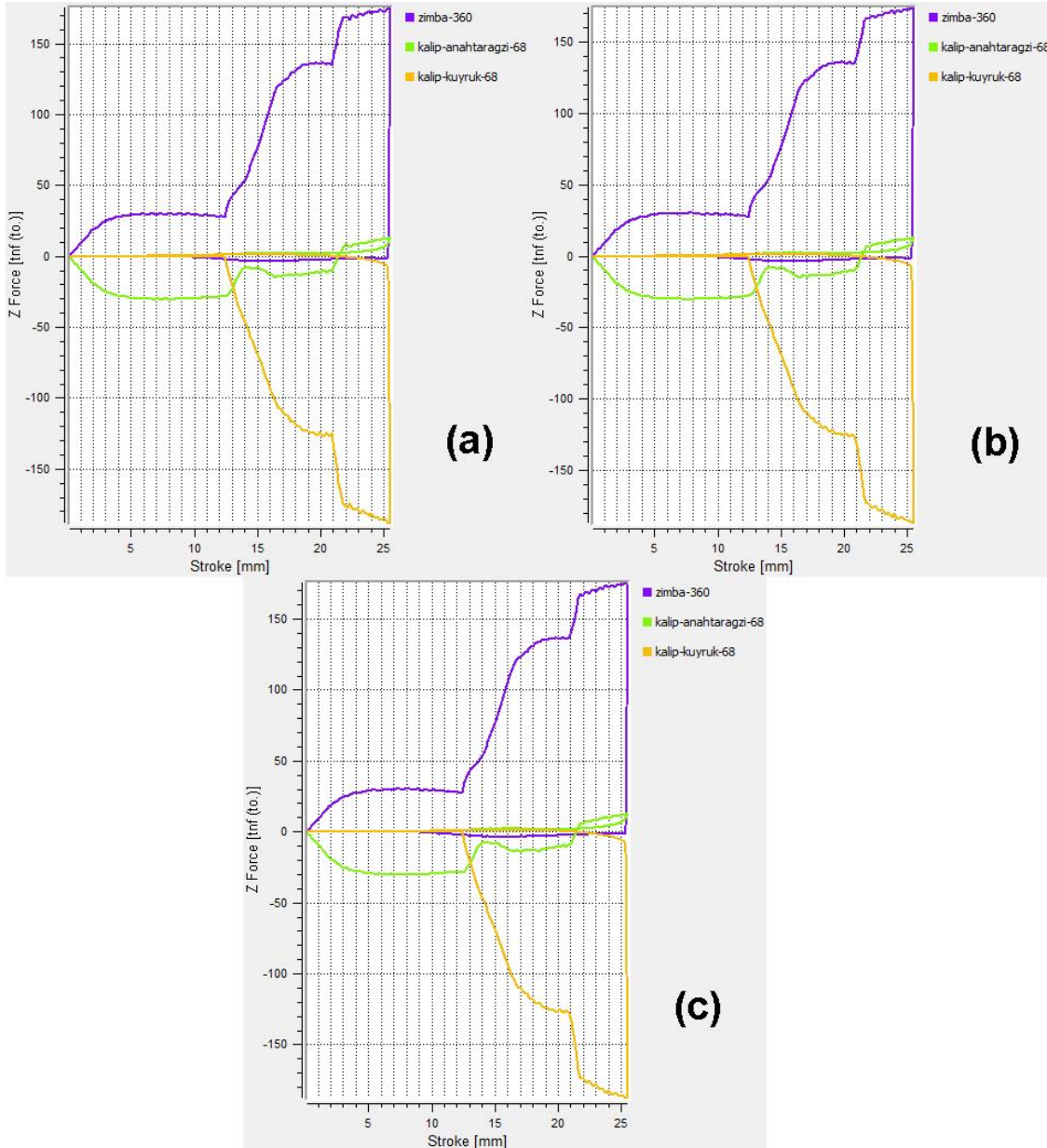
Şekil 4. Pres hızının değiştirildiği benzetimler ile temel benzetim arasında, iş parçasındaki anahtar ağız kısmının yüzeyindeki ve kuyruk kısmındaki gerilmelerin karşılaştırılması

Pres hızları değişiminin iş parçasındaki gerilmeye etkilerinin karşılaştırıldığı şekillerde, pres hızı azaldıkça gerilmenin olduğu alanın arttığı görülmektedir. Ayrıca, benzetim sonuçlarında, temel benzetim için maksimum gerilme değerinin 972,575 MPa, pres hızının 6 mm/s seçildiği benzetim için maksimum gerilme değerinin 960,709 MPa, pres hızının 4 mm/s seçildiği benzetim için maksimum gerilme değerinin ise 978,243 MPa olduğu görülmüştür.

Pres hızının 6 mm/s ve 4 mm/s seçildiği benzetimlerdeki basma kuvvetleri sonuçlarının, temel benzetimdeki basma kuvvetleri sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 5'te görülmektedir.

Pres hızı değişim benzetimlerindeki presin yaptığı basma kuvvetlerinin ve temel benzetimdeki presin yaptığı basma kuvvetinin karşılaştırıldığı şekilde, üretim sırasında basma kuvveti değişiminin benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca benzetim sonuçlarında, temel benzetim için maksimum basma kuvvetinin 175,289 ton kuvvet, pres hızının 6 mm/s seçildiği benzetim için maksimum basma kuvvetinin 174,196 ton kuvvet, pres hızının 4 mm/s seçildiği benzetim için maksimum basma kuvvetinin ise 175,67 ton kuvvet olduğu görülmüştür.

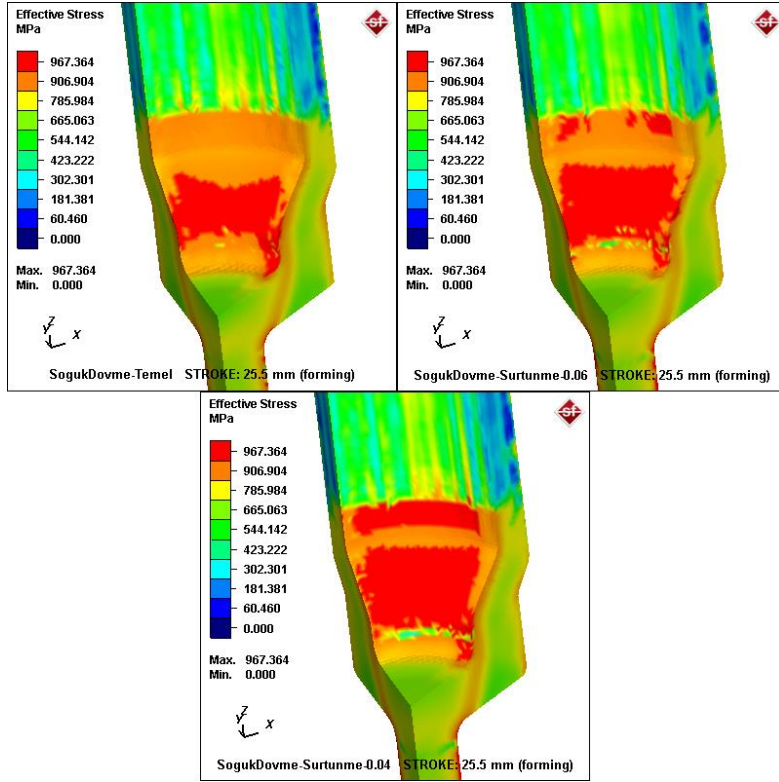




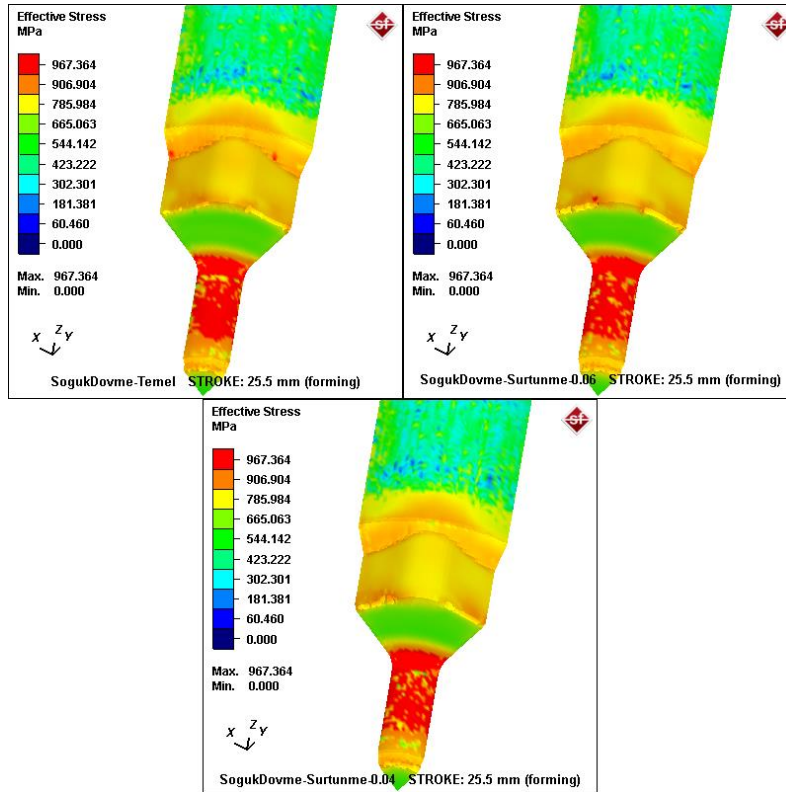
Şekil 5. Pres hızının değiştirildiği benzetimler ile temel benzetim arasında, üretim sırasındaki basma kuvvetlerinin karşılaştırılması: (a) Temel benzetim. (b) Pres hızının 6 mm/s seçildiği benzetim. (c) Pres hızının 4 mm/s seçildiği benzetim

### 3.2. Sürtünme Katsayısı Değişiminin Simulasyon Sonuçlarına Etkisi

Sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb ve 0,04 Coulomb seçildiği benzetimlerin gerilme değerleri sonuçlarının temel benzetimdeki gerilme değerleri sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 6 ve Şekil 7'de görülmektedir. Şekil 6'da pres zımbasının basma yaptığı ve parçanın zimba ile temas ettiği iç yüzeylerdeki gerilmeler görülürken, Şekil 7'de ise iş parçasındaki anahtar ağız kısmının yüzeyindeki ve kuyruk kısmındaki gerilmeler görülmektedir.

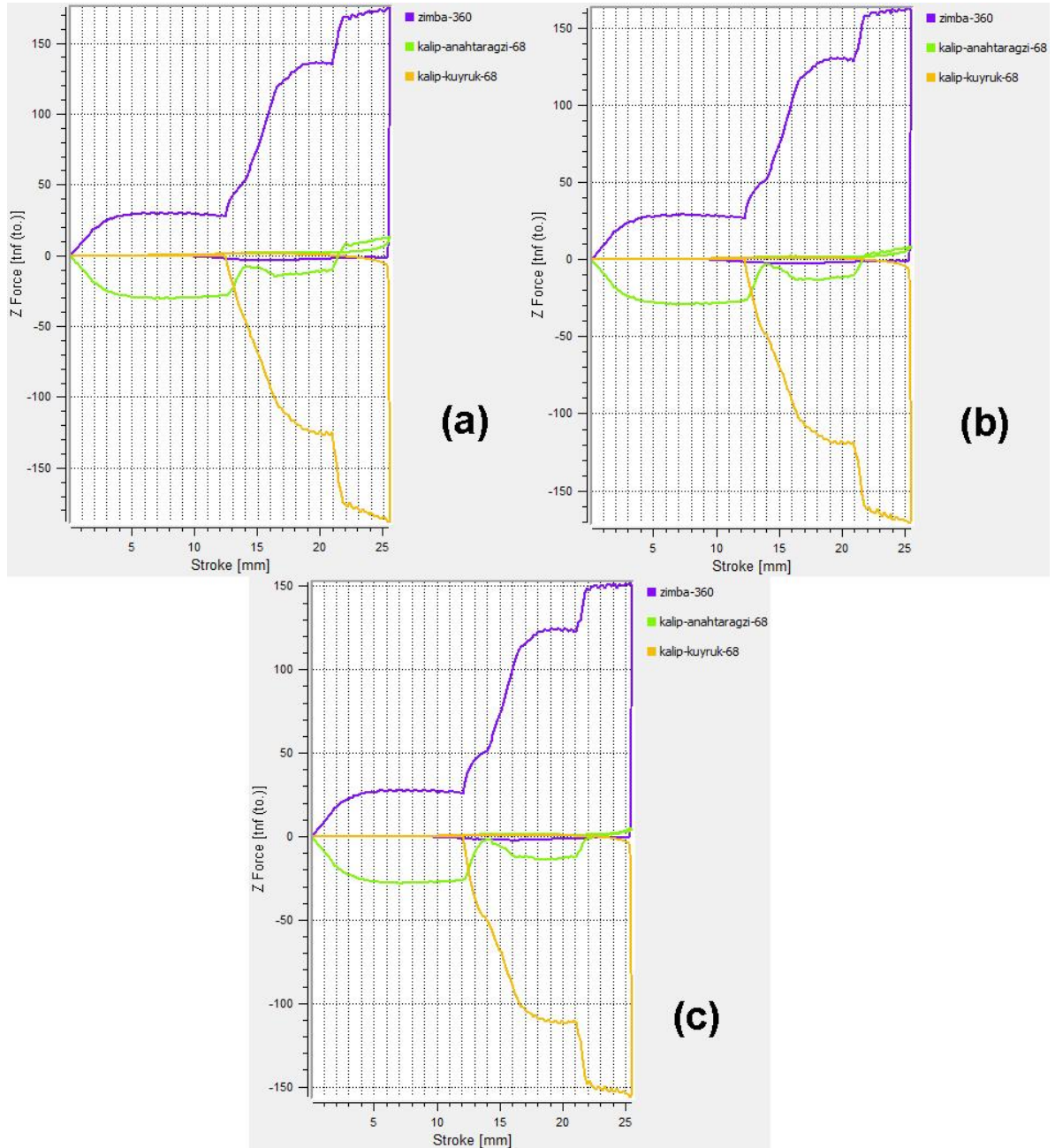


Şekil 6. Sürtünme katsayısının değiştirildiği benzetimler ile temel benzetim arasında, pres zımbasının basma yaptığı iç yüzeydeki gerilme değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7. Sürtünme katsayısının değiştirildiği benzetimler ile temel benzetim arasında, iş parçasındaki anahtar ağız kısmının yüzeyindeki ve kuyruk kısmındaki gerilmelerin karşılaştırılması

Sürtünme katsayılarının değişiminin iş parçasındaki gerilmeye etkilerinin karşılaştırıldığı şekillerde, sürtünme katsayısı azaldıkça gerilmenin olduğu alanın arttığı görülmektedir. Ayrıca, benzetim sonuçlarında, temel benzetim için maksimum gerilme değerinin 972,575 MPa, sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği benzetim için maksimum gerilme değerinin 967,364 MPa, sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb seçildiği benzetim için maksimum gerilme değerinin ise 968,734 MPa olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb ve 0,04 Coulomb seçildiği benzetimlerdeki basma kuvvetleri sonuçlarının, temel benzetimdeki basma kuvvetleri sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Sürtünme katsayısının değiştirildiği benzetimler ile temel benzetim arasında, üretim sırasındaki basma kuvvetlerinin karşılaştırılması: (a) Temel benzetim. (b) Sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği benzetim. (c) Sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb seçildiği benzetim

Sürtünme katsayısı değişim benzetimlerindeki presin yaptığı basma kuvvetlerinin ve temel benzetimdeki presin yaptığı basma kuvvetinin karşılaştırıldığı şekilde, üretim sırasında basma kuvveti değişiminin benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca benzetim sonuçlarında, temel benzetim için maksimum basma kuvvetinin 175,289 ton kuvvet, sürtünme katsayısının 0,06 Coulomb seçildiği benzetim için maksimum basma kuvvetinin 162,538 ton kuvvet, sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb seçildiği benzetim için maksimum basma kuvvetinin ise 152,219 ton kuvvet olduğu görülmüştür.

#### 4. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Aşağıda, soğuk dövme ile üretilen rot parçasının benzetim ortamında yeniden üretilmesi ve daha sonra üretimdeki pres hızı ve sürtünme katsayısı parametrelerinin değiştirilerek yeni üretim benzetimleri yapılması ile elde edilen gerilme ve presin yaptığı basma kuvveti sonuçlarının karşılaştırılmasıyla yapılan araştırmaların sonuçları verilmiştir.

- 1) Benzetimdeki üretimlerde, üretilen iş parçası kalıp içini doldurmuştur. Bu süreçte, tasaralanan kalıp iç hacmi şekillendirilmek istenen parçanın hacmi ile eş değer olarak ölçülmüştür. Böylece başta ek gerilmeler ve kalıba etkiyen gerilmeler önlenmiştir.
- 2) Gerçek üretimdeki pres hızı 5 mm/s, sürtünme katsayısı 0,08 Coulomb, kullanılan iş parçası malzemesi 16MnCr5 ve ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 20°C'dir. Gerçek üretimdeki bu parametrelere göre yapılan benzetimde elde edilen maksimum gerilme değeri 972,575 MPa ve maksimum pres kuvveti 175,289 ton kuvvet olmaktadır.

- 3) Çalışmada pres hızları 6 mm/s'ye çıkarılmış ve 4 mm/s'ye düşürülmüştür:

Pres hızı 6 mm/s'ye çıkarıldığında yani gerçek üretimdeki pres hızına göre 1 mm/s artırıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan benzetim sonucunda maksimum gerilme değeri 960,709 MPa ve maksimum pres kuvveti 174,196 ton kuvvet olmaktadır. Burada;

Pres hızı 4 mm/s'ye düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki pres hızına göre 1 mm/s azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan benzetim sonucunda maksimum gerilme değeri 978,243 MPa, ve maksimum pres kuvveti 175,67 ton kuvvet olmaktadır.

Gerçek üretimin benzetim sonuçları baz alınarak yapılan değerlendirmede, pres hızının 1 mm/s artırıldığı benzetim sonuçlarında maksimum gerilme değeri 11,866 MPa azalış ve maksimum pres kuvveti 1,093 ton kuvvet azalış göstermiştir. Pres hızının 1 mm /sn azaltıldığı benzetim sonuçlarında ise maksimum gerilme değeri 5,668 MPa artış, ve maksimum pres kuvveti 0,381 ton kuvvet artış göstermiştir.

Pres hızında meydana gelen 1 mm/s lik bu değişimler sayesinde birim hacimdeki dislokasyon sayısı, malzeme akışı ve tane yönelmesine bağlı olarak benzetim sonucu elde edilen gerilmeler değişim göstermiştir. Üretim, yapı, özellik ve performans değerleri açısından bakılırsa, deformasyon hızının değişimi malzemenin plastik deformasyon özelliklerinin değişmesine yol açmıştır. Özellikle düşük hızlarda malzeme akışı düşüş gösterdiğinden daha fazla gerilme ortaya çıkmıştır. Artan deformasyon hızında ise malzeme akış hızı artarak düşük gerilme ortaya çıkarmıştır. Pres kuvveti açısından değerlendirdiğimizde ise deformasyon hızı düşüldükçe pres kuvveti artış göstermiştir.

- 4) Çalışmada sürtünme katsayıları 0,06 Coulomb'a ve 0,04 Coulomb'a düşürülmüştür:

a) Sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb'a düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki sürtünme katsayısına göre 0,02 Coulomb azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak

üzere, yapılan benzetim sonucunda maksimum gerilme değeri 967,364 MPa ve maksimum pres kuvveti 162,538 ton kuvvet olmaktadır.

b) Sürtünme katsayısı 0,04 Coulomb'a düşürüldüğünde yani gerçek üretimdeki sürtünme katsayısına göre 0,04 Coulomb azaltıldığında diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere, yapılan benzetim sonucundan maksimum gerilme değeri 968,734 MPa ve maksimum pres kuvveti 152,219 ton kuvvet olmaktadır.

Gerçek üretimin benzetim sonuçları baz alınarak yapılan değerlendirmede, sürtünme katsayısının 0,02 Coulomb azaltıldığı benzetim sonuçlarında maksimum gerilme değeri 5,211 MPa azalış ve maksimum pres kuvveti 12,751 ton kuvvet azalış göstermiştir. Sürtünme katsayısının 0,04 Coulomb azaltıldığı benzetim sonuçlarında ise maksimum gerilme değeri 3,841 MPa azalış ve maksimum pres kuvveti 23,070 ton kuvvet azalış göstermiştir.

Sektörde kullanılan bazı katı yağlayıcıların uygulanan kuvvete olan etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, lübrikantlar katı film ve sıvı akışkan esaslı olacak şekilde sınıflandırılarak soğuk deformasyona olan etkileri araştırılmıştır. Hyunok ve arkadaşları tarafından dört farklı katı film esaslı yağlayıcı ile bir sıvı yağlayıcı kullanılarak yapılan derin çekme şekillendirmesinde sonlu elemanlar model benzetiminin ters algoritmalarını kullanarak sürtünme katsayısı ve kalıba uygulanan kuvvete etkisi belirlenmiştir (Hyunok vd., 2007). Diğer taraftan AHSS kalite çeliklerin derin çekme yöntemi ile şekillendirmesinde farklı tipte, viskozitede, yoğunlukta ve birim alandaki kaplama ağırlığına göre sınıflandırılmış yağlayıcılar kullanılarak farklı deformasyon hızlarındaki davranışları kalıba gelen kuvvet, ara yüzey basıncı ve sıcaklık cinsinden tanımlanarak proses için en uygun yağlayıcı seçilmiştir. Gerçek üretimde yağlayıcı olarak Zn-sabun-Ph kaplama yöntemi benimsenmiştir. Gerçek üretimde 0,08 Coulomb olan sürtünme katsayısı, çalışmada diğer üretim parametreleri sabit kalmak üzere 0,06 Coulomb ve 0,04 Coulomb olarak değiştirildiğinde ortaya çıkan benzetim sonuçlarına göre, düşük sürtünme katsayıları ile çözüm yapıldığında gerilme ve pres kuvveti değerleri düşüş göstermiştir. Bu kalıp ile malzeme arasındaki düşük sürtünme ve ara yüzey direnci sayesinde ortaya çıkmıştır. Öte yandan artan sürtünme katsayısı değerlerinde ise bu durumun tam tersi gerçekleşmesi mümkündür.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, İzmir-Kemalpaşa'da faaliyet gösteren EKO Endüstri Kalıp Otomotiv Plastik ve Spor Aletleri San. Dış.Tic.Ltd.Şti.'nin Tübitak-Teydeb 1507 Kobi Ar-Ge Başlangıç desteği programından desteklenen, 'Sonlu elemanlar model benzetim yönteminin soğuk dövme AR-Ge faaliyetlerinde kullanılması ve prototip rot üretimi gerçekleştirilmesi' başlıklı projeden faydalanılmıştır. Bu kapsamda desteğini esirgemeyen Engin Yöndem ve Işıl Yöndem Pelteci'ye teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Altan T., Ngaile G., Shen G. (2005): "*Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*", Bölüm 2,7,17, ASM International.
- Callister W. D. (2007): "*Material Science and Engineering: An Introduction*", 7. Basım, Department of Metallurgical Engineering The University of Utah, Amerika.
- Dieter G. E. (1988): "*Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition*", University of Maryland, McGraw-Hill Book Co..

- Hsu Q. C., Lee R. S. (1997): “Cold Forging Process Design Based on the Induction of Analytical Knowledge”, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 69, No. 1–3, sf. 264-272.
- Hyunkee K., Altan T. (1996): “Cold Forging of Steel -Practical Examples of Computerized Part and Process Design”, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 59, No. 1-2, sf. 122-131.
- Hyunok K., Sung J. H., Sivakumar R., Altan T. (2007): “Evaluation of Stamping Lubricants Using the Deep Drawing Test”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Cilt 47, No. 14, sf. 2120-2132.
- Ishinaga N. (1997): “An advanced press design for cold forging”, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 71, No. 1, sf. 100-104.
- Rao S. S. (2011): “*The Finite Element Method in Engineering*”, 5. Basım, Bölüm 1, Elsevier Inc..
- Sheljaskov S. (1994): “Current Level Of Development Of Warm Forging Technology”, *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 46, sf. 3-18.
- Valberg S. H. (2010): “*Applied Metal Forming–Including FEM Analysis*”, Bölüm 14, Cambridge University Press.
- Witt S. (2011): “*Basic Knowledge: Forgings–Significance, Design, Production, Application*”, German Association of the Forging Industry, Almanya.