

## ENJEKSİYON YIĞMA YÖNTEMİNDE KUVVET VE MALZEME AKIŞINA DEFORMASYON BÖLGESİ BOYUT ORANININ ETKİLERİ

M. Tahir ALTINBALIK\*

Yılmaz ÇAN\*

**Özet:** Enjeksiyon yığma yöntemi, kapalı kalıpla klasik dövme yöntemine benzeyen malzeme akışı, kuvvet simülasyonuna izin veren deformasyon mekanizması ve daha düşük kuvvetlere ihtiyaç duyulması nedeniyle uygun geometri-deki parçalar için, çapaklı dövmeye bir alternatif oluşturmaktadır. Böylece malzeme kaybı azalmakta ve çapak kesme işleminden tasarruf edilmektedir. Bilimsel olarak araştırılması yaklaşık son 20 yıla rastlayan yöntem henüz sistematik bir biçimde sanayi proseslerine uygulanacak teknolojik potansiyele ulaşmamıştır. Sunulan çalışmada yöntemin prensibine uygun kalıp düzeneği hazırlanmış ve farklı kalıp gravürleri işlenmiştir. İki farklı *birincil deformasyon bölgesi* boyut oranına sahip numuneler ile farklı diş sayılarına sahip spline formlar doldurulmuştur. Bu şekilde deformasyon bölgesi boyut oranının kuvvete olan etkilerinin incelendiği çalışmada, ölçülen deney kuvvetleri üst sınır tekniği ile hesaplanan kuvvetlerle de karşılaştırılmıştır. Deneyler 150 metrik ton kapasiteli bir hidrolik preste kurşun malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enjeksiyon yığma, üst sınır analizi, plastik deformasyonla imalat.

### The Effects of Aspect Ratio of the Primarily Deformation Zone on Load and Material Flow in the Injection Upsetting

**Abstract:** Injection upsetting, which represents metal flow as in closed die forging, is an alternative forming method of closed die forging with flash for convenient geometries due to less forming loads. This process gives less material waste and eliminates flash trimming time. This process has not reached its technological potential although scientific research dates back to last 20 years. In this study; a die set with different die gap has been made according to principal of injection upsetting. Specimens having two different primary deformation zone aspect ratios were used to upset splines with different tooth numbers. Measured and calculated load values obtained by using upper bound method were compared for different deformation region aspect ratios. Experiments were carried out by using a hydraulic press of which capacity 150 metric tons and lead was chosen as experimental material.

**Key Words:** Injection upsetting, upper bound analysis, manufacturing by plastic deformation.

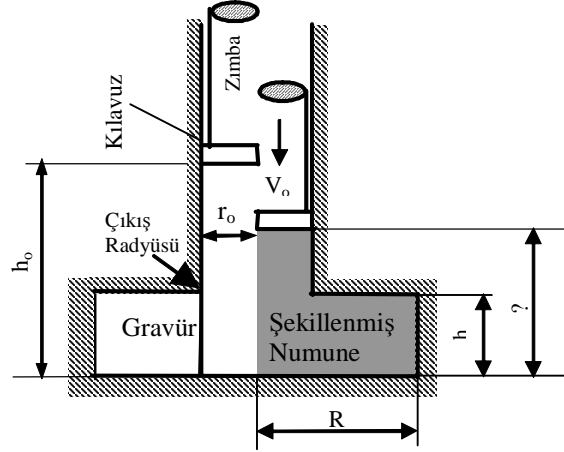
## 1. GİRİŞ

Kafa şişirme yöntemlerinin bir alternatifi olarak düşünülen ve hayata geçirilen enjeksiyon yığma yöntemi genellikle net ölçülere yakın parçalar elde etmek için kullanılıyorsa da uygun düzenlemelerle net ölçülü parçalar imal etmek mümkündür. Şekil 1'de şematik olarak gösterilen yöntemde kılavuz içindeki zimba tarafından aksenal olarak verilen hareket malzemenin radyal biçimde akararak kalıp boşluğunu doldurmasını sağlamaktadır (Balendra, 1985). Özellikle uzun şaftlı ve geniş flanşları olan parçaların burkulma problemi olmadan bir seferde yığılabilmesi yöntemin en önemli avantajı olarak söylenebilir (Mizuno ve diğ., 1999). Bunun yanında çapak alma operasyonuna ihtiyaç duyulmaması nedeniyle getirdiği ekonomiklik, iyi bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti, seri imalata uygun olması diğer avantajlar olarak sıralanabilir (Plancak ve diğ., 1992).

Yöntem yaklaşık 40 yıllık bir geçmişe sahip olmakla beraber konunun bilimsel olarak ele alınması yaklaşık son 20 yıla rastlamaktadır. Bahsedilen yöntem bu konuda ilk bilimsel çalışma yapanlar tarafından enjeksiyon yığma (injection upsetting) ismi ile sunulmuş olmasına rağmen yanıl ekstrüzyon veya radyal ekstrüzyon veya enjeksiyon dövme isimleri de kullanılmaktadır. Malzemenin bir kalıp kılavuzundan itilerek kalıp boşluğunu doldurduğu proseste malzeme akışını etkileyen iki temel unsur vardır. Bunlar; birincil

\* Trakya Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne.

deformasyon bölgesinin boyut oranı ( $T=h/2r_o$ ) ve şekillendirme devam ediyorken kalıp boşluğundaki anlık boyut oranıdır (Balendra, 1993). Balendra (1997) T değerine bağlı olarak 3 farklı akış modelinin olduğunu belirtmektedir. Buna göre; 1)  $1.3 < T < 1.64$  için malzemede katlanma meydana gelmektedir. Bu durum dış yüzeyde kusurlara yol açmaktadır. 2)  $0.8 < T < 1.3$  olduğunda katlanma olmamakta ama dış yüzeyde dönme meydana gelmektedir. Böylesi bir durumda kalıbın alt köşeleri, üst köşeleri doldurmak için gerekli kuvvetin %40 fazlası uygulandığı halde dolmamaktadır. 3)  $T < 0.8$  hali kalıbın ilk iki hale göre en iyi dolduğu birincil deformasyon bölgesi oranıdır. Ancak T değeri azaldıkça dar kanala malzeme ekstrüzyonu zor olduğundan kuvvet ihtiyacı artmaktadır.



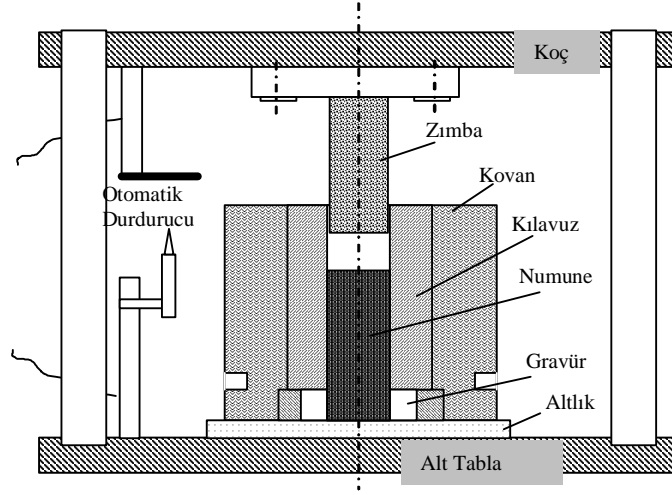
Şekil 1:  
Enjeksiyon Yığıma Yöntemi

Yöntemle ilgili pek çok teorik model geliştirilmesine rağmen, deformasyon mekanizmasının kapalı kalıpla klasik dövmeye benzer olması nedeniyle, proses, üst sınır kuvvet analizi yöntemlerine daha uygun bir model teşkil etmektedir (Parsons ve diğ., 1973). Ancak Balendra (1985)  $T < 0.65$  olan ince flanşlarda üst sınır analizinin çok uygun olmadığını belirtmektedir. Üst sınır analizinde malzeme akışını modellemek üzere iki adet teorik hız süreksizliği geçiş bölgesi tanımlanmıştır. Kalıp kılavuzu içinden alt kalıp boşluğuna malzeme geçişini tanımlayan bu modellerden ilkinde malzeme parabolik (Alexander ve Lengyel, 1965), ikincisinde ise konik (Milner, 1971) bir biçimde akmaktadır. Deneysel olarak  $T=0.13-0.63$  aralığında araştırılan konik modelde malzeme akışı radyal ve aksel hız bileşenleri halindedir ve bir  $\lambda$  geometri parametresi tanımlanmıştır. Şekil 1’de gösterilen çıkış radyüsü ( $R_ç=r/2r_o$ ) bir diğer önemli parametre olup Balendra (1987)  $R_ç=0.08$  ve Milner (1971)  $R_ç=0.1$  değerlerinin kendi deney koşulları içinde optimum değer olduğunu belirtmektedir.

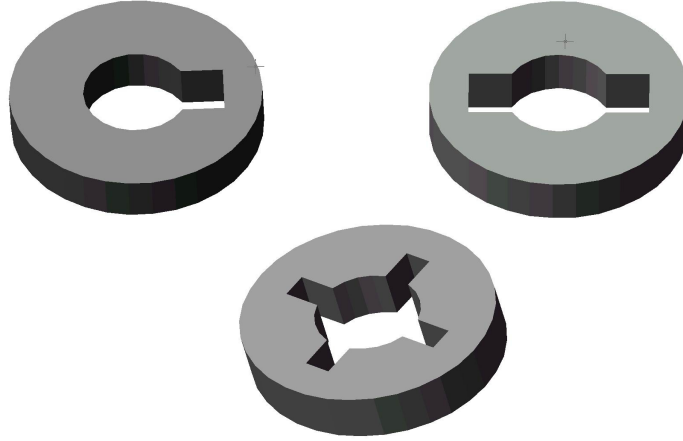
Bu çalışmada ilkel parça boyut oranının deformasyon kuvvetine ve kalıp doluluğuna olan etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır, aynı zamanda Üst Sınır Metodu uygulanarak prosesin matematiksel modellenmesi yapılmıştır ve sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Dövme deneyleri enjeksiyon yığıma yönteminin prensibine uygun olarak dizayn edilmiş Şekil 2’de gösterilen kalıp düzeneği ve Şekil 3’te gösterilen alt kalıplarla gerçekleştirilmiştir. Kalıplar 1.2344 DIN normlu sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş ve ıslah edilerek 53 HR<sub>C</sub> sertlik elde edilmiştir. 21 ve 23 mm. iç çaplarında iki adet kılavuz ve tek, çift ve dört dişli spline formu olmak üzere 3 farklı alt kalıp hazırlanmıştır. Alt kalıbın yüksekliği 15 mm. olup  $T_1=15/23=0.65$  ve  $T_2=15/21=0.71$  değerleri elde edilmiştir. T değerlerinin bu şekilde elde edilmesinin birkaç nedeni vardır. İlki, girişte bahsedilen  $T < 0.8$  şartını sağlamak ve prosesin dönme veya burkulma olmadan gerçekleşmesi içindir. Balendra(1985) üst sınır analizinin  $T < 0.65$  için uygun olduğunu kaydetmiştir. Bu bilgi ışığında T değeri tam olarak bu sınır değer ve biraz üstü seçilerek, önerilen kinematik kabul edilebilir hız alanlarının Balendra’nın bahsettiği bu şarta ve mevcut prosese ne derece uygun olduğunu araştırmak amaçlanmıştır. Ayrıca  $T > 0.5$  olduğundan Ko ve diğ. (2001) tarafından bahsedilen alt kenar ayrılmasından kaçınılmıştır. Kılavuzun alt kısmında yani kalıp çıkış bölgesindeki radyüs 2 mm. işlenerek  $R_1=0.087$  ve  $R_2=0.095$  olarak elde edilmiş, böylece Balendra (1987) ve Milner’in (1971) önerdiği sırasıyla 0.08 ve 0.1 alanında kalınmıştır.



Şekil 2:  
Enjeksiyon Yığıma Deneylerinde Kullanılan Kalıp Düzenegi



Şekil 3:  
Enjeksiyon Yığıma Deneylerinde Kullanılan Alt Kalıplar

Alt kalıp gravürleri ise Şekil 3'te gösterildiği gibi 3 farklı formdadır. Tek dişli ve **iki** dişli kalıp gravüründe diş boyutları birbirinin aynıdır. Dört dişli gravürde ise diş dibi çapının tek diş ve çift dişlerle aynı olması gerektiğinden, diş genişliği ve boyu farklıdır. Ancak özellikle **iki ve dört** dişli numuneler detaylı inceleneceği için bu iki kalıp gravürünün projeksiyon alanı aynı olacak şekilde işlenmiş ve kalıp yükseklikleri de aynı olduğundan her iki gravürün hacimlerinin eşit olması sağlanmıştır.

Deney malzemesi olarak oda sıcaklığında pekleşmemesi nedeniyle kurşun seçilmiştir. 40 mm. çapında bir ekstrüzyon alıcısından ileri ekstrüzyonla 20.9 ve 22.9 mm. çapında elde edilen çubuklar gerekli boylarda kesilerek işlenmiş ve finiş boyutuna getirilmiştir. Deneyler 5 mm/sn koç hızlı 150 metrik tonluk bir preste gerçekleştirilmiştir. Deneylerden önce her numune asetonla silinerek eşit sürtünme koşullarının oluşturulması amaçlanmıştır. Kuvvet ölçümü için bir Wheatstone köprüsü oluşturulmuş ve buradan alınan sinyaller gerekli kalibrasyonlar yapılarak bir  $x(t)$ - $y(t)$  yazıcısına kaydedilmiştir.

### 3. TEORİK ANALİZ

#### 3.1. Üst Sınır Metodu

Bu çalışmada prosesin matematiksel modellenmesi amacıyla plastik şekil verme proseslerinin analizinde sıklıkla kullanılan Üst Sınır Metodu uygulanmıştır. Yöntem plastik biçimlendirme işlemlerinde

kuvvet ve enerji ihtiyacının ve malzeme akışının modellenmesi için kısa bilgisayar zamanı aldığından, ancak sonlu elemanlar metodu kadar hassas sonuçlar elde edilememekle beraber kabul edilebilir hassasiyetle sonuçlar elde edildiğinden tercih edilmektedir. Üst Sınır Metodunda plastik deformasyon için harcanan güç, ideal plastik deformasyon için harcanan güç ve kayma ve sürtünme yüzeylerinde harcanan güçlerin toplamına eşit veya daha az olduğu şeklinde ifade edilir. Plastik deformasyon için gerekli kuvvet deformasyon için gerekli gücü presin gücüne eşitleyerek hesaplanır.

Yöntemde hesapları basitleştirmek için bir takım kabuller yapılır: 1) Malzeme izotropik, sıkıştırılmaz, pekleşmeyen, rijit tam plastiktir, 2) Takımlar rijittir, 3) Malzeme Levy-Mises ve von Mises akma kriterlerini sağlamaktadır, 4) Kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme tüm proses boyunca sabittir. Bu kabuller doğrultusunda istenen deformasyonu sağlamak için gerekli güç denklem 1 ile verilir:

$$\dot{W} = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV + \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{r_s} |\Delta V| dS + m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{r_f} |\Delta V| dS \quad (1)$$

Üst sınır Metodu ile plastik şekil verme proseslerinin incelenmesi için deformasyon bölgesinde kinematik olarak kabul edilebilir hız alanları önerilmesi ile başlar. Kinematik olarak kabul edilebilir hız alanı demek, bu hız alanlarının hacim sabitliğini ve sınır şartlarını sağlaması anlamına gelir. Önerilen hız alanlarının en iyisi en düşük ve deneysel sonuçlara en yakın sonuç veren hız alanıdır. Bu yöntemle hesaplanan kuvvet değerlerinin en az ölçülen kuvvet kadar yada daha yüksek olması beklenir. Böylece bir plastik şekillendirme prosesi için gerekli pres kapasitesini belirlemek amacıyla rahatlıkla kullanılabilir.

Denklem 1'in sağ tarafındaki ilk terim ideal plastik deformasyon için gerekli güç miktarını, ikinci terim bölgeler arası geçişteki hız süreksizliğinden gelen güç kayıpları ve üçüncü terim de takım-iş parçası arasındaki sürtünme için harcanan gücü ifade etmektedir. Silindirik koordinatlarda tüm bölgeler için gerilim hızı bileşenleri ise şu formüllerle elde edilmektedir;

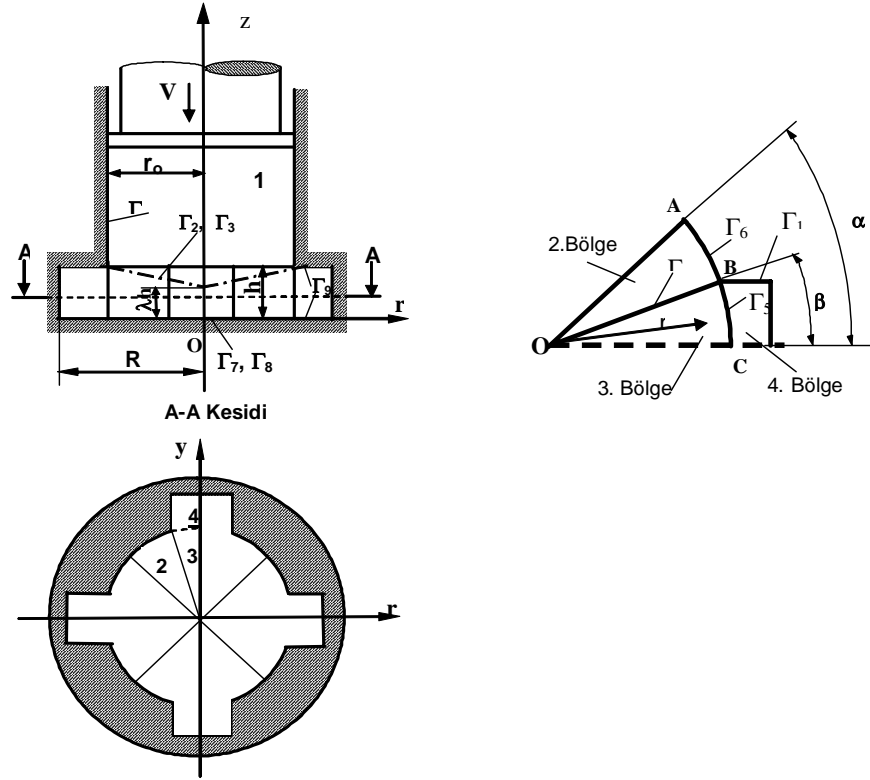
$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_r \right), \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} \right), \quad \dot{\epsilon}_{\theta z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right), \quad \dot{\epsilon}_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)$$

### 3.2. Üst Sınır Metodunun Uygulanması

Analiz için ilkel parça çapı kalıp iç çapına eşit kabul edilmiştir. Ayrıca formülasyonlar dış malzeme girdiği andan itibaren kalıpta dışa ait boşluğun ön duvarına malzeme temas edene kadar olan aşama için geliştirilmiştir. İkel parça, kalıp dış dibi çapına yığılana kadar olan kısım için gerekli teorik kuvvet hesabı enjeksiyon yığıma için literatürde verilen formülasyona göre hesaplanmış (Talbert ve Avitzur, 1996) ve Üst Sınır Metodu (ÜSM) uygulanarak elde edilen sonuçlara eklenmiştir. Üst Sınır Metodu yöntemini incelenen prosese uygulamak için üst kalıp içindeki silindirik malzeme 1 numaralı bölge olarak kabul edilmiştir. Alt kalıpta ise N dış sayısına sahip kalıp 2N parçaya ve her parça da 3 farklı bölgeye bölünmüştür. Teorik hesaplamada silindirik koordinat sistemi (r,θ,z) kullanılmış, deformasyon bölgeleri ve hız geçiş yüzeyleri Şekil 4'te gösterilmektedir. OC ve OA simetri eksenleri arasındaki açı α ve 3. bölgenin yay açısı ise β 'dir. Simetri düzlemlerinde komşu bölgelere malzeme geçişi yoktur. 1 numaralı bölgeden 2 ve 3 numaralı bölgeye olan hız süreksizliği geçiş bölgesi yine Şekil 4'te görüldüğü gibi konik seçilmiş, konikliğin eğimi λ parametresi ile temsil edilmiş olup λ=1 halinde geçiş yüzeyi yataya paralel olmaktadır. Teorik hesaplamalarda λ optimizasyon parametresi olarak bırakılmıştır.

Buna göre yukarıda da bahsedildiği gibi sınır şartlarını ve hacim sabitliğini sağlayacak kinematik kabul edilebilir hız alanları önceki çalışmalarda (Parson ve diğ., 1973 ve Plancak ve diğ., 1992) kullanılan hız alanları bu çalışmada incelenen prosese göre geliştirilerek aşağıdaki tabloda verilmiştir:



Şekil 4:  
Deformasyon Bölgeleri ve Seçilen Hız Geçiş Yüzeyleri

Tablo 1.  
Önerilen Kinematik Olarak Kabul Edilebilir Hız Alanları

	$V_r$	$V_\theta$	$V_z$
1. Bölge	0	0	$-V_0$
2. Bölge	0	$\frac{V_0 r_0 [(2\lambda r_0 + r(1-\lambda))]r(\alpha-\theta)}{2h[\lambda r_0 + r(1-\lambda)]^2}$	$\frac{V_0 r_0 z [(2\lambda r_0 + r(1-\lambda))]}{2h[\lambda r_0 + r(1-\lambda)]^2}$
3. Bölge	$\frac{V_0 r_0 r \alpha}{2h[\lambda r_0 + r(1-\lambda)]\beta}$	$-\frac{V_0 r_0 [(2\lambda r_0 + r(1-\lambda))]r(\alpha-\beta)\theta}{2h[\lambda r_0 + r(1-\lambda)]^2 \beta}$	$-\frac{V_0 r_0 z [(2\lambda r_0 + r(1-\lambda))]}{2h[\lambda r_0 + r(1-\lambda)]^2 \beta}$
4. Bölge	$\frac{V_0 r_0^2 \alpha}{2hr\beta}$	0	0

Tablo.1'deki hız alanları kullanılarak, 2 numaralı denklemlerdeki gerinim hızları türetilmiş ve literatürde verilen ilgili denklemlerde yerine konulmuştur. Toplam güç ihtiyacı  $W$  belirlendikten sonra,  $V_0$  takım hızı olmak üzere toplam kuvvet ihtiyacı:

$$F = W / V_0 \quad (3)$$

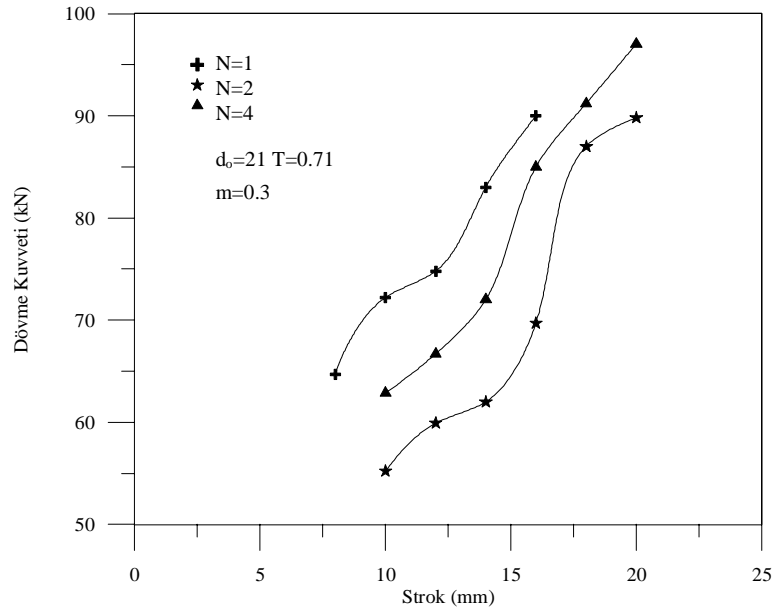
ifadesi ile hesaplanmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada tek, iki ve dört dişli spline formları farklı ilkel parça çaplarındaki numunelerle dövülmüş ve kuvvet ile malzeme akışı modellenmiştir. İki farklı boyut oranına sahip numunelerin değişik diş sayıları için çizilmiş kuvvet-strok eğrileri Şekil 5 ve 6'da gösterilmektedir. Her data noktası iki ölçüm sonucunun ortalamasıdır. Data değerleri her bir numunede diş bölgesine malzeme girmeye başladığı andan itibaren alınmıştır. Beklendiği gibi ilkel parça çapı büyük olan numunelerde diş bölgesine malzeme girişi

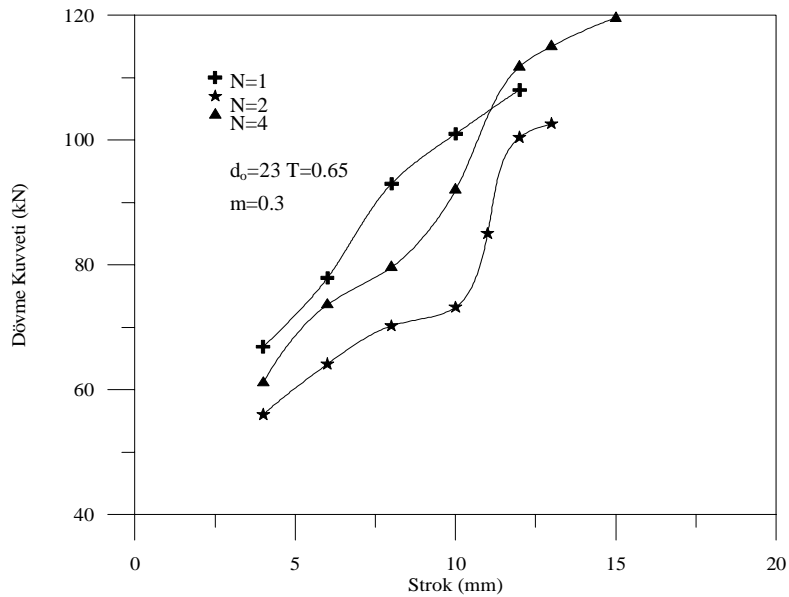
daha erken başlamıştır. İlkel parça çapı küçük olan numunelerin kuvvet değerleri ise, kapalı kalıpla klasik dövmede olduğu gibi daha küçük çıkmıştır. Diyagramlar bir bütün olarak incelendiğinde herhangi bir ilkel parça çapı için başlangıç strok değerlerinde en yüksek kuvvet tek dişli numunelerdedir. Bunun sebebi tek dişli numunelerde, aynı strok değerinde serbest yığıma aşamasının daha çabuk biterek spline formunun serbest kenarının kalıp diş üstü çapına temasıdır. Böylece kalıp daha çabuk dolmakta ve dişin dolmamış olan üst ve alt kısımlarına malzeme ekstrüzyonu iki ve dört dişli spline'a göre daha erken başlamaktadır. Tek dişli parçalarda gravürün dolmasının tamamlandığı sıralarda diğer numunelerde kalıpta diş oluşumu için bırakılan boşluğun ön duvarına malzeme teması ya yoktur ya da yok denecek kadar az miktardadır. Benzer ilişki iki ve dört dişli numunelerde de vardır. İki dişli gravür ile aynı hacme sahip olan ancak kalıp içindeki sürtünme yüzeyi daha fazla olan dört dişli numunelerde diş malzeme girdiği andan itibaren kuvvet değerleri iki dişli numunelere göre daha fazladır. Böylece her iki diş sayısı için eşit hacimde malzeme kalıba ötelenmekte ancak sürtünme faktörü kuvvet değerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Şekil 7 ve 8'de ise iki ve dört dişli numunelerde farklı T değerleri için elde edilen kuvvet değerleri ile Üst Sınır Metodu (ÜSM) uygulanarak elde edilen teorik sonuçları karşılaştırılmaktadır. Burada teorik ÜSM eğrileri önceki çalışmada (Çan ve diğ., 2003) belirlenen  $\lambda=\lambda_{opt}$  ve  $m=0.3$  için çizilmiştir.



Şekil 5:

*T=0.71 olan Numunelerde Farklı Diş Sayıları için Kuvvet-Strok İlişkileri*



Şekil 6:

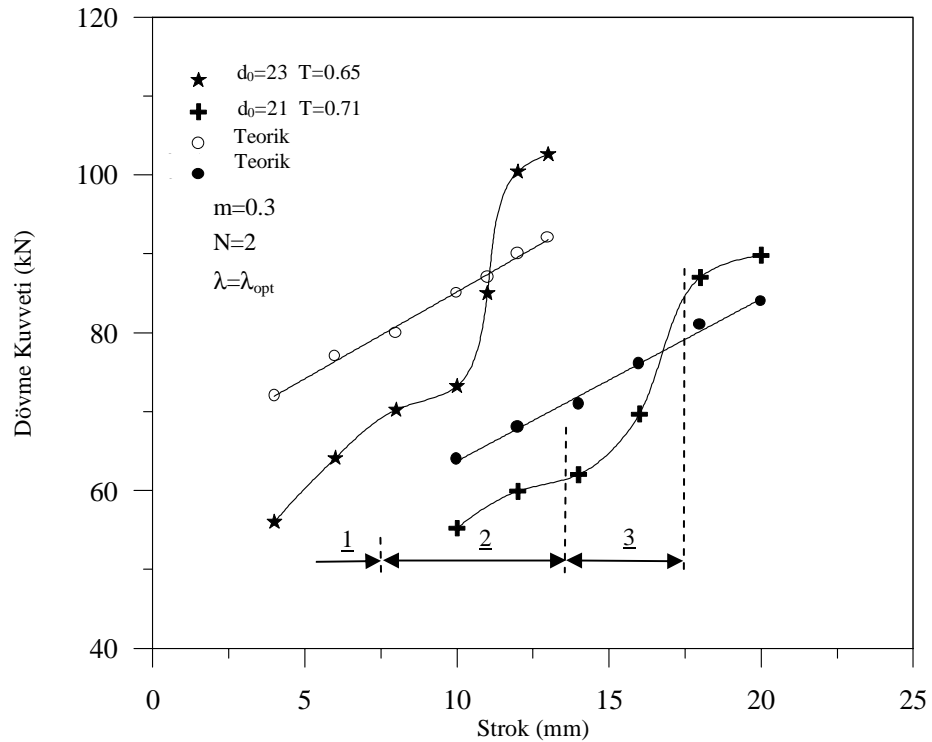
*T=0.65 olan Numunelerde Farklı Diş Sayıları için Kuvvet-Strok İlişkileri*

Üst Sınır Metodu uygulanırken parçada aksel simetriklik olması durumuna göre hesaplar yapıldığı için tek dişli spline formu için analiz uygulanmamıştır. Diyagramlar incelendiğinde kuvvet ile strok arasındaki ilişkide üç farklı bölgenin meydana geldiği görülebilir. Bu bölgeler diyagram üstünde (karışıklık olmaması amacıyla yalnızca alttaki eğrilerde) gösterilmiştir. Bu bölgeleri ve bölgelerdeki ölçüm sonuçları ile teorik analiz sonuçları şu şekilde açıklanabilir:

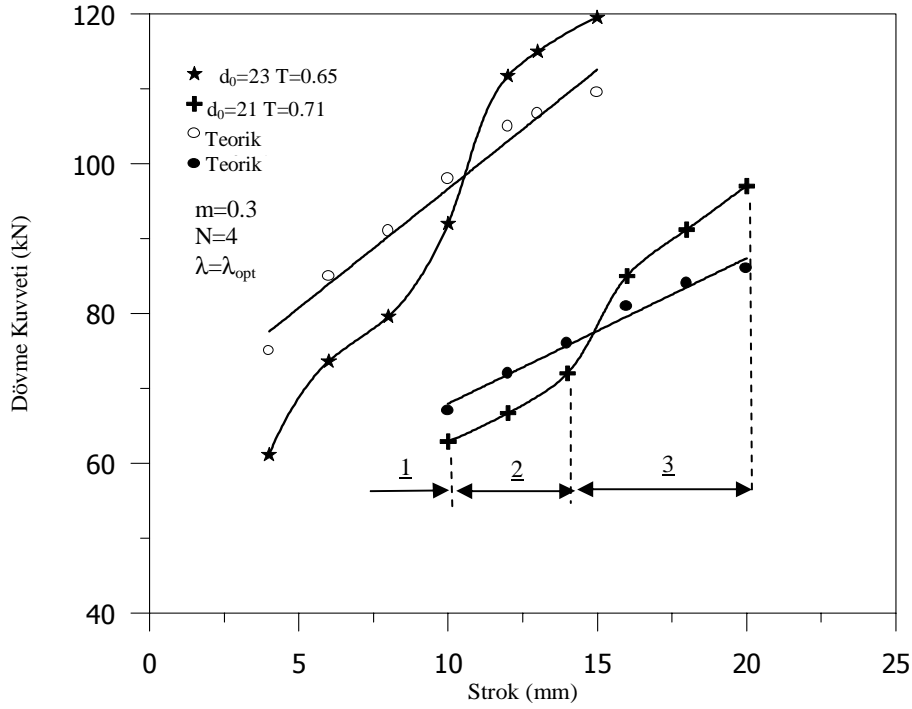
1. Bölge: Bu bölge, proste ilkel parça çapının dış dibi çapına kadar yığıldığı bölgedir. Burada henüz dış bölgesine malzeme girişi yoktur.

2. Bölge: Burada dış bölgesine malzeme girişi başlamıştır ve artan strokla beraber deformasyon için gerekli yük ihtiyacı da artmaktadır. Şekil 7 ve 8 incelendiğinde 2. bölge boyunca analiz sonuçları ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu söylenebilir. Teorik analiz sonuçları dış bölgesine malzeme girişi başladığı andan itibaren hesaplanmaya başlanmıştır. Beklendiği gibi ÜSM uygulanarak elde edilen teorik analiz sonuçları deneysel olarak elde edilen değerlerden daha yüksek çıkmıştır. 2. bölgenin başlarında nispeten yüksek olan farklar artan deformasyonla birlikte azalmaktadır. Bölgenin ilk data değeri için ölçülen kuvvet ile hesaplanan kuvvet arasındaki fark en düşük olarak %6 ( $T=0.71$  ve  $N=4$ ) ve en yüksek olarak %28 ( $T=0.65$  ve  $N=2$ ) mertebelerindedir. Ancak, her iki  $T$  değeri için tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Böylece bu gerek  $T=0.65$  gerekse  $T=0.71$  için UB analizinin geçerli olduğu ve prosese uygulanabileceği açıktır.

3. Bölge: Prosesin bu aşamasında dış üstü çapına malzeme teması başlamaktadır. Bu yüzden kuvvette de ani artış meydana gelmektedir. Bunun bir sebebi serbest kenarın hareketinin sınırlandırılarak sürtünen yüzey alanının artması, bir diğer sebebi ise kalıp içinde dolmamış bölgelerin çok az miktarda kalması ve buralara malzeme akışının çok zor olmasıdır. Hız denklemleri ve ÜSM uygulanarak yapılan hesaplar kalıpta dış oluşumu için ayrılan boşluğun ön duvarına malzeme temas ettiği ana kadar yapıldığı için 3. bölgeden itibaren analiz sonuçları daha aşağıda kalmaktadır. Bu durum benzer geometrideki parçaların klasik kapalı kalıpla dövülerek elde edildiği önceki çalışmalar ve analizlerle de uyumludur. (El-Domiaty ve diğ., 1998, Chitkara ve Bhutta, 2001)



Şekil 7: İki Dişli Spline Formu için Üst Sınır Analizi Sonuçlarının Ölçüm Sonuçları ile Karşılaştırılması



Şekil 8:

*Dört Dişli Spline Formu için Üst Sınır Analizi Sonuçlarının Ölçüm Sonuçları ile Karşılaştırılması*

Yazarların klasik kapalı kalıpla çapaklı dövme yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmalarda, aynı miktarda ilkel parça hacmi için başlangıç ilkel parça çapı azaldıkça dövme kuvveti de azalmış ancak kalıp doluluğu büyük çaplı ilkel parçalara göre daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir (Akata ve diğ.,1994). Bu çalışmada ise küçük hammadde çapındaki numunelerin doluluk oranları bile oldukça yüksektir. Doluluk oranı işlem tamamlandığında dış için ayrılan kalıp boşluğuna girmiş olan malzeme hacminin kalıptaki dış için bırakılan hacme oranı olarak tanımlanabilir. Enjeksiyon yığma yönteminde genellikle ön şekil dizaynı yapıp net ölçülere yakın parçalar imal edilmektedir. Bu çalışma için işlemin son aşamasında kalıp içinde meydana gelen sıvanma problemi daha iyi bir kalıp düzenlemesiyle aşılarak tam veya daha yüksek kalıp doluluğu elde edilebilir. Ancak kalıptaki dolmamış küçük bölgelerin doldurulması, gerekli kuvvet ihtiyacını da arttıracaktır. Bu yüzden kalıp tasarımını, imalatı istenen parçanın net boyutundan bir miktar büyük yapmak ve ardından net ölçülere getirme işlemleri ile parçayı istenen ölçü ve yüzey kalitesine getirmek tavsiye edilebilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Akata, H. E., Çan, Y., Altınbalık, M. T. (1994) An Approach to Preform Design in the Closed - Die Forging, Proceedings of the Engineering Systems Design and Analysis, PD.Vol: 6, London, England, pp.209 – 214.
2. Alexander, J.M. and Lengyel, B. (1964-65) On the Cold Extrusion of Flanges Against High Hydrostatic Pressure, Journal of the Institute of Metals, V.93, pp.137.
3. Balendra, R. (1985) Process Mechanics of Injection Upsetting, International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol.25, No.1, pp.63-73.
4. Balendra, R. (1987) Considerations in the Modelling of Injection Upsetting, International Journal of Production, Vol.25, No.6, pp.889-906.
5. Balendra, R. (1993) Injection-Chamber to Die-Cavity Interface for Injection Forming, International Journal of Machine Tool Manufacture, Vol.33, No.6, pp.753-760.
6. Balendra, R. (1997) Material-Flow Consideration for the Design of Injection Forging, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME, Vol.119, August, pp.350-357.
7. Chitkara, N.R., Bhutta, M.A. (2001) Shape Heading of Splines and Solid Spur Gear Forms:An Analysis and Some Experiments, International Journal of Mechanical Science, Vol.43, pp.1073-1106.



8. Çan, Y., Altınbalık, M.T., Akata, H.E. (2003) A Study of Lateral Extrusion of Gear Like Elements by Using Upper Bound Method, *Journal of Materials Processing Technology* (**baskıda**).
9. El-Domiaty, A., Shabara, M., Al-Ansary, M. (1998) Closed-Die Forging of Gear Like Elements, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME*, Vol.120, pp.34-41.
10. Ko, B.D., Kim, D.J., Lee, S.H., Hwang, B.B. (2001) The Influence of Die Geometry on the Radial Extrusion Processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.113, pp.109-114.
11. Milner, P.R. (1971) *The Injection Upsetting Process*, Ph.D. Thesis, University of Leeds, UK.
12. Mizuno, T., Mizuno, T., Kitamura, K. (1999) An Experiment on Injection Upsetting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.96, pp.234-239.
13. Parsons, B., Milner, P.R., Cole, B.N. (1973) Study of the Injection Upsetting of Metals, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol.15, No.6, pp.410-421.
14. Plancak, M., Bramley, A.N., Osman, F. (1992) Non-Conventional Cold Extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.34, pp.465-472.
15. Talbert, S.H., Avitzur, B. (1996) *Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming*, John Wiley&Sons, England.