

## ÇAPRAZ KAMALI HADDELEME PAREMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

**Necip Fazıl Yılmaz<sup>\*</sup>, Ali İhsan Çelik<sup>\*\*</sup>, Sadık Olguner<sup>\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>[nfyilmaz@gantep.edu.tr](mailto:nfyilmaz@gantep.edu.tr) Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 27310-Gaziantep

<sup>\*\*</sup>[acelik@adiyaman.edu.tr](mailto:acelik@adiyaman.edu.tr) Adıyaman Üniversitesi Besni MYO,02300-Adıyaman

<sup>\*\*\*</sup>[sadikolguner@hotmail.com](mailto:sadikolguner@hotmail.com) Makine Mühendisi-Gaziantep

### ÖZET

Firmaların, yeni ürünleri piyasaya sürebilmek ve pazarda söz sahibi olabilmek için kıyasıya bir mücadele içine girdikleri görülmektedir. İmalat sektöründe faaliyet gösteren işletmeler ise aynı ürünü daha kısa zamanda ve daha ucuza üretebilmek için alternatif üretim yöntemlerine artan bir hızda rağbet göstermektedirler. Özellikle metal şekillendirme ile elde edilen ürünlerin gittikçe karmaşık hale gelmesi, metal deformasyon yöntemlerinin gelişmesini ve geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Yeni üretim metotları içerisinde Çapraz Kamalı Haddeleme (ÇKH) yöntemi, başta Çin olmak üzere Avrupa ve Amerika'da büyük ilgi görmektedir. ÇKH, silindirik iş parçalarının düz plaka ya da merdaneler üzerine sabitlenmiş kamalı kalıpların arasında deforme edilerek aksenel simetrik şekil verme işlemidir. Geleneksel imalat yöntemlerine göre ürün kapasitesi, malzeme sarfiyatı, ürün mukavemeti ve çevresel etki gibi birçok konuda üstünlüğü bulunmaktadır. Çapraz Kamalı Haddelemenin olumlu özelliklerinin yanı sıra kalıp tasarımı sırasında karşılaşılan güçlükler nedeniyle bu yöntemin ülkemizde yaygın olarak kullanılmadığı görülmektedir. Tasarım sorunlarını aşmak ve klasik tasarımcılıktan bilgi yoğun tasarımcılığa geçebilmek için ÇKH yöntemindeki tüm parametrelerin ortaya konulması ve araştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, açı ve hız faktörlerinin kalıplarda oluşacak kuvvet üzerine etkileri incelenerek Çapraz Kamalı Haddeleme sırasında gerek kalıp üzerinde var olan gerekse de şekil verme sırasında ortaya çıkan parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmektedir.

**Anahtar Sözcükler:** Çapraz Kamalı Haddeleme (Cross Wedge Rolling), Metallere Şekil Verme, Optimizasyon

### ABSTRACT

It is observed that companies enter into a fierce struggle in order to release new products to market. Businesses operating in the manufacturing sector develop alternative production methods at an increasing rate to produce same product in a shorter time and cheaper. Especially in the metal forming, with the increasing complexity of the products, it is forced to grow and develop new metal deformation methods.

Cross Wedge Rolling (CWR) has attracted great interest especially in China, Europe and USA as a respectively new production method. Cross Wedge Rolling is a metal processing technology in which a cylindrical billet is plastically deformed into an axisymmetric part by the action of wedge shape dies moving tangentially relative to the workpiece. The CWR process offers several innovative features over traditional machining operations such as; production capacity, less waste material, strength of product environmental effect and better product quality. In addition to the positive aspects of cross wedge rolling, this method has not been widely used in our country due to the difficulties of die design. It is needed to make detail research on all effecting parameters in cross wedge rolling operation to overcome design problems

In this work, by analyzing the effects of angles and velocity on the force which is occurred on the dies, optimisation of Cross Wedge Rolling parameters are carried out.

**Keywords:** Cross Wedge Rolling; Metal Forming, Optimisation

## 1.GİRİŞ

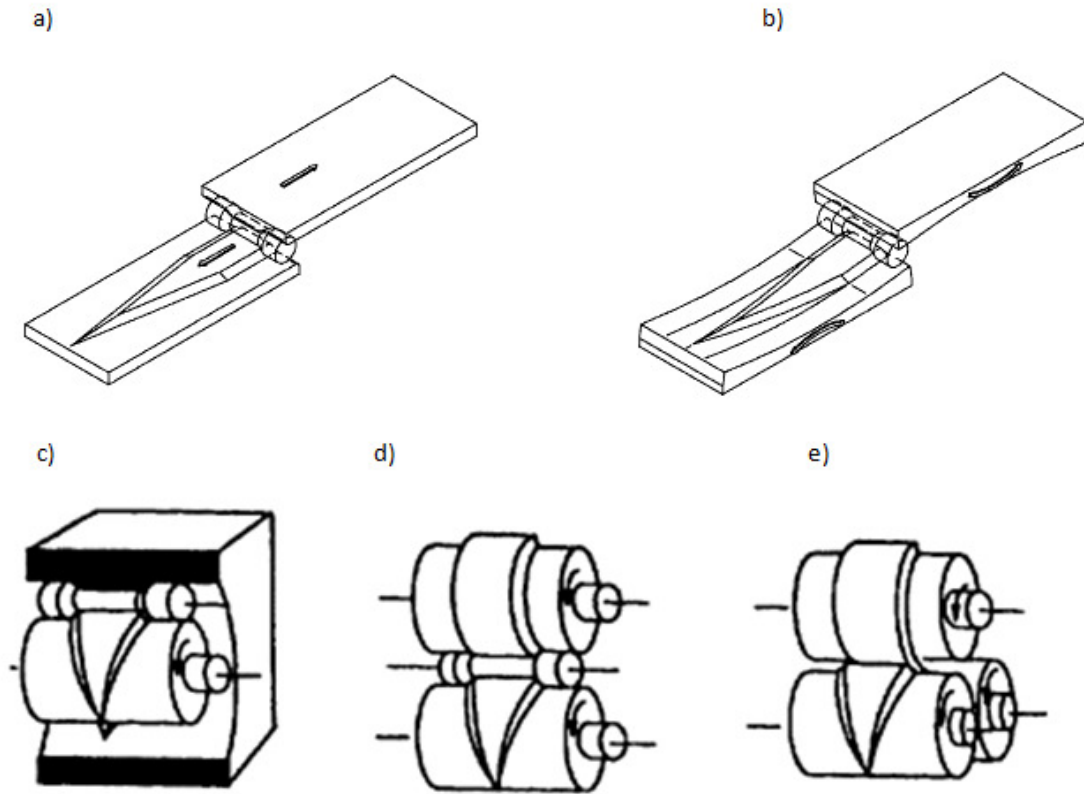
Metal şekillendirme ile elde edilen ürünler talaşlı ve talaşsız olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Talaşsız üretim yöntemleri arasında çapraz kamalı haddeleme (ÇKH) (Cross Wedge Rolling, "CWR") yönteminin önemi her geçen gün artmaktadır. Çapraz Kamalı Haddeleme yöntemi, dairesel iş parçalarının düz plaka ya da merdaneler üzerine monte edilmiş kamalı kalıpların arasında şekillendirilmesi esasına dayanmaktadır [1]. ÇKH'nin en önemli aşaması kalıp tasarımıdır. Aynı ürünler farklı kalıp geometrileri kullanılarak elde edilebilir ancak farklı geometrik parametreler şekil verme sırasında ortaya çıkacak kuvvet, gerilim gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir. Hassas ürünlerin sorunsuz şekilde üretilebilmesi ve çapraz kamalı haddeleme işleminin avantajlarından yararlanılabilmesi için kalıp geometrisi parametrelerinin optimizasyonu büyük önem [9] taşımaktadır. Yapılan çalışmalarda incelenmesi gereken parametreler sınıflandırılarak geometrik parametreler ve şekil verme parametreleri olmak üzere iki ayrı grup oluşturulmuştur. Geometrik parametreler; burun, kılavuzlama, gerdirme ve şekil verme uzunluklarıyla birlikte burun açısı, şekil verme açısı ve gerdirme açısı olmak üzere kalıp tasarımında dikkate alınması gereken ve kalıbı oluşturan tüm uzunluk ve açıları içeren parametrelerdir. Şekil verme parametreleri ise malzeme, kuvvet, kuvvet uygulama oranı, birim şekil değiştirme oranı, hız ve sürtünme gibi işlem sırasında belirlenmesi gereken parametrelerden oluşmaktadır. Geometrik parametrelerin işlem sırasında uygulanması gereken yük miktarını değiştirdiği [2] bilinmektedir. Bu çalışmada haddeleme derinliği ( $\delta$ ) sabit tutularak farklı şekil verme açısı ( $\alpha$ ), gerdirme açısı ( $\beta$ ) ve kalıp hızı ( $V$ ) değerlerine göre yük (load) ve kalıp uzunluğu (stroke) diyagramları incelenerek, olabilecek en uygun değerlerin ortaya konulmasına çalışılmıştır.

## 2.ÇAPRAZ KAMALI HADDELEME

Çapraz Kamalı Haddeleme yöntemi, dairesel iş parçalarının kamalı kalıpların arasında şekillendirilmesi esasına dayandığından, iş parçasının kalıpların hareketine bağlı olarak kendi eksenini etrafında dönmesi ve dairesel iş parçası yüzeyinin tamamının kamalı kalıplarla temas etmesi gerekmektedir. Haddeleme işlemi, kullanılacak malzemenin mukavemetine ve elde edilmek istenen ürünün özelliklerine göre soğuk, sıcak veya ılık

şekillendirmeye yapılabilmektedir. Malzemenin mukavemeti, işlemin sıcaklığı, malzeme ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayısı, kalıp geometrisi ve kalıpların hareket hızı şekillendirmeyi etkilemektedir. Tasarlanan kalıpların birbiriyle ve iş parçası ile uyum içerisinde çalışabilmesi için tüm bu parametrelerin doğru ve birbiriyle uyumlu olması gerekir. Aksi takdirde, bu tür işlemlerde en çok karşılaşılan kayma, sürüklenme, aksenal eğilme, yalpalama ve malzeme içerisinde çatlakların oluşması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır.

Çapraz Kamalı Haddeme Kalıpları kalıp şekline göre 5 farklı tipte tasarlanabilir. Bunlar düz, içbükey, tek merdaneli, çift merdaneli, üç merdaneli olup şematik şekiller Şekil 1’de gösterilmektedir [4].



Şekil 1. Kalıp şekillerine göre ÇKH:  
a) Düz b) İçbükey c) Tek Merdaneli d) İki Merdaneli e) Üç Merdaneli[3-4]

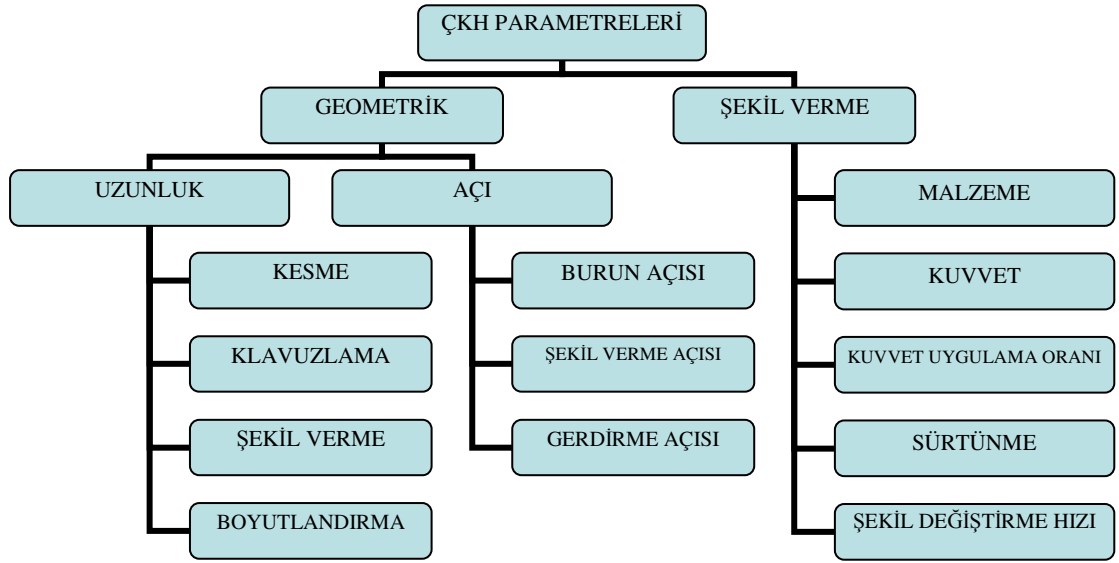
### 3. ÇAPRAZ KAMALI HADDELEME PARAMETRELERİ

Çapraz Kamalı Haddeme parametreleri iki ana başlık altında toplanabilir.

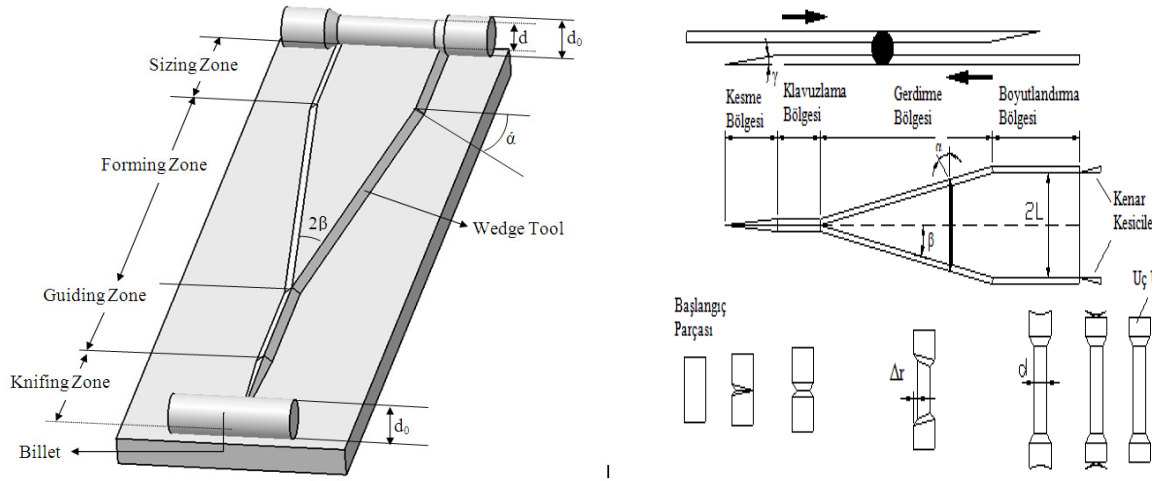
**a) Geometrik Parametreler:** Geometrik parametreler kalıpların tasarımı sırasında belirlenmesi gereken ve kalıba ait bütün açı ve uzunlukları içeren parametrelerdir. Üretilen parçanın geometrisi doğrudan geometrik parametrelerle ilgilidir.

**b) Şekil Verme Parametreleri:** Çapraz Kamalı Haddeme işleminin gerçekleştirilmesi sırasında belirlenmesi gereken kalıplara etkiyecek kuvvet, kalıp hızı, sürtünme ve birim şekil değiştirme gibi parametrelerdir.

Çapraz Kamalı Haddeme parametrelerinin sınıflandırılması ve geometrik parametrelerin kalıp geometrisi üzerinde yerleşimi sırasıyla Şekil 2 ve 3'te gösterilmektedir.

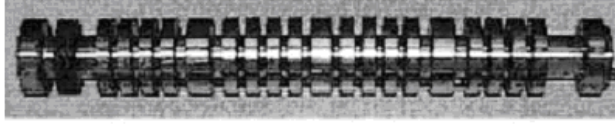


Şekil 2. Çapraz kamalı haddeme parametreleri [5]



Şekil 3. Çapraz kamalı haddeme kalıp geometrisi [2]

ÇKH yöntemi ile hassas ürünler elde edilebilmesi için, kalıpların etkin bir şekilde tasarımı ve başlangıç parçasının en uygun boyut ve geometrisinin tespiti gereklidir. Tasarlanan alt ve üst kalıpların birbirleri ile ve iş parçasıyla uyum içerisinde hareket etmesi de uç ürün hassasiyeti için büyük önem arz etmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi ÇKH yöntemi ile çapı 3-125 mm ve boyu 3-2000 mm arasında olan aksenal simetrik dairesel iş parçalarının üretimi yapılabilmektedir [3].

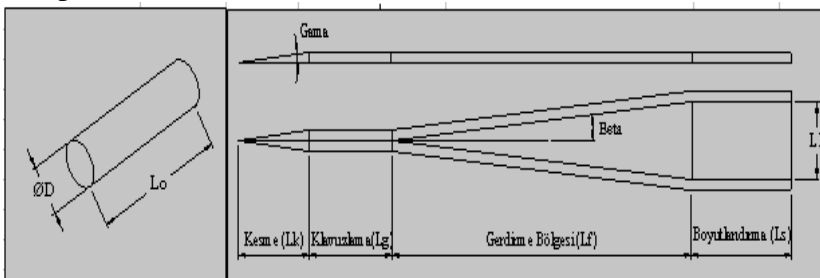


Şekil 4. Çapraz kamalı haddeleme ile üretilmiş bazı parçalar[3].

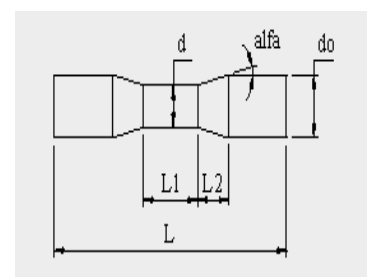
#### 4. TARTIŞMA

Talaşsız imalat işlemlerinin tamamında, kalıbın hazırlanması ve malzemeye şekil verme süreçlerinde pek çok değişkenin bir arada bulunması ve bu değişkenlerin tamamının hassasiyetle belirlenme gereksinimi nedeniyle üretimden önce işlemin bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Çapraz Kamalı Haddeleme işleminin üretimden önce bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmesi için, sonlu elemanlar yöntemi (FEM – Finite Element Method), üst sınır eleman tekniği (UBET – Upper Bound Elemental Technique) gibi metotlar kullanılabilir [6-8-10]. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile bilgisayar ortamında 144 farklı simülasyon gerçekleştirilmiş, çift çekirdekli işlemcisi ve 1GB RAM bulunan bir bilgisayarda her bir simülasyon yaklaşık 24 ile 48 saat arasında sonlanmıştır. Bu simülasyonlar neticesinde elde edilen teğetsel ve radyal kuvvetler dikkate alınarak oluşturulan grafikler incelenmiş ve bunlar içindeki en uygun değerlerin ortaya konulmasına çalışılmıştır.

#### Kalıp Geometrisi



#### İş Parçası Geometrisi



Şekil 5. Kalıp ve iş parçası geometrisi [2]

Bu çalışmada kabul edilen iş parçası malzemesi: AISI-1045 Çelik,  
iş parçası sıcaklığı: 1200 C,  
kalıp sıcaklıkları: 200 C, kalıplarla malzeme arasındaki ısı transferi ihmal edilmiştir.

Gerçekleştirilen bütün simülasyonlarda haddeleme derinliği ( $\delta$ ) 1,4 olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca iş parçasının kalıplar arasında sürüklenmeden dönmesini sağlamak için

kalıplar ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) 1 olarak kabul edilmiştir. Değişimin inceleneceği parametreler ise kalıp hızı ( $V$ ) 50, 75, 100, 125 mm/s, gerdirme açısı ( $\beta$ )  $4^0$ ,  $6^0$ ,  $8^0$ ,  $10^0$  ve şekil verme açısı ( $\alpha$ )  $20^0$ ,  $30^0$ ,  $40^0$  olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, her 0.15 mm kalıp hareketi (stroke) ile teğet ve radyal kuvvet verileri yeniden alınmış, böylece kalıp boyunca meydana gelen değişimin etkilerinin incelenebileceği grafikler elde edilmiştir.

Çalışmalar sırasında elde edilen 144 simülasyondan 300'ün üzerinde farklı grafik elde edilmiştir. Bu grafikler içerisinde açı ve hız faktörlerinin oluşacak kuvvet üzerine etkilerini gösteren en uygun veri seti alınarak Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Açı ve hız değerleri değişim tablosu

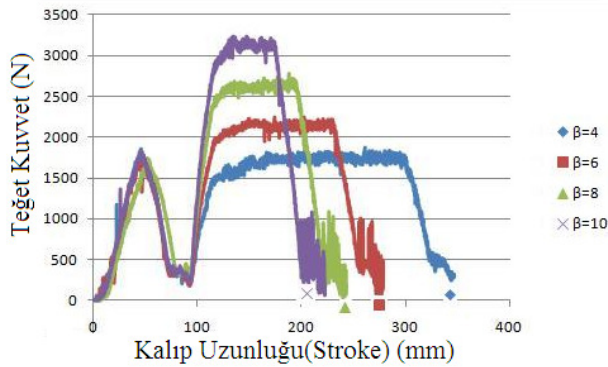
(β) değişken				(V) değişken				(α) değişken			
δ	A	v	β	δ	α	v	β	Δ	α	v	β
1,4	20	100	4	1,4	20	50	4	1,4	20	100	4
1,4	20	100	6	1,4	20	75	4	1,4	30	100	4
1,4	20	100	8	1,4	20	100	4	1,4	40	100	4
1,4	20	100	10	1,4	20	125	4				

Haddeleme derinliği ( $\delta$ ), şekil verme açısı ( $\alpha$ ), kalıp hızı ( $V$ ) ve gerdirme açısı ( $\beta$ ) değişimlerine göre elde edilen grafikler ayrı ayrı incelenmiştir.

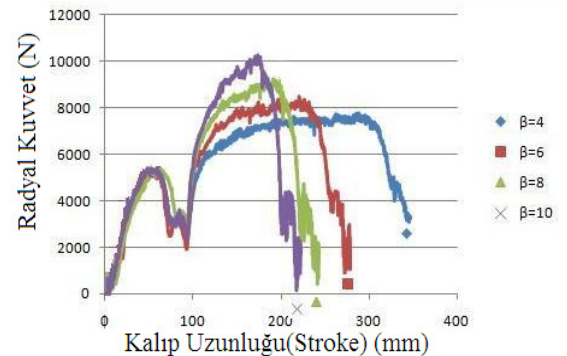
#### 4.1. Gerdirme Açısı ( $\beta$ ) Değişimine Göre Yük-Kalıp Uzunluğu Grafiği

Tablo 1'de görülen gerdirme açısı ( $\beta$ ) değişken grubu için elde edilen kuvvet-kalıp uzunluğu (stroke) grafiklerinin teğetsel ve radyal kuvvetlere göre değişimi sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir.

Bu grafiklerde haddeleme derinliği ( $\delta$ ) 1.4, şekil verme açısı ( $\alpha$ ) 20 ve kalıp hızı 100 mm/s olarak alınmış olup, gerdirme açısının 4, 6, 8 ve 10 derece olduğu durumlardaki değişimler görülmektedir.



Şekil 6. Gerdirme açısı ( $\beta$ ) değişken grubu için teğetsel kuvvet-kalıp uzunluğu



Şekil 7. Gerdirme açısı ( $\beta$ ) değişken grubu için radyal kuvvet-kalıp uzunluğu

Şekil 6 ve Şekil 7'de görüldüğü gibi diğer parametreler sabit tutulurken, gerdirme açısı ( $\beta$ )'nın değişimi çapraz kamalı haddeleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için kalıplara uygulanması gereken kuvvet üzerinde oldukça önemli bir etkisi bulunmaktadır.

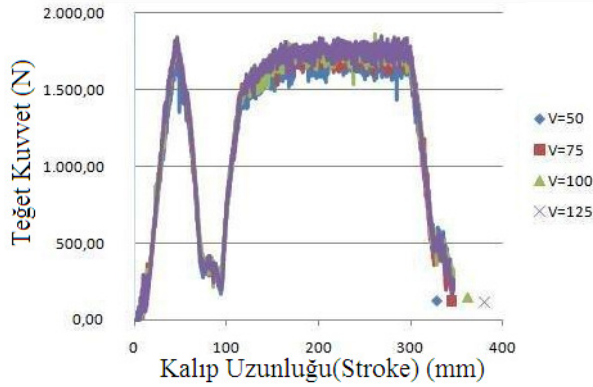


Gerdirme açısı ( $\beta$ )'nin artışı daha kısa kalıp kullanarak aynı ürünün elde edilebilmesini sağlamakla birlikte bu açının artmasıyla birlikte uygulanması gereken kuvvetin de arttığı görülmektedir. Gerdirme açısının artması ile kalıp maliyetleri konusunda avantaj sağlanırken, uygulanması gereken kuvvetin artması üzerinde durulması gereken bir konudur. Teğetsel kuvvet açısından bakıldığında gerdirme açısı 4 derece olduğunda maksimum yük 1750 N olurken, gerdirme açısı 10 derece olduğunda yaklaşık 3300 N olmaktadır. Meydana gelen radyal kuvvetin ise teğetsel kuvvetten daha fazla olduğu ancak maksimum kuvvetler arasında oran itibarıyla çok büyük değişikliğin olmadığı görülmektedir. Gerdirme açısı 4 derece iken 7900 N olan yük, açı 10 derece olduğunda en fazla 10500 N olmaktadır. Bu durumda, haddeleme derinliği, gerdirme açısı arttıkça dairesel iş parçasının merkezinde meydana gelebilecek çatlaklar, kalıp ve kuvvet uygulama maliyetlerinin hassasiyetle dikkate alınması gereği ortaya çıkmaktadır

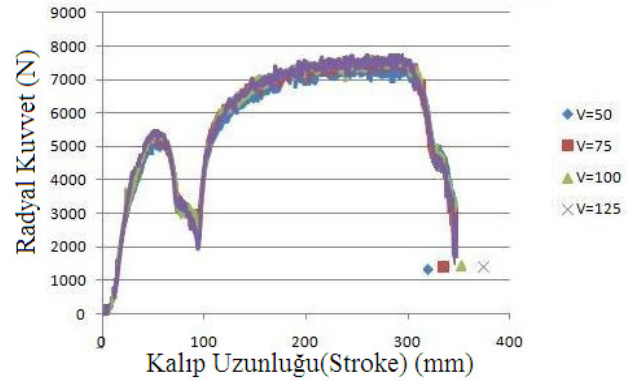
#### 4.2. Kalıp Hızı (V) Değişimine Göre Yük-Kalıp Uzunluğu Grafiği

Tablo 1'de görülen kalıp hızı (V) değişken grubu için elde edilen kuvvet-kalıp uzunluğu grafiklerinin teğetsel ve radyal kuvvetlere göre değişimi sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir.

Bu grafiklerde haddeleme derinliği ( $\delta$ ) 1.4, şekil verme açısı ( $\alpha$ ) 20 ve gerdirme açısı ( $\beta$ ) 4 olarak alınmış olup, kalıp hızının 50, 75, 100 ve 125 mm/s olduğu durumlardaki değişimler görülmektedir.



Şekil 8. Kalıp hızı (V) değişken grubu için teğetsel kuvvet-kalıp uzunluğu



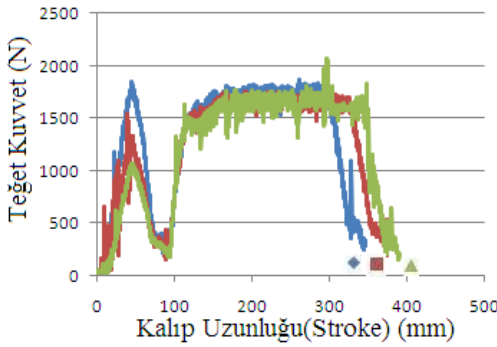
Şekil 9. Kalıp hızı (V) değişken grubu için radyal kuvvet-kalıp uzunluğu

Şekil 8 ve Şekil 9'da görüldüğü gibi kalıp hızı'nın değişimi işlem süresince uygulanması gereken maksimum kuvvet üzerinde önemli bir değişiklik meydana getirmemektedir. Teğetsel kuvvet en fazla 1800 N'a ulaşırken, radyal kuvvet en fazla 7800 N'a ulaşmaktadır. Bütün farklı kalıp hızı değerlerine göre grafiklerin yaklaşık olarak birbiriyle aynı değerleri verdiği görülmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken konu çok yüksek kalıp hızlarının belirlenmesi durumunda zamana göre malzemedeki birim şekil değiştirme hızı yüksek olacağından, iş parçasının kalıplar arasında kaymasına veya malzeme içerisinde iç çatlaklar oluşmasına neden olacaktır [7-11].

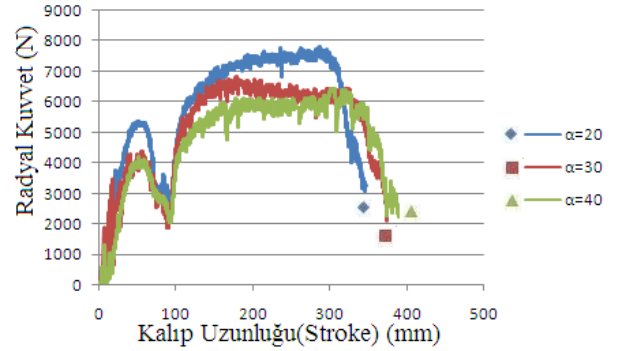
### 4.3. Şekil Verme Açısı ( $\alpha$ ) Değişimine Göre Yük-Kalıp Uzunluğu Grafiği

Tablo 1’de görülen şekil verme açısı ( $\alpha$ ) değişken grubu için elde edilen kuvvet-kalıp uzunluğu grafiklerinin teğetsel ve radyal kuvvetlere göre değişimi sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmektedir.

Bu grafiklerde haddelme derinliği ( $\delta$ ) 1.4, gerdirme açısı ( $\beta$ ) 4 ve kalıp hızı 100mm/s olarak alınmış olup, şekil verme açısının 20, 30 ve 40 derece olduğu durumlardaki değişimler görülmektedir.



Şekil 10. Şekil verme açısı ( $\alpha$ ) değişken grubu için teğetsel kuvvet-kalıp uzunluğu



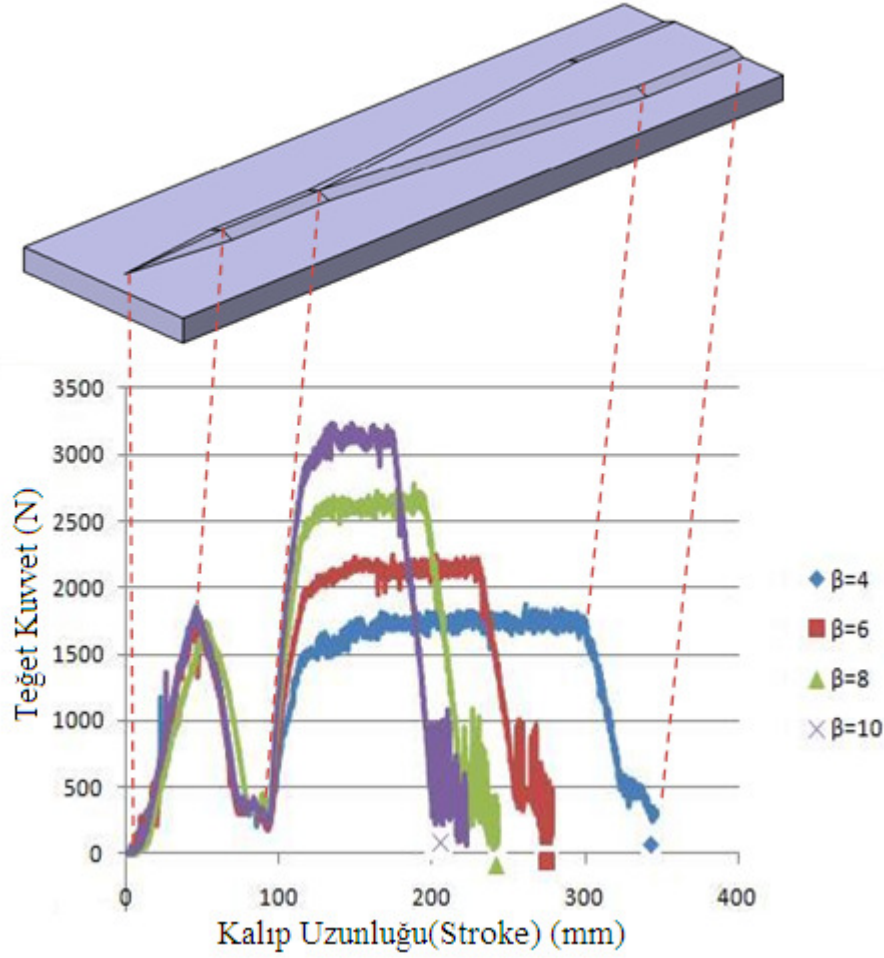
Şekil 11. Şekil verme açısı ( $\alpha$ ) değişken grubu için radyal kuvvet-kalıp uzunluğu

Şekil 10 ve Şekil 11’ de görüldüğü gibi şekil verme açısı ( $\alpha$ )’nın değişmesi, kalıbın kesme bölgesinde teğetsel kuvvet üzerinde değişiklik gösterirken, gerdirme bölgesinde maksimum teğetsel kuvvet üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Diğer tüm örneklerde olduğu gibi teğetsel kuvvet en fazla 1800 N’a ulaşırken radyal kuvvet 7800 N’a ulaşmaktadır. Grafiklerden görüldüğü gibi açının 20 derece olması durumunda kalıp boyunda küçük bir kısalma meydana gelmektedir. Şekil 11’e bakıldığında, şekil verme açısının artması durumunda uygulanması gereken yük miktarının azaldığı görülmektedir. Bu durumda şekil verme açısının büyük olması önemli bir avantaj olarak görülebilir. Fakat bu açının 40 dereceden daha büyük seçilmesi durumunda iş parçasının kendi eksenine etrafında dönmesinde sorunlar çıkmakta ve iş parçasının kayarak sürüklenmesine neden olmaktadır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada çapraz kamalı haddelmeyi etkileyen parametreler içinde hız ve açı faktörlerinin uygulanacak yük üzerine etkileri incelenmiştir. Beklenildiği üzere en yüksek yük değerleri gerdirme bölgesinde görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 12’de kalıp geometrisiyle grafik arasındaki bölgeler gösterilmektedir.





Şekil 12. Kalıp – Grafik gösterimi

Varılan bu noktada;

- Bütün grafikler incelendiğinde; kılavuzlama ve boyutlandırma bölgelerinde teğet ve radyal kuvvetlerin azaldığı, kesme ve gerdirme bölgelerinde ise teğet ve radyal kuvvetlerin genel olarak arttığı görülmektedir.
- Kılavuzlama bölgesinde malzeme üzerindeki deformasyonun çok az olması nedeniyle, bu bölüm kalıp geometrisi içerisinde çıkarılıp 3 bölgeden oluşan kalıp tasarlamak mümkündür.
- Gerdirme açısının artması kalıp boyutunu ciddi oranda kısaltmaktadır. İşparçasının malzemesine göre değişmekle birlikte haddeleme derinliği oranı 1.6'nın üzerinde olmamak kaydıyla gerdirme açısı en fazla 10 derece olmalıdır. (Burada ifade edilen 1.6 değeri makalede bahsedilmemekle birlikte elde edilen yüzlerce grafikten elde edilen sonuçtur. Bu çalışmada sadece açı üzerinde durulduğundan haddeleme derinliğine ilişkin detaya girilmemiştir.)
- Gerdirme açısının artması durumunda uygulanması gereken yük miktarının da arttığı görülmektedir.
- Şekil verme açısının değişmesi teğetsel kuvvet üzerinde önemli bir değişiklik göstermezken, radyal kuvvet üzerinde değişiklik göstermektedir. Açı büyüdükçe uygulanması gereken kuvvet azalmaktadır
- Kalıp hızının değişmesini uygulanması gereken yük miktarı üzerinde etkili değildir.
- Bütün durumlarda radyal kuvvet teğetsel kuvvetten daha fazladır.
- Kalıp tasarımı ÇKH'nin en zor kısmını oluşturmaktadır.
- Kalıp maliyeti kalıp uzunlukları kısaltılarak düşürülebilir.

Bu çalışma, diğer tüm parametrelerinin birbiriyle olan ilişkilerinin ortaya konulması ve ortaya çıkan bağıntıların matematiksel bir formüle dönüştürülmesi için halen devam etmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] PATER Z., Theoretical and Experimental Analysis of Cross Wedge Rolling Process, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 40, 49-63, (2000).
- [2] YILMAZ, N.F., BOZGEYİK, A., GÖV, K. Çapraz Kamalı Haddeme Tezgahı Tasarımı ve İmalatı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Konya Şubesi **IV. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi**, (24-25 Kasım 2007).
- [3] LI, Qiang, R., LOVELL, Michael R., The establishment of a failure criterion in cross wedge rolling, **Int J Adv Manuf Technol**, 24:180–189, (2004).
- [4] PETER, Z, GONTRAZ, A., WERO, W., Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls, **Journal of Materials Processing Technology**, (2006).
- [5] BOZGEYİK, A., Computer Aided Evaluation of Cross Wedge Rolling Parameters, Y.Lisans, Gaziantep, (2006).
- [6] PATER, Z., Finite element analysis of cross wedge rolling, **Journal of Materials Processing Technology**, 173, 201–208, (2006).
- [7] DONG, Y., TAGAVI, K. A., LOVELL, M. R., DANGE, Z., Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure, **Journal of Mechanical Sciences**, 42, 1233-1253, (2000).
- [8] FANG, G., LEI, L. P., ZENG, P., Three-dimensional rigid-plastic finite element simulation for the two-roll cross wedge rolling process, **Journal of Materials Processing Technology**, 129, 245-249, (2002).
- [9] PATER, Z., Tools optimisation in cross wedge rolling, **Journal of Materials Processing Technology** 139,153–159, (2003).
- [10] PATER, Z., Simulation of cross-wedge rolling process using the upper-bound method, **Scandinavia journal of metallurgy**, 27,120-127, (1998).
- [11] URANKAR, S., LOVELL, M., MORROW, C., LI, Q., KAWADA, K., Establishment of failure conditions for the cross-wedge rolling of hollow shafts, **Journal of Materials Processing Technology**, (2006).