

ÇAPRAZ KAMALI HADDELEME KALIP TASARIMINDA UYGULANMASI GEREKEN KUVVET ÜZERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Necip Fazıl Yılmaz*, Ali İhsan Çelik**

* Makina Mühendisliği Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, 27310, Gaziantep,

**Besni Bilgisayar Tekn. Böl. Adıyaman Üniversitesi, 02300 Adıyaman,

nfilyilmaz@gantep.edu.tr, acelik@adiyaman.edu.tr

(Geliş/Received: 11.12.2012; Kabul/Accepted: 25.04.2013)

ÖZET

Çapraz Kamalı Haddeleme (ÇKH), silindirik iş parçalarının zıt yönde hareket eden iki kalıp arasında yuvarlatılarak aksel yönde şekil verme işlemidir. Kalıp üzerinde bulunan kamalar sayesinde işparçasına istenilen form verilebilmektedir. Ancak, bu işlemin sorunsuz gerçekleşebilmesi için uygulanması gereken kuvvetin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde işparçasının dönmek yerine kayması, boyun vermesi, iç çatlakların oluşması ve yüzeyde katmanların oluşması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, ÇKH işleminde etkili olan parametrelerin kalıplara uygulanması gereken yük üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak, kalıp tasarımı ve imalatı için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, ÇKH kalıplarının tasarımı yapılırken uygulanması gereken kuvvetin belirlenmesinde gerdirme açısı (β), şekil verme açısı (α), haddeleme oranı (δ) ve kalıp hızı (V) gibi parametrelerin en önemli parametreler olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda DEFORM 3D paket programı ile benzetim ve analizler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler sonucunda, ÇKH kalıbı üzerindeki kesme ve gerdirme bölgelerinde uygulanması gereken kuvvetin diğer bölgeler göre daha fazla olması gerektiği görülmüş ve bu iki bölgedeki radyal ve teğetsel kuvvetler üzerine yoğunlaşmıştır. Elde edilen sonuçlar varyans analizi (ANOVA) metodu ile ele alınarak parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çapraz Kamalı Haddeleme, Modelleme, ANOVA

INVESTIGATION OF THE EFFECTING PARAMETERS ON LOAD REQUIREMENT OF CROSS WEDGE ROLLING DIE DESIGN

ABSTRACT

Cross wedge rolling (CWR) is a process that a cylindrical workpiece is plastically deformed into another axisymmetric shape by the action of two wedge tools moving relative to each other. As a result of the process, initial profile is transformed into round profile by the wedges mounted on the die. In order to perform the defect free process, rolling loads should be well determined in accordance with the movement. Otherwise, instead of rotation around its own axis workpiece may slide and also necking and internal cracks may occur. In this work, the most important process parameters influencing the loads such as stretching angle (β), forming angle (α), reduction ratio (δ) and die velocity (V) are determined as varying parameters. Within this work, different cross wedge rolling conditions have been simulated and analyzed by DEFORM 3D package program. It is realized that two most important zones are knifing and stretching zones. Considerable effort has been paid for the analysis of these two zones. Load requirement of knifing and stretching zones has been successfully identified by its radial and tangential components. Results are discussed by using analysis of variance (ANOVA) method to manifest the interactions of the parameters.

Keywords: Cross Wedge Rolling, Modeling, ANOVA

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çapraz kamalı haddeleme (ÇKH) yöntemi, talaşsız imalat alanında aksel simetrik parçaların üretiminde

yenilikçi bir yöntem olarak son yıllarda artan bir ivmeyle kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemde silindirik iş parçası, karşılıklı hareket eden iki kalıp arasında yuvarlanarak aksel yönde plastik

deformasyona uğramaktadır [1, 2]. Çapraz kamalı haddeme yönteminin yüksek ürün mukavemeti, malzeme tasarrufu, düşük enerji maliyeti ve çevresel etki gibi önemli avantajları bulunmasına rağmen, işparçasının deformasyonu, kalıp tasarımı ve kalıp imalatında yeterli teknik bilgiye sahip olunmaması nedeniyle endüstriyel olarak kullanımı yaygınlaşmamıştır [3, 4].

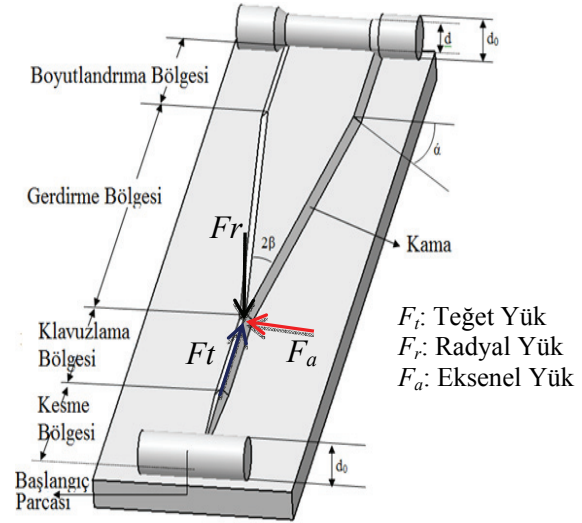
ÇKH kalıplarının tasarımı yapılırken uygulanması gereken kuvvet, süreç boyunca sabit olmadığı için haddeme kuvvetinin değişimini ortaya koymak ta büyük önem taşımaktadır. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda belirli bazı işparçaları üzerine çalışmalar yapıldığı, ancak genel olarak aksel simetrik tüm parçalar için parametrik bir çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmalar içinde sonlu elemanlar yöntemiyle çapraz kamalı haddeme sırasında işparçası üzerinde oluşan gerilme analizlerinin incelendiği görülmektedir [5-8]. Minting ve arkadaşları [9], DEFORM paket programı kullanarak ÇKH işleminde iş parçasının mekanik davranış özellikleri ve dinamik yapısındaki değişimleri incelemiştir. Pater [10] ÇKH yönteminde kuvvet analizi yaparken kalıp ile işparçasının temas yüzeyi üzerinde durmuş ve temas yüzeyinde oluşan ortalama basıncı belirlemek için üst sınır eleman tekniğini geliştirmiştir. Endüstriyel uygulamalarda iş parçası için elasto-plastik malzeme kullanılırken bu çalışmaların çoğunda iş parçası rijit-plastik olarak kabul edilmiştir. ÇKH yöntemindeki çok sayıda parametrenin varlığı ve karmaşıklığı nedeniyle ortaya konulan bu farklı yaklaşımlar sonucunda, aksel simetrik silindirik işparçalarının haddeme kuvvetinin belirlenmesinde genel bir çözüm ortaya konulamamıştır. ÇKH kalıp parametrelerinin birbirleriyle olan ilişkileri de belirli bazı ürünler için çalışılmış ancak, genel bir yaklaşım önerilmemiştir.

Çapraz kamalı haddemede kuvveti tahmin etmenin yolu, deneysel çalışma veya sonlu elemanlar metodudur. Kuvvete etki eden parametrelerin belirlenmesi için bütün alternatifleri dikkate alarak her bir parametre değişimi için yeni bir kalıp yapmak suretiyle çok sayıda deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır. Ancak, kalıp yapımındaki zorluklar ve maliyetler nedeniyle deneysel çalışma çok zaman alıcı, zor ve pahalıdır. Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapmanın da bazı zorlukları bulunmaktadır. Çünkü her bir analiz için ayrı bir önışlem yapmak gerektiği gibi benzetimlerin her biri çift çekirdekli bir bilgisayarda aralıksız olarak 5 ile 10 gün arasında sürmektedir. Bu çalışmada, çapraz kamalı haddemede kuvveti etkileyen parametreleri ve bu parametrelerin birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya koyabilmek amacıyla 144 farklı kombinasyonun benzetimi yapılmıştır. DEFORM 3D paket programı

kullanılarak yapılan bu benzetimler sonucunda elde edilen veriler analiz edilerek parametreler belirlenmiş ve varyans analizi (ANOVA) ile ÇKH kalıp tasarımında kuvvete etki eden parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri ortaya konulmuştur.

2. ÇAPRAZ KAMALI HADDELEME KUVVET ANALİZİ (CROSS WEDGE ROLLING LOAD CALCULATION)

Çapraz kamalı haddeme kalıbı üzerinde dört ana bölge bulunmaktadır. Bunlar kesme bölgesi, klavuzlama bölgesi, gerdirme bölgesi ve boyutlandırma bölgesidir. Örnek bir ÇKH kalıbı geometrik parametreleri ve haddeme işlemindeki teğet, radyal ve aksel kuvvetler Şekil 1'de gösterilmiştir.



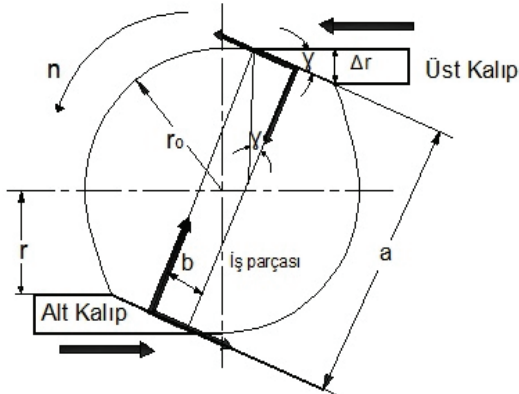
Şekil 1. ÇKH Geometrik Parametreleri (Geometric Parameters of CWR)

Yapılan benzetim çalışmalarında kalıp malzemesi rijit, işparçası ise elasto-plastik olarak kabul edilmiştir. Aksel kuvvet, işparçası akselinde meydana gelen F_a kuvveti olup iş parçasının aksel yönde uzamasını sağlayan kuvvettir. Aksel yükün etkisi ile malzeme, işparçasının dış akseli üzerinden yığılarak kenarlara doğru akmaktadır. Fakat aksel yük, kalıp üzerinde etkili olmadığından bu çalışmada detaylandırılmamıştır. İşparçasının kendi akseli etrafında dönmelerini sağlayan teğet kuvvet iç çatlaklar, boşluklar ve oluşabilecek kaymaları önlemek için önemlidir. Teğet kuvvetin kontrolsüz bir şekilde uygulanması durumunda işparçasının orta kesitinde dairesel şekilli ve aksel boyunca uzanan çapraz kırıklar oluşur. Radyal kuvvet ise işparçasının deformasyona karşı direnci sebebiyle kalıpları birbirlerinden uzaklaştırmak için kullanılan kuvvettir. Karşılıklı hareket eden kalıplar, üzerinden yığılarak

kenarlara doğru deforme olan işparçasının dış yüzeyine baskı yaparak radyal yükün oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, kalıp üzerine etki eden kuvvetler incelendiğinden, teğetsel ve radyal kuvvetler üzerinde durulmuştur.

ÇKH'de kuvvet hesabının teorik analizi için metal akışının teğet ve radyal yönde olduğu kabul edilerek birim basıncı belirlemek ve haddelme kuvvetini belirlemek için üst sınır yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Na ve Cho [11], kamalı kalıba etki eden radyal ve teğetsel kuvvetleri dikkate alarak eksenli etrafında dönmekte olan silindirik işparçasına etki eden yüzeyel basıncı analiz etmek için kinematik hız akış modeli geliştirmiştir. Hayama [12], dönerek şekillenen silindirik işparçası üzerinde kalıplar tarafından uygulanan sıkıştırma basıncı analizini üst sınır yöntemi kullanarak yapmıştır. Fu ve Dean [13] haddelme işlemi için gereken toplam güç gereksinimini azaltarak teğetsel ve radyal kuvvetleri belirlemeye çalışmıştır. Yılmaz ve Çelik [14] tarafından endüstriyel uygulamalar için kuvvet hesaplamaları aşağıdaki denklemler [10,13,15] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu denklemler sıkıştırılarak dönmeye zorlanan silindirik parçaların haddelme kuvvetlerini tahmin etmede kullanılabilir. İşparçasının şekillendirilme sırasındaki görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.

Burada; α : Şekillendirme açısını, (β) : Gerdirme açısını ve (δ) : Haddelme oranını ifade etmektedir.



Şekil 2. İşparçasının Şekillendirilme Görüntüsü (Forming View of the Workpiece)

$$f(\alpha) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{12} - \cos \alpha * \sqrt{1 + 11 * \cos^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{11}} * \ln \left(\frac{\sqrt{11} + \sqrt{12}}{\sqrt{11 * \cos \alpha} + \sqrt{1 + 11 * \cos^2 \alpha}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{q_m}{\sigma_0} = \frac{1}{\delta^2 - 1} * \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\left(\frac{f(\alpha)}{\sin^2 \alpha} + m * \frac{1}{\tan \alpha} \right) * \ln \delta z + \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2 \sin^2 \alpha} + 2 * m * Lz/d \right] \quad (2)$$

$$\delta_z = \frac{\delta + 1}{2} \quad (3)$$

$$L_z = \pi * r_0 * \lambda * \frac{(\tan \beta)}{2} * \delta \quad (4)$$

$$\lambda = (2.587 - 1.557 * \delta^{0.3528}) * (0.00355 * \alpha + 0.927) * \beta^{0.0568} \quad (5)$$

$$C = \frac{\pi * \tan \beta * \tan \alpha * \lambda * \delta}{\delta - 1} \quad (6)$$

Burada; q_m : ortalama temas basıncı, m : sürtünme katsayısı, σ_0 : malzeme gerilmesi, L_z : boyutlandırma bölgesi genişliği, λ : haddelme katsayısı, C : relatif haddelme adımı ifade etmektedir.

eğer $C \leq 1$

$$A_{xy} = 1 + \frac{2}{3} * r_0^2 * \frac{\cos \beta}{\tan \alpha} * \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{r}} * \frac{\delta - 1}{\delta}} * \left[1 + c * \frac{\delta - 1}{\delta} \left(1 + \sqrt{\frac{2 + c * \delta - c}{2 * \delta}} \right) - \sqrt{\left(\frac{1 + c * \delta - c}{\delta} \right)^3} \right] \quad (7)$$

$$A_{xz} = \frac{2}{3} \cos \beta * r_0^2 * \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{r}} * c * \frac{\delta - 1}{\delta}} \left[1 - \sqrt{\left(\frac{1 + c * \delta - c}{\delta} \right)^3 + c * \frac{\delta - 1}{\delta}} \right] \quad (8)$$

eğer $C > 1$

$$A_{xy} = \frac{2}{3} \cos \beta * r_0^2 * \frac{\cos \beta}{\tan \alpha} * \frac{\delta - 1}{\delta} * \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{r}}} \left[1 + \frac{3}{2} (c - 1) + \sqrt{\frac{\delta - 1}{\delta}} \right] \quad (9)$$

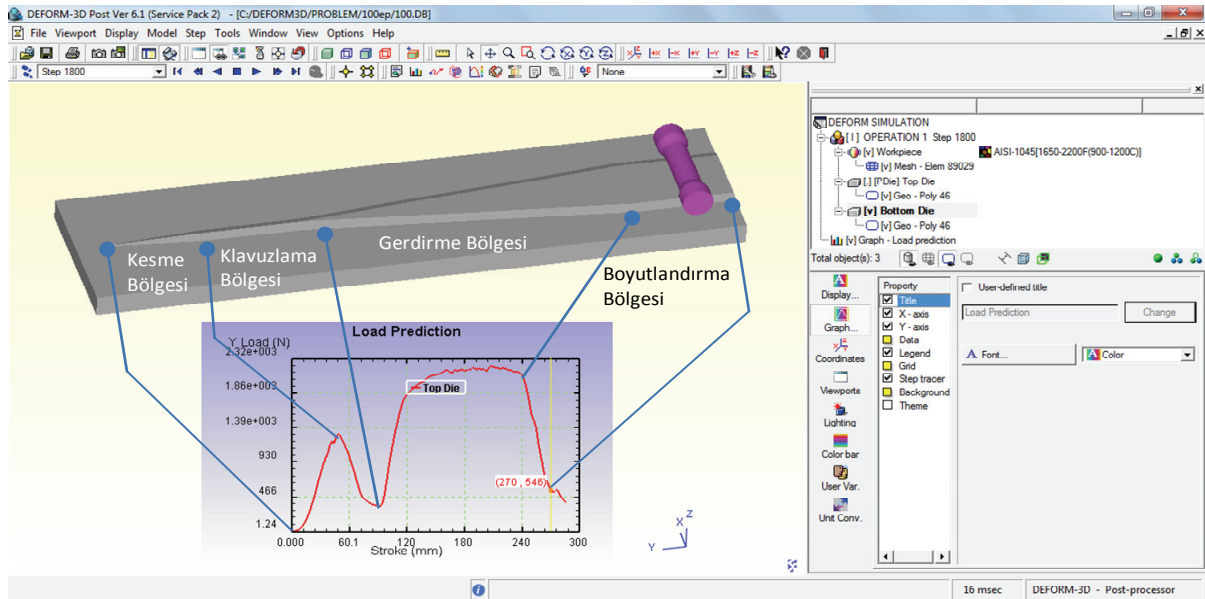
$$A_{xz} = \frac{2}{3} * \cos \beta * r_0^2 * \frac{\delta - 1}{\delta} * \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{r_0}{r}} + \frac{\delta - 1}{\delta}} \quad (10)$$

$$\tau = m * \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

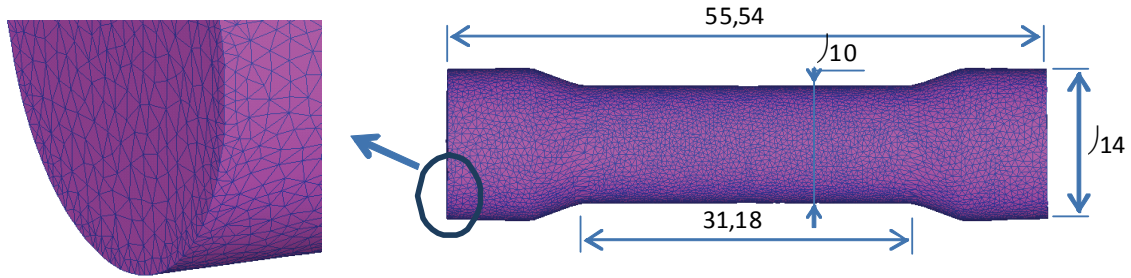
$$Q_z = 2 * (q_m * A_{xy} - \tau * \sin \beta * A_{xz}) \quad (12)$$

Burada; A_{xy} ve A_{xz} : radyal ve eksenel yöndeki temas yüzey alanı, τ : kayma gerilmesi, Q_z : hadde kuvvetinin radyal bileşeni ifade etmektedir.

Haddelme kuvvetini etkileyen kalıp parametrelerinin her birinin değişiminde tüm kalıp geometrisi değişmekte ve dolayısıyla uygulanması gereken kuvvet de değişmektedir. Ayrıca, kalıp boyunca haddelme kuvveti sürekli olarak değiştiği için işlem süresince dinamik modelleme yapabilen bir sonlu elemanlar programına ihtiyaç duyulmuş ve bu amaçla DEFORM 3D paket programı kullanılmıştır. Şekil 3'te DEFORM programı son işlemci ekranı ve örnek bir kuvvet-kalıp uzunluğu grafiği görülmektedir.



Şekil 3. Çapraz Kamalı Haddeme Benzetimi İçin Son İşlemci Ekranı (Post Processor Window for Cross Wedge Rolling Simulation)



Şekil 4. İşparçası üzerindeki Homojen Dağılımlı Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı (Uniform Distribution of Finite Element Network Structure for Workpiece)

3. ÇKH PARAMETRELERİNİN SAYISAL BENZETİMİ (NUMERICAL SIMULATIONS OF CWR PARAMETERS)

ÇKH işleminde benzetim için bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlara göre kalıp malzemesi rijit seçilirken işparçası AISI 1045 çeliği seçilmiş ve elasto plastik olarak tanımlanmıştır. Kalıp ile işparçası arasındaki sürtünme kayma sürtünmesi ($\mu=0,4$) olarak belirlenmiş ve işlem süresince sabit kabul edilmiştir. Silindirik işparçasının ilk uzunluğu $L_0=42,6$ mm ve çapı $d_0=14$ mm olarak tanımlanmıştır. İşparçası sıcaklığı $T_w=1200^\circ\text{C}$, kalıp sıcaklığı $T_t=200^\circ\text{C}$ ve ortam sıcaklığı $T_a=20^\circ\text{C}$ olarak tanımlanmıştır. Yapılan tüm benzetimlerde sıcak şekillendirme ve dörtüzlü tel kafesten oluşan katı eleman seçilmiştir. Benzetimlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı homojen dağılımlı olup, işparçası üzerinde 19720 nokta tanımlanmış ve bunlar üzerinde 89029 kabuk elemanı yer almıştır. Şekil 4'te bitmiş işparçasının geometrik boyutları ve işparçasının sonlu elemanlar ağ yapısı görülmektedir.

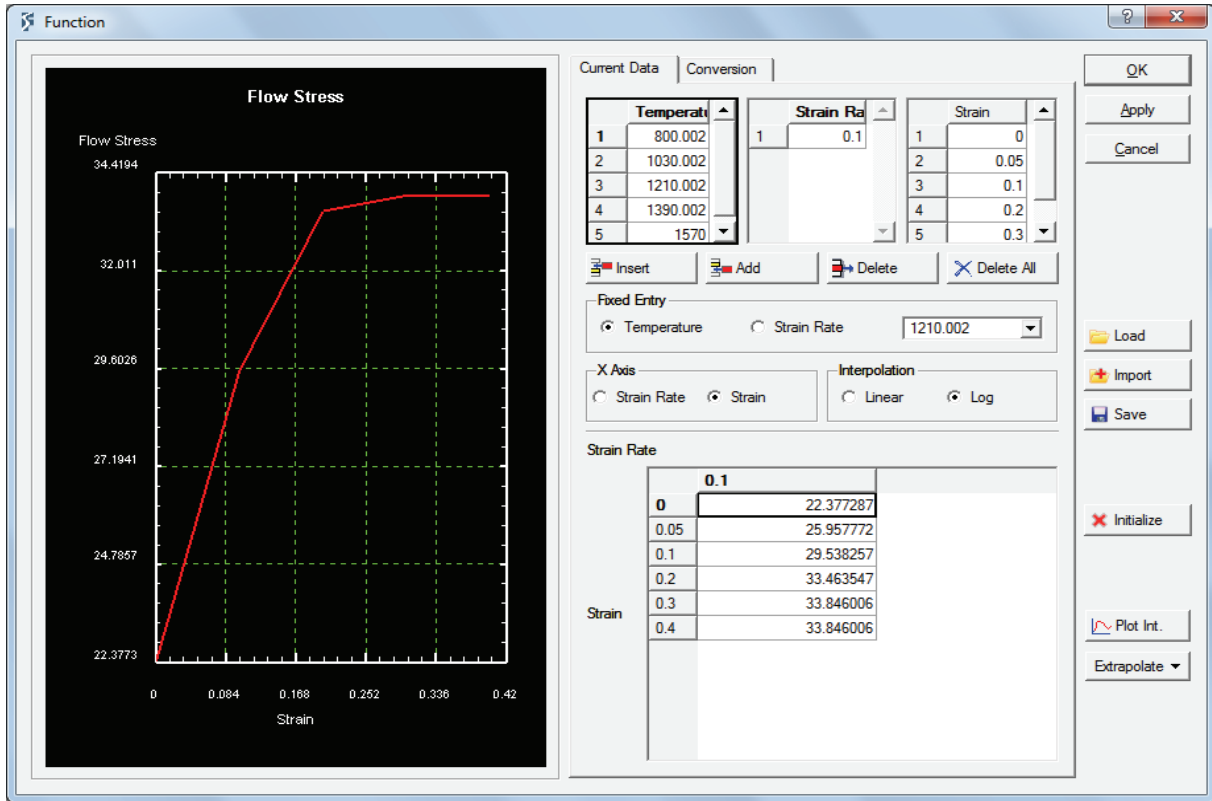
İşparçası malzemesinin çekme gerilmesi, ısı katsayısı, özgül ısı, ısı iletkenliği ve elastikiyet modülü gibi parametreler DEFORM 3D programının malzeme

veritabanından alınmıştır. Benzetimlerde kullanılan malzemenin deformasyon davranışları DEFORM 3D malzeme veritabanındaki şu malzeme modeli ile belirlenmiştir:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (13)$$

Burada $\bar{\sigma}$ akma gerilmesini, $\bar{\epsilon}$ efektif gerinmeyi, $\dot{\bar{\epsilon}}$ efektif gerinme oranını ve T sıcaklığı ifade etmektedir. Kullanılan malzemeye ilişkin gerilme-gerinim eğrisi ise Şekil 5'te sunulmuştur. Gerçekleştirilen tüm benzetimlerde uygulanması gereken kuvvet değerinin hassas bir şekilde elde edilebilmesi için kalıbın her 0.15mm ilerlemesinde veri alınmıştır. Elde edilen bu verilerle her bir benzetimde kalıp üzerine farklı noktalarda etki eden yaklaşık 1500 kuvvet değerinin elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu çalışmada ortaya konulan tüm kuvvet-kalıp uzunluğu grafikleri bu şekilde elde edilmiştir.

Kuvvete etki eden en önemli parametrelerden gerdirmeye açısı için (β) $4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$, şekillendirme açısı için (α) $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$, haddeme oranı (δ) (1,3), (1,4), (1,5) ve kalıp hızı için (V) 50, 75, 100, 125 mm/s aralıkları belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda,



Şekil 5. Benzetimlerde Kullanılan İşparçası Malzemesinin Gerilme-Gerinim Eğrisi (Stress-Strain Diagram of Workpiece Material)

bu değerlerden daha küçük ve daha büyük değerler için de ön benzetimler yapılmış ancak işparçasında kayma ve yüzey hasarları oluştuğu için benzetimlerin başarılı olduğu değer aralıkları incelenmiştir. Tablo 1’de kalıp hızının sadece (V) 50mm/s olduğu durumdaki parametrelerin değişimlerinde elde edilen haddelme kuvvetinin sayısal değerleri gösterilmektedir. Makale metninin daha fazla uzun olmaması için kalıp hızının 75, 100 ve 125mm/s olduğu diğer durumlardaki sonuçlar Tablo 1’de verilmemiş ancak, tüm değerlerin ana etki grafikleri Şekil 10 ve Şekil 11’de kullanılarak tartışılmıştır.

3.1 Gerdirme Açısının (β) Haddelme Kuvveti Üzerindeki Etkileri (The Effect of Stretching Angle (β) on Rolling Forces)

Haddelme kuvvetinin en yüksek olduğu gerdirme bölgesinde geometrik olarak en önemli parametre gerdirme açısıdır (β). Şekillendirme açısı (α) ve haddelme oranına (δ) bağlı olarak gerdirme açısının teğet ve radyal yük üzerindeki etkileri Şekil 6 ve 7’de gösterilmektedir.

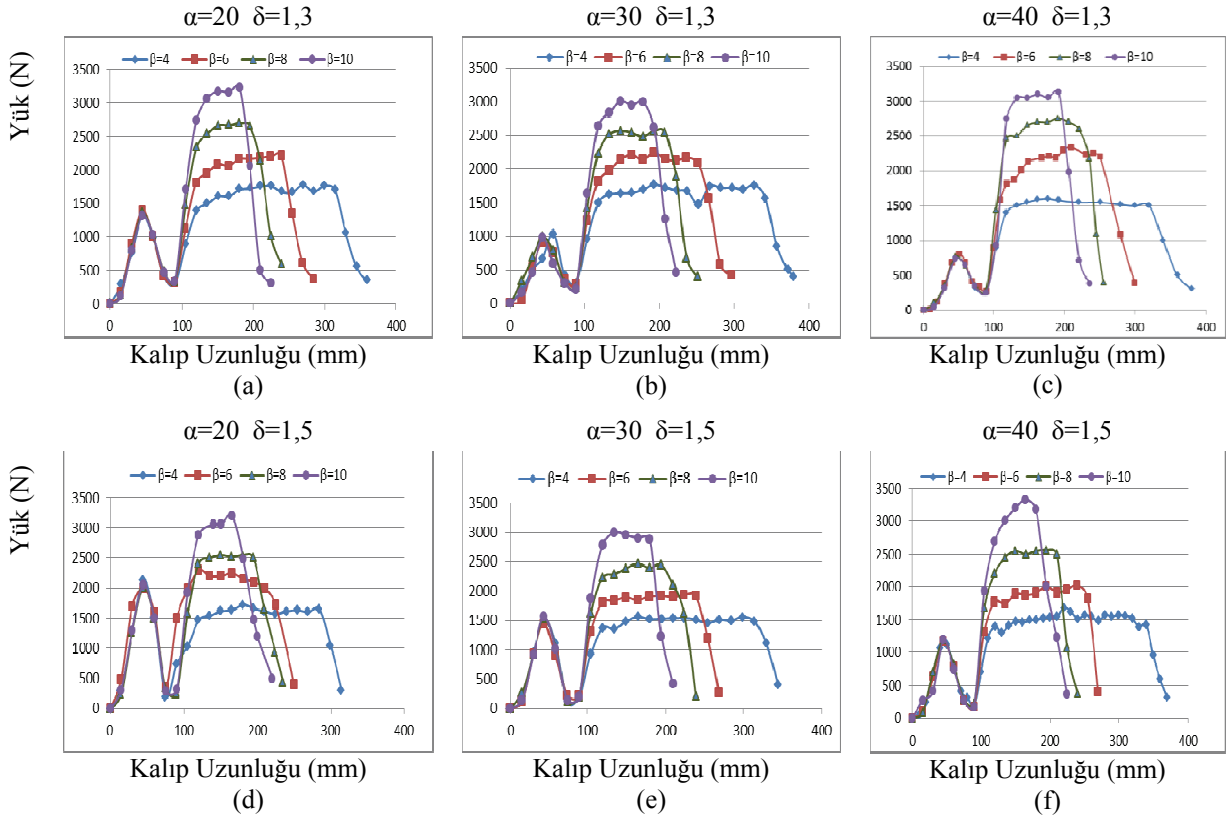
Şekil 6 (a, b ve c)’ye bakıldığında kesme bölgesinde haddelme oranı sabit kalıp, şekil verme açısı 20° ’den 40° ’ye çıktığında teğet yük değerlerinin 1500N’den 800N’ kadar azaldığı görülmektedir. Bunun yanısıra Şekil 6 (a, d)’de kesme bölgesi boyunca haddelme oranı arttıkça teğet yükün de arttığı açıkça görülmektedir. Gerdirme bölgesinde ise haddelme derinliği, kesme bölgesine göre daha az bir etkiye

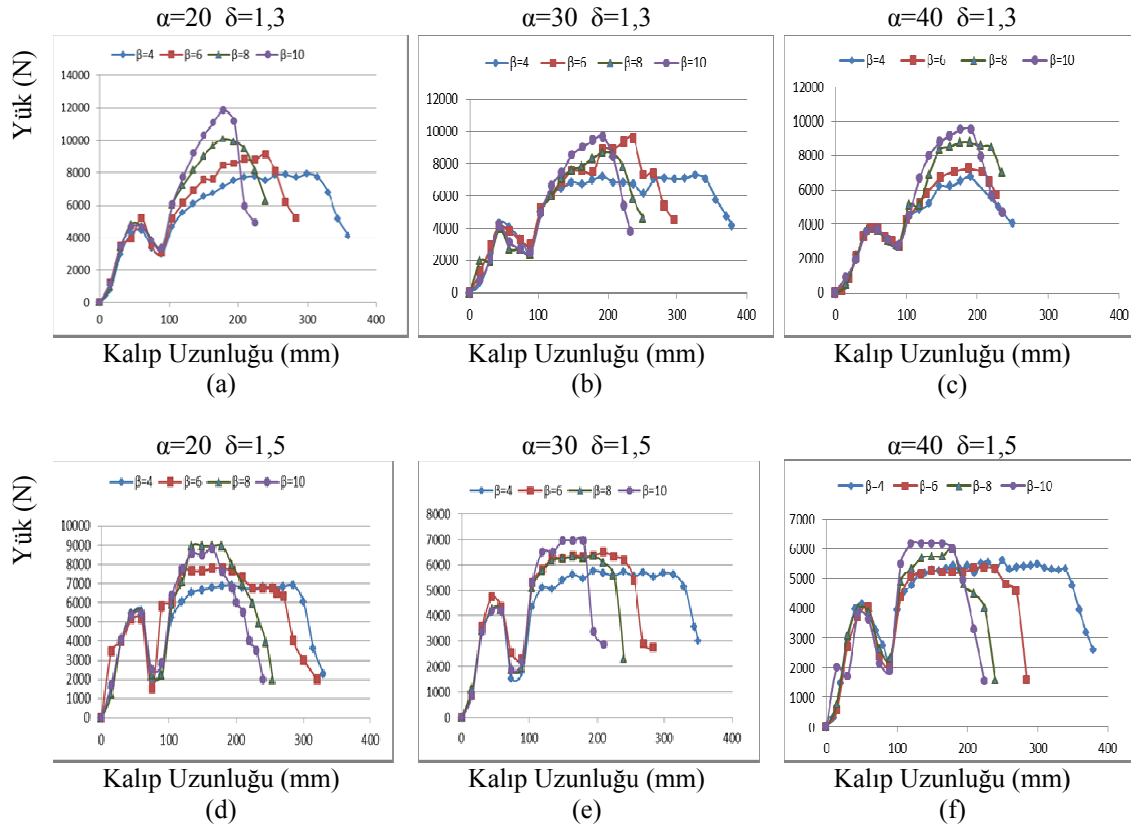
sahiptir. Gerdirme açısının artması yada azalması gerdirme bölgesinin uzunluğunu da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle Şekil 6’da gerdirme bölgesi için kalıp uzunluğu değerleri her bir grafikte farklı görünmektedir. Gerdirme açısının büyüklüğü kalıp boyunun kışalmasına sebep olduğundan büyük gerdirme açıları kalıp boyu açısından bir avantaj olarak kabul edilebilir, ancak bu durum yüksek şekillendirme kuvvetine neden olmaktadır. Diğer bir sonuç ise, gerdirme açısının gerdirme bölgesinde büyük bir etkiye sahipken kesme bölgesindeki etkisinin sınırlı olduğudur. Gerdirme açısının (β) artması ile işparçası eksenine boyunca dışa doğru malzeme akışı daha fazla olmakta ve işparçası kamalara daha fazla direnç göstereceğinden teğet ve radyal kuvvete ihtiyaç daha fazla olacaktır. Şekil 6’da dikkat çeken bir diğer husus ise klavuzlama ve boyutlandırma bölgelerinde teğet kuvvetin en düşük seviyede olduğudur.

Şekil 7 (a, b ve c), şekillendirme açısına bağlı olarak radyal kuvvetin değişimini göstermektedir. Şekil 7’deki tüm grafiklerde görüldüğü gibi radyal kuvvet, aynı koşullardaki teğet yüke göre yaklaşık olarak dört kat daha büyüktür. Bunun nedeni, işparçasının kendi eksenine etrafında dönerken metal akışının radyal yönde büyük bir direnç göstermesi nedeniyle işparçasının dış yüzeyine kalıpların baskı yapmasıdır. Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde, kalıbın gerdirme bölgesinde teğet yük neredeyse sabit kalırken radyal kuvvet sabit kalmamaktadır.

Tablo 1. Benzetimler Sonucunda Elde Edilen Haddeleme Kuvvetleri (Simulational Results for CWR Forces)

			Kesme Bölgesi		Gerdirme Bölgesi					Kesme Bölgesi		Gerdirme Bölgesi	
$\beta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	δ	Ft (N)	Fr (N)	Ft (N)	Fr (N)	$\beta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	δ	Ft (N)	Fr (N)	Ft (N)	Fr (N)
4	20	1,3	1341	4503	1867	8148	8	20	1,4	1726	5447	2649	9116
4	30	1,3	1036	4119	1792	7113	8	30	1,4	1346	4479	2541	7671
4	40	1,3	741	3761	1848	6077	8	40	1,4	1068	4129	2715	7548
6	20	1,3	1414	4798	2241	9007	10	20	1,4	1827	5388	3240	10142
6	30	1,3	1003	4128	2196	7949	10	30	1,4	1365	4465	3038	8211
6	40	1,3	864	3806	2271	7133	10	40	1,4	1018	4165	3008	9156
8	20	1,3	1403	491	2702	10056	4	20	1,5	2199	5929	1776	7167
8	30	1,3	937	4085	2589	8830	4	30	1,5	1605	5218	1751	6000
8	40	1,3	849	3759	2877	8704	4	40	1,5	1345	4490	1666	5614
10	20	1,3	1386	4820	3317	11875	6	20	1,5	1501	4691	1808	6215
10	30	1,3	1021	4094	2999	9927	6	30	1,5	1601	4991	2108	6915
10	40	1,3	871	3813	3215	10536	6	40	1,5	1246	4283	2308	7329
4	20	1,4	1817	5351	1804	7717	8	20	1,5	2198	6005	2608	8229
4	30	1,4	1339	4224	1714	6049	8	30	1,5	1722	5138	2510	7154
4	40	1,4	1069	4119	1741	6318	8	40	1,5	1211	4442	2688	6497
6	20	1,4	1648	5266	2205	8275	10	20	1,5	2231	5832	3258	9019
6	30	1,4	1378	4639	2166	7173	10	30	1,5	1627	4940	3458	7828
6	40	1,4	1032	3972	2104	6680	10	40	1,5	1229	4581	3658	8596

**Şekil 6.** Teğet Yük için Kuvvet-Kalıp Uzunluğu Grafikleri (Load-Stroke Diagrams for Tangential Loads)



Şekil 7. Radyal Yük için Kuvvet-Kalıp Uzunluğu Grafikleri (Load-Stroke Diagrams for Radial Loads)

3.2 Şekil Verme Açısının (α) Haddelme Kuvveti Üzerindeki Etkileri (The Effect of Forming Angle (α) on Rolling Loads)

Şekil 8 ve 9'da şekil verme açısının (α) gerdirme açısı (β) ve haddelme oranına (δ) göre teğet ve radyal kuvvet üzerindeki etkileri sunulmaktadır.

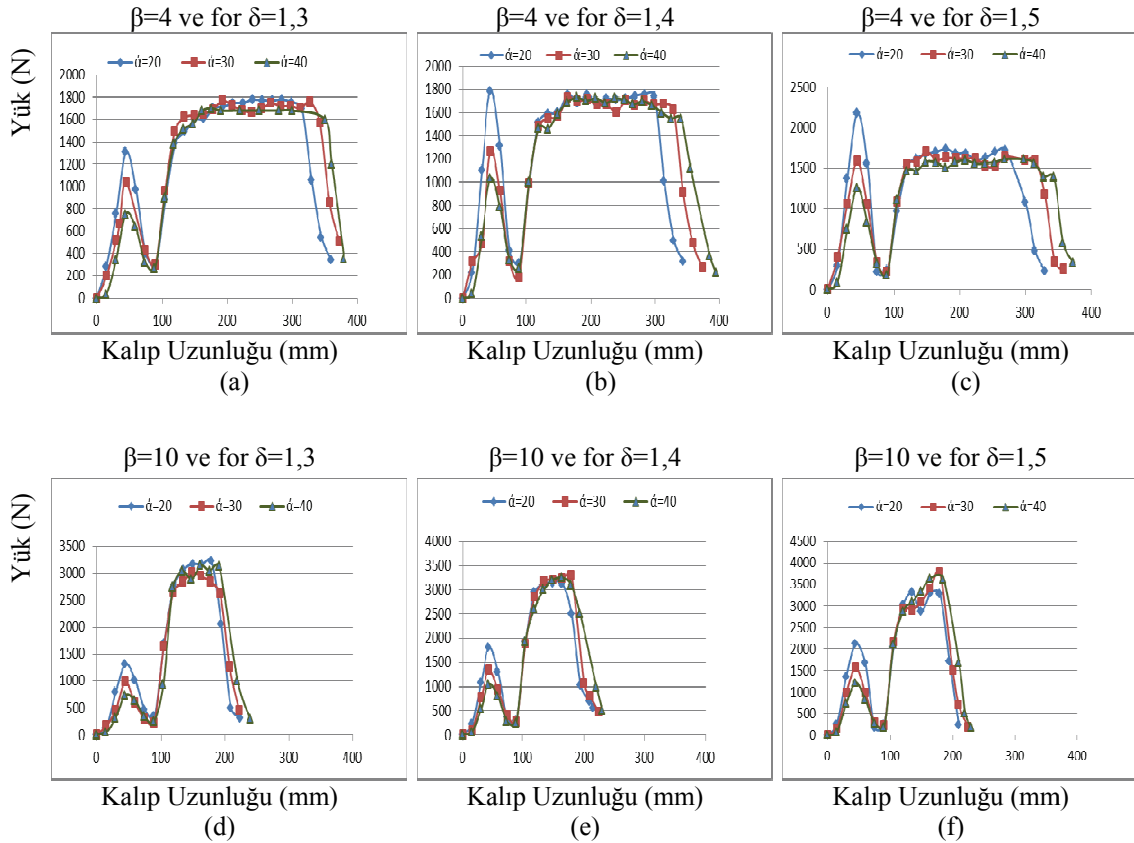
Çapraz kamalı haddelmede şekillendirme açısı hadde kalıbındaki kamaların yan yüzeyini oluşturmaktadır. Şekil verme açısı büyüdükçe, kalıp ile işparçası arasındaki temas yüzeyi azalmaktadır. Bu nedenle şekil verme açısının kesme bölgesinde daha etkili olduğu ve açı arttıkça gereksinim duyulan kuvvetin azalmakta olduğu Şekil 8 ve 9'da açık bir şekilde görülmektedir. Örneğin Şekil 8a ve Şekil 9a'ya bakıldığında kesme bölgesinde şekil verme açısı 20° 'den 40° 'ye çıktığında teğet kuvvet 1341 N'dan 741 N'a, radyal kuvvet ise benzer şekilde 4503 N'dan 3761 N'a düşmektedir.

Gerdirme bölgesinde ise şekil verme açısının teğet kuvvet üzerinde etkisinin çok az olduğu söylenebilir. Şekil verme açısı büyürken klavuzlama bölgesinin genişliği azalır ve şekil verme açısı 90° 'ye vardığında teorik olarak klavuzlama bölgesinin ortadan kalkmasına sebep olur. Bu nedenle, şekil verme

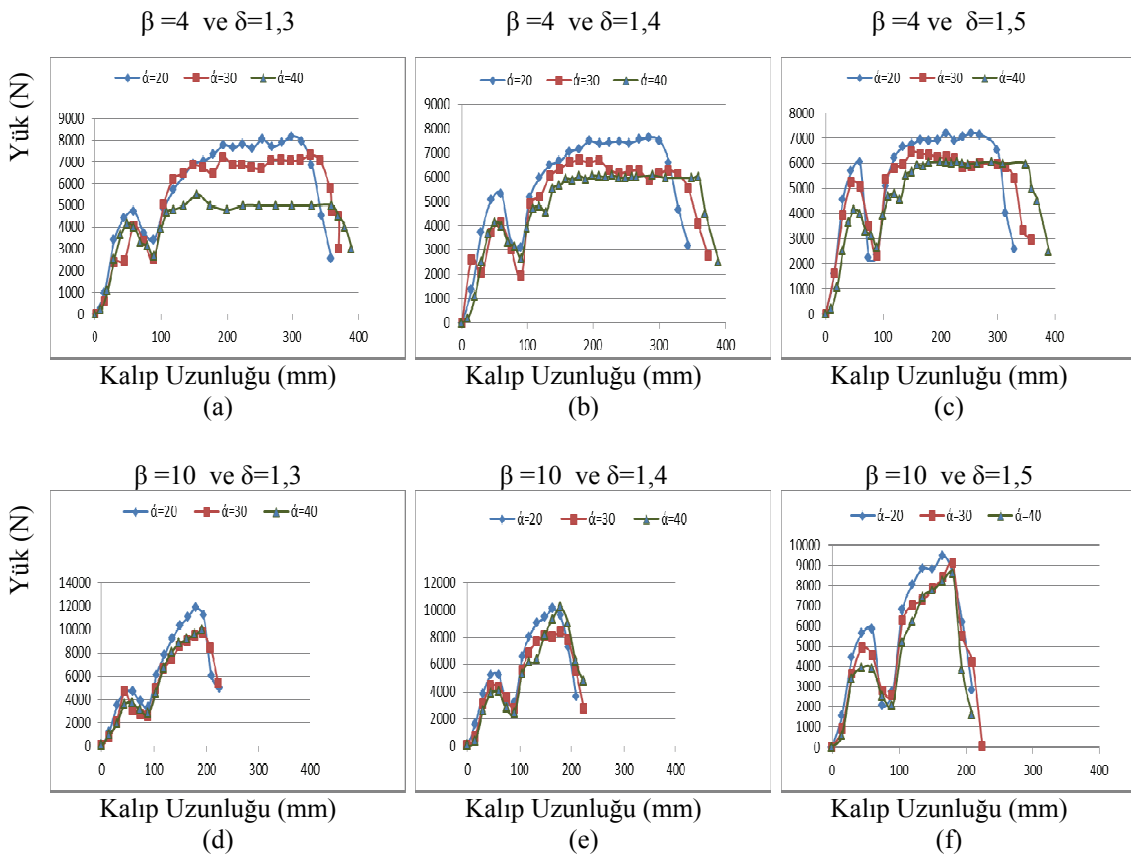
açısının 40° 'den çok daha büyük olması durumunda, klavuzlama bölgesinde kamaların teğet veya radyal yüklere karşı dayanma gücünün azaldığı ve işparçasında yüzeysel çatlaklara neden olabildiği kaynaklarda da teyit edilmektedir [16].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

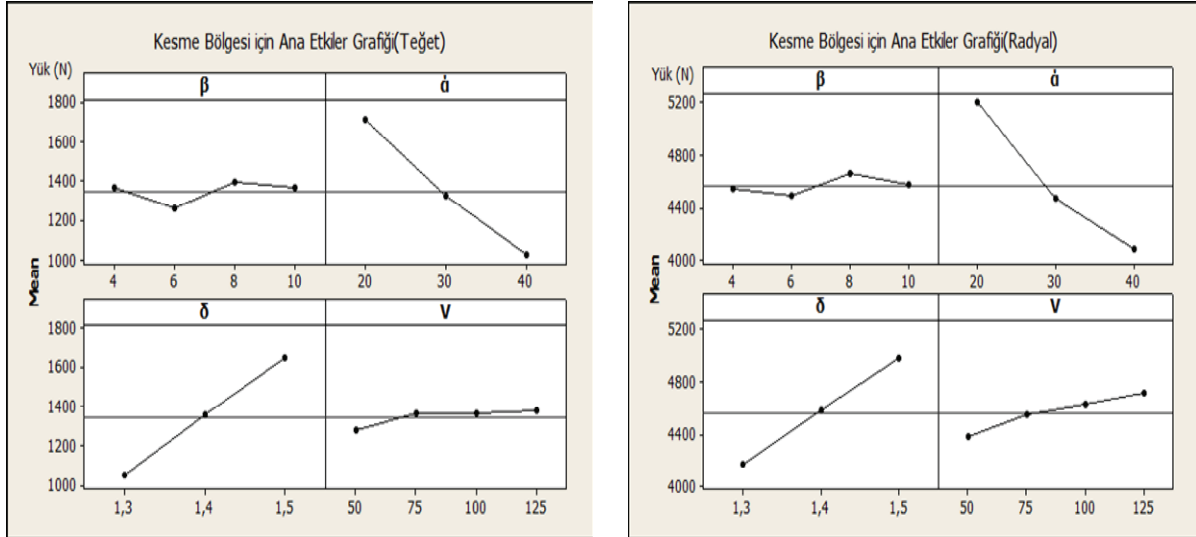
Çapraz kamalı haddelmeyle şekil verme işlemi son yıllarda artış göstermekle birlikte, kalıp geometrisini etkileyen parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri hakkında yeterli çalışma bulunmadığı için kalıp tasarımı etkin bir şekilde yapılamamakta ve endüstriyel kullanımı yaygınlaşmamaktadır. Çünkü her bir ürün değişikliğinde ve kalıp geometrisindeki herhangi bir parametrenin değişmesi durumunda kalıbın diğer geometrik parametreleri ile uygulanması gereken kuvvetler değişmektedir. Bu nedenle, çapraz kamalı haddelme işleminde etkin olan parametrelerin kalıp üzerinde hangi bölgelerde daha önemli olduğu ve birbirleriyle olan etkileşiminin ortaya konulması gerekmektedir. Bu çalışmada varyans analizi (ANOVA) yapabilmek için istatistiksel işlemlerde önemli bir yeri bulunan Minitab programı kullanılmıştır.



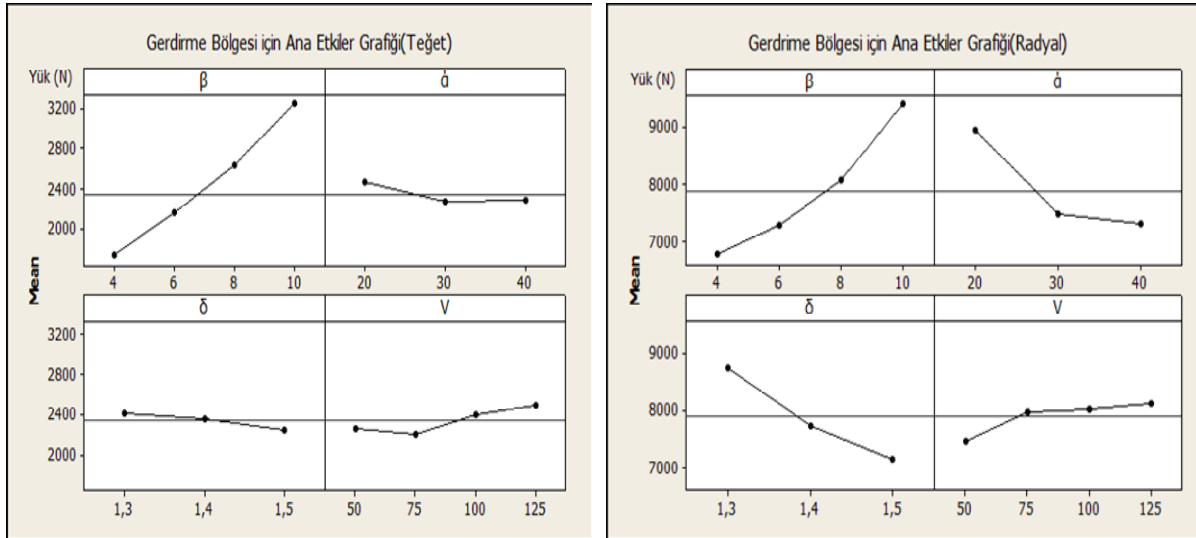
Şekil 8. Şekil Verme Açısına (α) göre Teğet Kuvvetler (Tangential Loads According to Forming Angle (α))



Şekil 9. Şekil Verme Açısına (α) göre Radyal Kuvvetler (Radial Loads According to Forming Angle (α))



Şekil 10. Kesme Bölgesindeki Teğet ve Radyal Kuvvet Ana Etkiler Grafikleri (Tangential and Radial Load MEP Charts for Knifing Zones)



Şekil 11. Gerdirme Bölgesindeki Teğet ve Radyal Kuvvet Ana Etkiler Grafikleri (Tangential and Radial Load MEP Charts for Stretching Zones)

İstatistiksel analizde tanımlanan modele uygunluğu için kullanılan başlıca istatistik parametreleri, R^2 regresyon katsayısı, $R^2(\text{adj})$ düzeltilmiş regresyon katsayısı ve MSE ortalama hata karedir. Genel olarak $R^2(\text{adj})$ değerinin büyük ve MSE değerinin küçük olması türetilen modelin uygunluğunu göstermektedir. $R^2(\text{adj})$, çoklu regresyon analizlerinde bağımsız değişkenlerin sayısı için düzeltilmiş regresyon katsayısıdır. Tasarım değişkenlerinin sayısının fazla olduğu durumlarda $R^2(\text{adj})$ değeri, R^2 değerine göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Çünkü R^2 , modelin artan terim sayısı ile birlikte artarken $R^2(\text{adj})$, kullanımı olmayan yada az olan terimlerin eklenmesi durumunda bu terimlerin etkisini model içinde azaltmaktadır. Bu durumda $R^2(\text{adj})$ değeri çoklu regresyon analizlerinde her zaman R^2 değerinden küçük olmaktadır.

Tablo 2. ANOVA ve R^2 Karşılaştırılması (Comparison of ANOVA and R^2)

Kalıp Bölgeleri		ANOVA	Çoklu Regresyon	Fark
Kesme Bölgesi (teğet)	R^2	99,91	99,99	-0,08
	$R^2(\text{adj})$	94,72	99,99	-5,27
Kesme Bölgesi (radyal)	R^2	99,62	99,66	-0,04
	$R^2(\text{adj})$	97,79	97,99	-0,20
Gerdirme Bölgesi (teğet)	R^2	99,99	99,99	0
Gerdirme Bölgesi (radyal)	$R^2(\text{adj})$	99,21	99,99	-0,78
	R^2	99,89	99,89	0
	$R^2(\text{adj})$	93,77	100,00	-6,23

Bu çalışmada yapılan toplam benzetim sayısı 144 tane olup iki farklı bölge için ayrı ayrı radyal ve teğet kuvvetlerin regresyon katsayıları bulunmuştur. Aşağıda Tablo 2'de ANOVA ve çoklu regresyon değerleri karşılaştırılmaktadır. Elde edilen değerler arasındaki yüksek korelasyon oldukça dikkat çekicidir. Hesaplanan R^2 (0,99) değeri, haddelme

kuvvetinin tanımlanan şekil verme açısı, gerdirme açısı, haddeme oranı ve kalıp hızındaki değişimin %99 olduğunu ifade etmektedir. Genel olarak, hesaplanan regresyon katsayısının 0,95'ten büyük olması, bağımlı değişkenlerle bağımsız değişkenler arasında kuvvetli bir bağıntının olduğunu göstermektedir.

Ana etkiler grafiklerinde, her bir parametre için belirlenen alt ve üst seviye değerlerinin grafiksel olarak farklarının yansıtılması ile diğer faktörlerden bağımsız olarak, her bir parametrenin tek başına olan etkisi ortaya konulmaktadır. Bu amaçla, çapraz kamalı haddeme kalıp tasarımında haddeme kuvvetine etki eden parametrelerin birbirleriyle olan etkilerini ortaya koymak için hazırlanan ana etkiler grafikleri Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmuştur.

Şekil 10'daki kesme bölgesinde α , β , δ ve V değişkenlerinin teğet ve radyal kuvvet üzerindeki etkilerinin benzer şekilde olduğu görülmektedir. Şekil verme açısı (α) büyüdükçe işparçası ile kalıp arasındaki temas yüzeyi azaldığından, şekil verme açısı 20^0 den 40^0 'ye yükselmesi haddeme kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Gerdirme açısı (β) haddeme kuvveti üzerinde çok düşük bir etkiye sahiptir, çünkü kesme bölgesinde gerdirme işlemi çok az olduğundan bu bölgede etkisi görülmemektedir.

Haddeme oranı arttıkça işparçasına uygulanması gereken haddeme kuvveti de artmaktadır. Kalıp hızının ise haddeme kuvveti üzerine etkisinin çok az olduğu görülmektedir.

Şekil 11'de gösterildiği gibi kesme bölgesinin tersine, gerdirme bölgesindeki en önemli parametre gerdirme açısıdır (β). Gerdirme açısı arttıkça haddeme kuvvetinin de artması gerektiği görülmektedir. Özellikle $\beta=8^0$ ve $\beta=10^0$ arasında hem teğet hem de radyal kuvvet üzerinde etkisinin daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil verme açısının (α) ise gerdirme bölgesinde teğet kuvvet üzerinde etkisi sınırlı iken, radyal kuvvet üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. Radyal kuvvet üzerinde şekil verme açısı, 20^0 'den 30^0 'ye çıktığında haddeme kuvvetinde önemli bir düşme görülürken 30^0 'den 40^0 'ye çıktığında haddeme kuvvetini pek fazla değiştirmemektedir. Haddeme oranı (δ) gerdirme bölgesinde teğet kuvvete etki etmezken, haddeme oranının artması radyal kuvvetin azalmasına neden olmaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle çapraz kamalı haddeme kalıp tasarımında uygulanması gereken haddeme kuvvetine etki eden parametreler incelenmiştir. Bu amaçla gerdirme açısı, şekillendirme açısı, haddeme oranı ve kalıp hızı gibi dört bağımsız parametre belirlenmiş ve üç boyutlu

sonlu elemanlar modeli kullanılarak DEFORM 3D paket programıyla çok sayıda benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerden elde edilen sayısal değerler ANOVA metodu kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Ana etkiler grafiği ve etkileşim grafikleri yardımıyla, haddeme kuvvetine etki eden parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Şekillendirme açısı (α), gerdirme açısı (β) ve haddeme oranının (δ) kalıp tasarımında haddeme kuvvetine etki eden önemli parametreler olduğu, ancak kalıp hızının çapraz kamalı haddeme işlemi üzerinde etkisinin çok az olduğu görülmüştür.
- Haddeme derinliğinin artması durumunda kesme bölgesinde haddeme kuvveti artarken, gerdirme bölgesinde azalmaktadır.
- Şekil verme açısının artması ile birlikte gerdirme açısının azalması durumunda işparçasıyla kalıp arasındaki temas yüzeyi azaldığı için gereksinim duyulan radyal kuvvet azalmaktadır.
- Gerdirme açısının artmasıyla birlikte kalıp boyunun kısılması durumunda işparçası radyal yönde kalıplar arasında daha fazla sıkıştırılmakta ve işparçası ile kalıp arasındaki temas yüzeyi artmaktadır. Bu durumda işparçasının aksel yönde deformasyonu için direnç oluşmasını sağlayarak radyal ve teğet kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır.
- Çapraz kamalı haddeme kalıp tasarımında en küçük kuvvet ile haddeme yapabilmek için kesme ve gerdirme bölgelerinin ayrı ayrı tasarlanması gerektiği, her iki bölgede de şekil verme açısının (α) 40^0 ve gerdirme açısının (β) 4^0 olması gerektiği görülmüştür. Haddeme oranının kesme bölgesinde en küçük 1,3 gerdirme bölgesinde ise en büyük 1,5 olması gerekmektedir. Kalıp hızının ise diğer girdi parametreleri ile arasında bir etkileşiminin olmadığı ve haddeme kuvveti üzerinde etki düzeyinin düşük olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Da Silva, M.L.N., Regone, W., Button, S.T., "Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed Steel Forgings Manufactured From Cross-Wedge-Rolled Preforms", **Scripta Materialia**, 54, 213–217, 2006.
2. Li, Q., Lovell, M., "Cross Wedge Rolling Failure Mechanisms And Industrial Application". **Materials Processing Technology**, 265-278, 2008.
3. Dong, Y., Lovell, M., Tagavi, K., "Analysis of Slip in Cross-Wedge Rolling: An Experimentally Verified Finite-Element Model", **Materials Processing Technology**, 80/81 273, 1998.

4. Wang, M., Li, X., Du, F., “Analysis of Metal Forming in Two-Roll Cross Wedge Rolling Process Using Finite Element Method”, **Iron and Steel Research**, 16(1), 38-43, 2009.
5. Pater, Z., “Finite Element Analysis of Cross Wedge Rolling”, **Materials Processing Technology**, 173 201–208, 2006.
6. Bai, Z., Ren, G., Zhang, C.J., “The Calculation of Deformation Load on Cross Wedge Rolling”, **Journal of Jilin University of Technology**, 3, 108-115, 1989.
7. Su, X., Zhang, K., Hu, Z., Yang, C., “Factors Affecting Parameters of Force and Energy in Cross Wedge Rolling”, **Heavy Duty Machine**, 4, 29-33, 2002.
8. Liu, G., Xu, C., Ren, G., “Research on FEM Numerical Simulation of Three Dimension Deformation of Cross Wedge Rolling”, **Forging & Stamping Technology**, 6, 32-35, 2001.
9. Minting, W., Xuotong, L., Fengshan, D., Yangzeng, Z., “A coupled thermal mechanical and microstructural simulation of the cross wedge rolling process and experimental verification”, **Materials Science and Engineering A**, 391, 305-312, 2005.
10. Pater, Z., “Theoretical Method for Estimation of Mean Pressure on Contact Area Between Rolling Tools and Workpiece in Cross Wedge Rolling Processes”, **J Mechanical Sciences**, 39, 233-243, 1997.
11. Cho, N.S., Na, K.H., “Analysis of the Rotational Compression of a Cylindrical Billet in the Transverse Rolling” **J. Mechanical Working Technology**, 28(22), 203-216, 1990.
12. Hayama, M., “Estimation of Load and Contact With in Rotational Compression of Rod”, **J. Japan Society for Technology of Plasticity**, 15 (157), 141-146, 1974.
13. Fu, X.P., Dean, T.A., “Past Developments, Current Applications and Trends in the Cross Wedge Rolling Process”, **Machine Tools and Manufacture**, 33, 367-400, 1993.
14. Yılmaz, N.F., Çelik, A.İ., “Çapraz Kamalı Haddeme Kuvvet Analizi”, **6. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi**, Konya/Türkiye, 2011.
15. Choi, S., Na, K.H., Kim, J.H., “Upper Bound Analysis of the rotary Forging of a Cylindrical Billet” **Jornal of Materials Processing Technology**, 67, 78-82, 1997.
16. Dong, Y., **A Numerical, Experimental and Phenomenological Investigation of Cross-Wedge Rolling**, PhD thesis, University of Kentucky, 1998.

