T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YANAL EKSTRÜZYON İLE DİŞLİ BENZERİ PARÇALARIN İMALATI: ANALİZ ve DENEYLER

Mak. Yük. Müh. Cenk MISIRLI

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Yöneticisi: Yrd.Doç.Dr. Yılmaz ÇAN

EDİRNE – 2006

İÇİNDEKİLER

Önsöz i
Özet ii
Abstract iii
Şekil Listesi iv
Tablo Listesi ix
Sembol Listesi x

BÖLÜM 1. İMALAT KAVRAMI

1.1. Giriş 1
1.2. İmalat 2
1.2.1. İmalat Yöntemleri ve Sınıflandırılması 2
1.2.1.1.Grup 1. Birincil Biçimlendirme 3
1.2.1.2.Grup 2. Şekil Değiştirme 3
1.2.1.3.Grup 3. Ayırma 4
1.2.1.4.Grup 4. Birleştirme 4
1.2.1.5.Grup 5. Kaplama 4
1.2.1.6.Grup 6. Malzeme Özelliklerinin Değiştirilmesi 4
1.3. Üretim Yöntemi Olarak Plastik Şekil Verme 5

BÖLÜM 2. DÖVME, EKSTRÜZYON YÖNTEMLERİ ve DİŞLİ TEKNOLOJİSİ

2.1. Dövme 8
2.1.1. Açık Kalıpla Dövme 8
2.1.2. Kapalı Kalıpla Dövme 9

2.1.2.1. Kapalı Kalıpla Çapaklı Dövme 10

2.1.2.2. Kapalı Kalıpla Çapaksız Dövme 11

2.2. Ekstrüzyon 13

2.2.1. İleri (direk) Ekstrüzyon 13

2.2.2. Geri (endirek) Ekstrüzyon 14

2.2.2.1. Ekstrüzyonda Malzeme Akışı 15

2.2.3. Yanal Ekstrüzyon 16

2.3. Dişli Teknolojisi 18

2.3.1. Dişli Teknolojisinin Gelişimi 18

2.3.2. Dişli veya Dişli Benzeri Parçaların İmalatı 19

2.3.2.1. Talaşlı Şekil Verme Yöntemleri 19

2.3.2.1.1. Azdırma ile Üretim 19

2.3.2.1.2. Modül Freze ile Üretim 20

2.3.2.1.3. Yüzey Frezeleme 20

2.3.2.1.4. Form Frezeleme 20

2.3.2.1.5. Form Taşlama 21

2.3.2.1.6. Traşlama (Raspalama) 21

2.3.2.1.7. Broşlama 21

2.3.2.1.8. Elektroerozyon ve Tel Erozyonu 21

2.3.2.2. Talaşsız Şekil Verme Yöntemleri 22

2.3.2.2.1. Haddeleme 22

2.3.2.2.2. Toz Metalurjisi 22

2.3.2.2.3. Döküm 22

2.3.2.2.4. Hassas Dövme 23

2.3.2.2.5. Soğuk Hassas Dövme 23

2.3.2.2.6. Ilık Hassas Dövme 24

2.3.2.2.7. Sıcak Hassas Dövme 24

BÖLÜM 3. KONUNUN ÖNEMİ, ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ve ÇALIŞMA PLANI

3.1. Konunun Önemi 26

3.2. Konu ile İlgili Olarak Yapılmış Önceki Çalışmalar 27

3.3. Çalışma Planı 32

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA PROSEDÜRÜ

4.1. Giriş 34

4.2. Yanal Ekstrüzyon Kalıplarının Tasarımı ve Üretimi 34

4.3. Kapalı Kalıpların Tasarımı ve Üretimi 36

4.4. Deney Malzemesi ve Özellikleri 38

4.4.1. Deney Malzemesi 38

4.4.2. Deney Malzemesinin Mekanik Özellikleri 39

4.4.3. Deney Malzemesinin Deneylere Hazır Hale Getirilmesi 40

4.5. Deneylerde Kullanılan Hidrolik Pres 42

4.5.1. Hidrolik Presler 42

4.5.2. Hidrolik Presin Bilgisayar Kontrollü Hale Getirilmesi İşlemleri 43

4.6. Eğilme Yorulması Deneyleri 48

4.6.1. Amaç 48

4.6.2. Test Makinesi ve Aparatları 48

4.6.3. Yükleme Noktası 50

4.6.4. Yorulma Deneyleri 51

4.7. Mikro-Sertlik Deneyleri 56

BÖLÜM 5. KUVVET VE ENERJİ YAKLAŞIMLARI

5.1. Giriş 58

5.2. Üst Sınır Metodunun Formülasyonu 59

5.2.1. İdeal Deformasyon Enerjisi 60

5.2.2. Kayma Enerjisi 62

5.2.3. Sürtünme Kayıpları 63

5.2.4. Geriye Çekme 63

5.2.5. Toplam Enerji Dağılımı 64

5.3. Konik Dişli Formunun Matematiksel Modellenmesi 65

5.4. Üst Sınır Metodunun Konik Dişli Forma Uygulanması 65

5.4.1. Seçilen Geometriye Göre Hız Alanlarının Oluşturulması 67

5.4.2. Toplam Deformasyon İşi Hesabı 69

5.4.2.1. Birinci Bölge için Deformasyon İşi 70

5.4.2.2. İkinci Bölge için Deformasyon İşi 70

5.4.2.3. Üçüncü Bölge için Deformasyon İşi 71

5.4.2.4. Dördüncü Bölge için Deformasyon İşi 73

5.4.2.5. Toplam Deformasyon İşi 74

5.4.3. Kayma Enerjisinden Doğan Kayıpların Hesabı 74

5.4.3.1. Birinci Bölgeden İkinci Bölgeye Geçişteki Kayma Enerjisi 75

5.4.3.2. Birinci Bölgeden Üçüncü Bölgeye Geçişteki Kayma Enerjisi 75

5.4.3.3. İkinci Bölgeden Üçüncü Bölgeye Geçişteki Kayma Enerjisi 77

5.4.3.4. Üçüncü Bölgeden Dördüncü Bölgeye Geçişteki Kayma Enerjisi 79

5.4.3.5. Toplam Kayma Enerjisi 81

5.4.4. Sürtünmelerden Doğan Enerji Kayıplarının Hesabı 81

5.4.4.1. Sap Boyunca Sürtünme Enerjisi 81

5.4.4.2. İkinci Bölgenin Altındaki Sürtünme Enerjisi 82

5.4.4.3. İkinci Bölgenin Ön Duvarındaki Sürtünme Enerjisi 82

5.4.4.4. Üçüncü Bölgenin Altındaki Sürtünme Enerjisi 83

5.4.4.5. Dördüncü Bölgenin Alt ve Üstündeki Sürtünme Enerjisi 84

5.4.4.6. Dördüncü Bölgenin Yan Yüzeyindeki Sürtünme Enerjisi 85

5.4.4.7. Toplam Sürtünme Kayıpları Enerjisi 86

5.4.5. Toplam Kuvvet İhtiyacı 86

5.5. Düz Dişli Benzeri Formun Matematiksel Modellemesi 87

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

6.1. Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme Yöntemi Deneyleri 90

6.1.1. Kuvvet-Strok Ölçüm Sonuçları 90

6.1.2. Kuvvet-Kalıp Doluluğu Ölçüm Sonuçları 104

6.2. Eğilme Yorulması Deneyleri Sonuçları 106

6.3. Mikro-Sertlik Deneyleri Sonuçları 112

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 116

KAYNAKLAR 119

ÖZGEÇMİŞ 124

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, yaklaşık 40 yıllık bir geçmişe sahip olmakla birlikte bilimsel olarak araştırılması son 20 yıla rastlayan yanal ekstrüzyon yönteminin, kapalı kalıpla klasik dövme ile farklı diş sayılarında ve farklı geometrilerde kuvvet analizi, diş dibi yorulma dayanımı ve mikro-sertlikler bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca yanal ekstrüzyon yönteminde konik dişli benzeri form için Üst Sınır Yöntemi kullanılarak yeni bir kuvvet yaklaşımı geliştirilmiştir.

Tezin deneysel çalışmalarının yürütülebilmesinde maddi destek aldığım Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesine, deneylerde kullanılan alüminyumun temin edilmesinde ve temin edilen alüminyumun spektrometrik analizlerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Makine Mühendisi Aliş YILMAZ'a, deneysel çalışmaların daha hassas yapılabilmesi için Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Atölyesinde mevcut bulunan hidrolik presin bilgisayar kontrollü olarak yeniden dizayn edilmesinde bilgi birikimini ve teknik desteğini esirgemeyen Sayın Yrd.Doç.Dr. Hilmi KUŞÇU'ya, emeği geçen tüm hocalarıma, meslektaşlarıma, arkadaşlarıma ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Tezin hazırlanmasında bilgi birikimini ve tecrübesini benimle paylaşan ve bana destek olan hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. M. Tahir ALTINBALIK'a teşekkürü borç bilirim.

Değerli fikirlerinden ve engin bilgi birikimlerinden yararlandığım hocam Sayın Prof.Dr. H. Erol AKATA'ya gönülden teşekkür ederim.

Sanırım teşekkürlerin en büyüğü 1999'dan beri önce Yüksek Lisans Tezimde sonra da sunulan bu tezde benimle uğraşan, yardımlarını ve manevi öğütlerini benden esirgemeyen, tezin yöneticisi hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Yılmaz ÇAN'a olacaktır.

Aralık 2006 Cenk MISIRLI

ÖZET

Bir mühendislik parçasını üretmek için var olan üretim yöntemlerinin seçilmesinde bir çok kriter söz konusudur. Mekanik özelliklerin üstünlüğü ve üretim hızının yüksekliği söz konusu olduğunda plastik şekil verme metotları diğer üretim metotlarına nazaran oldukça önemli üstünlükler arz eder. Metal şekillendirme işlemlerinde malzemeyi plastik olarak deforme etmek için gerekli kuvveti tahmin etmek oldukça önemlidir.

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanan "Yanal Ekstrüzyon ile Dişli Benzeri Parçaların İmalatı: Analiz ve Deneyler " isimli bu Doktora tezinde, konik dişli benzeri formun yanal ekstrüzyonu için ilk defa önerilen bir kabul edilebilir hız alanı ile gerekli denklemler oluşturulmuştur. Yanal ekstrüzyon yöntemi ve kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi ile üretilen farklı geometriye sahip dişli benzeri parçalar kuvvet, yorulma dayanımları ve mikro-sertlikleri bakımından karşılaştırılmışlardır. Sunulan bu Doktora Tezi yedi bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde üretim ve üretim yöntemlerine kısa bir giriş yapılıp, plastik şekil vermenin üretim yöntemlerindeki yerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde ekstrüzyon, dövme ve dişli teknolojisi kavramları detaylı olarak incelenmiş, üçüncü bölümde ise tez konusunun önemi vurgulanarak bu konuda daha önceden yapılan akademik çalışmalardan bahsedilmiştir.

Deneysel çalışma prosedürü dördüncü bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Yanal ekstrüzyonda konik dişli benzeri form için Üst Sınır Yöntemi kullanılarak yapılan teorik çalışma beşinci bölümde sunulmuştur.

Altıncı bölümde her iki yöntem için de yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları üzerinde durulmuştur.

Yedinci ve son bölüm olan Sonuçlar ve Tartışma bölümünde ise deneysel ve teorik çalışmalar karşılaştırılıp, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yanal Ekstrüzyon, Kapalı Kalıpla Klasik Dövme, Konik Dişli Form, Yorulma Dayanımı, Mikro-sertlik, Üst Sınır Yöntemi

ABSTRACT

There are many criteria when choosing a manufacturing method among the existing manufacturing methods to produce an engineering component. When better mechanical properties of the product and higher production rate are important then metal forming processes offer superiority to others. It is of interest to predict the force that will cause metal to deform plastically to desired shapes in any metal forming processes.

An upper bound solution for lateral extrusion of spur gear forms and splines with tapered tooth profile has been developed and a kinematically admissible velocity field newly proposed in this PhD thesis, which has been prepared in the Institute of Natural Science of Trakya University, entitled " Manufacturing by Lateral Extrusion of Spur Gears Forms and Splines Elements: Analysis and Experiments ". Spur Gears Forms which have different die geometry manufactured by Lateral extrusion process and closed-die forging. Load requirements, fatigue strength and micro-hardness compared. This thesis comprises of seven chapters.

In first chapter a brief introduction to manufacturing and manufacturing methods were defined and metal forming methods in manufacturing was mentioned. In second chapter extrusion, forging and gear technology was investigated in detail and academic literature survey was given in third chapter.

Detailed experimental work including, material, method, machine is presented in chapter fourth. Upper bound analysis of lateral extrusion of spur gear forms and splines with tapered tooth profile was presented in fifth chapter.

Experiments and results of experiments was given in chapter six.

The conclusions from this work and recommendation for future work is given in chapter seven.

Key words: Lateral Extrusion, Closed-Die Forging, Tapered Tooth Form, Fatigue Strength, Micro-hardness, Upper Bound Method.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Açık Kalıpla Dövme 9

Şekil 2.2. Kapalı Kalıpla Çapaklı Dövme 10

Şekil 2.3. Kapalı Kalıpla Çapaksız Dövme 11

Şekil 2.4. İleri Ekstrüzyon 13

Şekil 2.5. Geriye Ekstrüzyon 14

Şekil 2.6. Yanal Ekstrüzyonun Şematik Gösterimi 15

Şekil 2.7. a) Yanal Ekstrüzyon Yönteminde Üst Kalıp, Alt Kalıp,
Zımba Kombinasyonu, b) Yanal Ekstrüzyon Sonrası Elde Edilen Ürün 17

Şekil 2.8. Ekstrüzyonda Tipik Malzeme Akışı 17

Şekil 4.1. Yanal Ekstrüzyon Deneylerinde Kullanılan Konik Üst Kalıplar,
Alt Kalıp ve Zımba 35

Şekil 4.2. Yanal Ekstrüzyon Deneylerinde Kullanılan Düz Üst Kalıplar,
Alt Kalıp ve Zımba 35

Şekil 4.3. Yanal Ekstrüzyon Kalıplarının ve Zımbanın Prese Monte Edilişi 36

Şekil 4.4. Kapalı Kalıp Deneylerinde Kullanılan İki ve Dört Dişli Düz
Kalıplar ve Zımba 37

Şekil 4.5. Kapalı Kalıp Deneylerinde Kullanılan İki Ve Dört Dişli Konik
Kalıplar ve Zımba 37

Şekil 4.6. Kapalı Kalıpların ve Zımbanın Prese Monte Edilişi 38

Şekil 4.7. Ortalama Akma Sınırının Bulunması 40

Şekil 4.8. Deneylerde Kullanılan ve Bilgisayar Kontrollü Hale Getirilmiş Pres 43

Şekil 4.9. Presin Kumanda Panosu 44

Şekil 4.10. Basınç Akım Çeviricisi 44

Şekil 4.11. AIO-3310 Analog / Dijital I/Q Kartı 45

Şekil 4.12. Konum Bilgisini Okuyan Enkoderin Görünümü 45

Şekil 4.13. Enkoder-Makara Sisteminin Görünümü 46

Şekil 4.14. Enkoder Değerlerini Okuyan Kartın Görünümü 46

Şekil 4.15. Enkoder Bağlantısının Prensip Şeması 46

Şekil 4.16. Röle Kontrol Kartı 47

Şekil 4.17. Role Kontrol Kartının Görünümü 47

Şekil 4.18. INSTRON 8501 Üniversal Test Cihazı 49

Şekil 4.19. Eğilme Yorulması Deney Aparatları 49

Şekil 4.20. Eğilme Yorulması Deney Düzeneği 50

Şekil 4.21. Klasik Eğilme Yorulması Sonucu Diş Dibi Kırılması 51

Şekil 4.22. Eğilme Yorulmasındaki Kuvvetlerin Gösterimi 51

Şekil 4.23. Düz Dişli Benzeri Formun Tek Dişinin Şematik Yükleme Durumu 52

Şekil 4.24. Konik Dişli Benzeri Formun Tek Dişinin Şematik Yükleme Durumu 52

Şekil 4.25. Deneysel Çalışmada Esas Alınan Dişli Benzeri Ürün Geometrisi 53

Şekil 4.26. Yorulmada Kullanılan Değişkenlerin Tanımı 55

Şekil 4.27. Yorulma Deneylerinde Uygulanan Yükleme Halleri Örneği 55

Şekil 4.28. Ortadan Kesilmiş İki ve Dört Dişli Konik Formlar 56

Şekil 4.29. Ortadan Kesilmiş İki ve Dört Dişli Düz Formlar 57

Şekil 5.1. Hız Süreksizliği 62

Şekil 5.2. Yanal Ekstüzyonda Konik Dört Dişin Bir Dişinin Yarısı ve Deformasyona Uğrayan Kısmın Alt Bölgeleri 66

Şekil 5.3. Tek Dişin Açısal Gösterimi 67

Şekil 5.4. İkinci Bölgeden Üçüncü Bölgeye Geçişteki Hız Bileşenleri 77

Şekil 5.5. İkinci Bölgeden Üçüncü Bölgeye Geçişteki β Açısının Geometrisi 78

Şekil 5.6. Üçüncü Bölgeden Dördüncü Bölgeye Geçişteki γ Açısının Geometrisi 80

Şekil 5.7. Deformasyon Bölgeleri ve Seçilen Hız Geçiş Yüzeyleri 88

Şekil 6.1. a) Kapalı Kalıpla Klasik Dövmede Diş Oluşumu ,
b) Yanal Ekstrüzyonda Diş Oluşumu 91

Şekil 6.2. a) Kapalı Kalıpla Klasik Dövmede Bitmiş Ürün,
b) Yanal Ekstrüzyonda Bitmiş Ürün 92

Şekil 6.3. Konik İki Dişli Form için Üst Sınır Analizi Sonuçlarının
Deneylerden Elde Edilen Sonuçlarla Karşılaştırılması 93

Şekil 6.4. Konik Dört Dişli Form için Üst Sınır Analizi Sonuçlarının
Deneylerden Elde Edilen Sonuçlarla Karşılaştırılması 93

Şekil 6.5. Yanal Ekstrüzyonda İki ve Dört Dişli Konik Formda Verilen Stroka
Karşılık Elde Edilen Kuvvetlerin Karşılaştırılması 94

Şekil 6.6. Konik dört dişli formda hız bileşenlerinin toplam ekstrüzyon
basıncına etkisi 95

Şekil 6.7. Konik İki ve Dört Diş için Relatif Ekstrüzyon Basıncının
Karşılaştırılması 96

Şekil 6.8. Yanal Ekstrüzyonda Düz Dişli Benzeri Taslakların
Kuvvet-Strok Grafiği 97

Şekil 6.9. Yanal Ekstrüzyonda Düz ve Konik Formların
Kuvvet-Strok Grafiği 97

Şekil 6.10. Yanal Ekstrüzyonda Dört Dişe Sahip Düz ve Konik Formların
Kuvvet-Strok Grafiği 98

Şekil 6.11. Kapalı Kalıpla Klasik Dövmede Düz Dişli Benzeri Formların Kuvvet-Strok Grafiği 99

Şekil 6.12. Kapalı Kalıpla Klasik Dövmede Konik Dişli Benzeri Formların Kuvvet-Strok Grafiği 99

Şekil 6.13. Kapalı Kalıpla Klasik Dövmede İki Dişe Sahip Düz ve Konik Formların Kuvvet-Strok Grafiği 100

Şekil 6.14. Kapalı Kalıpla Klasik Dövmede Dört Dişe Sahip Düz ve Konik Formların Kuvvet-Strok Grafiği 101

Şekil 6.15. İki Dişe Sahip Düz Dişli Benzeri Formun Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme Kuvvet-Strok Eğrileri 101

Şekil 6.16. Dört Dişe Sahip Düz Dişli Benzeri Formun Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme Kuvvet-Strok Eğrileri 102

Şekil 6.17. İki Dişe Sahip Konik Dişli Benzeri Formun Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme Kuvvet-Strok Eğrileri 103

Şekil 6.18. Dört Dişe Sahip Konik Dişli Benzeri Formun Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme Kuvvet-Strok Eğrileri 103

Şekil 6.19. İki Dişli Konik Formda Farklı İki Yöntemde Kalıp Doluluğunun Kuvvete Etkisi 104

Şekil 6.20. Dört Dişli Konik Formda Farklı İki Yöntemde Kalıp Doluluğunun Kuvvete Etkisi 105

Şekil 6.21. İki Dişli Düz Formda Farklı İki Yöntemde Kalıp Doluluğunun Kuvvete Etkisi 105

Şekil 6.22. Dört Dişli Düz Formda Farklı İki Yöntemde Kalıp Doluluğunun Kuvvete Etkisi 106

Şekil 6.23. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan İki Dişli Konik Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarının Wöhler Diyagramı 108

Şekil 6.24. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Dört Dişli Konik Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarının Wöhler Diyagramı 109

Şekil 6.25. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan İki Dişli Düz Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarının Wöhler Diyagramı 110

Şekil 6.26. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Dört Dişli Düz Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarının Wöhler Diyagramı 111

Şekil 6.27. Mikro-Sertlik için İki Diş Ucu Boyunca Ortadan Kesilen Ürünler 112

Şekil 6.28. Sertlik Testi Ölçüm Yönleri 113

Şekil 6.29. İki Dişli Konik Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarında Sertlik Değişimi 113

Şekil 6.30. Dört Dişli Konik Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarında Sertlik Değişimi 114

Şekil 6.31. İki Dişli Düz Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarında Sertlik Değişimi 114

Şekil 6.32. Dört Dişli Düz Form için Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme ile Üretilmiş Deney Parçalarında Sertlik Değişimi 115

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1. 1.2344 Sıcak İş Takım Çeliğinin Kimyasal Bileşimi 34

Tablo 4.2. Deneylerde Kullanılan % 99.7 Alüminyum Malzemenin Kimyasal Bileşimi 39

Tablo 5.1. Önerilen Kinematik Olarak Kabul Edilebilir Hız Alanları 88

Tablo 6.1. İki Dişli Konik Form İçin Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme İle Üretilmiş Yorulma Numunelerine Uygulanan Kuvvet ve Eğilme Gerilmesi Değerleri 107

Tablo 6.2. Dört Dişli Konik Form İçin Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme İle Üretilmiş Yorulma Numunelerine Uygulanan Kuvvet ve Eğilme Gerilmesi Değerleri 108

Tablo 6.3. İki Dişli Düz Form İçin Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme İle Üretilmiş Yorulma Numunelerine Uygulanan Kuvvet ve Eğilme Gerilmesi Değerleri 109

Tablo 6.4. Dört Dişli Düz Form İçin Yanal Ekstrüzyon ve Kapalı Kalıpla Klasik Dövme İle Üretilmiş Yorulma Numunelerine Uygulanan Kuvvet ve Eğilme Gerilmesi Değerleri 110

SEMBOL LİSTESİ

r, θ, z	: Silindirik koordinatlar
σ_o	: Akma Gerilmesi
$\sigma_ç$	: Çekme Gerilmesi
ε	: Genleme
έ	: Genleme Hızı
H - h	: Yükseklik
N	: Diş sayısı
A_k	: Deney numunesinin başlangıç alanı
s	: Strok
V_0	: Zımba Hızı
C	: Sıcaklığa bağlı Katsayı
A	: Yüzey Alanı
R_{di}	: Dişüstü Yarıçapı
R_{yu}	: Yuvarlanma Dairesi Yarıçapı
R_{te}	: Temel Dairesi Yarıçapı
R_c	: Maksimum Yükleme Noktasının Dişli Merkezine Uzaklığı
F	: Kuvvet
$\sigma_{eğ}$	: Eğilme Gerilmesi
$M_{eğ}$	: Eğilme Momenti
$W_{eğ}$	: Eğilme Mukavemet Momenti
σ_{ort}	: Ortalama Gerilme
σ_{alt}	: Alt Gerilme
$\sigma_{üst}$	: Üst Gerilme
σ_g	: Gerilme Genliği
σ_r	: Radyal Gerilme
σ_h	: Hidrostatik Gerilme Bileşeni
σ_θ	: Teğetsel Gerilme
σ_z	: Eksenel Gerilme
τ, τ_s	: Kayma Gerilmesi

τ_R : Sürtünmeye Bağlı Kayma Gerilmesi

J : Toplam dövme kuvveti

$|\Delta V|$: Hız Süreksizliği

k : Basit Kaymada Akma Sınırı

μ : Sürtünme Katsayısı

P_{av} : Ortalama zımba basıncı

m : sürtünme faktörü

S_{ij} : Gerilme Deviatör Tansörü

ε_{ij} : Genleme Hızı Tansörü

δ_{ij} : Birim Tansördür

U_r, U_θ, U_z : Silindirik Koordinat Sisteminde Radyal, Teğetsel ve Eksenel Hız Bileşenleri

U_x, U_y, U_z : Kartezyen Koordinat Sisteminde Hız Bileşenleri

V_r : Radyal hız bileşeni

V_z : Hız bileşeni

V_θ : Teğetsel hız bileşeni

W_d : Deformasyon İşi

W_s : Kayma Enerjisi

W_f : Sürtünme Enerjisi

R_0 : Başlangıç Yarıçapı

α : İkinci bölgedeki açı

β : Üçüncü bölgedeki açı

γ : Diş açısı

N : Diş sayısı

θ : Değişken açı

$\acute{\varepsilon}_r, \acute{\varepsilon}_\theta, \acute{\varepsilon}_z$: Normal genleme hızı

$\acute{\varepsilon}_{r\theta}, \acute{\varepsilon}_{\theta z}, \acute{\varepsilon}_{rz}$: Kayma genlemesi hızı

BÖLÜM 1.

İMALAT KAVRAMI

1.1. GİRİŞ

Avrupa Kıtasında 18. ve 19. yüzyıllarda yeni buluşların üretimde kullanılması ve buhar gücüyle çalışan makinaların makinalaşmış endüstriyi beraberinde getirmesiyle birlikte, Avrupa'nın mevcut sermaye birikimini arttırması "Sanayi Devrimi" olarak tanımlanmıştır. Sanayi Devriminin birinci aşaması olan makinalaşma çağında endüstrileşme sürecinde demir ve kömür asıl enerji kaynağı ve hammaddeyi oluşturmuş, bu durum büyük fabrikaların doğmasına neden olmuştur. Böylelikle, Avrupa'da temelini tarım işçilerinin oluşturduğu toplumdan, fabrikalarda üretim yapan nüfusa doğru düzenli bir geçiş olmuştur. Sanayi Devriminin ikinci aşamasında, çelik, elektrik, petrol ve kimyasal maddelerin de enerji ve hammadde kaynaklarına dahil olması ile birlikte endüstrileşme bugünkü halini almıştır. Bu endüstrileşmeye bağlı olarak da, değişik ve farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde endüstrinin her kolunda az malzeme kaybına sahip, yüksek dayanım sağlayan, kaliteli ve hızlı olan üretim yaşam kuralı haline gelmiştir.

Endüstrideki bu gelişmeler kuşkusuz makine ve imalat mühendisliği biliminin çeşitli dallarında yapılan araştırmalar ve buluşların üretime yansımasından başka bir şey değildir. Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi tarafından desteklenen bu tez çalışmasında, son 20 yıldır karmaşık olmayan geometrideki parçaların şekillendirilmesinde bilimsel olarak ele alınan yanal ekstrüzyon yöntemi hakkında detaylı deneysel çalışmalar ve teorik yaklaşımlar verilmiştir. Ülkemiz sanayisi için de

önem arz eden dişli dövülmesi ile ilgili olarak dişli ön şekil dizaynı hakkında bilgiler sunulmuştur.

1.2. İMALAT

Genel bir yaklaşım izlenerek, imalat kavramının sanayi anlamı; eldeki hammaddenin işlenerek istenilen özellik ve biçimdeki bitmiş ürün haline getirilmesinde hammadde, proses ve üründen oluşan bir süreç olarak tanımlanır.

İmalat çok geniş bir disiplin olduğundan detaylı olarak anlaşılması sadece makine veya imalat mühendisliği dallarına değil, amaçları insan ihtiyaçlarını karşılamak olan diğer mühendislik dallarına da ışık tutar. İmalatta başlangıç olarak enerji, zaman ve insan kaynakları konusunda yeterli fizibilite çalışması yapıldığı taktirde proses aşamasına geçilebilir. Proses aşamasında ilk sırayı dizayn alır. Dizayn temel hareket noktası seçilerek değişik planlar gerçekleştirilir ve bunlar proses aşamasının işleme kısmında yerine konur. Kaynakların ve prosesin doğru yönetilmesi verimlilik ve üretkenliğin arttırılması bakımından önemlidir. Pazarlama konusu da ürünün en iyi ve karlı şekilde alıcıya ulaşmasında etkin bir rol üstlenmektedir. Son aşama olan sonuç aşamasında ise; ürünün alıcıya ulaştırılması, bu ürünün ürün ile ilintili diğer ürünler ile desteklenmesi ve ürünün kullanılması konusundaki diğer bilgiler ile kullanım karmaşıklığındaki pürüzlülüklerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır (Goetsch, D., 1991).

1.2.1. İmalat Yöntemleri ve Sınıflandırılması

İlerleyen teknoloji beraberinde yüksek kaliteli ürünlerin tasarımı ile bunların seri ve ucuz olarak üretimini sağlayan yöntemlerin geliştirilmesini getirmiştir. İnsanların yaşam standardı değişmiş ve insanlar sürekli daha iyiyi daha kaliteliyi arar olmuşlardır. Bu sebepten dolayı insanları daha da memnun etmek görevi mühendislere ve onların yaratma güdülerine bırakılmış durumdadır. Mühendisler her bir üretim yönteminin

imkanlarını, üstünlüklerini ve sınırlarını tanıyarak amaçladıkları tasarıma en ucuz ve doğru olarak ulaşmak için gerekli bilgileri edinmek zorundadırlar.

Mühendislik disiplini içinde imalat yöntemlerini iç ve dış dönüşümler olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar aşağıda verilmektedir;

İç Dönüşümler: Cevherleri indirgemek, arıtma yöntemleri, ısıl işlemler.
Dış Dönüşümler: Biçimlendirme.

- Döküm; erimiş durumdaki akıcılıktan yararlanılır.
- Kaynak; yerel eritme ile birleşme sağlanır.
- Talaş kaldırma; istenmeyen kısımlar kesilerek uzaklaştırılır.
- Plastik şekil verme; malzemenin şekil değiştirme kabiliyetinden faydalanılır.

İmalat yöntemlerinin genel olarak sınıflandırılmasında da altı grup söz konusudur (Lange, K., 1985). Bu grupları şu şekilde sıralayabiliriz.

1.2.1.1. Grup 1. Birincil biçimlendirme

Bağ oluşturma ana başlığı altında toplanan bu grup içinde, belirli herhangi bir şekle sahip olmayan katı parçacıklardan birincil şeklin yaratılması veya parçacıklar arasında bağıntılar oluşturulması ile ilgili üretim yöntemleri yer almaktadır. Döküm ve toz metalurjisi bu gruba dahil edilebilir.

1.2.1.2. Grup 2. Şekil değiştirme

Bağın arttırılması ana başlığı altında değerlendirilen bu grup içinde, bir katı cismin kütlesini veya bileşimini değiştirmeden şeklinin başka bir şekle dönüştürülmesi ile ya da bağın arttırılması ile ilgili üretim anlaşılır. Plastik şekil verme yöntemleri bu

grupta yer alır.

1.2.1.3. Grup 3. Ayırma

Bağın kopartılması ana başlığı altında değerlendirilen bu grup içinde bağın kopartılarak talaşlı biçimlendirme ile malzemenin ana kütleden kopartılmasına dayanan üretim yöntemi anlaşılır. Talaşlı şekil verme ve taşlama bu grupta yer alır.

1.2.1.4. Grup 4. Birleştirme

Bağın büyütülmesi ana başlığı altında belirtilen bu grup içinde, birbirinden ayrı parçalar arasında bağlantı oluşturarak başka elemanlar meydana getirmeyle ilgili üretim yöntemleri anlaşılır. Kaynak, lehim ve yapıştırma bu gruba dahil edilebilir.

1.2.1.5. Grup 5. Kaplama

Bağın büyütülmesi ana başlığı altında belirtilen bu grup içinde, gerek iş parçasının ömrünü uzatmak, gerekse şekil bütünlüğü sağlamak açısından iş parçası ile kaplama malzemesi arasında bağ oluşturmak söz konusudur. Boyama, galvaniz çekme ve plastik tabakalar kaplama bu gruba dahil edilebilir.

1.2.1.6. Grup 6. Malzeme özelliklerinin değiştirilmesi

Bağın büyütülmesi ana başlığı altında belirtilen bu grup içinde, iş parçasında optimum özellikler elde etmek amacıyla malzeme özelliklerinin değiştirilmesi anlaşılır. Burada malzemeden parçacıklar çıkarmak, parçacıklar ilave etmek veya parçacıkların yeniden düzenlenmesi ile ilgili işlemler söz konusudur.

Sunulan tez, ikinci grupta yer alan plastik şekillendirme yöntemi ile ilgilidir.

1.3. ÜRETİM YÖNTEMİ OLARAK PLASTİK ŞEKİL VERME

Mühendislikte kullanılan malzemeler genel olarak metal esaslı malzemeler ve metal dışı malzemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Demir esaslı metaller, demir dışı metaller, yüksek alaşımlı metaller ve toz metalurjisi, Metal Esaslı Malzemeler bölümünde, plastikler, elastomerler, kompozitler, seramikler ve camlar ise Metal Dışı Malzemeler bölümünde sıralanabilir. Metalik malzemelerin modern teknolojideki önemi istenilen şeklin çeşitli yöntemlerle kolaylıkla verilebilmesinden ileri gelmektedir. Plastik şekil verme yöntemi de bunlardan biridir.

Katı bir cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek amacıyla uygulanan ve bu işlem sırasında cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan imalat yöntemlerine plastik şekil verme yöntemleri denir.

Plastik şekil verme ile üretilen iş parçalarının uygulama alanları mutfak aletlerinden otomobil ve havacılık sanayine kadar çok geniş bir alandır.

Plastik şekil verme yöntemi, malzemelere yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır. Ayrıca karmaşık şekilli parçaların üretilmesinde avantajları olduğu gibi, iyi yüzey kalitesi, dar tolerans aralıkları, yüksek üretim hızı ve düşük parça başı maliyetleri nedeniyle de daha çok tercih edilen üretim yöntemlerinin başında gelmektedir.

Plastik şekil verme yöntemlerinin karakteristikleri üretilecek parçanın boyutlarına ve malzemesine göre farklılıklar gösterebilir. Şekil değiştirme için gerekli gerilme ve kuvvet değerleri çok büyüktür. Bu değerlerin büyük olmasının sebebi iş parçasının tümünün veya büyük bir bölümünün deformasyona maruz kalmasıdır.

Parçaların çoğu farklı bir biçim alır. Genellikle takımlar ağır, büyük ve pahalıdır. Bunun sebebi büyük kuvvetler ile çalışılmasıdır. Kalıp üretimindeki tolerans

aralığının darlığından dolayı, kalıpların üretimi için kalifiye elemana ve yeterli donanımlar ile desteklenmiş bir atölyeye ihtiyaç vardır. Üretilecek parça sayısının fazla olması gereklidir çünkü, kalıpların pahalı olması nedeniyle belli bir değerin üzerindeki üretim için avantajlı duruma geçilebilir.

Plastik şekil verme işlemlerini başlıca iki grupta sıralayabiliriz: Bunlar saç şekillendirme ve kütle biçimlendirme işlemleridir. Saç şekillendirmede, saç parçalar eşit cidar kalınlıklarında içi boş parçaların üretiminde kullanılır. Kütle biçimlendirme de ise iş parçası genellikle bütün doğrultularda ve büyük miktarda şekil değiştirir. Büyük kesit değişiklikleri ortaya çıkar. Kütle biçimlendirme işlemlerinde karşılaşılan kuvvetler saç şekillendirme işlemlerinde karşılaşılan kuvvetlere nazaran daha büyüktür. Çünkü kütle biçimlendirme işlemleri çok eksenli basma yükleri ile karakterize edilebilir.

Plastik şekil verme yöntemlerini etkin gerilme türünün esas alındığı bir gruplandırma ile sınıflandırmamız gerekirse, beş etkin gerilme haline göre hazırlanan gruplandırma şekli, aşağıdaki gibi açıklanmaktadır.

1) Basma Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçası veya hammaddenin esas olarak tek eksenli veya çok eksenli basma gerilmelerinin etkisi altında şekil değiştirdiği biçimlendirmelerdir. Ekstrüzyon, delme, kapalı kalıpla dövme, açık kalıpla dövme, haddeleme bu tür biçimlendirme işlemlerine dahil edilebilir.

2) Birleşik Çekme ve Basma Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçasının şekil değişiminin esas olarak birleşik tek eksenli veya çok eksenli çekme ve basma gerilmelerinin etkisiyle sağlandığı biçimlendirmelerdir. Sıvama, flanş biçimlendirme, derin çekme, tel-çubuk çekme bu tür biçimlendirme işlemlerine dahil edilebilir.

3) Çekme Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçasının şekil değişiminin tek eksenli veya çok eksenli çekme gerilmeleri etkisinde oluştuğu biçimlendirmelerdir. Kabartma, genişletme, gerdirme bu tür biçimlendirme işlemlerine dahil edilebilir.

4) Eğme Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçasının eğilme gerilmeleri ile şekil değiştirdiği işlemler ile biçimlendirmelerdir. Döner ve lineer kalıp hareketi ile bükme bu tür biçimlendirme işlemlerine dahil edilebilir.

5) Kesme Türü Biçimlendirme İşlemleri: Şekillenen iş parçalarında kayma ve kesme gerilmelerinin daha etkin olmasından kaynaklanan biçimlendirmelerdir. Burkulma, döndürme bu tür biçimlendirme işlemlerine dahil edilebilir.

Üretim yöntemleri içinde plastik şekil vermenin öneminin ve ana hatlarının açıklanmaya çalışıldığı bu bölüm yapılan tezin çalışma alanını kısmen de olsa belirlemiş olmaktadır.

Yapılan tez çalışması etkin gerilme türüne göre plastik şekil verme yöntemlerinin sınıflandırılmasında basma türü biçimlendirme grubundan dövme ve ekstrüzyon ile ilgilidir. Bu bağlamda dövme ve ekstrüzyon konuları bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

BÖLÜM 2.

DÖVME, EKSTRÜZYON YÖNTEMLERİ ve DİŞLİ TEKNOLOJİSİ

2.1. DÖVME

Dövme işlemi, insanlığın uyguladığı en eski metal şekillendirme sanatıdır. Tarihte, taş devrinden metal devrine geçiş ile dövme sanatı uygulanmaya başlanmış ve 18. yüzyılın sonlarına kadar el sanatı olarak gelişme göstermiştir. Bu tarihten sonra makinelerin insan gücünün yerini almasıyla birlikte, dövme sanatının uygulandığı atölyeler endüstrileşme yolunu tutmuştur.

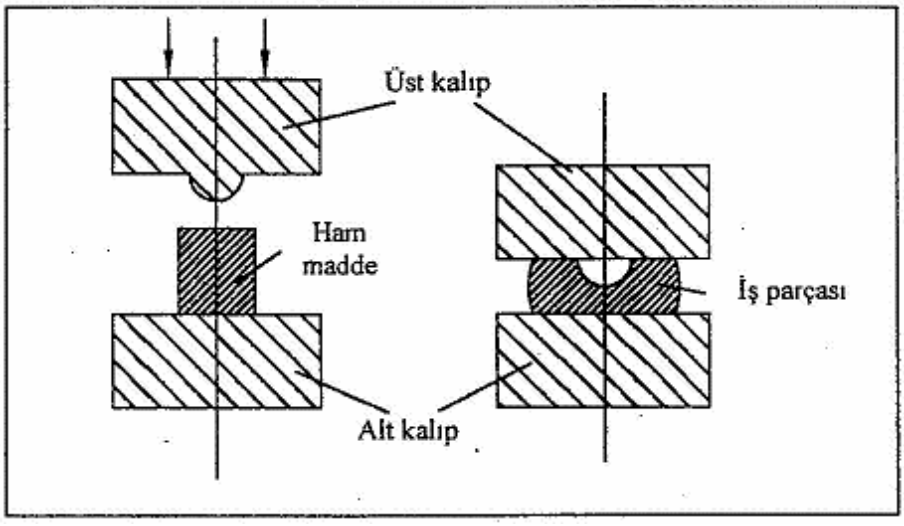
İş parçasının kalıp adı verilen takımlar yardımıyla darbe veya basınç altında kontrollü olarak plastik şekil değiştirdiği bir üretim yöntemidir. Krank milleri, el takımları, cıvata kafaları, dişliler, tekerlekler, biyeller, kancalar sayısız dövme örneklerinden bazılarıdır. Dövme yolu ile iş parçasının mekanik özelliklerinin yükseltilmesi sağlanır. Ayrıca, dövmede biçimlendirme malzemenin fiziksel durum değişiminden yararlanılarak yapılır.

Dövme işlemi sıcak, yarı sıcak ve soğuk olarak uygulanabilir. Dövme işleminde kullanılan kalıp; alt kalıp ve üst kalıp olarak adlandırılan iki parçadan oluşur. Dövme yöntemleri genel olarak; açık kalıpla dövme ve kapalı kalıpla dövme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.1.1. Açık Kalıpla Dövme

Dövmede dövülen iş parçasının yan yüzeylerinin serbest olarak hareket ettiği hale açık kalıpla dövme denir. Şekil 2.1.'de açık kalıpla dövme işlemi gösterilmektedir.

Açık kalıpla dövme işleminde genellikle boyut ve şekil hassasiyeti aranmadan basit ve düz şekilli kalıplarla yapılan bir dövme söz konusudur. İş parçası ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünme nedeniyle yığılma fıçı şeklinde olur. Sürtünmeden kaynaklanan fıçılaşma oluşumu sıcak kalıplar kullanarak veya etkin bir yağlama ile önlenebilir. Açık kalıpla dövme daha çok kapalı kalıpla dövmenin bir ara kesiti olarak kullanılır. Başlıca açık kalıpla dövme işlemleri yığma, delme ve kafa şişirme işlemleridir.



Şekil 2.1. Açık kalıpla dövme

2.1.2. Kapalı Kalıpla Dövme

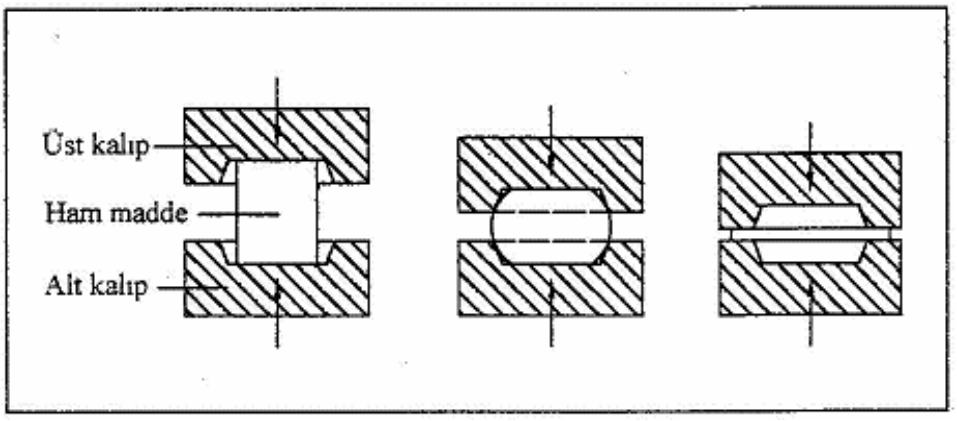
Karmaşık şekilli parçaları açık kalıpla dövmek çoğunlukla mümkün değildir. Bunun sebebi; açık kalıpla dövmede, malzeme en az bir doğrultuda serbest şekil değiştirir. Karmaşık şekilli parçaların dar toleranslar içinde elde edilebilmesi için birbiri üstüne kapanan ve elde edilecek parçanın negatif şekline sahip iki yarım kalıp kullanılır. Alt ve üst kalıplar kapandığında üretilecek ürünün şeklinde olan aradaki boşluk "gravür" olarak adlandırılır. Bu dövme yöntemine kapalı kalıpla dövme yöntemi denir.

Kapalı kalıpla dövme kendi arasında; kapalı kalıpla çapaklı dövme, kapalı kalıpla çapaksız dövme olarak iki ana kısma ayrılır. Kapalı kalıpta istenilen boyutta

ürün elde edebilmek için, gravüre yeterli miktarda malzeme koymak gerekir. Ancak, ara kademelerin kabaca yapılmasından, oksitlenme, malzeme boyutları, metalin genleşmesi ve dar kesitlere malzeme akışı gibi sebeplerden dolayı gerekli malzeme miktarını hassas olarak tespit etmek mümkün olmamaktadır. Bunun için gereğinden fazla hacimde hammaddeye ihtiyaç vardır. Malzemenin kapalı kalıp içinde akışını kolaylaştırmak için ön şekillendirme uygulanabilir. Ön şekillendirme büyük parçalar için genellikle açık kalıplar veya serbest kalıplarda gerçekleştirilir. Parça şekil ve boyutunun uygun olduğu durumlarda çok gözlü kalıplar kullanılarak, parçaya tüm dövme kademeleri uygulanabilir. Başlangıç malzemesi, kalıbı kenarlarındaki ayaklarda uzatma ve çevirme gibi ön işlemlere uğrar. Daha sonra sırasıyla kaba şekillendirme, kaba çapak kesme, son şekillendirme ve son çapak kesme işlemleri uygulanarak arzu edilen parça elde edilir.

2.1.2.1. Kapalı kalıpla çapaklı dövme

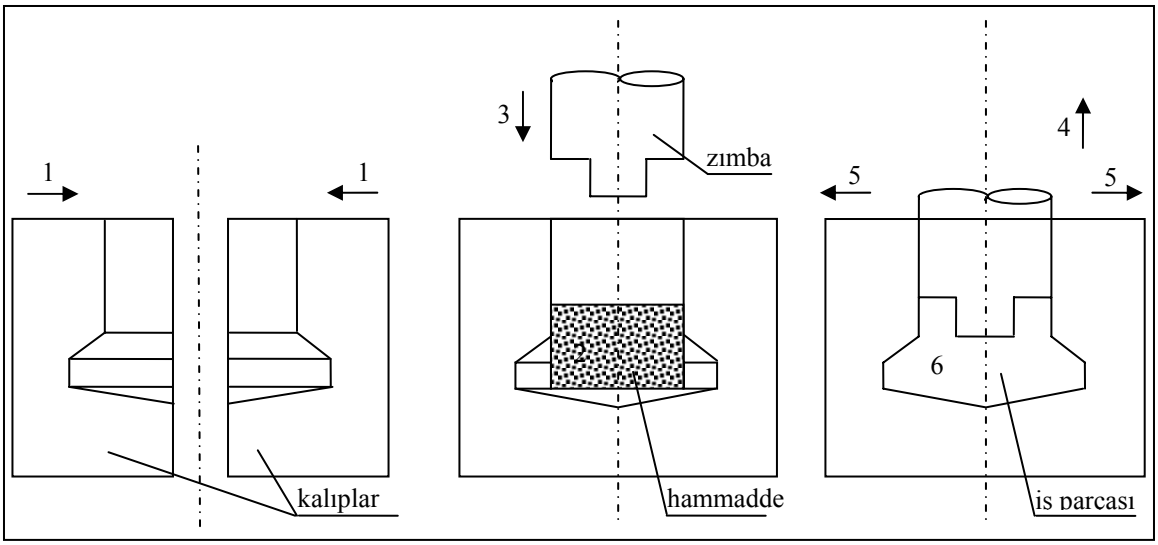
Şekil 2.2.'de kapalı kalıpla çapaklı dövme yöntemi gösterilmektedir. Bu yöntemde kalıp içine konacak olan hammadde üretilmesi istenen parçanın hacminden biraz fazla alındığı için fazla olan malzeme çapak halinde kalıp boşluğu dışında birikir ve bu nedenle alt ve üst kalıbın tam olarak kapanması gerçekleşemez. İş parçasını çevreleyen çapak dövme işleminden sonra kesilerek alınır (Akata H.E., 1987).



Şekil 2.2. Kapalı kalıpla çapaklı dövme (Akata, H.E., 1987)

2.1.2.2. Kapalı kalıpla çapaksız dövme

Soğuk veya sıcak olarak uygulanabilen bu yöntemde çapağa malzeme çıkmayacağı için hammadde hacmi çok dikkatli bir biçimde kontrol edilmelidir. Böylece metalin, bir ıstampa tarafından uygulanan kuvvetle herhangi bir malzeme kaybı olmadan kalıp boşluğunu doldurması sağlanır. Istampa ve kalıp bir veya birden çok parçadan oluşabilir. Kapalı kalıpla çapaksız dövmenin şematik resmi Şekil 2.3.'de verilmektedir (Akata H.E., 1987).



Şekil 2.3. Kapalı kalıpla çapaksız dövme: 1-kalıplar kapanır, 2-hammadde konur, 3-zımba aşağı iner, 4-zımba yukarı çıkarılır, 5-kalıplar açılır, 6-iş parçası alınır. (Akata, H.E., 1987)

Kapalı kalıpla çapaksız dövmede aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır.

1.) Malzeme hacimleri hammadde, ara kademeler ve son kademede eşit olmalıdır. Bunun pratik olmadığı durumlarda %0.5 ile %2 arasında dengeleme hacmi bırakılabilir.

2.) Malzeme akışı ile ilgili olarak, parçanın kalıp içinde merkezlenmesine çok dikkat edilmelidir.

3.) Ara kademeler arasındaki geçişlerde kesitler birbirine yakın ve ilişkili olmalıdır.

Malzeme kaybı olmadığı için ortaya çıkan kazancın, kalıpların pahalılığı ve işlemin her safhasında gösterilmesi gereken önemle bir anlamda dengelendiği bu yöntemde avantaj ve dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir (Altınbalık, T., 2000).

Avantajlar

- %10 ile %30 ağırlıktan kazanılır.
- Çapak kesmeye gerek yoktur.
- Kalıpta çapak alanı olmadığı için kuvvetler de nispeten azdır.
- Çapak kesme olmadığı için mekanik özellikler daha yüksektir.

Dezavantajlar

- Ara kademeler arasında ve kalıbın çeşitli bölgelerinde malzeme dağılımını iyi yapmak gerekir.
- Malzeme gramajı çok hassas hesaplanmalı ve kesilmelidir.
- Kalıp gravürü içinde merkezlemeye dikkat edilmelidir.
- Kalıpta birbiri içine giren parçalar arasında ince film şeklinde çapak oluşumu ortaya çıkabilir.
- Cidar kalınlıklarında değişmeler ortaya çıkabilir.

Bu yöntem genellikle rulman bilezikleri, dişli taslakları gibi disk şekilli parçalara uygulanır. Kapalı kalıpla dövmede işlem gerçekleştirilirken iki temel şart sağlanmalıdır, bunlar; düşük akma gerilmesi ve yüksek dövülebilirliktir (Akata H.E., 1987). Malzemenin plastik deformasyona karşı direncini gösteren akma gerilmesi, kalıp malzemelerinin sahip olduğundan çok daha düşük olmalıdır. Malzemenin hasara uğramadan deforme olabilme yeteneği; örneğin dövülebilirliği, arzulanan miktarda şekil değiştirmeye izin vermelidir. Verilen bir malzeme için hem akma gerilmesi hem de dövülebilirlik o malzemenin metalurjik karakteristikleri, sıcaklık, genleme ve genleme hızı gibi dövme parametrelerinden etkilenir.

Yöntemde malzeme akışı ve kalıbın doldurulması iş parçasının akma gerilmesi ve dövülebilirliği ile büyük oranda ilişkilidir. Bir diğer önemli unsur ise sürtünmedir. Sürtünme genellikle dövülebilirliği, malzeme akışını, basınç dağılımını, kuvvet ve enerji ihtiyacını etkiler.

2.2. EKSTRÜZYON

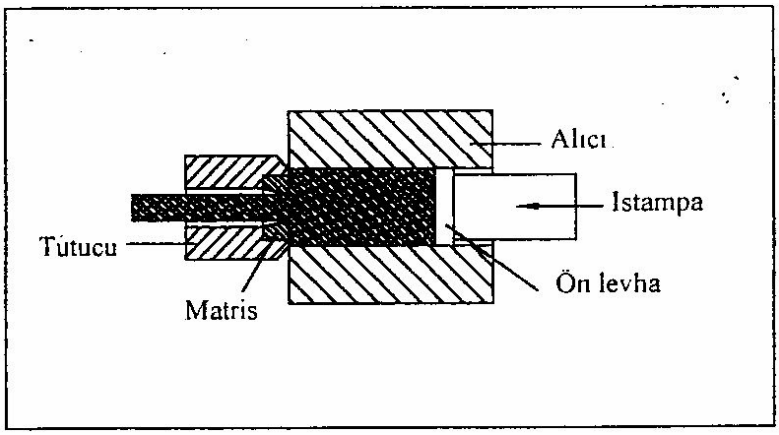
Metal bir bloğun, bir kovan (alıcı) içine yerleştirilerek ıstampa vasıtasıyla uygulanan basma kuvvetinin etkisi altında, ürün kesitinin şeklinde olan matris deliğinden geçirilmesine ekstrüzyon denir. Ekstrüzyon yöntemi ile çubuk, boru, şerit gibi ürünler elde edilebildiği gibi, ayrıca pek çok karmaşık şekiller ve çeşitli kesit şekilleri de elde edilmektedir. Elde edilen şekiller bir yarı mamul olabileceği gibi bazen de doğrudan kullanılan bitmiş ürün, yani mamul de olabilir (Çapan, L., 1999).

Ürünün çıkış yönü ve ıstampanın hareket yönüne bağlı olarak ekstrüzyon işlemleri 3 ana gruba ayrılır. Bunlar,

1) İleri (direk) ekstrüzyon,
2) Geri (endirek) ekstrüzyon,
3) Yanal ekstrüzyondur.

2.2.1. İleri (direk) Ekstrüzyon

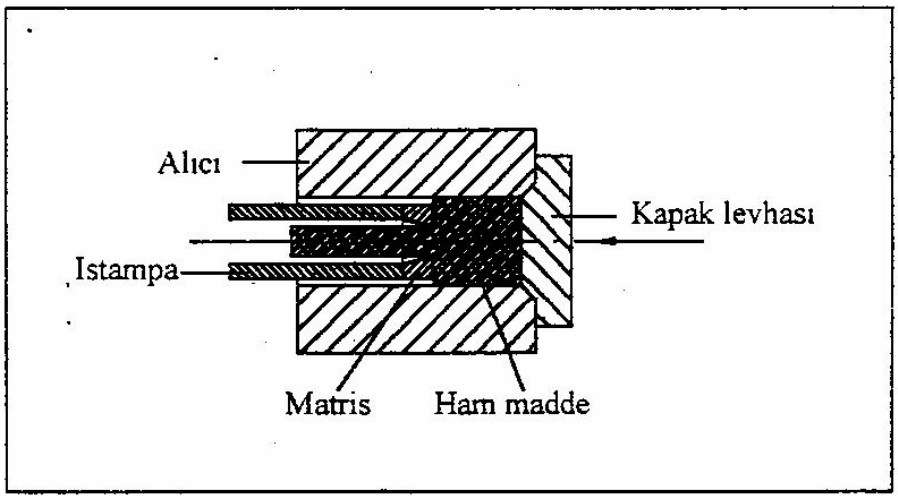
Şekil 2.4.'de gösterildiği üzere ileri ekstrüzyonda tutucu tarafından taşınan matris alıcının bir ucunda bulunur. Alıcının diğer tarafından basan ıstampa takoz malzemesinin matris deliğinden geçmesini sağlar. Istampayı korumak amacıyla, ıstampa ile takoz arasına bir ön levha konur. İşlem sonunda bir miktar takoz malzemesi alıcı içinde kalır.



Şekil 2.4. İleri ekstrüzyon (Çapan, L., 1999)

2.2.2. Geri (endirek) ekstrüzyon

Geriye ekstrüzyonda matris ıstampanın ucuna tespit edilmiştir (Şekil 2.5.). Bu yöntemde ıstampanın içi deliktir. Böylece, ıstampanın alıcı içine doğru hareketinde basılan çubuk matris ve ıstampa deliğine girer. İleri ekstrüzyonda, matris deliğinden geçen ürünle ıstampanın hareket yönü aynı, geriye ekstrüzyonda ise terstir. Geriye ekstrüzyonda kuvvet direk ekstrüzyona kıyasla daha küçüktür. Çünkü, ileri ekstrüzyonda takoz alıcıya göre hareket ettiği için ikisi arasında bir sürtünme söz konusudur. Geriye ekstrüzyonda ise takoz ile alıcı ara yüzeyinde malzeme hareketi yoktur, dolayısıyla sürtünme söz konusu değildir. Fakat geriye ekstrüzyon gerekli tezgahın karmaşıklığı nedeniyle, sınırlı bir uygulama alanına sahiptir.



Şekil 2.5. Geriye ekstrüzyon (Çapan, L., 1999)

İleri ekstrüzyonda alıcı içinde kalan malzeme miktarı takoz ağırlığının %18…%20'si, geri ekstrüzyonda ise %5…%6'sı arasındadır. Ayrıca geri ekstrüzyon için gerekli kuvvet ileri ekstrüzyona kıyasla %25…%30 daha küçüktür.

Ekstrüzyon soğuk ve sıcak olarak uygulanabilen bir yöntemdir. Sıcak ekstrüzyonda takozlar alıcı içine konmadan önce ekstrüzyon sıcaklığına kadar fırında ısıtıldığı gibi ayrıca, düşük ekstrüzyon hızlarında alıcıların da ısıtılması gerekir.

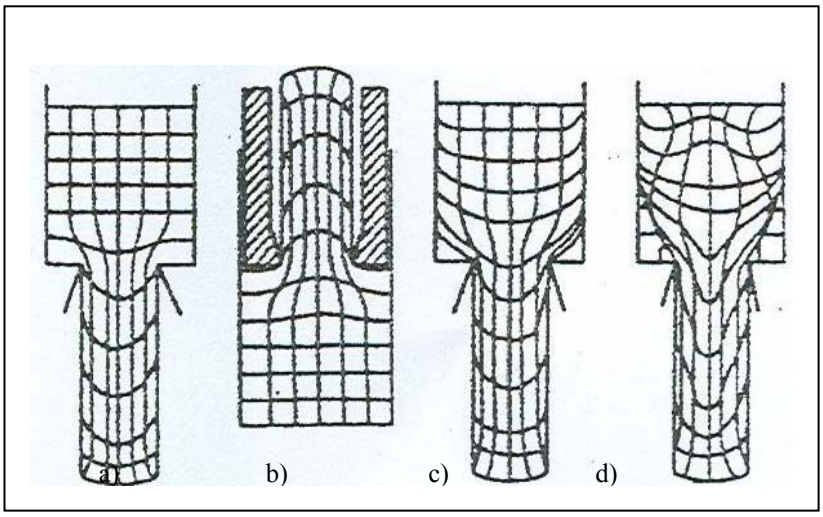
Ekstrüzyonun sürekli bir işlem olmadığı açık olmakla beraber büyük takozlarla çok uzun ürünler elde edilebilmektedir (Çapan, L., 1999).

Serbest veya açık kalıpla ekstrüzyon ise, genellikle yukarıda bahsedilen klasik ekstrüzyon yöntemlerine göre çok daha küçük kesit değişikliklerinin sağlandığı bir yöntemdir. Bu yöntemde hammadde alıcı içine yataklanmış biçimde değil, ıstampa kuvvetinin etkisiyle doğrudan matris deliğinden geçirilmeye zorlanır. İşlemin gerçekleştirilmesi için, ekstrüzyon kuvveti burkulma kritik yükünden küçük olmalıdır.

Yapılan tez çalışması, yukarıda anlatılan ekstrüzyon yöntemlerinden yanal ekstrüzyon yöntemini kapsamaktadır. Aşağıda bu yöntem ile ilgili kapsamlı bilgi verilmektedir.

2.2.2.1. Ekstrüzyonda malzeme akışı

Ekstrüzyonda malzeme akışı ekstrüzyon tipine, ekstrüzyon oranına, kalıp şekline ve yağlamaya bağlıdır. Ekstrüzyonda tipik malzeme akışları Şekil 2.8.'de görülmektedir.



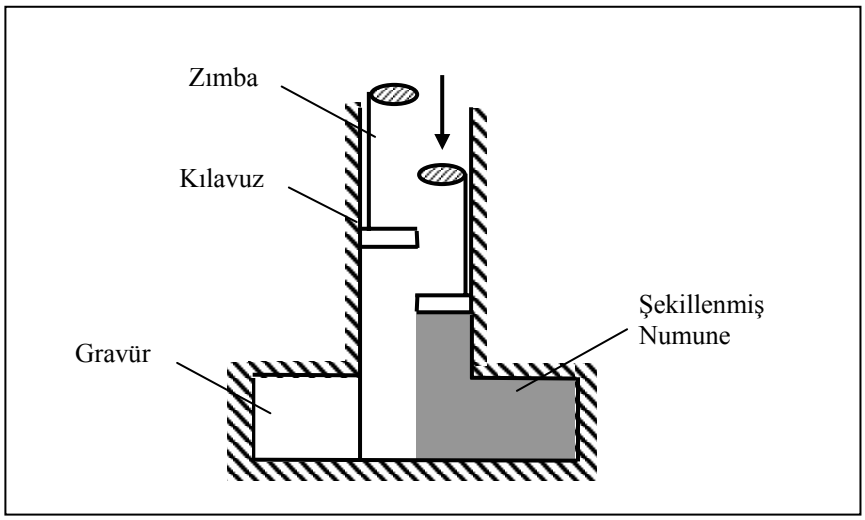
Şekil 2.8. Ekstrüzyonda tipik malzeme akışı. Homojen deformasyonda, ileri (a) ve geri (b) ekstrüzyonda malzeme akışı. İleri ekstrüzyonda sürtünmeli (c) ve aşırı sürtünmeli (d) durumlarda malzeme akışı (Kayalı, E.S., Ensari, C., 2000)

Şekil 2.8.a.'da görülen homojene yakın bir deformasyonda malzeme akışı, iyi yağlanmış bir takoz ve sürtünmesi az olan bir kovanla yapılan ekstrüzyonda sağlanır. Bu durum geri ekstrüzyonda Şekil 2.8.b.'de görülen deformasyon şeklidir ve burada kalıp girişine kadar takozun şekil değişimi homojendir. Şekil 2.8.c.'de görülen malzeme akışı takoz-kovan ara yüzeyinde sürtünmenin fazla olduğu durumda meydana gelir. Takoz kesitinde malzeme akışını gösteren küçük kareler şeklinde çizilmiş olan ağın kalıbın bulunduğu yüzeydeki kovan köşelerinde yığılmasından ve aşırı distorsiyonundan malzeme akışının homojen olmadığı anlaşılmaktadır. Homojen olmayan malzeme akışında, takozun ortasındaki ağlarda ekstrüzyon yönünde sadece uzama, kenarlarda ise kayma şekil değişimi meydana gelmektedir. Kovan-takoz ara yüzeyinde aşırı sürtünme olduğunda metal akışı merkeze doğru yönelir ve orta kısımda da kayma şekil değişimi oluşur (Şekil 2.8.d.). Sürtünmenin en fazla olduğu "yapışma" durumunda, dış kısımda ince bir kabuk halinde takozun yüzeyi kalacak şekilde metal iki kısma ayrılır. Bu durumda ekstrüzyon ürününün yüzeyi tamamen yeni ve temiz bir yüzeydir (Kayalı, E.S., Ensari, C., 2000).

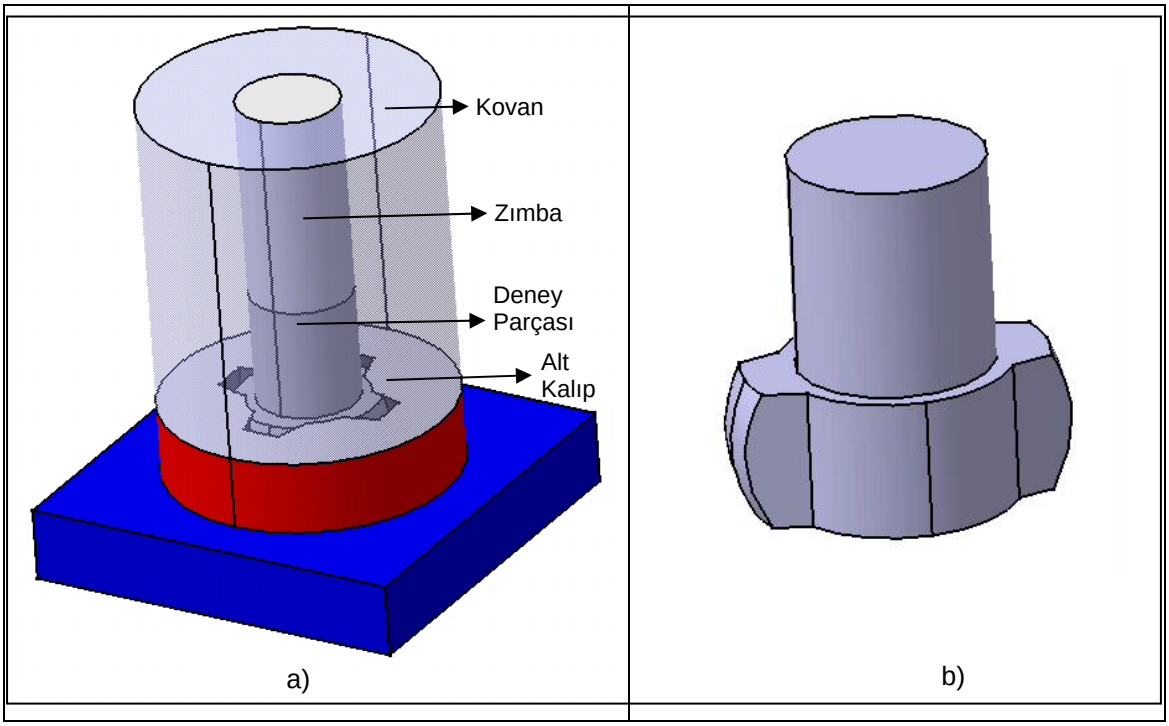
2.2.3. Yanal Ekstrüzyon

Yanal ekstrüzyon kavramı literatürde enjeksiyon yığma, radyal ekstrüzyon veya enjeksiyon dövme isimleri ile de karşımıza çıkmaktadır (Ko, B.D. ve diğ., 2001). Bu yöntem, kafa şişirme yöntemlerine bir alternatif olarak düşünülmüştür. Yöntem genellikle net veya nete yakın parçalar üretmek için kullanılmaktadır. Malzeme akışı kapalı kalıpla klasik dövme yöntemine benzemektedir. Deformasyon mekanizmasının kuvvet simülasyonuna olanak vermesinden dolayı deformasyon kuvveti düşüktür (Choi, H.J. ve diğ., 2001). Yöntemde malzeme kaybı azalmaktadır, ayrıca çapak kesme işlemine gerek kalmamaktadır. Bu avantajından dolayı da çapaklı dövmeye bir alternatif oluşturmaktadır. Şekil 2.6.'da şematik olarak gösterilen yöntemde kılavuz içindeki zımba tarafından eksenel olarak verilen hareket malzemenin radyal biçimde akarak kalıp boşluğunu doldurmasını sağlamaktadır. Şekil 2.7.'de de yanal ekstrüzyon yöntemi ve yöntem sonrası elde edilen ürün detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Bu işlemde,

malzeme akışını etkileyen temel unsurlardan biri, birincil deformasyon bölgesinin boyut oranı, diğeri ise, şekillendirme sırasında kalıp boşluğundaki anlık boyut oranıdır.



Şekil 2.6. Yanal ekstrüzyonun şematik gösterimi (Altınbalık, T., Çan Y., 2004)



Şekil 2.7. a) Yanal ekstrüzyon yönteminde üst kalıp, alt kalıp, zımba kombinasyonu, b) Yanal ekstrüzyon sonrası elde edilen ürün

Yanal ekstrüzyonda malzeme akış yönü zımba hareket yönüne diktir (Milner, P.R., 1971). Bu yöntemde bir sap kısmı olan ve yan tarafa doğru flanşı veya parçalı çıkıntıları olan karmaşık şekilli makine elemanları net şekle yakın olarak üretilmektedir. Söz edilen avantajlarına rağmen, yanal ekstrüzyonu sınırlayan en önemli faktör ise oluşan yüksek takım gerilmeleridir (Hsu, H.H., 2002). Bu yüzden prosesin, özellikle çelik ve alaşımları kullanıldığında sıcak veya ılık olarak yapılması tavsiye edilir (Lee, Y.S. ve diğ., 2001).

2.3. DİŞLİ TEKNOLOJİSİ

2.3.1. Dişli Teknolojisinin Gelişimi

Dişliler hızı arttırıp azaltmakta kullanılan en yaygın mekanik güç iletme elemanlarıdır. Dişlilerin dört bin yıldan daha uzun zamandır kullanıldıkları bilinmektedir (Dudley, D. W.,1969). 19. yüzyılın ilk yarısında düz dişleri evolvent profilini sağlayacak şekilde ve boyut hassasiyetinde işleyen ilk dişli üretim makinesi kullanılmaya başlanmıştır.

Dişli malzemesinin seçiminde dayanım, yağlama koşulları, üretimdeki alternatif yöntemler ve tabii ki toplam maliyet göz önüne alınır. Bununla beraber ihtiyaca cevap verecek malzeme seçimi şarttır. Örneğin; karmaşık şekiller ve düşük gerilmelerde, dökme demir, seri üretimin uygun olmadığı durumlarda ve yüksek gerilmelerde dökme çelik kullanılmaktadır. Hafif malzeme gereken durumlarda alüminyum, düşük sürtünme ve korozyon dayanımı için ise bronz ve diğer alaşımların kullanımı yaygınlaşmıştır.

Günümüzde mühendislik alanında yapılan yeni atılımlarla birlikte dişli teknolojisi de hızlı ilerlemeler kaydetmiştir. Dişlilerin karmaşık yapısından dolayı, hem boyutsal hassasiyetin tam sağlanma zorunluluğu, hem de dişlilerin şeklinin mükemmel olması gerekliliği dişli üretim prosesini özel bir konuma getirmektedir.

Dişlilerin kullanım alanları, oyuncaklardan uzay mekiklerine, redüktörlerden otomobil endüstrisine uzanan geniş bir aralıkta yer almaktadır. Dişli üretiminde en temel ve en eski metal şekillendirme prosesi olan dövme, maksimum dayanım/ağırlık oranına sahip parçaların, malzeme deformasyonunun da kontrol edilerek üretildiği bir yöntemdir. Dövmenin diğer yöntemlerle rekabeti amacıyla hassas dövme (net veya nete yakın) teknolojisinde önemli gelişmeler olmuştur. Minimum malzeme kaybı ve yüksek boyut toleransı net dövmenin avantajları arasındadır (Altınbalık, T., 2000).

2.3.2. Dişli veya Dişli Benzeri Parçaların İmalatı

Dişli üretim yöntemleri arasında değişik prosesler kullanılıyor olmasına rağmen herhangi bir dişli üretimi için gerçekte iki yol mevcuttur. Bunlar, talaşlı şekil verme ve talaşsız şekil verme (plastik şekil verme) yöntemleridir.

2.3.2.1. Talaşlı şekil verme yöntemleri

Talaş kaldırma, ucu keskin bir takımla parça üzerinden malzeme kaldırma işlemidir. Genellikle kesme hareketi dönme veya doğrusal, ilerleme ve yardımcı hareketler ise doğrusal hareketlerdir. Kesici takımlarla fazla malzemenin uzaklaştırılarak dişli üretim prensibine dayanan prosesler bu gruba girer. Yöntem hem dişli taslağı hem de bitirme işlemleri için kullanılır. Dişli dişlerinin karmaşık konturda olması ve yüksek boyutsal hassasiyet gerektirmesi, dişliler kesilirken doğal olarak işleme zamanını arttırmaktadır. Malzeme kaybı da bir diğer problemdir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için alternatif olarak çapaksız şekillendirme teknikleri geliştirilmiştir.

Kullanılan en yaygın talaşsız yöntemler aşağıda sıralanmaktadır:

2.3.2.1.1. Azdırma ile üretim

Dişler arasındaki metalin kesilerek uzaklaştırıldığı yöntemde, bir silindir dışına spiral olarak seri biçimde açılmış sonsuz vida şeklindeki kesici dişlerin bulunduğu azdırma ismi verilen kesici takım ile gerçekleştirilir. Azdırma ile imalat hem kaba hem de net şekilli dişli işlemlerinde kullanılan en hızlı metottur.

2.3.2.1.2. Modül freze ile üretim

Bu yöntem, azdırma ile üretime benzemektedir. Günümüzde iki tip modül frezeleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Birincisinde bir dairesel pinyon dişli kesici takım kullanılmaktadır. Yöntemde dişli bir yöne dönerken ters yönde döndürdüğü iş parçasının üzerine dişleri açar. İkincisinde ise, düz bir blok üzerinde kremayer dişli gibi yerleştirilmiş olan kesici dişler diş açma operasyonunu gerçekleştirmektedir. Bu yöntem azdırmaya kıyasla daha yavaştır fakat kullanılan takımlar azdırmada kullanılan takımlardan daha ucuzdur. Yöntemle üretilen dişlilerin boyutsal doğruluğu azdırma ile üretilenlere benzemektedir.

2.3.2.1.3. Yüzey frezeleme

Yöntem çoğunlukla spiral konik dişliler ve hipoid dişlilerin yapımında kullanılır. Bu yöntemde üç farklı sistem kullanılır. Birinci sistemde kesme merkezine göre sabit bir radyal mesafede dairesel olarak yerleştirilmiş kesici dişler mevcuttur. Diğer sistemde dönen dairesel bir tabla üzerine yerleştirilmiş bıçaklar kesme hareketini gerçekleştirmektedir. Üçüncü sistemde ise, sürekli taksimatı sağlamak amacıyla çok başlangıçlı bir kesici takım mevcuttur (Eyercioğlu, Ö., 1995).

2.3.2.1.4. Form frezeleme

Form frezeleme taslak dişliden, azdırmaya benzer şekilde, iki diş arasındaki malzemenin kesilerek atıldığı bir yöntemdir. Yöntem çok sayıda küçük dişli (saat ve alet dişlileri) üretimi için uygundur.

2.3.2.1.5. Form taşlama

Diş yüzeyleri sertleştirme işleminden sonra taşlanırlar. Taşlama metotları talaşlı dişli imalatında kullanılan metotlara tamamen benzerdir. Kullanılan taşlama çarklarının şekli ve sayısı çeşitlilik gösterir. Form taşlamada genellikle yuvarlanma dairesi çapı 12 mm. den 1.8 m. ye kadar olan dış dişliler ve 90 mm. den 750 mm. ye kadar olan iç dişliler taşlanabilir. Bu yöntemde pek çok durumda diş dibi özel bir ön taşlama bıçağı ile işlenir (Eyercioğlu, Ö., 1995).

2.3.2.1.6. Traşlama (Raspalama)

Traşlama normal kesme işlemine ve taşlamaya göre genellikle çok daha hızlı bir son talaş alma işlemidir. İşlenecek malzemenin sertliğiyle sınırlandırılmıştır. Traşlama bıçakları, dişleri kesici kenarları oluşturmak üzere eksene dik düzlemlerle dilimlenmiş silindirik dişli veya kremayer şeklindedir. Profil geometrisi, taksimat hataları ve helis hataları bir dereceye kadar traşlama ile düzeltilebilir.

2.3.2.1.7. Broşlama

Yöntem, dişli üretimi için oldukça hızlı bir yöntemdir. Hem iç hem de dış alın ve helisel dişlilerde kullanılırsa da, iç alın dişli üretiminde daha sık olarak kullanılır.

Broşlama, yuvarlanma dairesi çapı 250 mm. den büyük dişliler ile diş genişliği fazla olan dişliler için pek pratik değildir (Eyercioğlu, Ö., 1995).

2.3.2.1.8. Elektroerozyon ve tel erozyonu

Bu yöntem her sertlikteki malzemeden dişli üretimi için kullanılır. Burada, kesici takım görevini bir elektrot görmektedir. Elektrot ile iş parçası arasındaki ark, iş parçasında erozyon meydana getirir. Dişli üretiminde sık kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle yüzey hassasiyeti küçük, daha düşük pürüzlülüklerde dişler elde etmek mümkündür.

2.3.2.2. Talaşsız şekil verme yöntemleri

2.3.2.2.1. Haddeleme

Malzemelere plastik şekil vermede haddeleyerek şekillendirme bitirme işlemi olarak kullanılabileceği gibi katı bir çubuktan dişli yapılmasında da kullanılabilir. Haddeleme işlemi hızlı ve ekonomik bir prosestir. Dişli yüzeyinin kalıntı basma gerilmelerine dayanımını arttırır. Haddeleyerek bitirme işlemi yalnızca dişlerin birbiri ile temas eden yüzeylerine uygulanır.

2.3.2.2.2. Toz metalurjisi

Düz, helisel, konik, düz-helisel, helisel-helisel dişliler bu yöntemle üretilir. Bu yöntemde toz haline getirilmiş metal sıkıştırılıp sinterlenerek dişli haline getirilir. Dişlilerin dayanımları sınırlı olmakla beraber çok sayıda üretim söz konusu olduğundan maliyetleri aşırı derecede ucuzdur.

2.3.2.2.3. Döküm

Döküm yöntemiyle düşük yüklerde çalışan dişliler oldukça çok sayıda üretilirler. Bu yöntemle üretilen dişliler çoğunlukla karmaşık şekillidirler ve kare delikleri, kama kanalı, dişlinin ters yönde dönmesini engelleyen parça gibi ekler içerirler. Metalin erime sıcaklığına kadar ısıtılıp, basınç altında kalıp boşluğuna dökülmesi işlemidir. Döküm işlemi ile üretilen dişlilerde genel olarak boyut hassasiyeti kötüdür.

2.3.2.2.4. Hassas dövme

Dişli dövme terimi, parçaların net veya nete yakın boyutlarına dövülmesini içermektedir. Dişlilerin hassas dövülmesi konusu hakkında son zamanlarda çok olumlu aşamalar kaydedilmiştir. Bu şekilde üretilen dişlilerin diğer tüm klasik yöntemlere olan doğal üstünlüğü kaydedilmiş olumlu aşamalara bağlanabilir. Bu avantajların başlıcaları, artan dayanım, daha az hammadde tüketimi, dizayn fleksibilitesi ve ekonomiklik olarak sıralanabilir.

Hassas dövme terimi sadece bir dövme prosesini değildir. Aynı zamanda dövmeye filozofik bir yaklaşımı da ifade eder. Bu yaklaşımın amacı net veya net boyuta yakın parça üretmektir. Net dövme sonunda dövülmüş yüzeylerde ek bir işleme gerek yoktur, ancak, küçük deliklerin delinmesi gibi ek işlemler yapılabilir. Nete yakın dövmede ise çok az miktarda işleme ya da bitirme operasyonu uygulanır.

Shipley'e göre (1985) hassas dövme bazen, boyutsal ve yüzey toleranslarının tam olarak sağlandığının bir göstergesi olarak "tam tolerans dövme" olarak da adlandırılır.

2.3.2.2.5. Soğuk hassas dövme

Soğuk dövme klasik bir hassas dövmedir. En önemli avantajı yüksek boyutsal tolerans ve üretkenliğin bir arada olmasıdır. İşlem başlıktan da anlaşıldığı üzere, malzemenin rekristalizasyon sıcaklığının altında gerçekleşir. Parlak yüzeyli iş parçaları kullanıldığından üretilen parçaların yüzeyleri sıcak dövmeye göre çok iyidir. Hatta öyle ki, bazen bu parçalar talaşlı şekil verme ile elde edilenler kadar iyi yüzey kalitesine ulaşabilir. Bununla beraber prosesin bazı sınırlamaları vardır. En başta, şekillenecek malzemenin takımları yüksek gerilmelere maruz bırakabileceği yüksek akma gerilmesi gelir. Geri kalanlar ise şu şekilde sıralanabilir.

- Parça boyutları pres kapasitesi ile sınırlıdır.
- Pek çok parça soğuk olarak dövülmekle beraber karmaşık şekilli, yüksek oranda deformasyon gerektiren ve asimetrik parçalar dövülemez.
- Dövülecek çeliğin karbon oranı %0.5' ten düşük ve diğer alaşım elementlerinin toplam miktarı %3' ten az olmalıdır.
- Pekleşmenin etkisinin giderilmesi amacıyla bir ara tavlamaya ihtiyaç duyulur.
- Kullanılacak hammadde hacminin önceden çok iyi belirlenmiş olması ve iyi yağlama yapılması gerekir.
- Takımlar pahalı olduğundan ancak çok sayıda üretim ekonomik olur.

Yukarıda belirtilen sınırlamalara bakıldığında dövme işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılması daha mantıklı görünüyorsa da, eğer parçanın soğuk olarak dövülmesi mümkünse kesinlikle bu proses seçilmelidir (Akata, E., 1987).

2.3.2.2.6. Ilık hassas dövme

200-850 ^{0}C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu yöntemde alaşımlı çeliklerin şekillendirilmesi sağlanır. Bu yöntemin başlıca avantajı boyut hassasiyetinin soğuk dövmede olduğu gibi yüksek olmasıdır. Ayrıca, şekillendirme kabiliyeti de sıcak

dövmede olduğu gibi iyidir. Bu dövme yönteminin dezavantajı prosesin kompleks olması ve kalıpların pahalı olmasıdır.

2.3.2.2.7. Sıcak hassas dövme

Malzemenin rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde gerçekleşen bir yöntemdir. Kalıp boşluğunu doldurmak soğuk dövmeye göre daha kolaydır. Bu yöntemde daha düşük deformasyon enerjisine ihtiyaç vardır. Çok daha çeşitli, farklı büyüklüklerde ve değişik malzemelerden parçaların şekillendirilmesine imkan tanır. Bu yöntemin dezavantajı ise takımların soğuk şekillendirmeye göre daha çabuk aşınmasıdır.

Yapılan çalışmada, talaşsız imalat da olarak adlandırılan plastik şekil verme ile üretilmiş dişli benzeri parçaların imalatı üzerinde durulacaktır. Plastik şekil verme ile üretilmiş dişlilerin talaşlı imalat yöntemleriyle üretilmiş olanlara göre daha uzun ömürlü olduğu ve daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu önceden yapılmış çalışmalarda belirtilmektedir.

Geometrileri nedeniyle şekil zorluk faktörü yüksek olan dişli profillerinin dövülmesi için net ölçülere yakın dövme işlemi tercih edilmelidir. Plastik şekil vermenin bir dalı olan kapalı kalıpla klasik dövme, uygun geometrideki parçalar çapaksız dövüldüğünde bir hayli avantajlı üretim yöntemidir. Ekonomiklik, dar boyut toleransları, iyi yüzey kalitesi, arttırılmış mekanik özellikler yöntemin önemli avantajları olarak karşımıza çıkar.

.

Bu çalışma ile dişli benzeri parçaların imalatının, plastik şekil vermenin farklı iki prosesinden (yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme) hangisi ile yapılmasının daha uygun olacağı hakkında da yorum yapılacaktır.

BÖLÜM 3.

KONUNUN ÖNEMİ, ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ve ÇALIŞMA PLANI

3.1. KONUNUN ÖNEMİ

Artan teknolojik gelişmelere bağlı olarak dişli üretiminde, dişli üretim yöntemleri ve dişli üretiminde hangi üretim yönteminin uygun olacağı sorularının cevapları daha da fazla merak edilir hale gelmiştir. Bilindiği üzere dişliler hızı arttırıp azalmak için kullanılan en yaygın mekanik güç iletme elemanlarıdır (Abdul-Rahman, R.O., Dean, T.A., 1981). Geniş bir uygulama ve araştırma alanına sahip bu elemanların yüksek mukavemetli, iyi yüzey kalitesine sahip ve dar toleranslar içinde işlenmesi endüstriyel bir zorunluluktur. Dişli üretim teknolojisi bünyesinde farklı üretim yöntemlerini barındırmasına karşın genelde talaşsız üretim ve talaşlı üretim olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

Plastik şekil verme ile üretilmiş dişlilerin, talaşlı şekil verme ile üretilmiş dişlilere oranla daha uzun ömürlü olduğu ve daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu bilinmektedir. Geometrileri nedeni ile şekil zorluk faktörü yüksek olan dişli profillerinin dövülmesi için net ölçülere yakın dövme işlemi tercih edilmektedir (Sadeghi, M.H., 2003).

Yapılan tez çalışmasında dövme yöntemi gibi plastik şekil verme yöntemlerinin bir alt kolu olan ekstrüzyon yönteminin, uzun şaftlı ve geniş flanşları olan parçaların burkulma problemleri olmadan bir seferde yığılması işleminin rahatlıkla gerçekleştirilebildiği yanal ekstrüzyon yöntemi anlatılmaktadır (Balendra, R., Qin, Y.,2000). Bu tez çalışması bağlamında, firmaların genellikle eldeki mevcut imkanlara göre karar verdikleri üretim yöntemi optimizasyonu bilimsel bir yaklaşımla ele alınacaktır. Literatürde dişli imalatı ile ilgili eksik görülen dişli ön şekil dizaynı ile ilgili net sonuçlar ortaya konacaktır. Zor geometrisi nedeniyle matematiksel modellemesi basitleştirici kabullerle yapılan dişli benzeri parçalarla ilgili olarak bilimsel gerçeğe

yakın hesaplar yapılacak ve böylece literatüre önemli bir katkıda bulunulacaktır. Bu amaçla gerçeğe çok yakın sonucu vermesi, bilgisayarda az zaman alması ve seçilen proseslere uygulanabilmesi gibi kriterleri sağlaması açısından Üst Sınır Analizi Yöntemi kullanılacaktır (Chitkara, N.R., Bhutta, M.A., 2001). Bu çalışma sonrasında bulunacak sonuçlara göre ülkemiz açısından mevcut hammaddelerin daha doğru ve daha tasarruflu bir biçimde kullanılmasına yönelik olarak bilgiler elde edilecektir. Sunulan tez çalışmasında, deney malzemesi olarak alüminyum kullanılacaktır. Dünyada elde edilmesi ile ilgili olarak 3000 yıla kadar bir sorun olmayan alüminyum, hafifliğinin yanında özgül dayanım ve özgül modülüs değerlerinin yüksek olması nedeniyle alaşımlandırılarak pek çok kritik uygulamada kullanılmaktadır (Narayanasamy, R., Pandey, K.S., 1997). Dişlilerin en kritik noktaları diş dibi bölgeleri olup eldeki malzeme ve üretim yöntemine bağlı olarak buralardaki eğilme yorulması dayanımı değerleri önem teşkil etmektedir (Akata, E. ve diğ. 2004). Tez çalışmasının en önemli ayaklarından biri elde edilen dişli benzeri parçaların yorulma deneyleridir. Bu deneylerden elde edilecek sonuçlar, pek çok kritik noktada ve hafifliğin önem arz ettiği durumlarda alüminyum esaslı malzemelerin kullanılması için yol gösterici olacaktır. Ayrıca, farklı yöntemler kullanılarak üretilecek olan dişli benzeri parçaların diş dibinden diş ucuna kadar olan belirli aralıklarda mikro-sertlikleri de ölçülecektir.

3.2. KONU İLE İLGİLİ OLARAK YAPILMIŞ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Konu ile ilgili olarak yanal ekstrüzyon (enjeksiyon yığma) yöntemi ile yapılmış dişli benzeri parçalar ve dişli parçalara yönelik değişik ve farklı çalışmalar mevcuttur (Quin, Y., Balendra, R., 1998). Bu çalışmalarda, kuvvet-enerji ihtiyaçları, deneysel işlemlerde kullanılan numunelerin dövülerek şekillendirilebilirliği, kalıbı doldurma kabiliyetleri (malzeme akışı) ile ilgili bilgilere önem verilmiştir. Ayrıca Üst Sınır Metodu uygulanarak yapılan yanal ekstrüzyon prosesinin matematiksel modellemesi de konu ile ilgili literatür çalışmalarında mevcuttur (Balendra, R., Hijazi, M.A., 1989).

Henry'nin (Henry, J.C.,1971), yapmış olduğu çalışma bu konuda yapılmış olan deneysel ve teorik çalışmalar arasındaki ilk çalışmadır. Henry altı farklı çelik kullanarak

proses parametrelerinin kuvvete olan etkisini ve deformasyon bölgesinin boyut oranının flanştaki hata ile ilişkisini deneysel olarak incelemiştir.

Balendra (Balendra, R., 1987), yaptığı çalışmada yanal ekstrüzyon yönteminde, kılavuz içinde bulunan zımba tarafından eksenel yönde verilen hareketin malzemenin radyal biçimde akarak kalıp boşluğunu doldurmasını sağladığını belirtmektedir.

Balendra ve Quin (Balendra, R., Quin, Y., 2004), karmaşık geometriye veya dişlere sahip makine parçalarının geleneksel dövme yöntemi ile üretiminin çok zor olduğunu, net veya nete yakın ölçülere sahip bitmiş parçaların üretiminde yanal ekstrüzyon yönteminin daha etkili olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca bu yöntem çapak kesme gibi sonraki işlemlerin azaltılmasını da sağlamaktadır. Yapılan çalışmada geleneksel dövme yöntemine göre daha az kuvvet gerektiği buna karşılıksa daha fazla kalıp doluluğu elde edildiği saptanmıştır.

Geiger (Geiger, R., 1985), net veya net şekle yakın parçaların üretilmesinde radyal ekstrüzyonun kullanılması ile yaptığı çalışmada, çelik ve çelik alaşımlarının bu yöntemle üretimi yapılırken prosesin ılık veya sıcak olarak gerçekleştirilmesinin daha uygun olacağını belirtmiş, çelik ve alaşımları ile ilgili olarak değişik sıcaklıklarda radyal ekstrüzyon yöntemini kullanarak deneyler gerçekleştirmiştir.

Altınbalık ve Çan (Altınbalık, T., Çan Y., 2004) yaptıkları çalışmada yanal ekstrüzyon yöntemini prensibine uygun kalıp düzeneği hazırlamışlar ve farklı kalıp gravürleri işletmişlerdir. İki farklı birincil deformasyon bölgesi boyut oranına sahip numuneler ile farklı diş sayılarına sahip düz formlar doldurulmuştur. Bu şekilde deformasyon bölgesi boyut oranının kuvvete olan etkileri incelenmiştir. Böylelikle ölçülen deney kuvvetleri Üst Sınır Analizi Yöntemi ile hesaplanan kuvvetlerle karşılaştırılmıştır.

Mizuno (Mizuno, T., 1999) ve arkadaşları yanal ekstrüzyon yönteminin en önemli avantajının uzun şaftlı ve geniş flanşları olan parçaların burkulma problemi olmadan bir seferde yığılabileceği olduğunu söylemişlerdir.

Balendra (Balendra, R., 1993) malzemenin kalıp kılavuzundan itilerek kalıp boşluğunu doldurduğu proseste malzeme akışını (kalıbı doldurma kabiliyetini) etkileyen iki ana unsurun varlığından söz etmiştir. Bunlardan ilki, birincil deformasyon bölgesinin boyut oranı ($T=h/2r_0$), ikincisi ise, şekillendirmenin olduğu andaki kalıp boşluğundaki anlık boyut oranıdır.

Balendra (Balendra, R., 1997) yaptığı çalışmada T değerine bağlı olarak üç farklı akış modelinin olduğunu belirtmektedir. Bunlardan birincisi; $1.3<T<1.64$ için malzemede katlanma meydana gelmektedir. Bu durum dış yüzeyde kusurlara yol açmaktadır. Bir diğeri, $0.8<T<1.3$ 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. Son olarak ise $T<0.8$ halinde 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.

Yanal ekstrüzyon yöntemi ile ilgili olarak pek çok teorik model geliştirilmesine rağmen Parsons **(**Parsons B.ve diğ,, 1973) ve arkadaşları yöntemin kapalı kalıpla klasik dövmeye benzer bir deformasyon mekanizması sergilemesi nedeniyle, prosesin üst sınır kuvvet analizi yöntemlerine daha uygun bir model teşkil ettiğini belirtmektedirler.

Chitkara ve Bhutta (Chitkara, N.R., Bhutta, M.A., 2001) yaptıkları çalışmada, malzemenin diş boşluğuna girmeye başladığı andan dişin tam doluluğa ulaştığı ana kadar diş boşluğundaki doluluk, dişin üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru üniform değildir. Bunun sebebi; sürtünmenin dişin üstünde ve altında farklı olmasıdır. Böylece malzeme akışı, dişin üst yüzeyinde alt yüzeyine göre daha hızlıdır.

Balendra (Balendra, R., 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 tanımlamışlardır. Kalıp kılavuzu içinden alt kalıp boşluğuna malzeme geçişini tanımlayan bu modeller üzerine yapılan

çalışmalardan birinde Alexander ve Lengyel, (Alexander, J.M., ve Lengyel, B., 1965), malzemenin parabolik bir biçimde aktığını belirtmişler ve buna yönelik çalışma yapmışlardır. Milner (Milner, P.R., 1971) ise bu konu ile ilgili olarak ikinci bir model üzerinde durmuş ve malzemenin konik bir biçimde aktığını belirtmiş buna yönelik çalışma yapmıştır.

Balendra **(**Balendra, R., 1987) deneysel olarak T=0.13-0.63 aralığında yaptığı araştırmada konik modelde malzeme akışı radyal ve eksenel hız bileşenleri halinde olduğunu ve bir λ geometri parametresi tanımlandığını belirtmektedir. Yapılan çalışmada çıkış radyüsü ($R_ç=r/2r_o$) önemli başka bir parametre olup $R_ç=0.08$ değerinin kendi deney koşulları içinde optimum değerler olduğunu belirtmektedir.

Plancak ve arkadaşları (Plancak, M., Bramley, A., Osman, F.,1992) üst sınır analizi yöntemini yanal ekstrüzyon parçalarına uygulamışlardır ve tahmini kuvvetlerin, ölçülen kuvvetlerden ara hallerde yaklaşık % 25 ve deformasyonun bitim anında % 10 daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Bunun yanında yöntemde çapak alma operasyonuna ihtiyaç duyulmaması nedeniyle getirdiği ekonomiklik, iyi bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti, seri imalata uygun olması yöntemin diğer avantajları olarak sıralanmıştır.

Plancak ve arkadaşları (Plancak, M. ve diğ., 1996) da bu tezin matematiksel modellemesinde kullanılan üst sınır yöntemi içindeki hesaplamalarında deneysel kuvvetlerin deformasyon işleminin bitim aşamasında tahmini kuvvetlerden fazla çıktığını ve bunun da teoride farz edilen hız alanının deney anında tam olarak geçerli olamayacağından kaynaklandığını belirtmektedirler.

Tezin içinde yer alan ve yanal ekstrüzyon yöntemi ile deneysel olarak karşılaştırılacak olan kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi ile yapılmış dişli benzeri parçalar, dişli taslak parçaları ve dişli parçalara ait çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Kuvvet ve malzeme akışı ile ilgili yorumların bulunduğu bu çalışmalarda, sürtünme-

kuvvet ilişkileri, sertlik, başlangıç parça boyutları, yorulma dayanımları gibi farklı çalışmalarda yer almaktadır.

Chitkara ve Kim (Chitkara, N. R., Kim, Y., 1996) yaptıkları çalışmada, dişli benzeri parçaların kapalı kalıpta klasik dövülerek şekillendirilmesi ile ilgili olarak deneyler yapmışlardır. Malzemenin son kısımlarının dövülmesi için, işlemin son kısımlarında kuvvetin birden bire arttığını saptamışlardır. Buna bağlı olarak yaptıkları kuvvet analizinde en iyi sonucun m=0.2 sürtünme katsayısı için bulunduğunu belirtmişlerdir. Fakat yapılan çalışmada sürtünme katsayısının işlem sırasında değişebileceği de belirtilmiştir.

Cho ve arkadaşları (Cho, H. ve diğ. , 1997) diş sayısının kapalı kalıpta dişli dövülmesinde en önemli parametre olduğunu söylemişlerdir. Bu çalışmada, değişik diş sayılarında farklı deneyler yapılmış, sürtünme katsayılarının m=0.1 ve m=0.3 olduğu durumlarda verilen bir modül için dövme kuvvetinin diş sayısının artışına bağlı olarak arttığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, kuvvet analizi üst sınır yöntemi kullanılarak yapılmış ve yükseklikteki şekil değiştirme oranının optimum dövme için % 15 değerinin altında kalması gerektiği belirtilmiştir.

Choi ve arkadaşları (Choi, J.C. ve diğ. 1996), yaptıkları çalışmada Üst Sınır Yöntemini kullanarak kuvvet analizi yapmışlar, sürtünme şartları, diş sayısı,modül gibi parametrelerin dövme kuvvetlerine etkileri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmada deney malzemesi olarak alüminyumu tercih etmişler ve deneylerini alüminyum kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, akışın sınırlandığı oran aralığından bahsedilerek, bu aralığın 0 ile 1 arasında değiştiği ve 1 değerine yaklaştıkça malzeme akışının güçleştiğini, 1 olduğu durumda ise akışın gerçekte mümkün olmadığını belirtmişlerdir.

El Domiaty ve arkadaşları (El-Domiaty, A., Shabara, M., Al-Ansary, M., 1998) kapalı kalıpla dövme işleminde dişli benzeri taslakları kullanmışlar ve sürtünme katsayısını sabit kabul etmişlerdir. Kuvvet tahminlerini üst sınır analizi yöntemi ile yapmışlar, deney aşamasında ise ticari saflıkta alüminyum kullanmışlardır. Bu

çalışmada teorik olarak üst sınır yöntemi kullanılarak yapılan kuvvet değerlerinin, pratikteki deney sonrası değerler ile mukayesesi yapılmış ve pratikte işlemin başlangıç safhaları için bulunan kuvvetin, teorikte hesaplanan kuvvetten daha büyük olduğu, fakat döverek şekil değiştirme işleminin bitimine doğru, pratikte bulunan değerlerin ve teorik değerlerin birbirine iyice yaklaştığı görülmüştür. Sonuç olarak, her iki sonucun da birbirine yakın olduğu belirtilmektedir.

Eyercioğlu (Eyercioğlu, Ö., 1995), kapalı kalıpla dövülerek elde edilmiş ve talaşlı işleme yöntemi ile elde edilmiş düz dişli çarkları çeşitli açılardan kıyaslamıştır. Bu karşılaştırmada, dövülerek elde edilmiş dişlilerin talaşlı işlemeye oranla % 5 malzeme tasarrufu sağladığını, dayanımın % 20 arttığını ve üretim zamanının % 50 azaldığını söylemektedir.

3.3. ÇALIŞMA PLANI

Sunulan çalışma için gerekli deney malzemelerinin alınması ve bazı malzemelerin işçilik ücretlerinin karşılanarak deneylerde kullanılacak kalıplar haline getirilmesi için gerekli maddi destek Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Fonu tarafından karşılanmıştır. Deneysel çalışmalarda Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Atölyeleri kullanılmıştır. Ayrıca Mühendislik-Mimarlık Fakültesi atölyesinde bulunan presin fondan temin edilen maddi kaynak çerçevesinde alınan elektronik ekipmanlar ile gerekli olan yük ihtiyacının ve strok miktarının bilgisayar ortamında ve daha hassas olarak belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tüm bunlardan sonra deneysel olarak yapılacak işlemler aşağıda sıralanmaktadır.

- Yapılacak olan deneysel çalışmalarda soğuk deformasyona uygun mekanik özellikler gösteren alüminyum malzeme temin edilecektir. Kuvvet deneylerinden sonra, yorulma dayanımı deneyleri ve mikro-sertlik deneyleri yapılacaktır.

- Deneylerde kullanılacak olan alüminyumlar belirlenen ölçülere göre işlenecektir.

- İşlenecek olan alüminyum malzemeler kullanılarak farklı diş sayılarına ve farklı profillere sahip dişli benzeri numunelerin iki farklı üretim yöntemi için deneyleri gerçekleştirilecektir. Kalıp içindeki malzemenin hareketi adım adım gerçekleştirilecek ve her adımdaki kuvvet değerleri ölçülerek kalıp doluluğu hesaplanacaktır.

- Deneylerde iki ve dört dişli kalıp boşluğu kullanılacaktır. Her iki kalıbın düz ve konik formları imal ettirilecektir. İki yöntem için toplam sekiz farklı deney prosesi gerçekleştirilecektir. Benzer çalışmaların ışığında kalıp dişine malzeme girdiği andan itibaren kalıp dolana kadar olan her adımda 1 mm.'lik yatay ilerleme olacak şekilde bölünecek ve deneylerin istatistiki doğruluğu açısından her dövme strokunda üç deney numunesi harcanacaktır.

- Deneylerden sonra parçalar yorulma işlemine tabi tutulacaktır. Yorulma deneyi yapılacak parçalar kalıbın tam olarak dolduğu aşamadan elde edilen parçalar olacaktır ve her deney noktası için üç adet parça kullanılacaktır.

- Her deneyde dövme için gerekli kuvvet ve strok bilgisayara aktarılacaktır. Bu işlem için eldeki mevcut bilgisayar otomatik kontrollü hale getirilecektir.

- Farklı iki yöntem ile üretilen parçalara, diş dibinden diş ucuna kadar olan mesafede farklı aralıklar ile mikro-sertlik ölçümleri yapılacak ve ölçüm sonuçları birbiri ile karşılaştırılacaktır.

- Çalışmanın matematiksel modellemesi dövme prosesi için geliştirilecek Üst Sınır Analizi Yöntemi ile yapılacaktır. Bu yöntemde ilk defa önerilecek bir kabul edilebilir hız alanı ile gerekli denklemler oluşturulacak ve sonra bu denklemler bilgisayar yardımı ile çözülecektir (Abdul, N.A., Dean, T.A., 1986).

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMA PROSEDÜRÜ

4.1. GİRİŞ

Tez çalışması sırasında gerçekleştirilen deneyler için gerekli kalıp malzemeleri, bu kalıpların işlenmesi için gerekli işçilik maliyetleri, deneylerde kullanılan alüminyum malzemeler, mevcut presin bilgisayar kontrollü hale getirilmesi için gerekli ekipmanlar, tez kapsamında yürütülen ve maddi olarak Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Fonu tarafından desteklenen "Yanal Ekstrüzyon ile Dişli Benzeri Parçaların İmalatı" isimli TÜBAP-699 numaralı projeden karşılanmıştır.

4.2. YANAL EKSTRÜZYON KALIPLARININ TASARIMI ve ÜRETİMİ

Yanal ekstrüzyon deneylerinde kullanılacak olan kalıplar kimyasal bileşimi Tablo 4.1.'de verilen 1.2344 DIN normlu sıcak iş takım çeliğinden tel erozyon yöntemi ile işletilmiştir. Yanal ekstrüzyon deneyleri için kullanılan alt kalıp yüksekliği, 15 mm.' dir. Bu işlemlerden önce kalıpların sertleştirilmesi amacıyla çeliğe 1040 ^{0}C' de su verilip 550 ^{0}C' de iki saat temperleme yapılmış ve sertlikleri ~ 50 R_C ölçülmüştür. Deneylerde iki dişli ve dört dişli konik alt kalıplar ile iki dişli ve dört dişli düz alt kalıplar kullanılmıştır. Yanal ekstrüzyon kalıpları Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de görülmekte olan kalıp kovanı, üst kalıp, zımba ve alt kalıplardan meydana gelmektedir.

Tablo 4.1. 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
0.37-0.42	0.3-0.5	0.9-1.2	max.0.03	max.0.03	5.0-5.5	1.2-1.5	0.9-1.1



Şekil 4.1. Yanal ekstrüzyon deneylerinde kullanılan konik üst kalıplar, alt kalıp ve zımba



Şekil 4.2. Yanal ekstrüzyon deneylerinde kullanılan düz üst kalıplar, alt kalıp ve zımba

Yanal ekstrüzyon yönteminde kullanılacak olan kalıpların ve zımbanın prese bağlanışı ve deneye hazır hale getirilişini gösteren fotoğraf Şekil 4.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Yanal ekstrüzyon kalıplarının ve zımbanın prese monte edilişi

4.3. KAPALI KALIPLARIN TASARIMI ve ÜRETİMİ

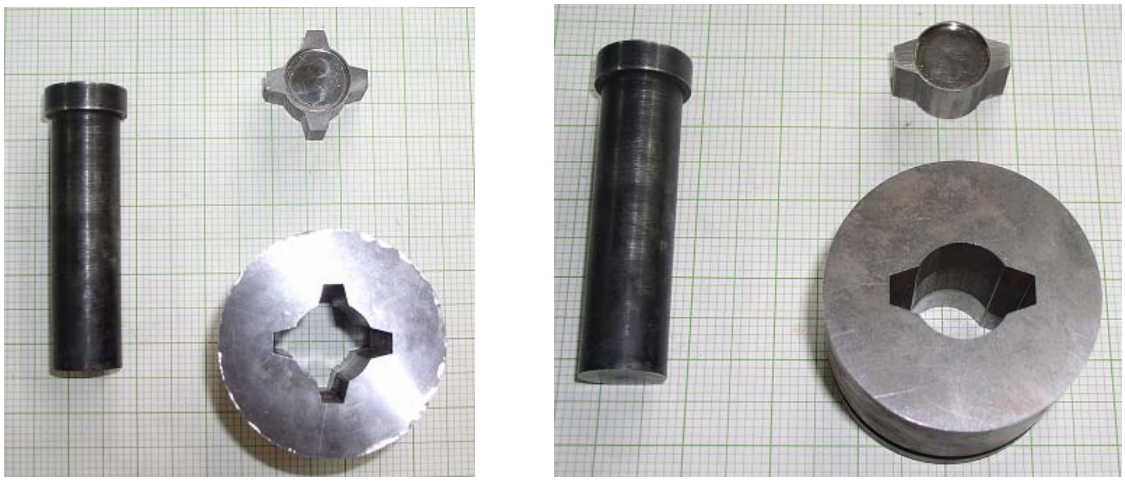
Kapalı kalıpla klasik dövme deneylerinin yapılacağı kalıplar yanal ekstrüzyon deneylerinin yapıldığı kalıplarla aynı malzemeden ve aynı yöntemler kullanılarak imal edilmiştir. Bu deney grubu için imal edilen kalıplarda da iki ve dört dişli benzeri konik üst kalıplar ile iki ve dört dişli benzeri düz üst kalıplar mevcuttur. Ayrıca, üst kalıpların içine geçtiği iki ve dört dişli benzeri konik alt kalıplar ile iki ve dört dişli benzeri düz alt kalıplar da mevcuttur.

Kapalı kalıpla klasik dövme deneylerinde kullanılacak olan alt ve üst kalıplar yanal ekstrüzyon kalıplarıyla aynı biçim ve ölçülere sahiptir. Her iki yöntem sonrası bitmiş parça yüksekliğinin eşit olması koşuluna bağlı kalınarak, kapalı kalıpla klasik dövme deneylerinde kullanılacak deney numuneleri hacim sabitliği esasına göre hazırlanmıştır. Her farklı deney grubu için hacim sabitliği esas alınarak yapılan hesaplar sonrası bulunan ilkel parça yükseklikleri hesaplanmıştır.

Üst kalıpların üst kısımlarında merkezlemeye de olanak sağlaması açısından 2 mm. derinliğinde ve 0.75 mm. et alınlığında oyuklar mevcuttur. Presin üst koçuna monteli şekilde bulunan zımba 23,5 mm. çapında, 80mm. yüksekliğindedir. Zımba açılmış olan bu oyuğun içine girerek pres tarafından uygulanan kuvvetle birlikte üst kalıbı deney numunesinin üzerine doğru hareket ettirmektedir. Söz konusu kalıpların ve zımbanın Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.4. Kapalı kalıp deneylerinde kullanılan iki ve dört dişli düz kalıplar ve zımba



Şekil 4.5. Kapalı kalıp deneylerinde kullanılan iki ve dört dişli konik kalıplar ve zımba

Kapalı kalıpla klasik dövme yönteminde kullanılacak olan kalıpların ve zımbanın prese bağlanışı ve deneye hazır hale getirilişini gösteren fotoğraf Şekil 4.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Kapalı kalıpların ve zımbanın prese monte edilişi

Her iki yöntemin deney sonuçlarının birbiri ile doğru olarak karşılaştırılmasına olanak sağlaması açısından yukarıda da belirtildiği üzere, aynı diş sayısı ve geometriye sahip ekstrüzyon ve dövme kalıplarının çevreledikleri alanlar eşittir.

4.4. DENEY MALZEMESİ ve ÖZELLİKLERİ

4.4.1. Deney Malzemesi

Yanal ekstrüzyon yöntemi deneylerinde ve kapalı kalıpla klasik dövme deneylerinde % 99.7 ticari saflıkta alüminyum kullanılmıştır. Belirtilen alüminyumun kimyasal analizi aşağıda Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan % 99.7 alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi

Si (%)	**Fe (%)**	**Cu (%)**	**Mn (%)**	**Mg (%)**	**Zn (%)**	**Ni (%)**	**Cr (%)**
0.0643-0.0733	0.136-0.174	0.00343-0.00384	0.00265-0.00307	0.00146-0.00401	0.00564-0.00766	0.00046-0.00141	0.00099-0.00123
Pb (%)	**Sn (%)**	**Ti (%)**	**Na (%)**	**Sr (%)**	**V (%)**	**Zr (%)**	**Al (%)**
0.00008-0.00040	0.00004-0.00152	0.00479-0.00520	0.00014-0.00072	<0	0.0129-0.0247	0.00015-0.00040	**99.71-99.77**

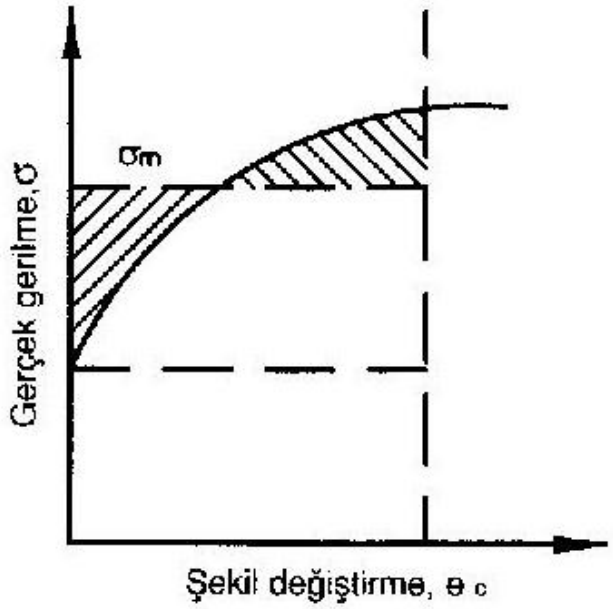
4.4.2. Deney Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Alüminyum kendine özgü özellikleriyle, çok eski zamanlardan beri demir ve çelik gibi bir çok malzemeden fazla önem kazanmıştır. Saf alüminyumun genel özellikleri şöyle sıralanabilir;

- Saf alüminyum hafif bir malzemedir. Aynı hacimdeki bir çelik malzemenin ağırlığının ancak üçte biri kadar ağırlıktadır. Düşük yoğunluklu bir malzeme olmasından dolayı dayanım/yoğunluk oranı yüksektir.
- Çeşitli alüminyum alaşımlarının mukavemeti, normal yapı çeliğinin mukavemetine denk veya daha yüksek olmasına karşın saf alüminyum düşük mukavemet ve akma sınırına sahiptir..
- Alüminyum elastik bir malzemedir. Bu nedenle ani darbelere karşı dayanıklıdır.
- Alüminyum, işlenmesi kolay bir metaldir.
- Alüminyuma şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi tüm metotlar uygulanabilir. Ancak saf alüminyumun kaynak ve lehimleme kabiliyeti düşüktür.
- Saf alüminyum iyi ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir.

Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin akma sınırının belirlenmesi amacıyla yapılan çekme deneyi sonucunda malzemenin çekme gerilmesi $\sigma_ç$ = 151 MPa

olarak bulunmuştur. Sunulan tezde yanal ekstrüzyon prosesi için seçilen malzeme yukarıda da belirtildiği üzere %99,7 ticari saflıkta alüminyum olup bilindiği gibi pekleşen bir malzemedir. Bu sebeple gerilme-genleme arasındaki ilişki $\sigma=K\varepsilon^n$ şeklinde verilmektedir. Gerçek gerilmenin şekil değişimi ile birlikte artması, hesaplama kolaylığı açısından bir ortalama akma sınırı (σ_m) tarif edilmesi ihtiyacını doğurmuştur (Şekil 4.7. Çapan, L., 1999). Bu doğrultuda, literatür değerleri ve prosesteki genleme miktarları da göz önüne alınarak malzemenin ortalama akma gerilmesi σ_m=112 MPa olarak belirlenmiş ve konik form için geliştirilen matematiksel modellemenin teorik hesaplamalarında bu değer kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Ortalama Akma Sınırının Bulunması (Çapan, L., 1999)
(Taralı alanlar eşittir)

4.4.3. Deney Malzemesinin Deneylere Hazır Hale Getirilmesi

Hacim sabitliğine bağlı kalarak, her iki yöntemde de maksimum doluluktaki diş yüksekliğinin 15 mm. olacağı düşünülmüştür. Özel olarak %99,7 saflıkta 30 mm. çapında borulara döktürülen alüminyum çubuklar kesme ve tornalama işlemi ile deneyler için olması gereken ölçülere işlenmiştir. İşlenen deney numunelerinin ilkel

parça çapları 25 mm.'dir. Yükseklikleri ise; hacim sabitliği hesabı ve maksimum kalıp doluluğu düşünüldüğünde aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\frac{\pi D_{ilkelparça}^2}{4} * h_{\max.doluluk} = Alan_{kal.} * 15$$

yukarıdaki denklem kullanılarak kapalı kalıpla dövmede kullanılacak deney malzemesinin ilkel parça yükseklikleri;

iki dişli düz form için, $L_{k1} = 21{,}80$ mm.

dört dişli düz form için, $L_{k2} = 21{,}80$ mm.

iki dişli konik form için, $L_{k3} = 19{,}50$ mm.

dört dişli konik form için, $L_{k4} = 20{,}90$ mm.

ölçülerinde işletilmiştir.

Yanal ekstrüzyon deneylerinden sonra elde edilen net veya nete yakın ölçülere sahip bitmiş parça yükseklikleri kapalı kalıpla dövme yöntemindeki yüksekliklere eşittir. Ancak, yanal ekstrüzyon sonrasında ürünün finiş boyutundan başka sap kısmı da bulunmaktadır. Bu yüzden, her deney grubu için ilkel parça çapları 45 mm. işlenmiştir.

4.5. DENEYLERDE KULLANILAN HİDROLİK PRES

4.5.1. Hidrolik Presler

Hidrolik presler yük sınırlı makineler grubunda olup, dövme işlemi yapabilme kabiliyetleri maksimum yük kapasiteleri ile sınırlandırılmıştır. Strok boyunca her konumda maksimum kuvvet elde edilebileceği için bu makineler bütün strok boyunca hemen hemen sabit kuvvet gerektiren ekstrüzyon tipi şekillendirme işlemlerine uygundur (Alexander, J.M., Lengyel, B., 1964). Deneylerde kullanılan hidrolik presin fotoğrafı Şekil 4.8.'de gösterilmektedir. Manüel kontrollü preslerde genellikle, hidrolik motoru çalıştıran ve durduran iki adet buton vardır. Presi kullanmak için öncelikle ana motor çalıştırılır. Daha sonra hareketli üst koçu aşağı ve yukarı doğru hareket ettiren butonlar kullanılarak, koçun konumu deney malzemesine uygun konuma getirilir. Koçun hareketini sağlayan pistona verilen hidrolik yağ ile oluşan basıncın değeri bir manometreyle okunarak uygulanan baskı kuvveti hakkında fikir sahibi olunur. Deney parametreleri dolaylı yöntemlerle ölçülerek kuvvet-strok diyagramının çizilmesinde epey sorun teşkil etmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmayla yukarıda bahsedilen işlemlerin tümünün kontrolünün bilgisayara devredilmesi sağlanmıştır. Yapılan yeni yazılım sayesinde maksimum kuvvet ve strok değerleri sınırlandırılarak deneylerin güvenle yapılmasına olanak sağlanmıştır. Pres üzerinde yapılan çalışmanın sağladığı bir diğer avantaj ise deney parametrelerinin her deney için ayrı ayrı dosyalara kaydedilmesi ve kuvvet-stok diyagramlarının otomatik olarak çizilebilmesidir. Aşağıda presin bilgisayar kontrollü hale getirilmesi detaylı olarak anlatılmaktadır. Yanal ekstrüzyon deneyleri ve kapalı kalıpla klasik dövme deneyleri belirtilen hidrolik preste gerçekleştirilirken, hidrolik presin üst koçunun aşağı doğru hareketi sırasında belirtilen her stroka karşılık ölçülen kuvvet değerleri kaydedilmiştir (Kuşçu, H. ve diğ., 2006)

4.5.2. Hidrolik Presin Bilgisayar Kontrollü Hale Getirilmesi İşlemleri

Tez çalışmasında yapılan deneyler fotoğrafı Şekil 4.8.'de görülmekte olan Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi atölyesinde bulunan 150 metrik ton kapasiteli, 5 mm/sn koç hızlı bir hidrolik pres kullanılarak yapılmıştır.



4.8. Deneylerde kullanılan ve bilgisayar kontrollü hale getirilmiş pres

Bu presin içinde, elektrik motoruyla tahrik edilen, maksimum 300 bar basınç yapan bir yağ pompası mevcuttur. Koçun aşağı ve yukarı hareketleri butonlara bağlı 2 adet 220 volt 50Hz solenoid valflarla kontrol edilmektedir. Böylece modernize edilen bu presin kumanda panosunda toplam 4 adet buton mevcuttur (ikisi ana motoru çalıştırıp durduruyordu, diğer ikisi ise koçun aşağı ve yukarı hareketini sağlıyordu). Bu çalışmayla, mevcut kumanda panosuna Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi iki konumlu bir anahtar (swich) konularak prese yeni özellikler kazandırılmıştır.



Şekil 4.9. Presin kumanda panosu

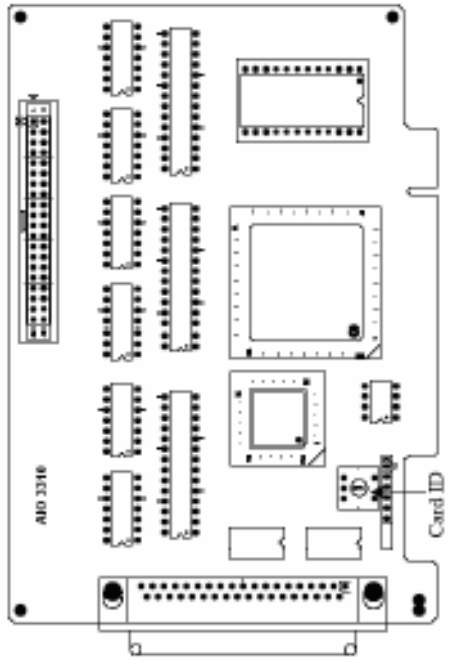
Anahtar “Manüel” konumdayken presin eski haliyle yani butonlarla kontrol edilmesine imkan sağlanmıştır, “Automatic” konumdayken ise tüm kontrollerin bilgisayara devredilmesi sağlanmıştır. Ayrıca kumanda panosuna iki adet 9 pinlik bilgisayar konektörü eklenerek presin bilgisayar ile bağlantısı sağlanmıştır. Bir numaralı konektör üzerinden ana motorun durdurulup çalıştırılması ile koçun aşağı ve yukarı hareketlerini kontrol eden devreler ile tasarlanan röle kontrol kartıyla iletişim sağlanmaktadır. İki numaralı konektör üzerinden ise basınç-akım transducerinden alınan basınç bilgisiyle rotasyon enkoderinden alınan konum bilgileri bilgisayarın I/Q kartına iletilmektedir. Baskı silindirin kesiti sabit olduğundan ve basit kuvvetle orantılı olacağından presin uyguladığı kuvvet miktarını ölçmek için hidrolik pompa çıkışındaki basıncının ölçülmesi yeterli olacaktır. Ölçülen bu basınç değerini değerlendirmek üzere bilgisayara Şekil 4.10.’da gösterilen 0-400 barı 4-20 mA’ e dönüştüren basınç akım çeviricisi kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Basınç akım çeviricisi

Bu sensörde 0-400 bar arasındaki basınç 4-20 mA’ e çevrilmektedir. Bu basınç dolayısıyla da kuvvet bilgisini bilgisayara iletebilmek için, PCI slotuna takılan Şekil.4.11.’ de gösterilen AIO-3310 I/Q kartı kullanılmıştır. Basınç akım çeviricisinin

ürettiği 4-20 mA' lik çıkış sinyali I/Q kartının analog girişine verilebilmesi için 0-10 volta dönüştürülmüştür.



Şekil 4.11. AIO-3310 Analog / Dijital I/Q kartı

Koçun hareket miktarı Şekil 4.12.'de gösterilen rotasyon enkoder yardımıyla okunabilmektedir. Şekil 4.13.'te görülen bir makara düzeneği yardımıyla koçun her 1 milimetrelik hareketine karşılık enkoderin çıkışında 2 pals elde edilebilecek şekilde kasnaklar boyutlandırılmıştır. Bu pals bilgileri bilgisayarın ISA slotuna takılan Şekil.4.14.'te gösterilen enkoder okuma kartına iletilmektedir.



Şekil 4.12. Konum bilgisini okuyan enkoderin görünümü

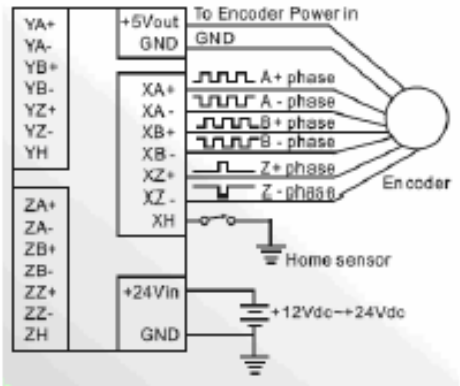


Şekil 4.13. Enkoder-makara sisteminin görünümü

Enkoder ile kart bağlantısı Şekil 4.15.' te gösterildiği şekliyle bağlanmıştır. Böylece bu kart yardımıyla konum bilgisi yazılıma iletilmektedir.

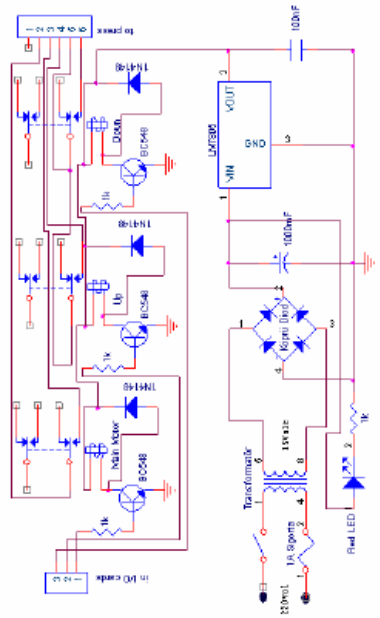


Şekil 4.14. Enkoder değerlerini okuyan kartın görünümü



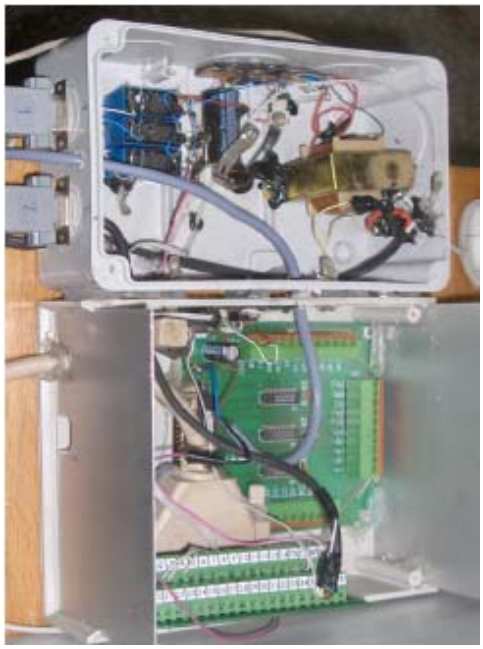
Şekil 4.15. Enkoder bağlantısının prensip şeması

Yazılımın ürettiği kontrol çıktıları presin elektrik devrelerini kumanda edebilmesi için Şekil 4.16.' da gösterilen röle kontrol kartı yapılmıştır.



Şekil 4.16. Röle kontrol kartı

Röle kontrol kartının standart bir kutu içine yerleştirilmiş görünümü Şekil.4.17.'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Role kontrol kartının görünümü

Tez kapsamında yürütülen ve yukarıda bahsedilen bu düzenlemelere bağlı olarak; daha önce sadece butonlarla kontrol edilen mevcut presin tüm fonksiyonlarının

bilgisayar ile hassas bir şekilde kontrol edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, deney esnasındaki kuvvet ve strok değerleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Prese kazandırılan diğer bir özellik ise, deney esnasında tanımlanan maksimum kuvvet veya strok değerine ulaşıldığında presin otomatik olarak emniyetli bir şekilde durmasıdır (Kuşçu, H. ve diğ., 2006).

4.6. EĞİLME YORULMASI DENEYLERİ

4.6.1. Amaç

Dişe etkiyen ve dişin dayanımını belirlemekte kullanılan tek yönlü eğilme yüklemesi bu tip eğilme yorulması işleminin başlıca amacıdır. Yapılan deney, üretim yöntemi, hammadde geometrisi ve malzeme gibi parametrelerin ürünün dayanımına etkilerinin belirlenmesi açısından son derece uygundur.

Normal dişli deneyleri hem oldukça pahalıdır, hem de zaman kaybına yol açar. Fazla yükleme halinde dişli kırılabileceği gibi, eksenden hafif kaçıklıkta sonuçların yanlış analiz edilmesine yol açar. Eğilme yorulması deneylerinin yapılışında dönme hareketinin olmaması için aparatlar yapılmış ve herhangi bir dönme hareketinin olmadığı bir deneyin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bu deneylerde; kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi ile üretilen düz ve konik dişli benzeri taslaklar ile yanal ekstrüzyon yöntemi ile üretilen düz ve konik dişli benzeri taslakların mukavemetinin üzerine etkilerinin araştırılması düşünülmüştür. Alt bölümlerde ise, eğilme yorulması deneyinin ayrıntıları ve deney aparatı hazırlama kısmı anlatılacaktır.

4.6.2. Test Makinesi ve Aparatları

Yapılan tez çalışmasındaki eğilme yorulması deneyleri yukarıda Şekil 4.18.'de görülen 0.5-50 Hz frekans aralığında çalışan 50 kN kapasiteli INSTRON 8501

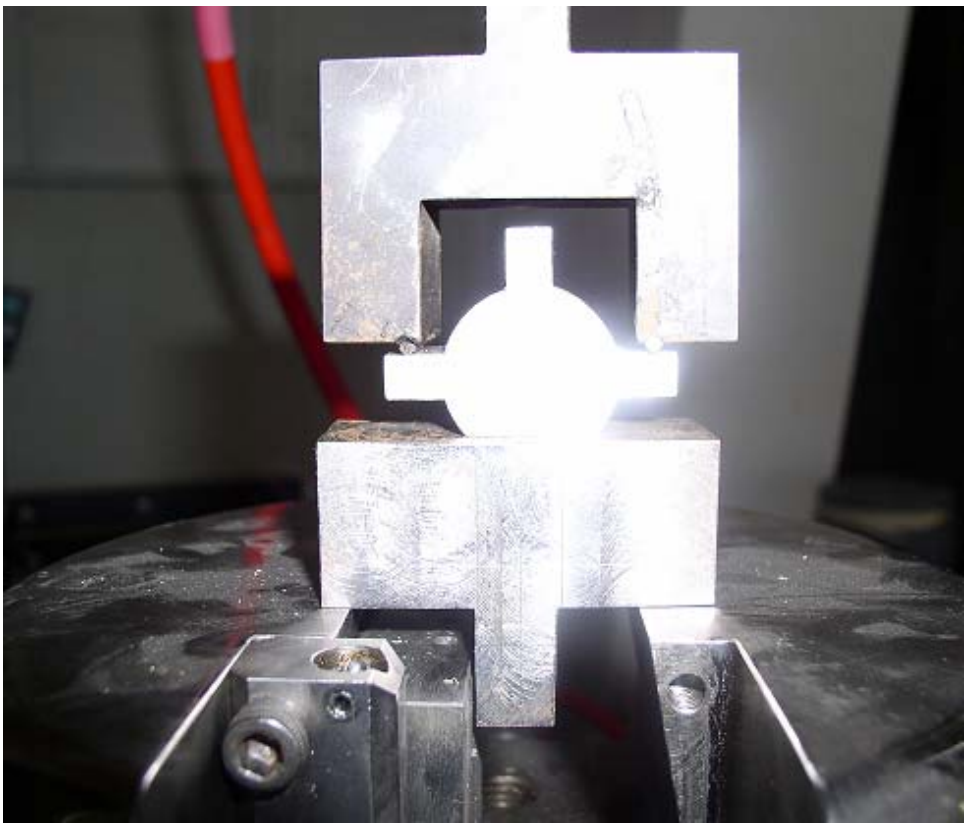
Üniversal test cihazında yapılmıştır. Yorulma deneyleri yapılırken iki farklı üst aparat ile bir alt aparat yaptırılmıştır. Şekil 4.19.'da fotoğrafları görülen yorulma deney aparatları 1.2344 DIN normlu sıcak iş takım çeliğinden imal edilerek 1040 ^{0}C' de yağda su verilmiş ve 550 ^{0}C'de temperlenerek ~52 R_C sertlik ölçülmüştür. Şekil 4.20.'de ise eğilme yorulması deney düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 4.18. INSTRON 8501 Üniversal test cihazı



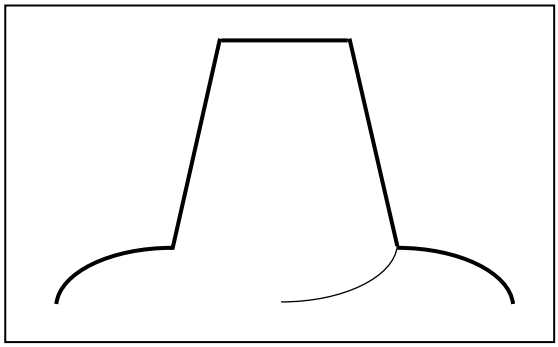
Şekil 4.19. Eğilme yorulması deney aparatları



Şekil 4.20. Eğilme yorulması deney düzeneği

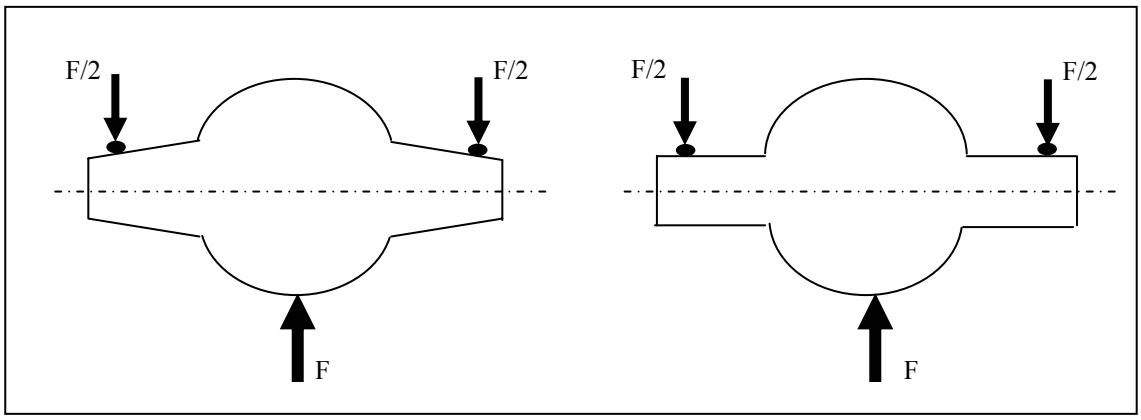
4.6.3. Yükleme Noktası

Elde edilen deney sonuçlarının sağlıklı bir biçimde yorumlanması açısından dişli benzeri taslakların dişlerinin yükleme yeri oldukça önemlidir. Üstelik gerilme, diş dibindeki kritik bir noktada oluştuğundan bu durum yükleme noktasının yerinin doğru olarak tespiti ile yakından ilgilidir (Shigley, J. E., 1977). Klasik eğilme yorulması sonucu diş dibi kırılması Şekil 4.21.'de görülmektedir. Hasar tipleri arasında yer alan kırılma aniden ortaya çıkar ve dişlinin işlev görmemesini sağlar. Kırılma pek çok değişik sebepten dolayı oluşabilir. Bunların en yaygınları; klasik eğilme yorulması, aşırı yükleme ve rasgele kırılmadır. Klasik eğilme yorulması hasarı, dişlinin en çok yorulmaya maruz kaldığı diş dibinde ortaya çıkar ve bu hasara aşırı yükleme veya malzemenin akma sınırını aşmış olan bir çevrim gerilmesi sebep olabilir.



Şekil 4.21. Klasik eğilme yorulması sonucu diş dibi kırılması

Üst taraftan konik dişlilere basma kuvveti uygulayan aparatta aralarında 31,8 mm. mesafe olan iki adet kanal açılarak 2 mm. çapında iki adet pim bu kanallara yapıştırılmıştır. Düz dişlilere basma kuvveti uygulayan aparatta ise aralarında 34,8 mm. mesafe olan iki adet kanal açılmış ve bu kanallara da 2 mm. çapında iki adet pim yapıştırılmıştır. Bu şekilde dişliler üzerine kuvvetin tek bir noktadan etkimesi sağlanmıştır. Şekil 4.22.'de dişe etkiyen kuvvetler gösterilmektedir.

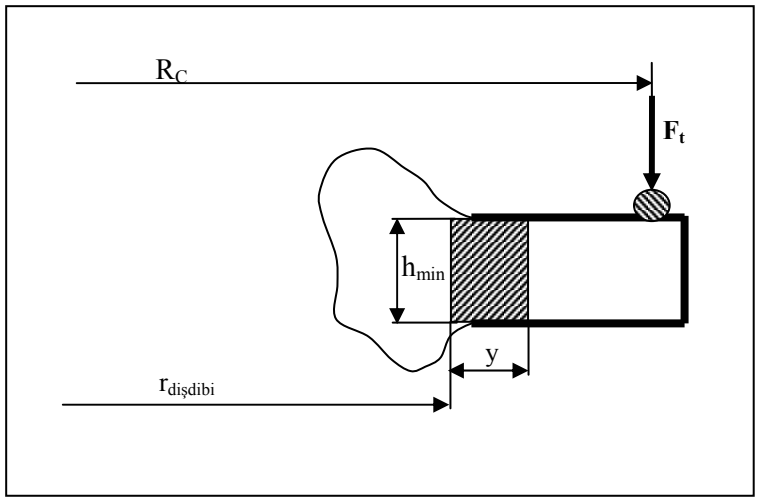


Şekil 4.22. Eğilme yorulmasındaki kuvvetlerin gösterimi

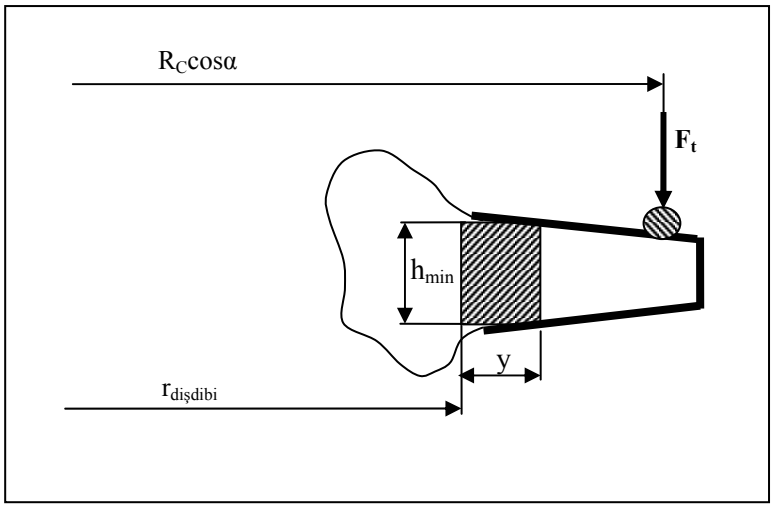
4.6.4. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri yukarıda açıklanan cihaz ve aparatlarla, yük, belirlenen yük noktasına gelecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler iki ayrı gruptaki deney

parçalarına uygulanmıştır. Birinci grup parçalar; kapalı kalıpla klasik dövme ile iki ve dört dişli düz ve konik dişli benzeri taslakların üretildiği parçalardır. İkinci grup parçalar ise; yanal ekstrüzyon yöntemi ile iki ve dört dişli düz ve konik dişli benzeri taslakların üretildiği parçalardır. Yanal ekstrüzyon parçalarının yorulma deneyleri yapılırken sap kısımları kesilmiştir.



Şekil 4.23. Düz dişli benzeri formun tek dişinin şematik yükleme durumu

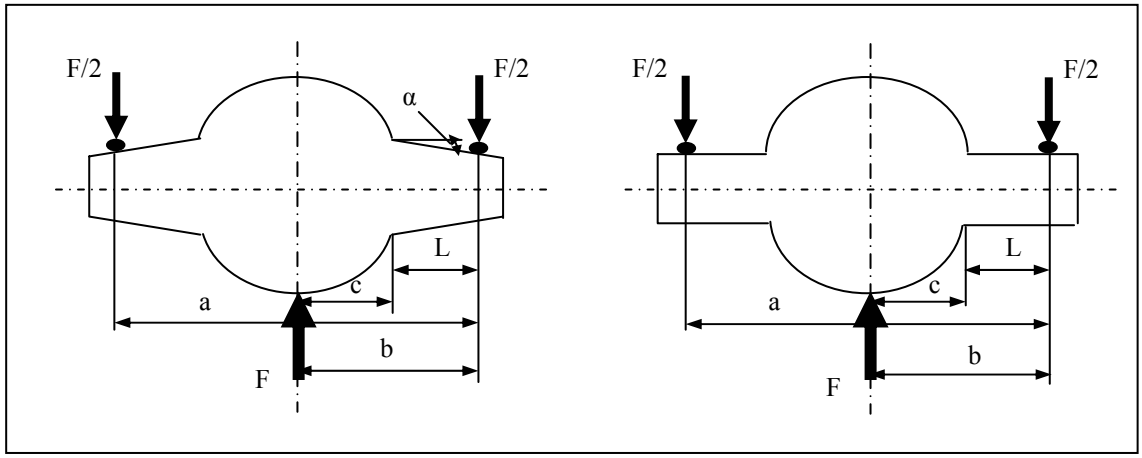


Şekil 4.24. Konik dişli benzeri formun tek dişinin şematik yükleme durumu

Şekil 4.19.'da gösterilen eğilme yorulması aparatlarında, deney tezgahı tarafından tek dişe uygulanan kuvvet Şekil 4.22.'deki gibi $F_t = F/2$ değerindedir.

Böylece diş, bu kuvvet etkisinde dibinden eğilmeye ve kırılmaya zorlanacaktır. Dişliler bir ucu mesnetli bir çubuk olarak kabul edilebileceğinden farklı geometrideki dişler Şekil 4.23. ve 4.24.'de gösterildiği gibi yüklenecek ve eğilecektir. Uygulanan yük etkisinde maksimum gerilme diş dibinde oluşacaktır. Eğilme gerilmesini; $W_{eğ}$ eğilme mukavemet değeri olmak üzere,

$\sigma_{eğ} = \frac{M_{eğ}}{W_{eğ}}$ olarak yazmak mümkündür.



Şekil 4.25. Deneysel çalışmada esas alınan dişli benzeri ürün geometrisi

Şekil 4.25.'deki gibi belirlenen parça geometrilerine ve diş dibi mesafelerine bağlı olarak $M_{eğ}$ farklı değerler almaktadır. Bu değerler belirlenerek aşağıda verilmiştir.

$b = \frac{a}{2}$, $L = b - c$ olmak üzere,

$M_{eğ} = \frac{F}{2} * L = F_t * L$ ise,

İki dişli düz bitmiş ürün için ; $M_{eğ2düz}$ = Ft * 6,575

Dört dişli düz bitmiş ürün için ; $M_{eğ4düz} = Ft * 5,235$

İki dişli konik bitmiş ürün için ; $M_{eğ2konik} = Ft * \cos\alpha * 4,910$

$\alpha = 15^0$ olduğundan ; $M_{eğ2konik} = Ft * 4,748$

Dört dişli konik bitmiş ürün için ; $M_{eğ4konik} = F_t * \cos\alpha * 4,445$

$\alpha = 15^0$ olduğundan ; $M_{eğ4konik} = F_t * 4,293$ olarak bulunur.

$W_{eğ} = \frac{I}{c} = \frac{yh_{\min}^2}{6}$ formülü ile eğilme mukavemeti değeri parça geometrilerine bağlı olarak hesaplanabilir.

$$\sigma_{eğ2düz} = \frac{F_t * 39,450}{y * h_{\min}^2} ,$$

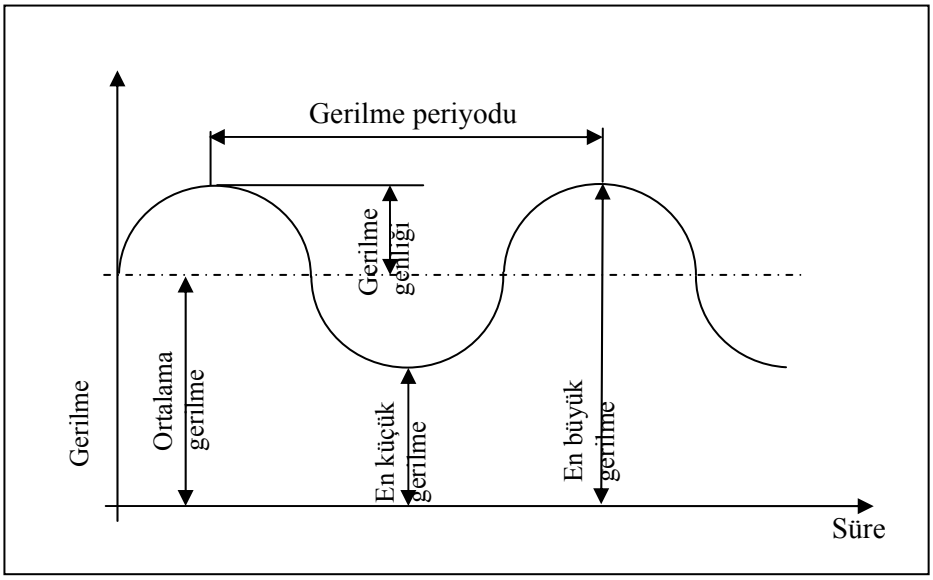
$$\sigma_{eğ4düz} = \frac{F_t * 31,410}{y * h_{\min}^2} ,$$

$$\sigma_{eğ2konik} = \frac{F_t * 28,488}{y * h_{\min}^2} ,$$

$$\sigma_{eğ4konik} = \frac{F_t * 25,758}{y * h_{\min}^2}$$

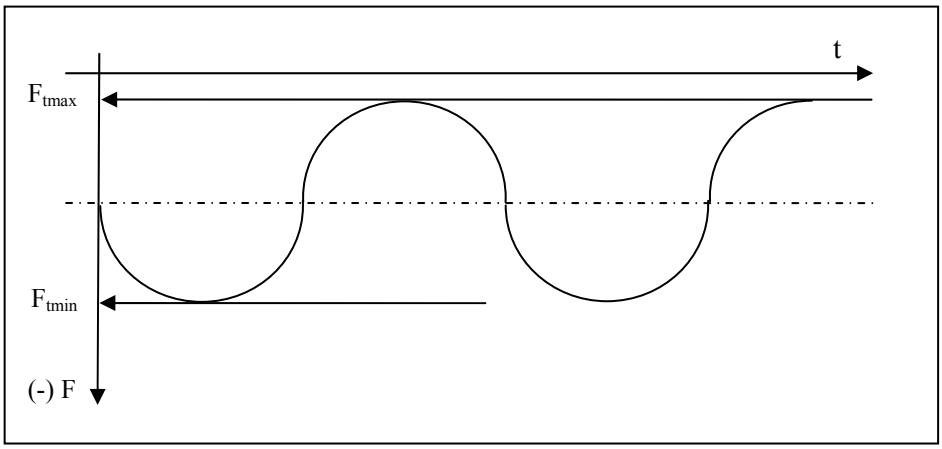
denklemlerine göre eğilme gerilmeleri hesaplanmaktadır. Yapılan deneylerin hassas olması amacıyla her deneyden önce "h_{min}" ve "y" değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Malzemenin çekme gerilmesine bağlı olarak tahminen tespit edilmiş gerilme değerleri

eşitlikte yerine konarak, uygulanacak kuvvet değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.26.'da yorulmada kullanılan değişkenlerin tanımı verilmektedir.



Şekil 4.26. Yorulmada kullanılan değişkenlerin tanımı (Savaşkan, T., 2000)

Bir ön basma gerilmesine tabi tutulan numunelerde σ_{ort} ile σ_g arasındaki fark sabit kalacak şekilde eşdeğer gerilme ifadesi $\sigma_{ort} \pm \sigma_g$ olarak uygulanmıştır. Amaçlanan yükleme hali, parçanın her bir çevrimde basma yükü ve yüksüz halde olması iken, parçaların yükleme aparatlarından kurtulmaması amacı ile F_{tmax} = -0,125 kN' luk bir yükün her çevrimde maksimum yük olmasına karar verilmiştir.



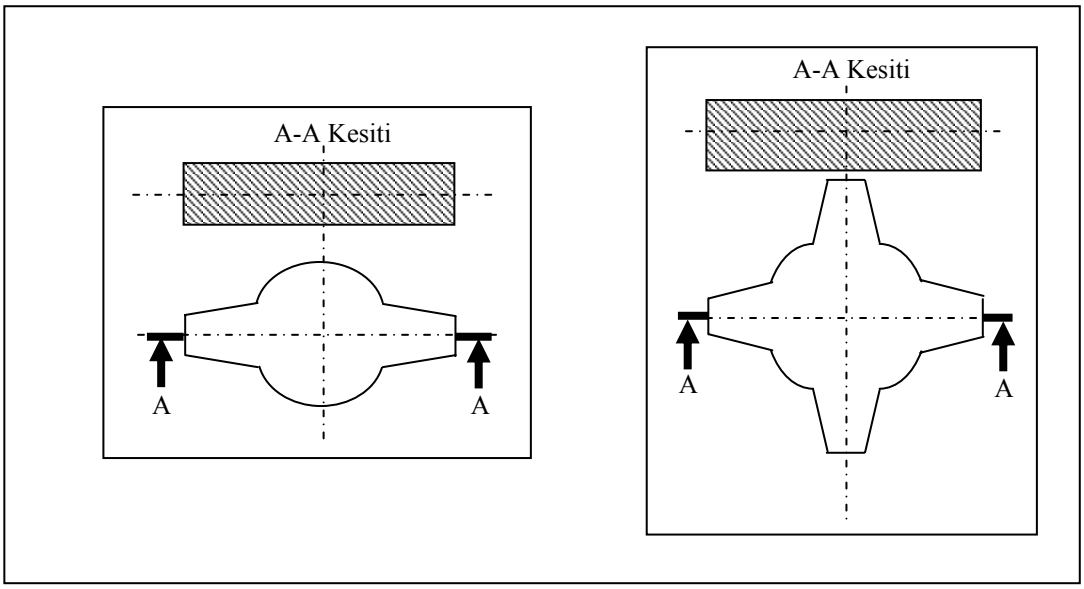
Şekil 4.27. Yorulma deneylerinde uygulanan yükleme halleri örneği (Altınbalık, T., 2000)

Örnek olması amacıyla uygulanan yükleme hali yukarıda Şekil 4.27.'de verilmiştir. Böylece parça F_{tmax} ve F_{tmin} değerlerinde daima basma kuvvetine maruz kalmıştır (Altınbalık, T.,2000).

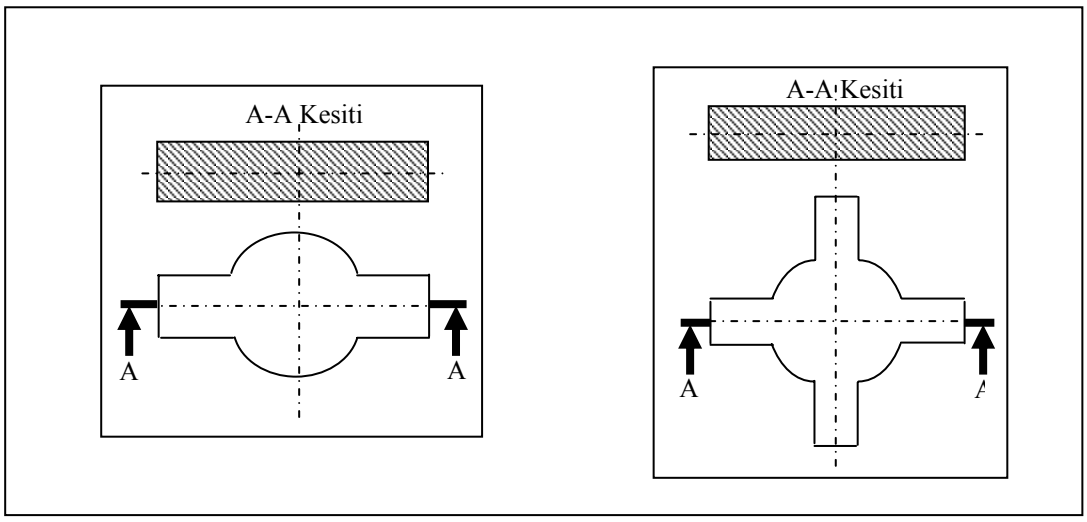
Tezde yapılan üç noktadan eğme üzerinden tek diş eğilme yorulması deneylerinde, diş dibi eğilme gerilmesi hesaplarının bulunmasında ve deney aparatlarının hazırlanmasında Akata, E. ve diğ. (2004) isimli çalışma referans olarak alınmıştır.

4.7. MİKRO-SERTLİK DENEYLERİ

Kapalı kalıpla klasik dövme ve yanal ekstrüzyon deneylerinden sonra elde edilen finiş boyutuna sahip bitmiş ürünler mikro-sertlik deneylerine tabi tutulmuştur. Mikro-sertlik ölçümü deneyleri, konik ve düz dişli benzeri taslakların Şekil 4.28. ve Şekil.4.29.'da gösterildiği gibi parça boyu doğrultusunda ortadan ikiye kesilerek diş dibinden diş ucuna kadar olan mesafede çok küçük aralıklarla sertliklerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sertliği ölçülecek ürünlerin yüzeyleri %0,5 HF (Hidroflorik asit) içeren kimyasal madde ile parlatıldıktan sonra Brinell test metodu ile ölçümler yapılmıştır. Yapılan mikro-sertlik ölçümlerinde numune üzerine ölçüm için 9,807 N'luk bir yük uygulanmıştır.



Şekil 4.28. Ortadan kesilmiş iki ve dört dişli konik formlar



Şekil 4.29. Ortadan kesilmiş iki ve dört dişli düz formlar

BÖLÜM 5.

KUVVET VE ENERJİ YAKLAŞIMLARI

5.1. GİRİŞ

Metal biçimlendirmenin karakteristiği oldukça karmaşıktır. Bu yüzden üç boyutlu gerçek biçimlendirme prosesleri için tam bir matematiksel sonuç elde etmek zor olur. Eğer deformasyon hacminde gerilme ve genleme oranı bulunabilirse bir metal biçimlendirme prosesi için tam bir çözüm elde edilebilir. Bunun için bazı araştırmacılar tarafından metal biçimlendirme problemlerini çözmek amacıyla bazı analitik ve nümerik metotlar kullanılmıştır. Metal şekillendirmenin hesabı için gerilme ve genleme alanlarını ve metal akışını tahmin etmeye yönelinmiştir. Bilim adamları ve mühendisler tarafından tercih edilen metotlar, dilim metodu, kayma çizgileri metodu, sınır analizi, sonlu eleman analizi, sonlu farklar ve sınır elemanı metotlarıdır. Dilim metodu; metal akış yönüne dik olan bu dilim ölçülmeyecek kadar küçük bir doğru içinde veya eğride metal deformasyonlarını göz önünde tutar. Etkiyen kuvvetler dilim üstüne yerleştirilir ve bu sonuçlar statik dengenin farklı bir denklemi içindedir. Doğruluk çok yüksek değilse de, metot hızlı hesap elde etmeye yarar. Kayma çizgileri metodu metal biçimlendirme prosesleri için gerilme ve genleme dağılımını bulur. Fakat bu sadece düzlem genleme için uygundur. Bu metotta, plastik akış, kayma çizgisi diye adlandırılan çizgiler ile sunulan düzlemler boyunca kayma deformasyonu ile temsil edilir. Kayma çizgisi analizi düzlem genleme problemleri için bile çok uzun ve yorucudur. Sonlu farklar metodu genellikle sıcaklık dağılımını hesaplamak için kullanılabilir. Sonlu elemanlar metodu nümerik bir metottur ve metal biçimlendirmeye spesifik değildir (Maccarini, G. ve diğ., 1991). Bilgisayar sistemlerindeki ve nümerik metotlardaki gelişmeler daha doğru sonuçları geliştirmek için kullanımlarını daha geçerli hale getirmiştir. Metal biçimlendirmenin sonlu eleman analizi daha doğru gerilme ve genleme dağılımını bulurken, bilgisayar zamanı ise uzundur. Ayrıca sonlu elemanların hassasiyeti verilen dataların da hassasiyetine oldukça bağlıdır (Çan, Y., 1998).

Limit analizi alt sınır ve üst sınır olmak üzere ikiye ayrılır. Temeli makul bir gerilme alanı olan alt sınır çözümü gerçek değerinden daha az ve eşit olmayan bir doğru alır. İlk önce Prager ve Hodge (Prager, W., 1951) tarafından tanıtılan Üst Sınır Metodu, plastik olarak deforme olan hacimdeki hız alanları ile giderilmesi gerekli şartların önemini içerir. Malzeme hareketinin matematik sunumu olan kinematik olarak kabul edilebilir hız alanı plastik bölgede önemli bir fikir meydana getirir. Öyle ki, plastik olarak deforme olacak kısım içerisinde deformasyonu sağlayabilmek için dış kuvvetlerde yapılan iş, iç enerji ihtiyacına eşit olmalıdır.

Kinematik olarak kabul edilebilir hız alanı bileşenleri ve onların birinci türevleri kayma yüzeylerinin dışında sürekli olmalı ve sınır şartlarını sağlamalıdır.

Kinematik olarak kabul edilebilir hız alanları boyunca, gerçek olan deformasyon sırasında güç dağılımı küçüktür. Eğer gerçek hız alanı hesaplanabilirse, enerji doğru olarak tahmin edilebilir. Kinematik olarak yapılan gerçek yüzünden, makul hız alanı çeşitli metal biçimlendirme problemlerinin çözümü için Üst Sınır Metodunun farklı geometrisini kullanan çoğu araştırmacı için gerilme alanından daha kolaydır.

5.2. ÜST SINIR METODUNUN FORMÜLASYONU

Üst sınır metodunu ifade etmede sıra ile aşağıdaki kabuller yapılır,

- Malzeme izotropik ve sıkıştırılamazdır.
- Elastik deformasyon ve atalet kuvvetleri yoktur.
- Malzeme Levy-Mises ve von Mises kriterlerini sağlamaktadır.
- Malzeme pekleşmeyen rijit plastiktir.
- Malzemenin akma sınırı sabittir.

Toplam güç, ideal deformasyon, sürtünme direncini yenme ve iç kaymaya sebep olmak için gerekli güç ihtiyacının toplamı olarak kabul edilebilir. Eğer proseste tel çekmede olduğu gibi bir geri çekme varsa bu sebeple geri çekme için uygulanan güç, toplam güçten çıkartılmalıdır (Çan, Y., 1998).

5.3.1. İdeal Deformasyon Enerjisi

Von Misses malzemesi için iş oranı şöyle yazılabilir,

$$\dot{\omega} = \sigma_{11}\dot{\varepsilon}_{11} + \sigma_{22}\dot{\varepsilon}_{22} + \sigma_{33}\dot{\varepsilon}_{33} + 2\left(\sigma_{12}\dot{\varepsilon}_{12} + \sigma_{23}\dot{\varepsilon}_{23} + \sigma_{31}\dot{\varepsilon}_{31}\right) \quad (5.1.1)$$

bu tensor notasyonunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{\omega} = \sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (5.1.2)$$

Gerilme tensörü keza gerilme deviatörü ve hidrostatik gerilme şeklinde yazılabilir.

$$\dot{\omega} = \left(S_{ij} + S\,\delta_{ij}\right)\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (5.1.3)$$

S_{ij}, gerilme deviatör tansörü,

ε_{ij}, genleme hızı tansörü,

δ_{ij}, birim tansördür. Böylece (5.1.3) denklemi aşağıdaki şekilde genişletilebilir.

$$\dot{\omega} = \left(S_{11} + S\right)\dot{\varepsilon}_{11} + \left(S_{22} + S\right)\dot{\varepsilon}_{22} + \left(S_{33} + S\right)\dot{\varepsilon}_{33} + 2\left(S_{12}\dot{\varepsilon}_{12} + S_{23}\dot{\varepsilon}_{23} + S_{31}\dot{\varepsilon}_{31}\right) \quad (5.1.4)$$

$$\dot{\omega} = S_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} + S\,\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (5.1.5)$$

Plastik deformasyonda hacim sabitliği denklem (5.1.5) deki gibi tanımlanabilir.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33} = 0 \quad (5.1.6)$$

Böylece (5.1.4) eşitliği aşağıdaki hali alır.

$$\dot{\omega} = \left(S_{11}\right)\dot{\varepsilon}_{11} + \left(S_{22}\right)\dot{\varepsilon}_{22} + \left(S_{33}\right)\dot{\varepsilon}_{33} + 2\left(S_{12}\dot{\varepsilon}_{12} + S_{23}\dot{\varepsilon}_{23} + S_{31}\dot{\varepsilon}_{31}\right) \quad (5.1.7)$$

Son eşitlik tansör notasyonuna göre,

$$\dot{\omega} = S_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (5.1.8)$$

halini alır. Von-Misses akma kriterine göre gerilme deviatörünün ikinci inveryantı belirli bir değere ulaştığında, yani malzemenin basit kaymada akma sınırı olan k değerine ulaştığında akma başlayacağından, genleme hızı bileşenleri yerine konarak,

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = k^2 \tag{5.1.9}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{kl}\dot{\varepsilon}_{kl}}}{k}\dot{\varepsilon}_{ij} \tag{5.1.10}$$

böylece,

$$\dot{\sigma} = \frac{1}{k} S_{ij} S_{ij} \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \tag{5.1.11}$$

denklem (5.1.9) daki von Mises akma koşulu yerine konduğunda,

$$\dot{\sigma} = 2k \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \tag{5.1.12}$$

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \tag{5.1.13}$$

$$\dot{\sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}} \tag{5.1.14}$$

σ_0 malzemenin akma gerilmesidir.

Temas alanı altında metalde iç enerji ihtiyacı (5.1.14) eşitliğinin deformasyon hacmi üzerinden integrasyonu ile elde edilir.

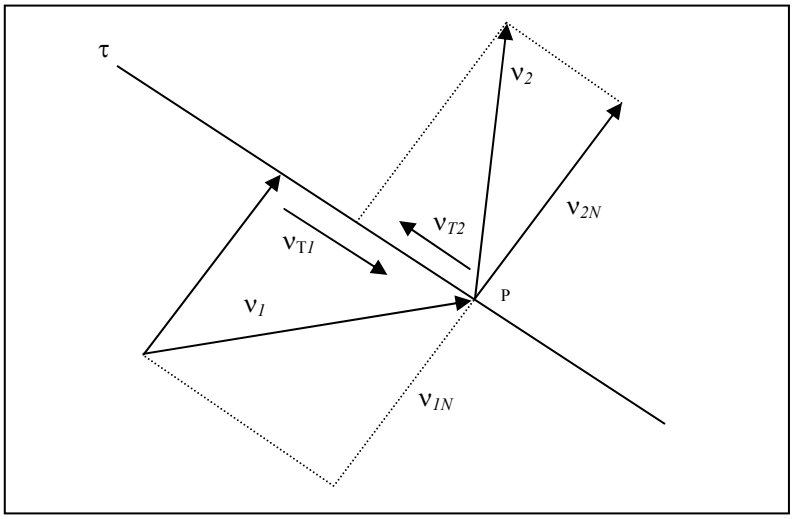
$$\dot{W}_D = \int_V \dot{\sigma}\, dV \tag{5.1.15}$$

V deformasyon bölgesinin hacmidir.

$$\dot{W}_D = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \int_V \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}\, dV \tag{5.1.16}$$

5.2.2. Kayma Enerjisi

Tüm deformasyon bölgesinde hız alanı için tek bir matematiksel ifade kullanmak ya mümkün değil ya da çok zordur. Bu zorluğu gidermek için deformasyon bölgesini çeşitli bölgelere bölmek avantajlı olabilir. Her bir bölgede, hız alanı ve türevi sürekli olmalıdır. Yüzeye paralel, hız süreksizleri mevcut olabilir.



Şekil 5.1. Hız süreksizliği (Çan, Y., 1998)

Şekil 5.1.'de V_{1N} ve V_{2N} I. ve II. bölgelerde hızın normal bileşenleridir. V_{T1} ve V_{T2} sınırda teğetsel bileşenlerdir. Teğetsel bileşenler arasındaki fark hız süreksizliği diye adlandırılır.

$$|\Delta V| = v_{t1} - v_{t2} \tag{5.1.17}$$

Yüzey boyunca hız süreksizliği şekil değiştirmiş malzeme içinde kayma artışına yol açar. Malzemenin müsaade edebileceği kaymaya karşı maksimum dayanım,

$$\tau = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \tag{5.1.18}$$

kayma sınırları üzerindeki maksimum enerji ihtiyacı,

$$\dot{W}_s = \int_\Gamma \tau |\Delta v| \, dS \tag{5.1.19}$$

5.2.3. Sürtünme Kayıpları

Her zaman takımlar ve nesneler arasındaki temasta, bağıl bir hareket vardır. Bu hareket için sürtünme diye adlandırılan bir mukavemet vardır. Sürtünmenin mekanizması karışıktır. Sürtünme mukavemeti τ ile gösterilir. Sürtünmenin matematiksel tarifi çok olduğu halde, bunlardan ikisi, sürtünmenin Coulomb katsayısı ve kayma katsayısı sabit plastisitede en çok kullanılanlardır. Eğer Coulomb Sürtünme Yasası kabul edilirse, o zaman;

$$\tau = \mu p \tag{5.1.20}$$

fakat, bilimsel olarak aşağıdaki denklem tercih edilir.

$$\tau = m\frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \tag{5.1.21}$$

m, takım ve metal arasındaki sürtünme faktörüdür ki, sürtünme meydana geldiğinde 0'dan 1'e değişir. Takım ile malzeme arasındaki relatif hareketten dolayı sürtünme direncini yenmek için gerekli enerji,

$$\dot{W}_f = \frac{m}{\sqrt{3}}\int_S \sigma_o \Delta V ds \tag{5.1.22}$$

olarak verilir. Burada; ΔV, takım malzeme ara yüzüne paralel yönde hız süreksizliğidir.

5.2.4. Geriye Çekme

Bazı şekil değiştirme yöntemlerinde bu terim önemlidir. Malzemeyi deforme etmek için gerekli gerçek gücü azaltmada bu geriye çekme kuvveti işleme yardım eder. Bundan dolayı kuvvet şu şekilde verilir.

$$\dot{W}_t = \int_{S_i} T_i V_i ds \tag{5.1.23}$$

T_i ; dış gerilmenin normal bileşeni,

S_i ; dış gerilmenin uygulandığı yüzey,

V_i ; takım hızı.

5.2.5. Toplam Enerji Dağılımı

Toplam güç aşağıdaki gibi elde edilir.

$$J^* = \dot{W}_d + \dot{W}_s + \dot{W}_f - \dot{W}_t \tag{5.1.24}$$

(5.1.16), (5.1.19), (5.1.22), (5.1.23) denklemleri (5.1.24) denklemleri içerisinde yerine konduğunda,

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_o \int_V \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}\,dv + \int_\Gamma \tau|\Delta v|\,ds + \frac{m}{\sqrt{3}}\int_S \sigma_o \Delta V ds - \int_{S_i} T_i V_i ds \tag{5.1.25}$$

dışarıdan verilen toplam enerji (Avitzur, B., 1985), (Talbert, S.H., Avitzur, B., 1996),

E^p=F.v (5.1.26)

burada ; F, deformasyon için dışarıdan uygulanan kuvveti, v, takım hızını gösterir.

Böylelikle toplam güç hesaplanabilir ve minimum enerji gereksinimi toplam enerji mimimize edilerek bulunabilir. Denklem (5.1.25)'de tüm güç terimleri bütün metal şekillendirme işlemleri için mevcut olmayabilir veya ihmal edilecek kadar etkisi zayıf olabilir. Bu da araştırmacılara kolaylık sağlar.

Birçok karmaşık metal biçimlendirme proseslerinde, mesela kapalı kalıpla dövme ve son zamanlarda uygulanmakta olan yanal ekstrüzyon yöntemi gibi, malzeme deformasyonu, işlem sırasında çeşitli kademelerde akış yönünde değişmektedir. Karmaşık akış mekanizması biçimlendirme kuvvetleri ve takım gerilmelerinin hesabını

son derece zorlaştırır. Bu zorluklar göz önünde bulundurulduğunda yapılan üst sınır analizi, hesaplamalarda büyük ölçüde kolaylık sağlamaktadır. Aşağıda iki ve dört dişli konik kalıplar kullanılarak yapılan yanal ekstrüzyon işleminin Üst Sınır Analizi Yöntemi kullanılarak yapılmış matematiksel modellemesi sunulmaktadır.

5.3. KONİK DİŞLİ FORMUNUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

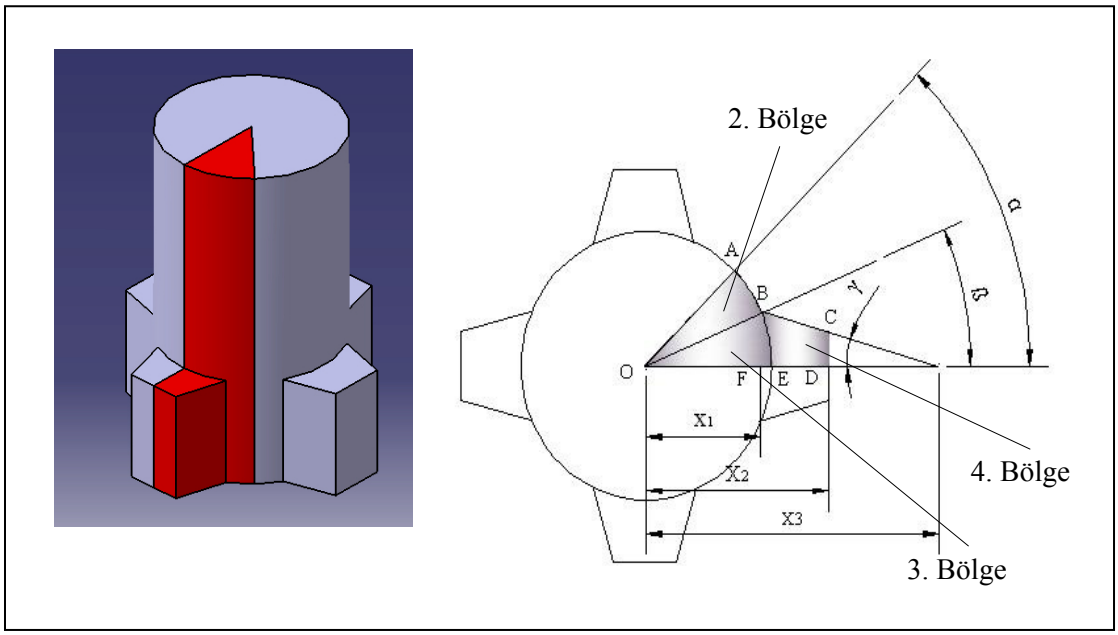
Hazırlanan tezde, konik dişli formunun yanal ekstrüzyon yöntemi için geliştirilen Üst Sınır Analizi Yöntemi ile prosesin matematiksel modellenmesi sağlanmıştır. Bu yöntemde, ilk defa önerilen bir kabul edilebilir hız alanı ile gerekli denklemler oluşturulmuş ve sonra bu denklemler nümerik olarak bilgisayar yardımı ile çözülmüştür.

5.4. ÜST SINIR METODUNUN KONİK DİŞLİ FORMA UYGULANMASI

Üst Sınır Metodu ile plastik şekil verme proseslerinin incelenmesi, deformasyon bölgesinde kinematik olarak kabul edilebilir hız alanlarının önerilmesi ile başlar (Gordon, W.A., Tyne, C.Y., 1987). 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 yapılan deneylerde ölçülen kuvvet değeri kadar ya da daha yüksek olması beklenir. Böylece bir plastik şekillendirme prosesi için gerekli pres kapasitesini belirlemek amacıyla rahatlıkla kullanılabilir.

Bu yöntemde hesapları basitleştirmek için bir takım kabuller yapılmıştır. Bunlar; 1) Malzeme izotropik, sıkıştırılamaz, 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 (Çan, Y., Altınbalık, M.T., Akata, H.E., 2003) .

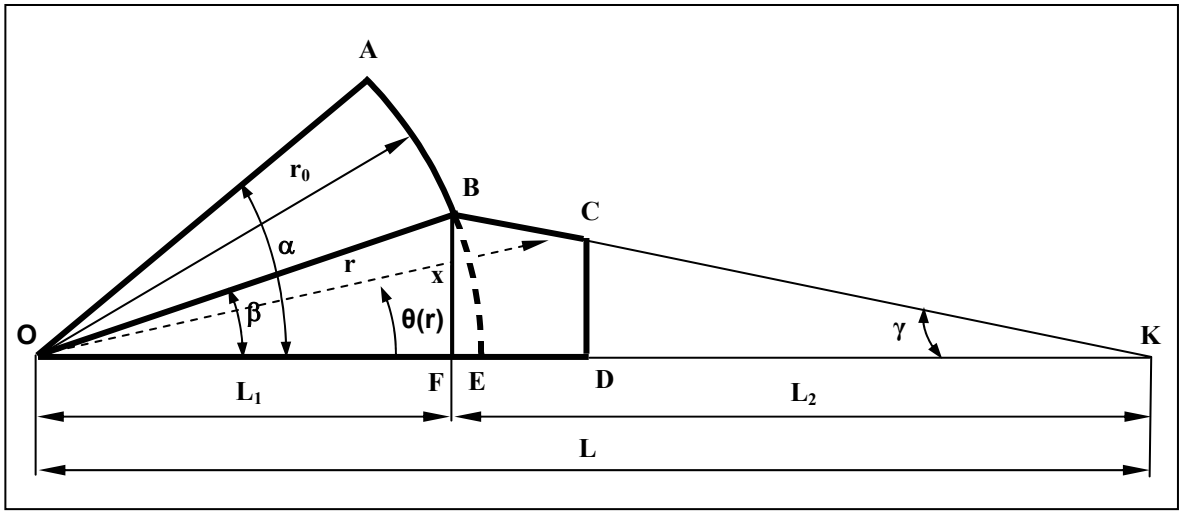
Yöntemde analiz için ilkel parça çapı kalıp iç çapına eşit kabul edilmiştir. Ayrıca, formülasyonlar dişe malzeme girdiği andan itibaren kalıpta dişe ait boşluğun ön duvarına malzeme temas edene kadar olan aşama için geliştirilmiştir.



Şekil 5.2. Yanal ekstüzyonda konik dört dişin bir dişinin yarısı ve deformasyona uğrayan kısmın alt bölgeleri

Yukarıda Şekil 5.2.'den de görüldüğü üzere yanal ekstrüzyon prosesinde bir diş 2N parçaya bölünmüş ve bu N diye oluşturulan dişin yarısına denk gelen kısım da malzemenin akışına göre 4 farklı bölgeye ayrılmıştır. Her bir bölge için kinematik olarak kabul edilebilir hız alanları oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında, konik dişli benzeri form için geliştirilen yanal ekstrüzyon yöntemi ile ilgili gerekli teorik hesaplar yapılarak hız alanları oluşturulmuş ve bu hız alanlarına bağlı olarak toplam deformasyon işi, toplam kayma kayıpları ve toplam sürtünme kayıpları için gerekli ifadeler çıkarılmıştır. Bu ifadeler aşağıda sırası ile sunulmaktadır.



Şekil 5.3. Tek dişin açısal gösterimi

5.4.1. Seçilen Geometriye Göre Hız Alanlarının Oluşturulması

Şekil 5.2.'den de görüldüğü üzere yanal ekstrüzyon sırasında kalıp içindeki malzemenin akışı 4 bölgede incelenmiştir. Bu dört bölgedeki hız alanları aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

1. Bölge; Bu bölgede, plastik akış yoktur. Malzeme kovan (alıcı) içerisinde rijit cisim gibi hareket eder ve buna bağlı olarak hız alanları aşağıdaki gibi seçilebilir.

$$U_{r1} = 0,$$

$$U_{\theta 1} = 0,$$

$$U_{z1} = -V_0 \qquad (5.2.1)$$

2. Bölge; Burada henüz diş bölgesine malzeme girişi yoktur. Bu bölgede, radyal yönde plastik deformasyon yoktur. AB arasındaki kalıp duvarına kuvvet uygulanmaktadır. Eksenel hız olan U_{z2}' nin z ile doğrusal olarak değiştiği varsayılırsa, sınır şartları ve hacim sabitliği ile diğer hız alanları kartezyen koordinatlar kullanılarak aşağıdaki gibi oluşturulabilir;

$$U_{r2} = 0,$$

$$U_{\theta 2} = -V_0 \frac{r}{h}(\alpha - \theta), \tag{5.2.2}$$

$$U_{z2} = -V_0 \frac{z}{h}$$

OA yüzeyi boyunca sınır şartları oluşturulurken;

$\theta = \alpha$ ifadesi kullanılmıştır. Sınır şartlarına bağlı olarak,

$$\left(U_{\theta 2}\right)_{\theta=\alpha} = 0 \tag{5.2.3}$$

bulunur.

3. Bölge; Bu bölgede, kartezyen koordinat sistemi kullanılmıştır. OB yüzeyi boyunca $\theta = \beta$ ifadesine bağlı olarak,

$$U_{y3}\cos\beta - U_{x3}\sin\beta = \frac{r_0}{h}\left(\alpha - \beta\right), \tag{5.2.4}$$

eşitliği ile hız alanları aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$U_{x3} = V_0 \frac{x}{2h}\left(1 + \frac{2(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta}\right)$$

$$U_{y3} = V_0 \frac{y}{2h}\left(1 - \frac{2(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta}\right) \tag{5.2.5}$$

$$U_{z3} = -V_0 \frac{z}{h}$$

4. Bölge; Prosesin bu aşamasında diş ön duvarına malzeme teması başlamaktadır. Bu yüzden kuvvettede ani artış meydana gelmektedir. Kuvvetteki ani artışın bir sebebi serbest kenarın hareketinin sınırlanarak sürtünen yüzey alanının artması, diğer bir sebebi ise kalıp içinde dolmamış bölgelerin çok az miktarda kalması ve buralara malzeme akışının çok zor olmasıdır. Malzeme eksenel yönde akmamaktadır,

bunun için hız bileşenleri z' den bağımsızdır. 4. Bölgede kenarlardaki ve dişin ön duvarındaki sürtünmeye bağlı olarak normal hız bileşeni aşağıdaki sınır şartı kabulü yapılarak sıfır olmalıdır.

$$\left.\frac{U_{y3}}{U_{x3}}\right|_{y=y(x)} = -\tan\gamma \tag{5.2.6}$$

denklem (5.2.6)'da verilen sınır şartı gibi, bu bölgede x yönündeki diğer bir sınır şartı ise,

$x=x_1$ de $U_{x3}= U_{x4}$, (5.2.7)

şeklinde verilmektedir.

Bu bölgede de, kartezyen koordinat sistemi kullanılmıştır ve oluşturulan hız alanları aşağıdaki gibidir.

$$U_{x4} = \frac{1}{2h}\left(x + \frac{2x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)$$

$$U_{y4} = -\frac{y}{2h} - \frac{\tan\gamma}{h}\left(x + \frac{x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta} - \frac{x_3}{2}\right) \tag{5.2.8}$$

$$U_{z4} = 0$$

5.4.2. Toplam Deformasyon İşi Hesabı

Yukarıda (5.2.1), (5.2.2), (5.2.5) ve (5.2.8) numaralı denklemlerde; her bölge için oluşturulan sınır şartlarını ve hacim sabitliğini sağlayan kinematik olarak kabul edilebilir hız alanları önerilmiştir.

Bu hız alanları her farklı bölge için,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right) \tag{5.2.9}$$

formülasyonu ile hesaplanmaktadır. Plastik deformasyon işi hesabında kullanılan efektif genleme hızı formülü ise,

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\left(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2\varepsilon_{\theta r}^2 + 2\varepsilon_{rz}^2 + 2\varepsilon_{\theta z}^2\right)} \tag{5.2.10}$$

şeklindedir.

Plastik deformasyona bağlı olarak deformasyon işi formülü aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$\dot{W}_d = \sigma_o \int_V \dot{\varepsilon}\, dV \tag{5.2.11}$$

Yanal ekstrüzyon (enjeksiyon yığma) için belirlenen hız alanlarından her bölge için belirlenen genleme hızları hacim sabitliğini sağlamaktadır ve bu genleme hızları formülde yerine yazılarak, her bölge için ayrı ayrı deformasyon işi hesapları elde edilmektedir.

5.4.2.1. *Birinci bölge için deformasyon işi*

Bu bölgede plastik deformasyon olmadığı için, plastik deformasyon işi "0" dır.

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = 0 \tag{5.2.12}$$

$$\dot{W}_{d1} = 0 \tag{5.2.13}$$

5.4.2.2. *İkinci bölge için deformasyon işi*

$$\dot{\varepsilon}_{r2} = 0\,, \tag{5.2.14}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta 2} = \frac{1}{h}, \tag{5.2.15}$$

$$\dot{\varepsilon}_{z2} = -\frac{1}{h}, \tag{5.2.16}$$

$$\dot{\varepsilon}_{r2z2} = \dot{\varepsilon}_{\theta 2z2} = \dot{\varepsilon}_{r2\theta 2} = 0 \tag{5.2.17}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}}_2 = \sqrt{\frac{1}{2}\left(0^2 + \frac{1}{h^2} + \frac{1}{h^2}\right)} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{2}{h^2}\right)} = \frac{1}{h} \tag{5.2.18}$$

$$\dot{W}_{d2} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^h\int_\beta^\alpha\int_0^{R_0}\bar{\dot{\varepsilon}}_2 r dr d\theta dz \tag{5.2.19}$$

$$\dot{W}_{d2} = \frac{1}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}R_0^2(\alpha - \beta) \tag{5.2.20}$$

5.4.2.3. ***Üçüncü bölge için deformasyon işi***

$$\dot{\varepsilon}_{x3} = \frac{1}{2h}\left(1 + \frac{2(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta}\right), \tag{5.2.21}$$

$$\dot{\varepsilon}_{y3} = \frac{1}{2h}\left(1 - \frac{2(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta}\right), \tag{5.2.22}$$

$$U_{z3} = -\frac{1}{h} \tag{5.2.23}$$

$$\dot{\varepsilon}_{x3y3} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_{x3}}{\partial y_3} + \frac{\partial U_{y3}}{\partial x_3}\right) = 0, \tag{5.2.24}$$

$$\dot{\varepsilon}_{x3z3} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_{x3}}{\partial z_3} + \frac{\partial U_{z3}}{\partial x_3}\right) = 0\,, \tag{5.2.25}$$

$$\dot{\varepsilon}_{y3z3} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_{y3}}{\partial z_3} + \frac{\partial U_{z3}}{\partial y_3}\right) = 0\,, \tag{5.2.26}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{2h} + \frac{(\alpha-\beta)}{h\sin 2\beta}\right)^2 + \left(\frac{1}{2h} - \frac{(\alpha-\beta)}{h\sin 2\beta}\right)^2 + \frac{1}{h^2}\right]} \tag{5.2.27}$$

eğer $\dfrac{(\alpha-\beta)}{h\sin 2\beta}$ ifadesini işlem kolaylığı açısından A olarak tanımlarsak

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{2h} + A\right)^2 + \left(\frac{1}{2h} - A\right)^2 + \frac{1}{h^2}\right]} \tag{5.2.28}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{h^2} + 4A^2} \tag{5.2.29}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{h^2} + 4\left[\frac{(\alpha-\beta)}{h\sin 2\beta}\right]^2} \tag{5.2.30}$$

buradan $\dfrac{(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}$ ifadesini "B" olarak tanımlarsak, denklem aşağıdaki şekli ile oluşur.

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{2h}\sqrt{3 + (2B)^2} \tag{5.2.31}$$

Bu ifadeyi üçüncü bölge için deformasyon işi bağıntısında yerine koyarsak,

$$\dot{W}_{d3} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^h\int_0^{\beta}\int_0^{x_1/\cos\theta} \bar{\dot{\varepsilon}}\, r\, dr\, d\theta\, dz \tag{5.2.32}$$

$$\dot{W}_{d3} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^h\int_0^\beta\int_0^{x_1/\cos\theta}\frac{1}{2h}\sqrt{3+(2B)^2}\,r\,dr\,d\theta\,dz \tag{5.2.33}$$

$$\dot{W}_{d3} = \frac{1}{2\sqrt{3}}\bar{\sigma}\sqrt{3+4B^2}\,x_1^2\tan\beta \tag{5.2.34}$$

$$\dot{W}_{d3} = \frac{1}{2\sqrt{3}}\bar{\sigma}x_1^2\tan\beta\sqrt{3+\frac{4(\alpha-\beta)^2}{(\sin 2\beta)^2}} \tag{5.2.35}$$

5.4.2.4. ***Dördüncü bölge için deformasyon işi***

$$\dot{\varepsilon}_{x4} = \frac{1}{2h}, \tag{5.2.36}$$

$$\dot{\varepsilon}_{y4} = -\frac{1}{2h}, \tag{5.2.37}$$

$$\dot{\varepsilon}_{z4} = 0, \tag{5.2.38}$$

$$\dot{\varepsilon}_{x4y4} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_{x4}}{\partial y_4}+\frac{\partial U_{y4}}{\partial x_4}\right) = 0, \tag{5.2.39}$$

$$\dot{\varepsilon}_{x4z4} = 0, \tag{5.2.40}$$

$$\dot{\varepsilon}_{y4z4} = 0, \tag{5.2.41}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}}_4 = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{4h^2}+\frac{1}{4h^2}\right)+\left(\frac{1}{4}\frac{\tan^2\gamma}{h^2}\right)}, \tag{5.2.42}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}}_4 = \frac{1}{2h}\sqrt{1+\tan^2\gamma} \tag{5.2.43}$$

$$\dot{W}_{d4} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^h\int_{x_1}^{x_2}\bar{\dot{\varepsilon}}_4(x_3 - x)\tan\gamma dxdz \tag{5.2.44}$$

$$\dot{W}_{d4} = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\left(\frac{1}{2h}\sqrt{1+\tan^2\gamma}\right)\int_0^h\int_{x_1}^{x_2}(x_3 - x)\tan\gamma dxdz \tag{5.2.45}$$

$$\dot{W}_{d4} = \frac{1}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\left(\sqrt{1+\tan^2\gamma}\right)\tan\gamma\left[(x_2 - x_1)(2x_3 - x_2 - x_1)\right] \tag{5.2.46}$$

Her bölge için ayrı ayrı elde edilen deformasyon işi hesaplarının tümü toplanarak toplam deformasyon işi ifadesi elde edilir. Bu ifade aşağıda verilmiştir.

5.4.2.5. *Toplam deformasyon işi*

Her bir deformasyon bölgesinden elde edilen deformasyon işi ifadeleri toplanarak toplam deformasyon işi bulunur.

$$\dot{W}_{dtoplam} = \dot{W}_{d1} + \dot{W}_{d2} + \dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4} \tag{5.2.47}$$

5.4.3. Kayma Enerjisinden Doğan Kayıpların Hesabı

Dişli benzeri parçaların yanal ekstrüzyon işlemi sırasında hız süreksizliği yüzeyleri boyunca kaymaya bağlı olarak oluşan enerji kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\dot{W}_s = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}}\int_S |\Delta V| dS \tag{5.2.48}$$

5.4.3.1. *Birinci bölgeden ikinci bölgeye geçişteki kayma enerjisi*

Buradaki yüzeyler üzerindeki kayma enerjisi kayıplarına bağlı olan hız süreksizliği aşağıda verilmiştir,

$$\Delta V_{s1-2} = \left| V_0 \frac{r}{h}(\alpha - \theta) \right| \tag{5.2.49}$$

bulunan bu ifade kayma enerjisi formülünde yerine konduğunda bu bölgedeki kayma enerjisi aşağıdaki şekli ile elde edilir.

$$\dot{W}_{s1-2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \int_{\beta}^{\alpha} \int_{0}^{R_0} |\Delta V_{s1-2}| r dr d\theta \tag{5.2.50}$$

$$\dot{W}_{s1-2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \int_{\beta}^{\alpha} \int_{0}^{R_0} (\alpha - \theta) \frac{r}{h} r dr d\theta \tag{5.2.51}$$

$$\dot{W}_{s1-2} = \frac{1}{6\sqrt{3}h} \bar{\sigma} R_0^3 (\alpha - \beta)^2 \tag{5.2.52}$$

5.4.3.2. *Birinci bölgeden üçüncü bölgeye geçişteki kayma enerjisi*

Birinci bölgeden üçüncü bölgeye geçişte oluşacak olan hız süreksizliği aşağıda verilmiştir.

$$\Delta V_{s1-3} = \sqrt{U_{x3}^2 + U_{y3}^2} \tag{5.2.53}$$

$$\Delta V_{s1-3} = \sqrt{\left[\frac{V_0 x}{2h} \left(1 + \frac{2(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta} \right) \right]^2 + \left[\frac{V_0 y}{2h} \left(1 - \frac{2(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta} \right) \right]^2} \tag{5.2.54}$$

U_{x3} ve U_{y3} formüllerinde $\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}$ ifadesini C olarak adlandırırsak,

$$\Delta V_{s1-3} = \sqrt{\left[\frac{V_0 x}{2h}(1+C)\right]^2 + \left[\frac{V_0 y}{2h}(1-C)\right]^2} \tag{5.2.55}$$

$$\Delta V_{s1-3} = \frac{1}{2h}\sqrt{\left[\left(V_0^2 x^2 + V_0^2 y^2\right)\left(1+C^2\right)\right] + \left[\left(V_0^2 x^2 - V_0^2 y^2\right)2C\right]} \tag{5.2.56}$$

$$\dot{W}_{s1-3} = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma \int_0^{\beta} \int_0^{x_1/\cos\theta} \left|\Delta V_{s1-3}\right| r dr d\theta \tag{5.2.57}$$

kartezyen koordinatlarda verilen hız alanlarından elde edilen ΔV_{s1-3} ifadesini silindirik koordinatlarda yazabilmek için aşağıdaki dönüşüm işlemi gerçekleştirilebilir ve böylelikle 1. bölgeden 3. bölgeye geçişteki kayma enerjisi ifadesi silindirik koordinatlarda hesaplanmış olur.

$$x = r\cos\theta, \tag{5.2.58}$$

$$y = r\sin\theta, \tag{5.2.59}$$

$$x^2 + y^2 = r^2 \tag{5.2.60}$$

$$x^2 - y^2 = r^2\cos^2\theta - r^2\cos^2\theta = r^2(\cos 2\theta) \tag{5.2.61}$$

bu ifadeler ΔV_{s1-3} denkleminde yerlerine yazılırsa,

$$\Delta V_{s1-3} = V_0 \frac{1}{2h} r\sqrt{\left(1+C^2\right) + \left(2C\cos 2\theta\right)} \tag{5.2.62}$$

denklemi elde edilir.

Bu denklem de, 1. bölgeden 3. bölgeye geçişteki kayma enerjisi ifadesi bulmak için aşağıdaki denklemde yazılır.

$$\dot{W}_{s1-3} = \frac{1}{2\sqrt{3h}} \bar{\sigma} r \int_0^{\beta} \int_0^{x_1/\cos\theta} \sqrt{\left[\left(1+C^2\right)+\left(2C\cos 2\theta\right)\right]} r dr d\theta \qquad (5.2.63)$$

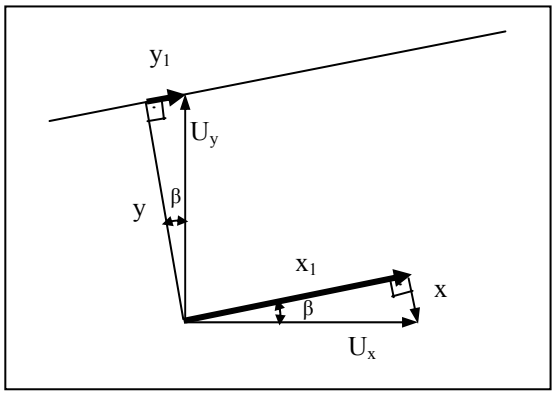
denklemde C ifadesini yerine koyarsak,

$$\dot{W}_{s1-3} = \frac{1}{2\sqrt{3h}} \bar{\sigma} \int_0^{\beta} \int_0^{x_1/\cos\theta} \sqrt{\left[\left(1+\left(\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2\right)+\left(\frac{4(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\cos 2\theta\right)\right]} r^2 dr d\theta \qquad (5.2.64)$$

$$\dot{W}_{s1-3} = \frac{1}{6\sqrt{3h}} \bar{\sigma} x_1^3 \int_0^{\beta} \sqrt{\left[\left(1+\left(\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2\right)+\left(\frac{4(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\cos 2\theta\right)\right]} \frac{1}{\cos^3\theta} d\theta \qquad (5.2.65)$$

ifade tek katlı integral biçiminde oluşturulduktan sonra çözümünün yapılabilmesi ancak nümerik olarak mümkün olabilmektedir. Dolayısı ile bu geçiş bölgesindeki kayma enerjisi nümerik olarak hesaplanmış ve toplam kayma enerjisinde yerine yazılmıştır.

5.4.3.3. *İkinci bölgeden üçüncü bölgeye geçişteki kayma enerjisi*



Şekil 5.4. İkinci bölgeden üçüncü bölgeye geçişteki hız bileşenleri

$$x_1 = U_x \cos\beta \tag{5.2.66}$$

$$y_1 = U_y \sin\beta \tag{5.2.67}$$

2. Bölgeden 3. Bölgeye geçişteki teğetsel hız aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$V_{t2-3} = U_{x3} \cos\beta + U_{y3} \sin\beta \tag{5.2.68}$$

Bu bölgedeki radyal hız ise "0" dır.

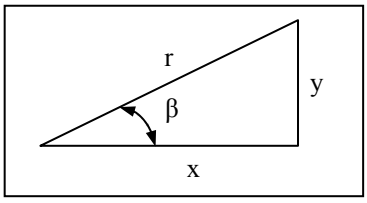
$$V_{r2-3} = 0 \tag{5.2.69}$$

Böylelikle bu bölgedeki ΔV_{s2-3} aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\Delta V_{s2-3} = U_{x3} \cos\beta + U_{y3} \sin\beta - V_{r2-3} \tag{5.2.70}$$

$$\Delta V_{s2-3} = U_{x3} \cos\beta + U_{y3} \sin\beta - 0 \tag{5.2.71}$$

$$\Delta V_{s2-3} = V_0 \left[\left(\frac{x}{2h} + \frac{x(\alpha-\beta)}{h \sin 2\beta} \right) \cos\beta + \left(\frac{y}{2h} - \frac{y(\alpha-\beta)}{h \sin 2\beta} \right) \sin\beta \right] \tag{5.2.72}$$



Şekil 5.5. İkinci bölgeden üçüncü bölgeye geçişteki β açısının geometrisi

$$\Delta V_{s2-3} = V_0 \left[\left(\frac{x}{2h} + \frac{x(\alpha-\beta)}{h \sin 2\beta} \right) \cos\beta + \left(\frac{x \tan\beta}{2h} - \frac{x \tan\beta(\alpha-\beta)}{h \sin 2\beta} \right) \sin\beta \right] \tag{5.2.73}$$

$$\Delta V_{s2-3} = \frac{V_0 r}{2h}\left(1 + \frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\cos 2\beta\right) \tag{5.2.74}$$

bu denklemde, 2. bölgeden 3. bölgeye geçişteki kayma enerjisi ifadesini bulmak için aşağıdaki denklemde yazılır.

$$\dot{W}_{s2-3} = \frac{V_0}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^h\int_0^{R_0}\frac{r}{2h}\left(1 + \frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\cos 2\beta\right)drdz \tag{5.2.75}$$

$$\dot{W}_{s2-3} = \frac{V_0}{4\sqrt{3}}\bar{\sigma}R_0^2\left(1 + \frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\cos 2\beta\right) \tag{5.2.76}$$

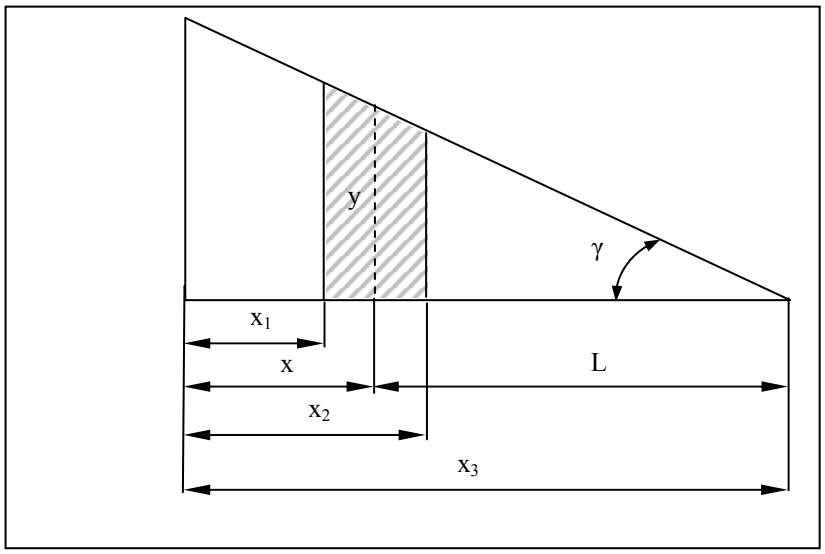
5.4.3.4. *Üçüncü bölgeden dördüncü bölgeye geçişteki kayma enerjisi*

Buradaki hız süreksizliği $\Delta V_{3\text{-}4}$ ifadesi ile aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$\Delta V_{s3-4} = \left(\sqrt{U_{y3}^2 + U_{z3}^2}\right) - \left(\sqrt{U_{y4}^2 + U_{z4}^2}\right) \tag{5.2.77}$$

$$\Delta V_{s3-4} = V_0\left[\left(\sqrt{\frac{y^2}{4h^2}\left(1 - \frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2 + \frac{4z^2}{4h^2}}\right) - \left(-\frac{y}{2h} - \frac{\tan\gamma}{h}\left(x + \frac{x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta} - \frac{x_3}{2}\right)\right)\right]$$

(5.2.78)



Şekil 5.6. Üçüncü bölgeden dördüncü bölgeye geçişteki γ açısının geometrisi

$$L = x_3 - x \tag{5.2.79}$$

$$y = L\tan\gamma = (x_3 - x)\tan\gamma \tag{5.2.80}$$

$$x = x_3 - \left(\frac{y}{\tan\gamma}\right) \tag{5.2.81}$$

$$\Delta V_{s3-4} = V_0\left[\left(\sqrt{\frac{y^2}{4h^2}\left(1-\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2+\frac{4z^2}{4h^2}}\right)-\left(-\frac{y}{2h}-\frac{\tan\gamma}{h}\left(x_3-\left(\frac{y}{\tan\gamma}\right)+\frac{x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}-\frac{x_3}{2}\right)\right)\right] \tag{5.2.82}$$

$$\dot{W}_{s3-4} = \frac{1}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^h\int_0^{y_1}\left|\Delta V_{3-4}\right|dydz \tag{5.2.83}$$

İfade iki katlı integral biçiminde oluşturulduktan sonra çözümünün yapılabilmesi ancak nümerik olarak mümkün olabilmektedir. Dolayısı ile bu geçiş bölgesindeki kayma enerjisi nümerik olarak hesaplanmış ve toplam kayma enerjisi formülasyonunda yerine konmuştur.

5.4.3.5. *Toplam kayma enerjisi*

$$\dot{W}_{stoplam} = \dot{W}_{s1-2} + \dot{W}_{s1-3} + \dot{W}_{s2-3} + \dot{W}_{s3-4} \tag{5.2.84}$$

şeklinde verilmektedir.

5.4.4. Sürtünmelerden Doğan Enerji Kayıplarının Hesabı

Deformasyona uğrayan iş parçasının sapı boyunca, 2. bölgenin alt ve üst bölümlerinde, 2. bölgenin ön duvarında, 3. bölgenin alt ve üst bölümlerinde, 4. bölgenin alt ve üst bölümlerinde, 4. bölgenin yan yüzeyinde sürtünmeler olmaktadır. Sürtünmelerden doğan enerji kayıplarını hesaplayabilmek için de,

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} m\bar{\sigma}, \tag{5.2.85}$$

$$\dot{W}_f = \int_S \tau |\Delta v| \, ds, \tag{5.2.86}$$

$$\dot{W}_f = \frac{1}{\sqrt{3}} m\bar{\sigma} \int_S |\Delta v| \, ds \tag{5.2.87}$$

formülü verilmektedir. Burada;ΔV, takım-malzeme ara yüzeyine paralel yöndeki hız süreksizliği, m, sürtünme faktörüdür.

5.4.4.1. Sap boyunca sürtünme enerjisi

$$\dot{W}_{fsap} = \frac{1}{\sqrt{3}} m\bar{\sigma} \int_0^{2\pi} \int_0^{\Delta L} V_0 r_0 \, d\theta \, dz \tag{5.2.88}$$

$$\dot{W}_{fsap} = \frac{1}{\sqrt{3}} m\bar{\sigma} V_0 \, 2\pi R_0 \left(H - h - V_0 t\right) \tag{5.2.89}$$

5.4.4.2. İkinci bölgenin altındaki sürtünme enerjisi

Bu bölgedeki hız süreksizliği denklem (5.2.90)'da verilmiştir.

$$\Delta V_{f2alt} = \left| -V_0 \frac{r}{h}(\alpha - \theta) \right| \tag{5.2.90}$$

Alt bölgedeki sürtünme enerjisi kaybı denklem (5.2.92)'de oluşturulmuştur.

$$\dot{W}_{f2alt} = \frac{V_0}{\sqrt{3}} m\bar{\sigma} \int_{\beta}^{\alpha} \int_{0}^{R_0} \left(\frac{r}{h}(\alpha - \theta) \right) r dr d\theta \tag{5.2.91}$$

$$\dot{W}_{f2alt} = \frac{V_0}{3\sqrt{3}} m\bar{\sigma} \frac{R_0^3}{h} (\alpha - \beta)^2 \tag{5.2.92}$$

5.4.4.3. İkinci bölgenin ön duvarındaki sürtünme enerjisi

$$\Delta V_{f2\ddot{o}ndu\,\text{var}} = \sqrt{U_{\theta 2}^2 + U_{z2}^2} \tag{5.2.93}$$

$$\Delta V_{f2\ddot{o}ndu\,\text{var}} = V_0 \left(\sqrt{\left(-\frac{z}{h} \right)^2 + \left(-\frac{r_0}{h}(\alpha - \theta) \right)^2} \right) \tag{5.2.94}$$

$$\Delta V_{f2\ddot{o}ndu\,\text{var}} = \frac{V_0}{h} \sqrt{z^2 + r_0^2 (\alpha - \theta)^2} \tag{5.2.95}$$

$$\dot{W}_{f2\ddot{o}ndu\,\text{var}} = \frac{V_0}{\sqrt{3}} m\bar{\sigma} \int_0^h \int_{\beta}^{\alpha} \left(\frac{1}{h} \sqrt{z^2 + r_0^2 (\alpha - \beta)^2} \right) R_0 d\theta dz \tag{5.2.96}$$

yukarıda yazılan ifadenin kısmi integrasyon kullanılarak alınan integrali aşağıda yazılmıştır.

$$M_1 = r_0^2(\alpha - \theta)^2 \tag{5.2.97}$$

$$N_1 = \sqrt{h^2 + r_0^2(\alpha - \beta)^2} \tag{5.2.98}$$

M_1 ve N_1 kabulleri yapılırsa, denklemin tek katlı integral içeren hali aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\dot{W}_{f\,2\ddot{o}ndu\,\mathrm{var}} = \frac{V_0}{2\sqrt{3}h} m\bar{\sigma} R_0 \int_\beta^\alpha \left[hN_1 + M_1 \ln(h + N_1) - M_1 \ln(M_1)\right] d\theta \tag{5.2.99}$$

M_1 ve N_1 ifadeleri denklemde yerine konduğunda

$$\dot{W}_{f\,2\ddot{o}ndu\,\mathrm{var}} = \frac{V_o}{2\sqrt{3}h} m\bar{\sigma} R_0 \int_\beta^\alpha \left(h\sqrt{h^2 + r_0^2(\alpha - \beta)^2} + r_0^4(\alpha - \theta)^4 \ln\left| \frac{h + \sqrt{h^2 + r_0^2(\alpha - \beta)^2}}{r_0^2(\alpha - \theta)^2} \right| \right) d\theta$$

(5.2.100)

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin de çözümü sadece nümerik olarak yapılabilmektedir. Nümerik çözüm yapıldıktan sonra denklem toplam sürtünme kayıpları enerjisinde yerine konmuştur.

5.4.4.4. Üçüncü bölgenin altındaki sürtünme enerjisi

$$\Delta V_{f3alt} = \sqrt{U_{x3}^2 + U_{y3}^2} \tag{5.2.101}$$

$$\Delta V_{f3alt} = V_0 \sqrt{\frac{x^2}{4h^2}\left(1+\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2 + \frac{y^2}{4h^2}\left(1-\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2} \tag{5.2.102}$$

$\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}$ ifadesi "C" olarak tanımlanırsa,

$$\Delta V_{f3alt} = V_0 \sqrt{\frac{x^2}{4h^2}(1+C)^2 + \frac{y^2}{4h^2}(1-C)^2} \tag{5.2.103}$$

Bu ifadede; "y=tanβ.x" denklemi yerine yazıldığında,

$$\Delta V_{f3alt} = V_0 \frac{x}{2a}\sqrt{(1+C)^2 + (1-C)^2 \tan^2\beta} \tag{5.2.104}$$

İfadesi elde edilmiş olur.

$$\dot{W}_{f3alt} = m\frac{1}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}\int_0^{\beta}\int_0^{x_1/\cos\theta}\frac{x}{2h}\sqrt{(1+C)^2 + (1-C)^2\tan^2\beta}\,r\,dr\,d\theta \tag{5.2.105}$$

$$\dot{W}_{f3alt} = \frac{V_0}{3\sqrt{3}h}m\bar{\sigma}x_1^3\tan\beta\sqrt{\left(1+\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2 + \left(1-\frac{2(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2\tan^2\beta} \tag{5.2.106}$$

5.4.4.5. Dördüncü bölgenin alt ve üstündeki sürtünme enerjisi

$$\Delta V_{f4alt-üst} = \sqrt{U_{x4}^2 + U_{y4}^2} \tag{5.2.107}$$

$$\Delta V_{f4alt-üst} = V_0\sqrt{\frac{1}{4h^2}\left(x+\frac{2x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)^2 + \left(-\frac{y}{2h}-\frac{\tan\gamma}{h}\left(x+\frac{x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}-\frac{x_3}{2}\right)\right)^2} \tag{5.2.108}$$

denklemde $\frac{(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}$ ifadesini "B" olarak tanımlarsak,

$$\Delta V_{f4alt-üst} = \frac{V_0}{2h}\sqrt{(x+2x_1B)^2 + \left(y^2 + 4y\tan\gamma\left(x+x_1B-\frac{x_3}{2}\right) + 4\tan^2\gamma\left(x+x_1B-\frac{x_3}{2}\right)\right)} \quad (5.2.109)$$

$$y = (x_3 - x)\tan\gamma \quad (5.2.110)$$

$$x_3 = R_0\left(\cos\beta + \frac{\sin\beta}{\tan\gamma}\right) \quad (5.2.111)$$

denklem (5.2.110) ve (5.2.111) daki dönüşüm yapılıp sürtünme enerjisi formülünde yerine yazıldığında, (5.2.112) denklemi elde edilir.

$$\dot{W}_{f4alt-üst} = \frac{2m}{\sqrt{3}}\int_{x_2}^{x_3}\int_{0}^{y}|\Delta V|\,dx\,dy \quad (5.2.112)$$

Bu bölgedeki sürtünme enerjisi nümerik olarak hesaplanmış ve toplam sürtünme enerjisi formülünde yerine konmuştur.

5.4.4.6. Dördüncü bölgenin yan yüzeyindeki sürtünme enerjisi

$$\Delta V_{f4yanyüzey} = \sqrt{U_{x4}^2 + U_{z4}^2} \quad (5.2.113)$$

$$\Delta V_{f4yanyüzey} = \frac{V_0}{2h}\left(x + \frac{2x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right) \quad (5.2.114)$$

$$\dot{W}_{f4yanyüzey} = \frac{V_0}{\sqrt{3}}m\bar{\sigma}\int_0^h\int_0^{x_{21}/\cos\gamma}\frac{1}{2h}\left(x + \frac{2x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)dxdz \quad (5.2.115)$$

$$\dot{W}_{f4yanyüzey} = \frac{V_0}{2\sqrt{3}h}m\bar{\sigma}\int_0^h\left(\frac{x^2}{2} + \frac{2x_1(\alpha-\beta)}{\sin 2\beta}\right)\Bigg]_0^{x_{21}/\cos\gamma}dz \quad (5.2.116)$$

$$x_{21} = (x_2 - x_1) \quad (5.2.117)$$

$$\dot{W}_{f4yanyüzey} = \frac{V_0}{2\sqrt{3}} m\sigma \frac{-(x_2 - x_1)}{\cos\gamma}\left[\left(\frac{(x_2 - x_1)}{2\cos\gamma} + \frac{2x_1(\alpha - \beta)}{\sin 2\beta}\right)\right] \quad (5.2.118)$$

5.4.4.7. Toplam sürtünme kayıpları enerjisi

$$\dot{W}_{ftoplam} = \dot{W}_{fsap} + \dot{W}_{f2alt-üst} + \dot{W}_{f2öndu\,var} + \dot{W}_{f3alt-üst} + \dot{W}_{f4alt-üst} + \dot{W}_{f4yanyüzey} \quad (5.2.119)$$

şeklinde verilmektedir.

5.4.5. Toplam Kuvvet İhtiyacı

Konik dişli benzeri formun toplam kuvvet ihtiyacının belirlenmesi için yukarıda yapılan hesaplara bağlı olarak bir toplam güç ihtiyacı (W_{TOPLAM}) belirlendikten sonra, V_0 takım hızı olmak üzere toplam kuvvet ihtiyacı (F) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$W_{TOPLAM} = \dot{W}_{dtoplam} + \dot{W}_{stoplam} + \dot{W}_{ftoplam} \quad (5.2.120)$$

$$W_{TOPLAM} = \dot{W}_{fsap} + 2N\left(\dot{W}_{d1} + \dot{W}_{d2} + \dot{W}_{d3} + \dot{W}_{d4} + \dot{W}_{s1-2} + \dot{W}_{s1-3} + \dot{W}_{s2-3} + \dot{W}_{s3-4} + \dot{W}_{f2alt}\right.$$
$$\left.\dot{W}_{f2öndu\,var} + \dot{W}_{f3alt} + \dot{W}_{f4alt-üst} + \dot{W}_{f4yanyüzey}\right) \quad (5.2.121)$$

$$F = \frac{W_{TOPLAM}}{V_0} \quad (5.2.122)$$

Ayrıca (W_{TOPLAM}) ifadesine bağlı olarak relatif dövme basıncı (P_{av}/σ) aşağıda denklem (5.2.123)'de sunulmaktadır.

$$\frac{P_{av}}{\sigma} = \frac{W_{toplam}}{\sigma\ A_k\ V_o} \quad (5.2.123)$$

5.5. DÜZ DİŞLİ BENZERİ FORMUN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Yukarıda da bahsedildiği gibi sınır şartlarını ve hacim sabitliğini sağlayacak kinematik olarak kabul edilebilir hız alanları bu form için de kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda (Parson ve diğ.,1973 ve Plancak ve diğ.,1992) kullanılan hız alanları düz dişli benzeri parçaların yanal ekstrüzyonunda Üst Sınır Analizi yöntemi ile matematiksel olarak modellendiği bir çalışmada (Çan, Y. ve diğ., 2005) geliştirilmiş ve aşağıda Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Konik dişli formda bahsedilen tüm kabuller burada da yapılmıştır. Bu kabuller doğrultusunda istenen deformasyonu sağlamak için gerekli güç aşağıda bir kez daha verilmiştir.

$$\dot{W} = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{ij}\,\dot{\varepsilon}_{ij}}\, dV \quad + \quad \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{\Gamma_s} |\Delta V|\, dS \; + \; m\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_{\Gamma_f} |\Delta V|\, dS \tag{5.3.1}$$

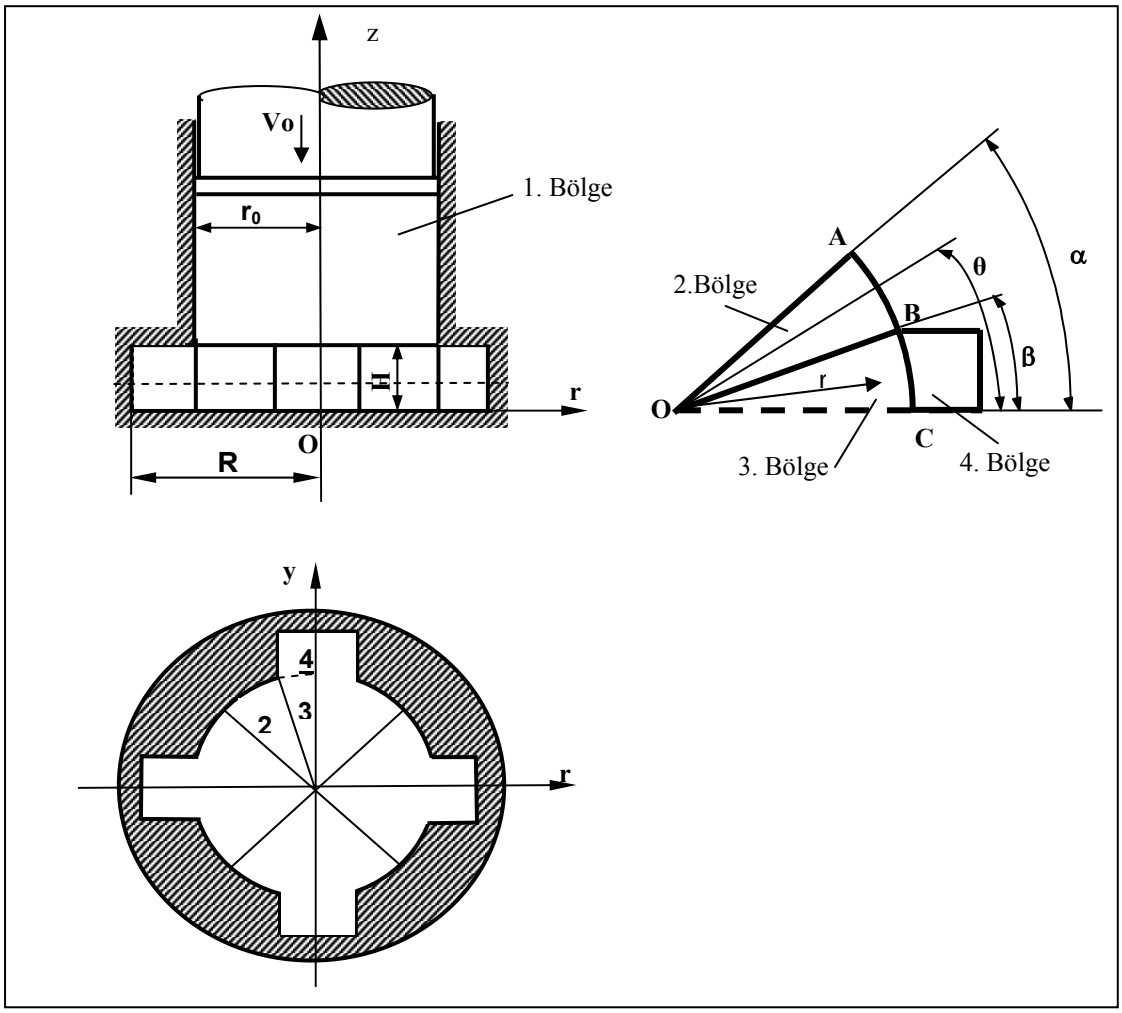
Denklem (5.3.1)'in sağ tarafındaki ilk terim ideal plastik deformasyon için gerekli güç miktarı, ikinci terim bölgeler arası geçişteki hız süreksizliğinden gelen güç kayıpları ve üçüncü terim de takım-iş parçası arasındaki sürtünme için harcanan gücü ifade etmektedir. Silindirik koordinatlarda tüm bölgeler için gerinim hızı bileşenleri ise yine daha önce bahsedildiği üzere şu formüllerle elde edilmektedir;

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{1}{r}\left(\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_r\right), \qquad \dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} \tag{5.3.2}$$

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

(5.3.3)

Düz dişli form için deformasyon bölgeleri ve seçilen hız geçiş yüzeyleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Deformasyon bölgeleri ve seçilen hız geçiş yüzeyleri
(Altınbalık, T., Çan Y., 2005)

Tablo 5.1. Önerilen kinematik olarak kabul edilebilir hız alanları

	V_r	V_θ	V_z
1. Bölge	0	0	$-V_0$
2. Bölge	0	$-V_0(\alpha-\theta)\frac{r}{H}$	$-V_0\frac{z}{H}$
3. Bölge	$V_0\frac{r\alpha}{2H\beta}$	$-V_0\frac{r(\alpha-\beta)\theta}{H\beta}$	$-V_0\frac{z}{H}$
4. Bölge	$V_0\frac{r_o^2\alpha}{2Hr\beta}$	0	0

Tablo 5.1.'deki hız alanları kullanılarak, (5.3.2) ve (5.3.3) 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,

$$F = W / V_0 \tag{5.3.4}$$

ifadesi ile hesaplanmıştır.

Yapılan tez çalışmasında yanal ekstrüzyon ile düz dişli benzeri parçaların imalatı ile ilgili olarak sadece deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Tez çalışmasının bu bölümünde kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi ve yanal ekstrüzyon yöntemi ile ilgili olarak yapılan deneyler ve deneylerden elde edilen sonuçlar üzerinde durulacaktır. Ayrıca dişli benzeri konik formlar için geliştirilen matematiksel modellemeden elde edilen sonuçlar, aynı formlardan elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

6.1. YANAL EKSTRÜZYON ve KAPALI KALIPLA KLASİK DÖVME YÖNTEMİ DENEYLERİ

6.1.1. Kuvvet-Strok Ölçüm Sonuçları

Dördüncü bölümde bahsedilen kalıplar, pres düzeneği ve deney malzemesi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.'de ölçüleri verilen deney numuneleri hazır hale getirildikten sonra aseton ile silinerek kalıpların içine yerleştirilmiştir. Böylelikle her numune için eşit sürtünme koşulları oluşturulmuştur. Deneylerde her iki yöntem için farklı geometri ve diş sayılarına sahip kalıplarda kuvvet-strok eğrileri oluşturulmuştur. Zımbanın aşağı doğru olan hareketine bağlı olarak malzemenin diş boşluklarına girmeye başladığı andan dişin tam doluluğa ulaştığı ana kadar olan değişik stroklarda her deney grubu için sekizer adet deney numunesi hazırlanmıştır. Şekil 6.1.'de her iki yöntem ile farklı stroklarda basılmış numuneler görülmektedir. Yorulma deneylerinde ise, finiş boyutuna sahip numuneler elde edebilmek amacıyla her deney grubu için altışar adet deney numunesi işlenmiştir. Şekil.6.2.'de her iki yöntem ile basılmış numunelerin finiş boyutları veya finişe çok

yakın boyutları gösterilmektedir. Aynı prensiple mikro-sertlik deneyleri için de ikişer adet deney numunesi işlenmiştir.

Yanal ekstrüzyon yönteminde başlangıçtaki numune boyu, "h_0" ve numune çapı, "d_0" olmak üzere h_0/d_0 oranı "1,8" olarak hesaplanmıştır. Yanal ekstrüzyon deneyleri yapılırken ilk olarak zımbanın kalıp içindeki deney numunesine deformasyon yaratmadan teması sağlanmıştır. Daha sonra belirlenen strok mesafelerinde malzemenin üzerine kuvvet uygulanmıştır. Zımba istenen strok mesafesine gelince pres otomatik olarak durmuştur. Böylelikle farklı stroklarda, farklı kuvvet değerleri okunarak kuvvet-strok eğrisi oluşturulmuştur. Strok mesafesinin arttırılması ile doğal olarak diş boşluklarına daha fazla malzeme girmeye başlamış ve böylelikle malzeme üzerine daha fazla kuvvet uygulanmıştır. Şekil 6.1.'de artan strok miktarı ile birlikte diş mesafesi oluşumu daha iyi görülmektedir.

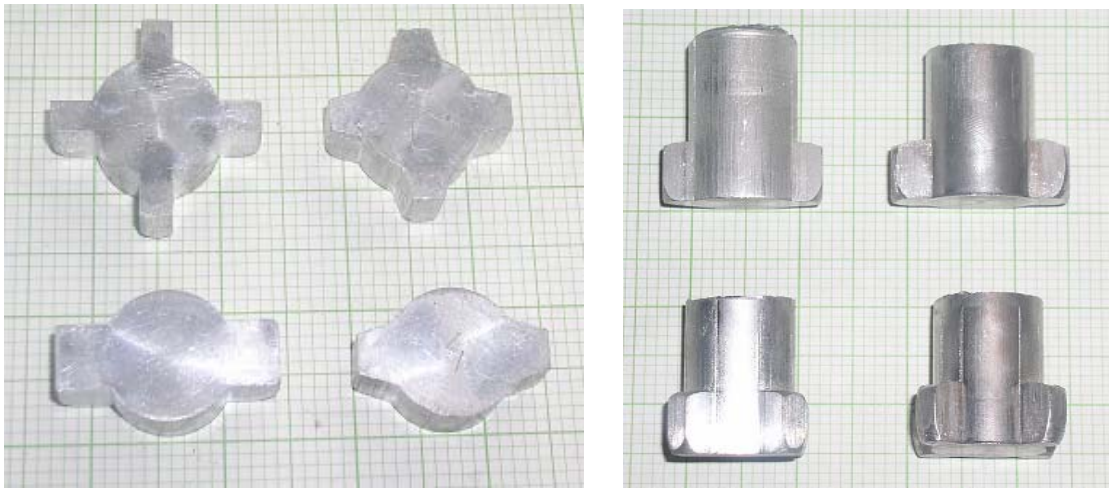


a)



b)

Şekil 6.1. a) Kapalı kalıpla klasik dövmede diş oluşumu , b) Yanal ekstrüzyonda diş oluşumu



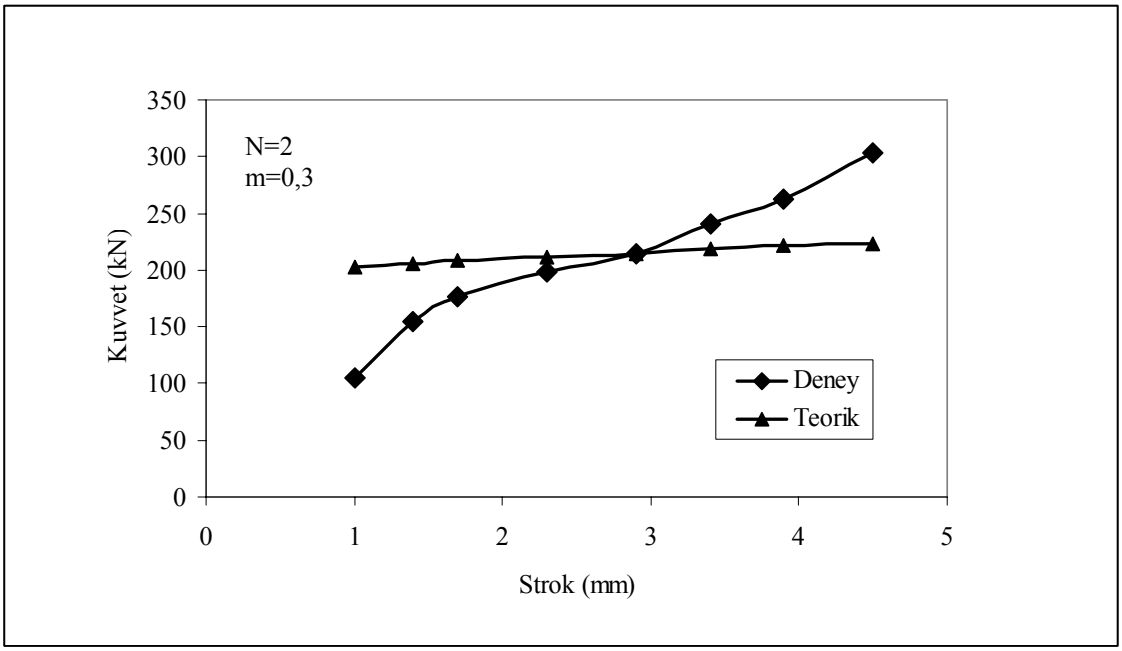
a) b)

Şekil 6.2. a) Kapalı kalıpla klasik dövmede bitmiş ürün, b) Yanal ekstrüzyonda bitmiş ürün

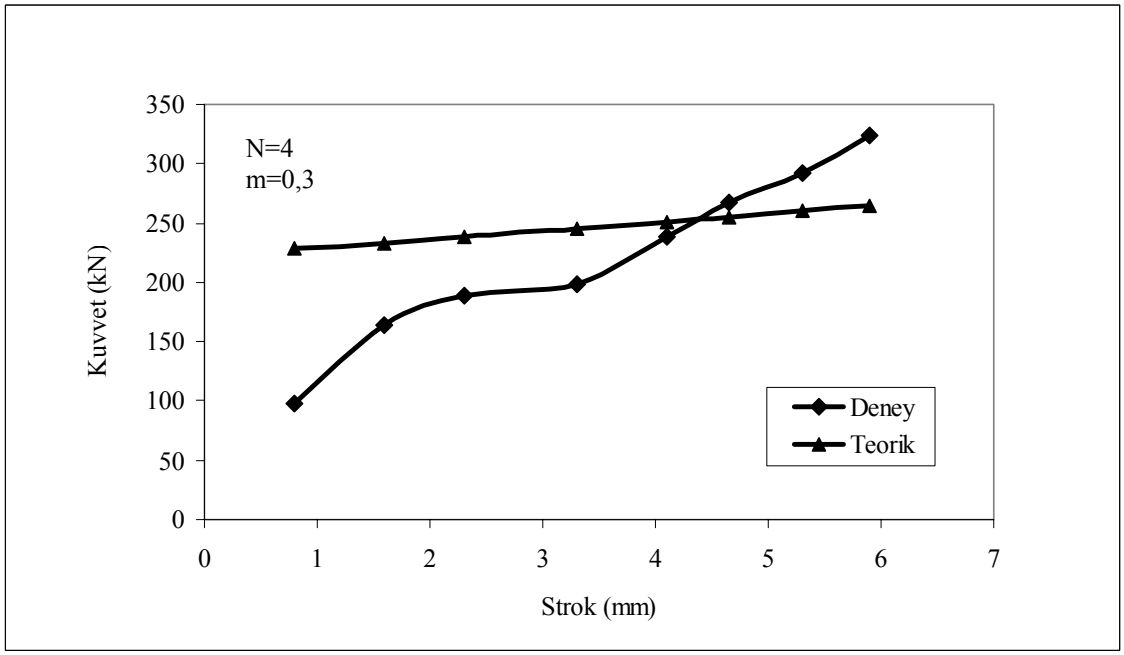
Şekil 6.1.'de görüldüğü üzere malzemenin diş boşluğundaki akışı dişin yan kenarlarından başlayarak dişin ön duvarına doğru devam etmektedir. Malzemenin kalıbı tam olarak doldurmasından önce malzemede fıçılaşma söz konusudur. Diş boşluğundaki doluluk, dişin üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru üniform değildir. Bunun sebebi; sürtünmenin dişin üstünde ve altında farklı olmasıdır. Malzeme akışı, diş üstünde daha hızlıdır. Tam doluluğa ulaşana kadar diş üstündeki alan alttaki alana göre daha büyüktür. Tam diş doluluğuna sahip parçalar üretilirken artan strokla birlikte, malzemenin kalıbın ön duvarına değmesi sonucu kuvvet daha da hızlı artmaya başlamaktadır. Bu kuvvet artışı ile birlikte dişin üst ve alt köşeleri dolmaya başlamaktadır. Bu bölge Bölüm 5.'de anlatılan 4. bölgedir ve "diş köşelerinin doldurulduğu bölge" olarak adlandırılabilir. Fakat, malzemede dişin ön duvarına dokunmadan önce sürtünmeye bağlı olarak bir fıçılaşma olduğu için 4. bölgede dişin üst kısmının köşeleri tam olarak dolsa bile alt köşelerde az da olsa boşluklar kalmaktadır. Ancak, dişin ön duvarında böyle bir durum söz konusu değildir.

Bölüm 5.'te anlatıldığı üzere Üst Sınır Analizi, az zaman alması ve çok fazla teorik bilgiye gereksinim duymaması nedeniyle kuvvet tahmini hesaplarında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Uygun hız alanları seçildiğinde bu yöntem, şekillendirilecek

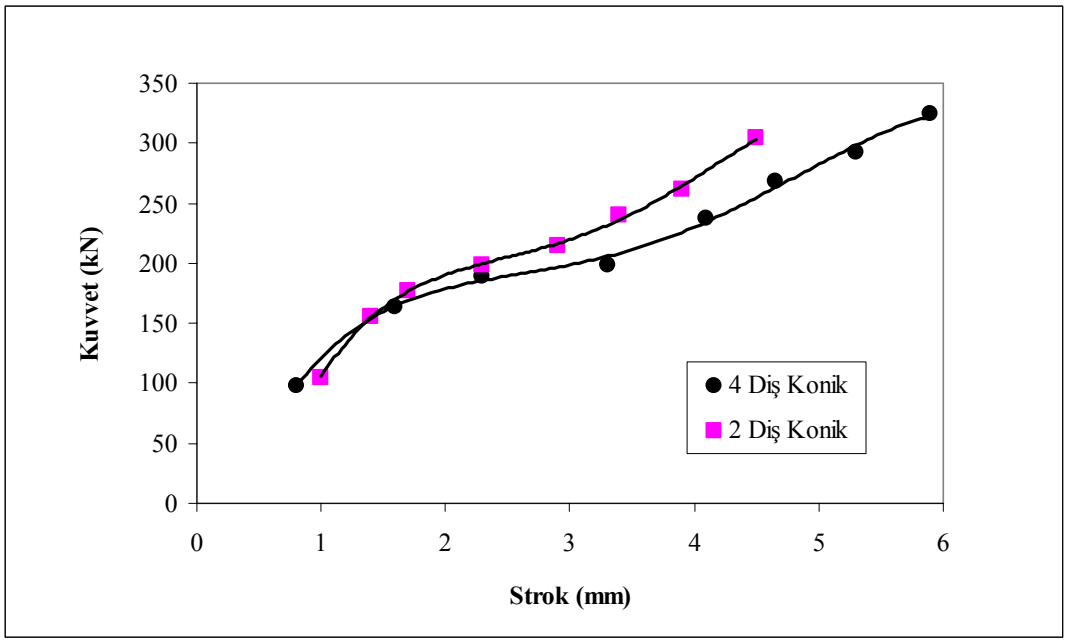
parçanın gereksinim duyduğu kuvvete eşit veya bundan daha fazla bir kuvvet değeri verdiği için, seçilecek iş makinesinin kapasitesinin belirlenmesinde önemli ölçüde faydalı olmaktadır.



Şekil 6.3. Konik iki dişli form için Üst Sınır Analizi sonuçlarının deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması



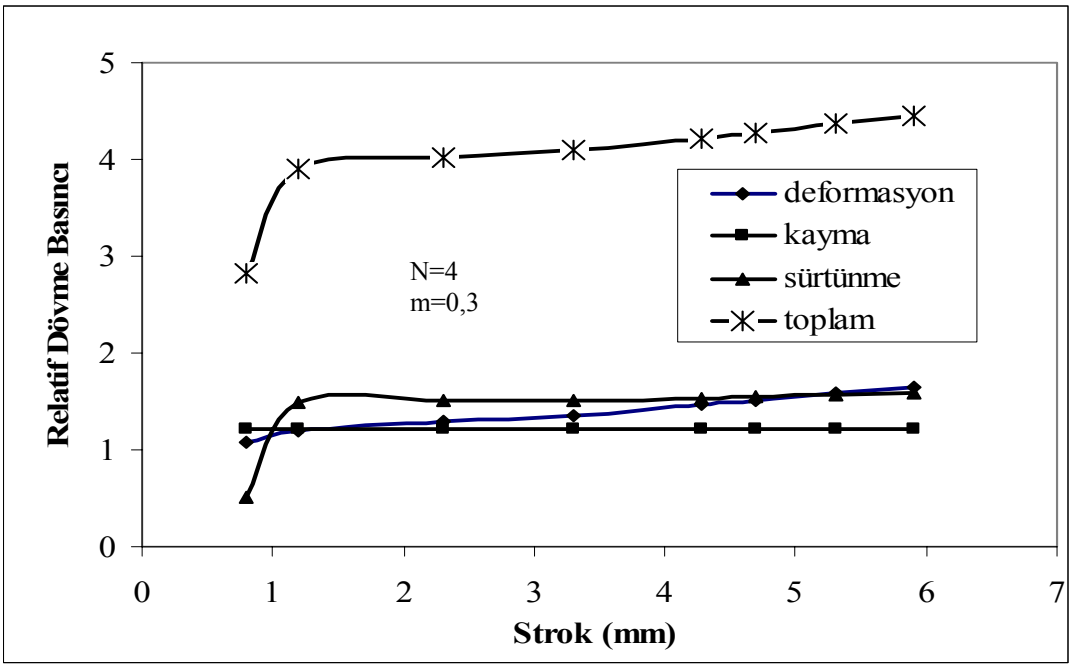
Şekil 6.4. Konik dört dişli form için Üst Sınır Analizi sonuçlarının deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması



Şekil 6.5. Yanal ekstrüzyonda iki ve dört dişli konik formda verilen stroka karşılık elde edilen kuvvetlerin karşılaştırılması

İki ve dört dişli konik formlar için Üst Sınır Analizi yöntemi kullanılarak ekstrüzyon kuvveti nümerik olarak belirlenmiştir. Şekil 6.3. ve Şekil 6.4.'de sabit sürtünme şartlarında (m=0,3) farklı diş sayılarında verilen stroka karşılık elde edilen deneysel ve teorik ekstrüzyon kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Grafiklerden de anlaşıldığı üzere, diş sayısına bağlı olarak ekstrüzyon kuvveti artmaktadır. Bu sonuç zaten olması beklenen sonuçtur ve deneysel olarak da ispatlandığı Şekil 6.5.'de görülmektedir. Diş sayısı arttıkça, kayma enerjisi artmaktadır, takım-malzeme temas yüzeyi artmaktadır. Ayrıca, deformasyona uğrayan malzeme hacmi artmaktadır. Bunlara bağlı olarak da uygulanan kuvvet artmaktadır. Teorik hesaplarda da kayma enerjisi, sürtünme enerjisi ve deformasyon enerjisi toplanarak ekstrüzyon kuvveti değeri hesaplandığı için, diş sayısının artışına bağlı olarak teorik hesaplardan elde edilen kuvvetler de artmaktadır. Yukarıdaki iki grafikten (Şekil 6.3., Şekil 6.4.) görüldüğü üzere, zımba strokuna bağlı olarak deneysel ve teorik kuvvetler yavaş yavaş artmaktadır. Her iki grafikte de deney malzemesinin kalıp boşluğuna girmeye başladığı anlarda teorik kuvvetler deneylerden elde edilen kuvvetlerden daha yüksektir. Fakat daha sonra deneysel kuvvetler bir anda artmaktadır. Bu durum şöyle açıklanabilir; deney malzemesi kalıp ön duvarına dokunana kadar seçilen hız alanlarına bağlı olarak kalıp boşluğunda akmaya başlar.

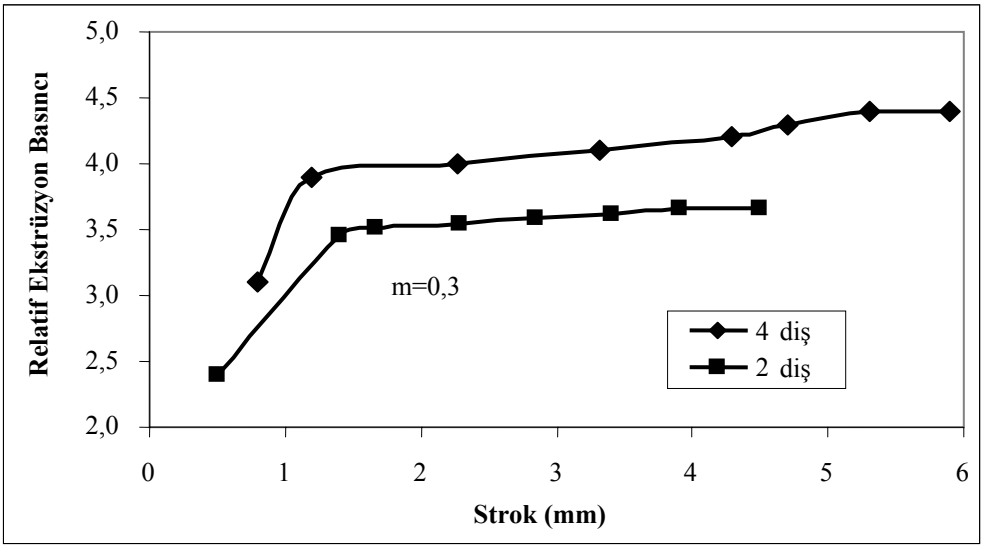
Malzemenin ön duvara değmesi ile birlikte sıra diş köşelerinin doldurulmasına gelmiştir. İşte bu aşamada köşelerin doldurulması için fazla kuvvet gerekmektedir ve gereken bu fazla kuvvet teorik analizde hız alanları hesabına dahil edilmemektedir. Dolayısı ile diş köşelerinin doldurulmasında deneysel kuvvetlerin teorik kuvvetlerden fazla çıkması beklenen sonuçtur ve grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.6. Konik dört dişli formda hız bileşenlerinin toplam ekstrüzyon basıncına etkisi

Şekil 6.6.'dan da görüldüğü üzere kayma enerjisi, sürtünme kaybı, iç deformasyon enerjisi toplam ekstrüzyon kuvvetinin hesaplanmasında önemli rol oynarlar. Dört dişli form için artan stroka karşılık Relatif Ekstrüzyon Basıncı yukarıda verilmektedir. Kayma enerjisi sabittir ve strokun artmasıyla değişmez. Fakat toplam relatif ekstrüzyon basıncına büyük katkı sağlar. Buradan, gerekli ekstrüzyon kuvveti için hız süreksizliklerinin hesaplanmasının önemli bir unsur olduğu ortaya çıkmaktadır. Bunun için kayma yüzeyleri doğru olarak tahmin edilmeli ve çözümler bu tahminlere bağlı olarak yapılmalıdır. Buna karşılık sürtünme enerjisinin etkisi de göz ardı edilmemelidir. İç deformasyon enerjisi ise zımba basıncı arttıkça artmaktadır. Bunun

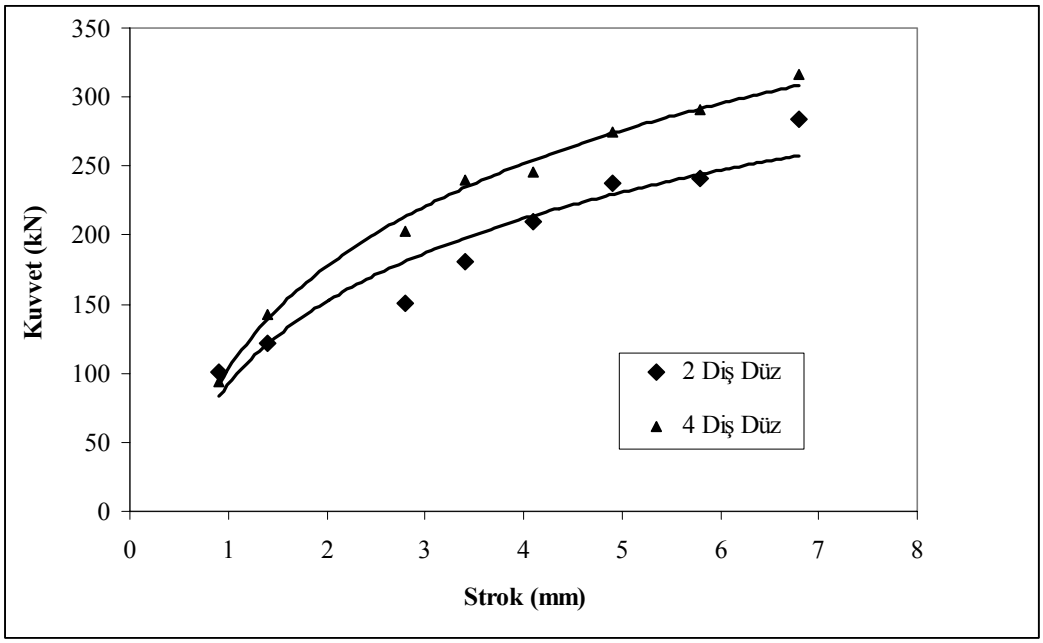
sebebi ise strok arttıkça diş sayısına bağlı olarak deformasyon bölgesinin hacminin artmasıdır. Aşağıda Şekil 6.7.'den de görüldüğü üzere, aynı sürtünme şartlarında iki ve dört dişin Relatif Ekstrüzyon Basıncındaki değişim verilmektedir. Görüldüğü üzere iki dişte Relatif Ekstrüzyon Basıncı daha azdır. Zımba stroku her iki diş için de farklıdır çünkü, diş boşluğuna giden malzeme miktarı iki dişte dört dişe göre daha azdır.



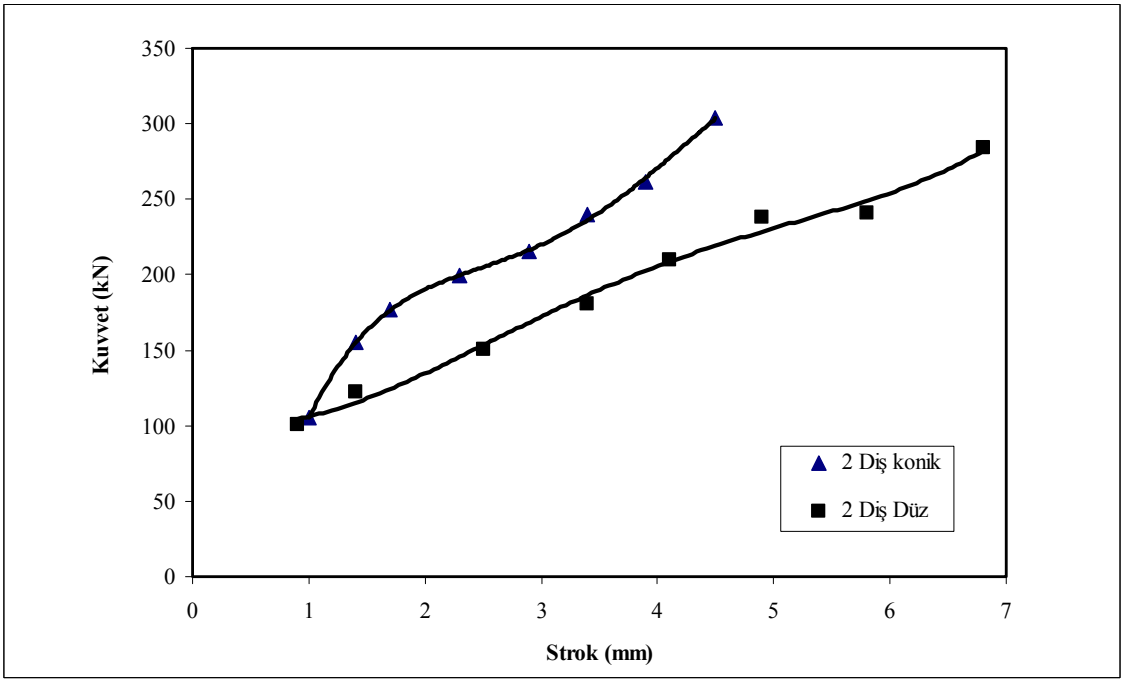
Şekil 6.7. Konik iki ve dört diş için Relatif Ekstrüzyon Basıncının karşılaştırılması

Sonuç olarak şu söylenebilir ki, Relatif Ekstrüzyon Basıncı öncelikli olarak diş sayısına bağlıdır. Bunun sebebi de, diş sayısının artmasıyla birlikte kayma enerjisinin, sürtünme kayıplarının ve deformasyon bölgesinin hacminin artıyor olmasıdır.

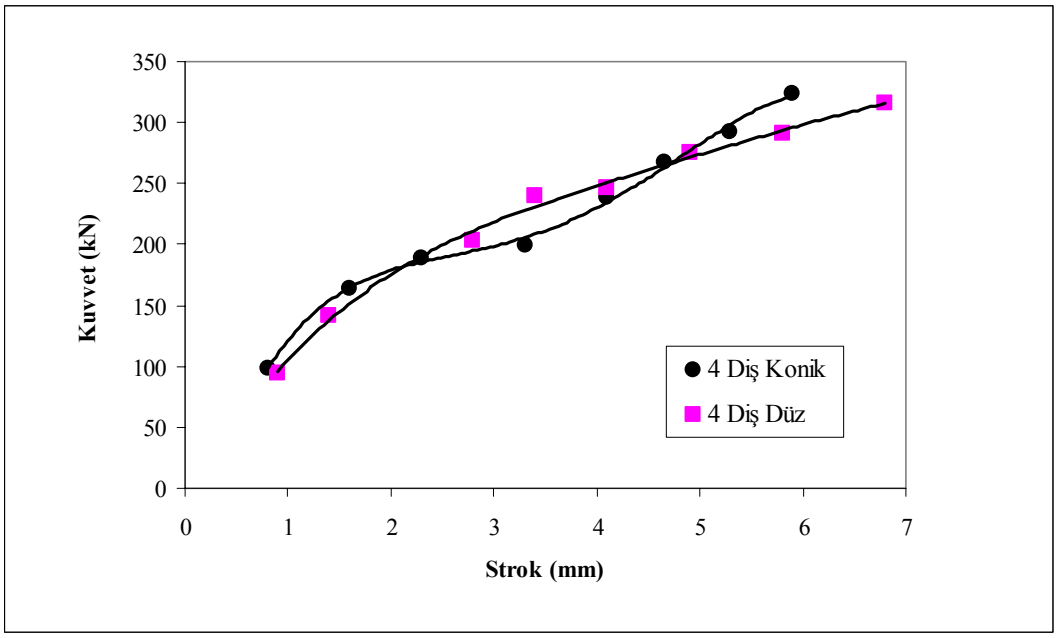
Eşit finiş boyutu hacmine sahip iki ve dört düz dişli benzeri parçaların yanal ekstrüzyon ile üretimi sonrasında elde edilen kuvvet-strok grafiği Şekil 6.8.'de gösterilmektedir. Daha önceden de belirtildiği üzere diş sayısına bağlı olarak takım-malzeme arasındaki sürtünme arttığı için ekstrüzyon kuvveti de artmaktadır. Grafikten görülebileceği gibi, diş sayısı arttıkça doğal olarak kuvvette artmaktadır. İki farklı diş sayısına sahip alt kalıplar ile yapılan deneyler sabit sürtünme şartlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.8. Yanal ekstrüzyonda düz dişli benzeri taslakların kuvvet-strok grafiği



Şekil 6.9. Yanal ekstrüzyonda düz ve konik formların kuvvet-strok grafiği

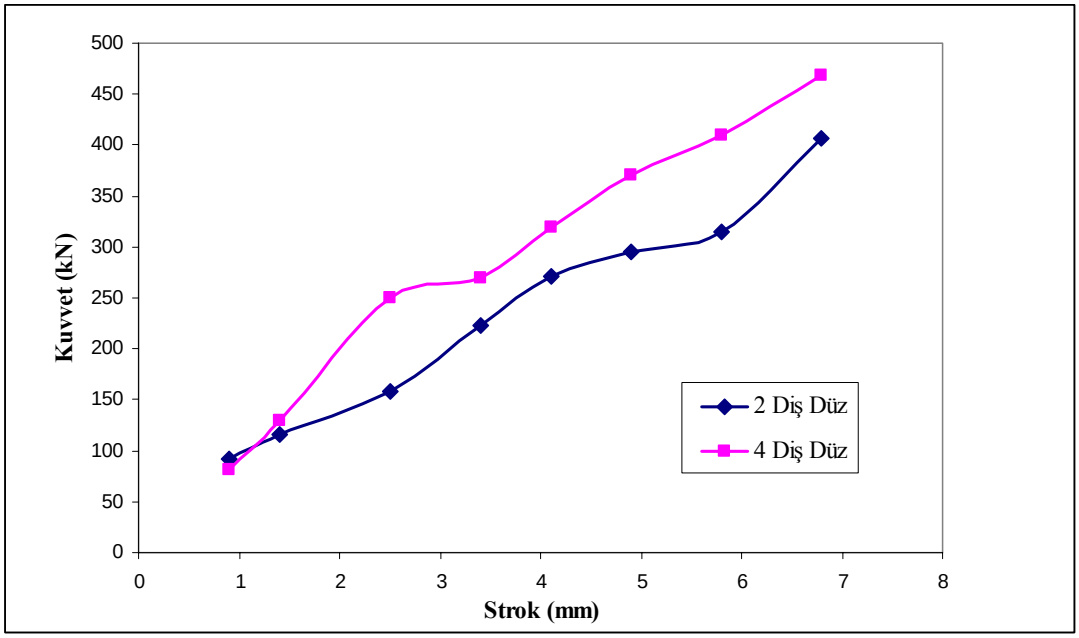


Şekil 6.10. Yanal ekstrüzyonda dört dişe sahip düz ve konik formların kuvvet-strok grafiği

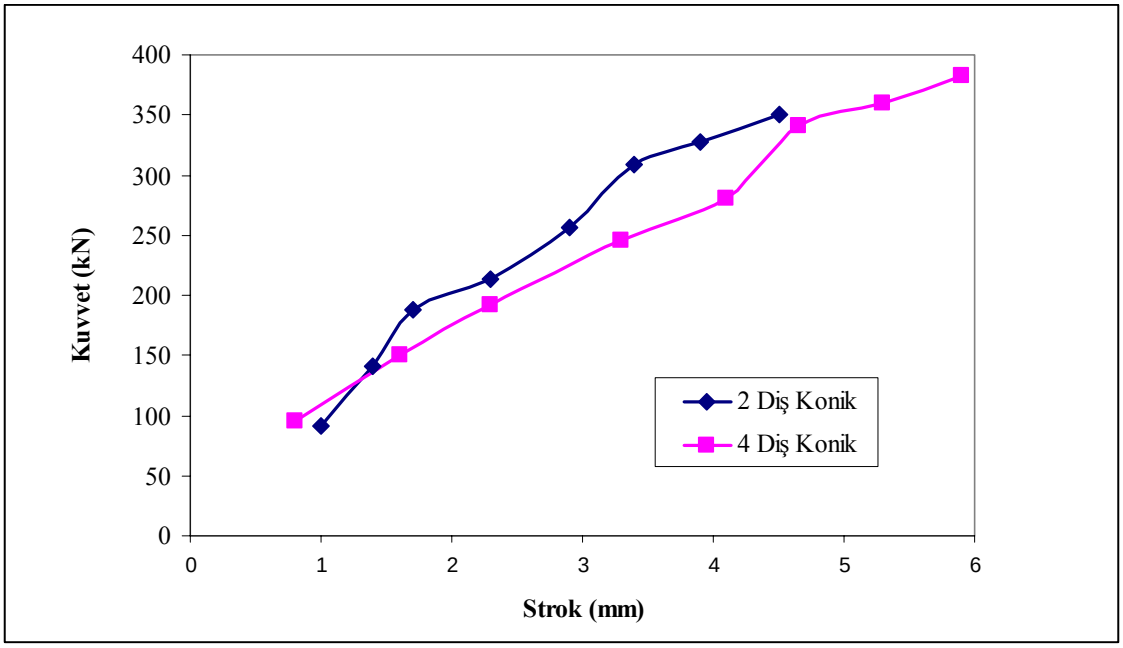
Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da yanal ekstrüzyon yöntemi deneylerinde aynı diş sayısına fakat farklı geometriye sahip kalıplardan elde edilen kuvvet-strok grafikleri verilmektedir. Şekil 6.9.'da iki dişe sahip konik ve düz dişli benzeri formların kuvvet-strok grafiği, Şekil 6.10.'de ise dört dişe sahip konik ve düz dişli benzeri formların kuvvet-strok grafiği verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere konik formların düz formlara göre kalıp boşluğunda doldurdukları hacim azdır. Buna bağlı olarak ön duvara kadar olan strok mesafeleri de azdır. Bu durum sürtünmenin az olacağını ve dolayısı ile kuvvetin düz forma göre daha az çıkması gerektiğini göstermektedir. Hem her iki farklı geometrideki formunda diş boşluğundaki hacim farklılıklarının çok fazla olmaması, hem de konik formda malzemenin kalıbın içine daralan bir kesit alanına bağlı olarak akması kuvvetin farklı çıkmasında başlıca etken olarak gösterilebilir. Dolayısı ile kuvvet konik formda daha büyük çıkmaktadır.

Kapalı kalıpla klasik dövme deneylerinde de Bölüm 4.'te verilen ölçülere sahip numuneler kullanılmıştır. Deney prosedürü aynen yanal ekstrüzyonda olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Kapalı kalıpla dövmede aynı diş geometrisinde, aynı alana sahip,

farklı diş sayılarındaki kalıplardan elde edilen kuvvet-strok eğrileri Şekil 6.11. ve Şekil.6.12.'de gösterilmektedir.



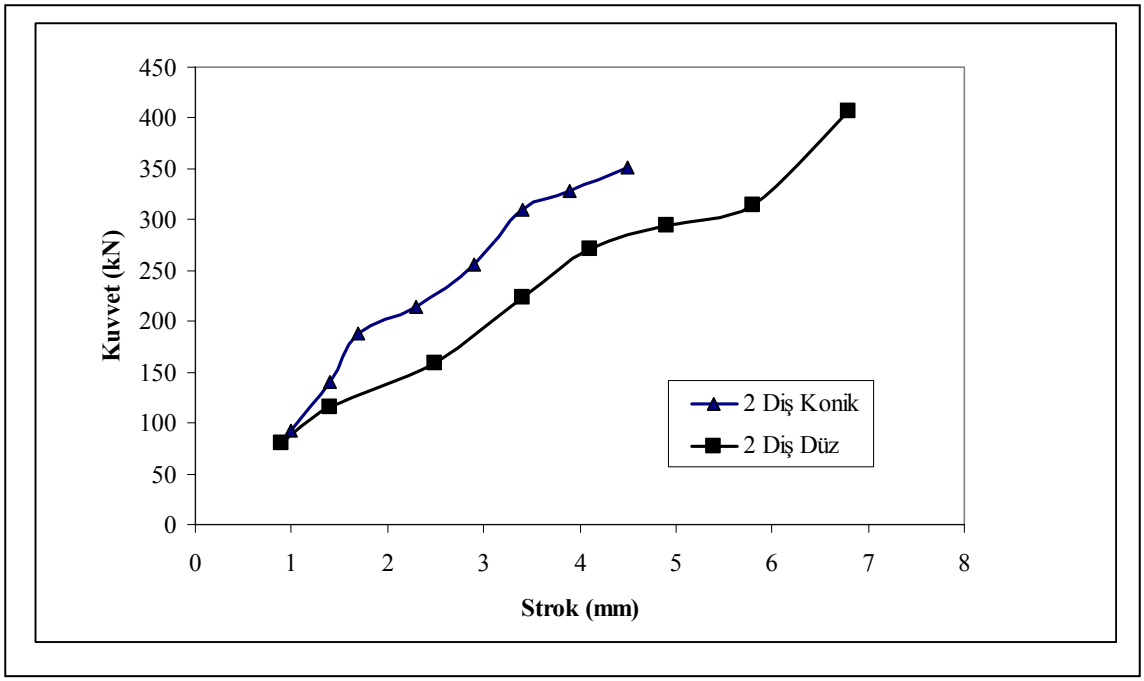
Şekil 6.11. Kapalı kalıpla klasik dövmede düz dişli benzeri formların kuvvet-strok grafiği



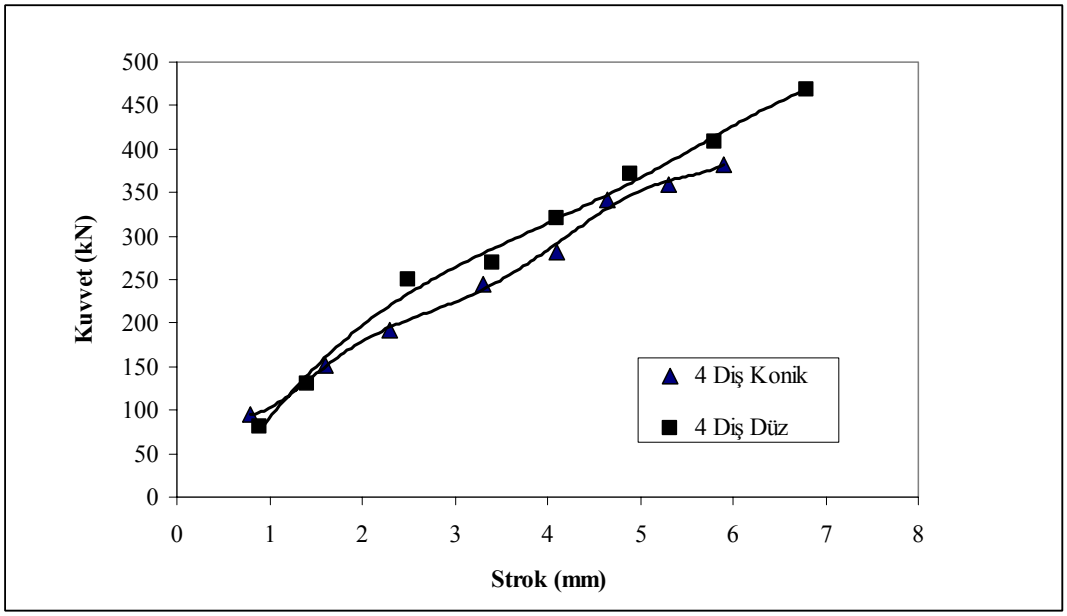
Şekil 6.12. Kapalı kalıpla klasik dövmede konik dişli benzeri formların kuvvet-strok grafiği

Yukarıdaki iki grafik incelendiğinde kapalı kalıpla klasik dövmede de aynen yanal ekstrüzyona benzer şekilde diş sayısı arttığında kalıp-malzeme ara yüzeyindeki sürtünmeye bağlı olarak kuvvetler de artmaktadır. Ayrıca, deney malzemesinin kalıp ön duvarına değmesi ile birlikte kuvvetler daha da hızlı artmaktadır. Çünkü, bu safhadan sonra artık kalıp köşeleri de malzeme ile dolmaya başlamıştır dolayısıyla kuvvet daha hızlı bir şekilde artar.

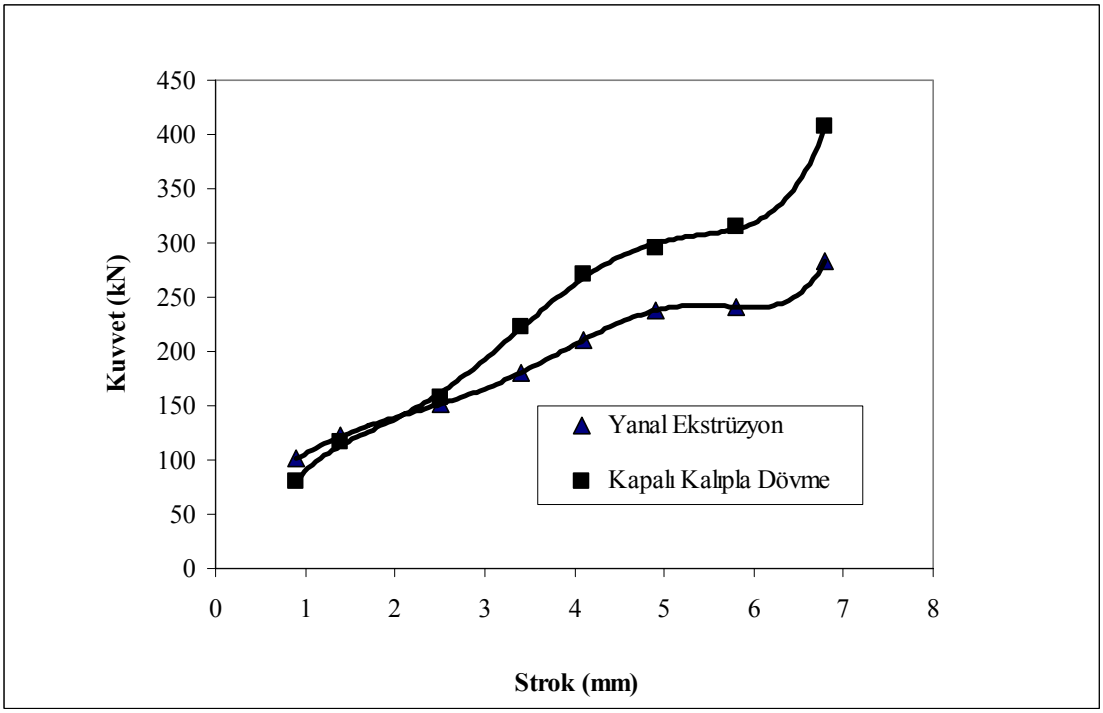
Aşağıda Şekil 6.13. ve Şekil 6.14.' te ise, eşit diş sayısına fakat farklı diş geometrisine sahip dişli formlarının kuvvet-strok eğrileri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere düz dişli formda strokun fazla olması deney malzemesinin daha fazla yüzeye sürtündüğü, başka bir deyişle malzemenin sürtündüğü yüzey hacminin daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısı ile düz dişli formların kuvvetlerinin daha fazla çıkması normaldir.



Şekil 6.13. Kapalı kalıpla klasik dövmede iki dişe sahip düz ve konik formların kuvvet-strok grafiği



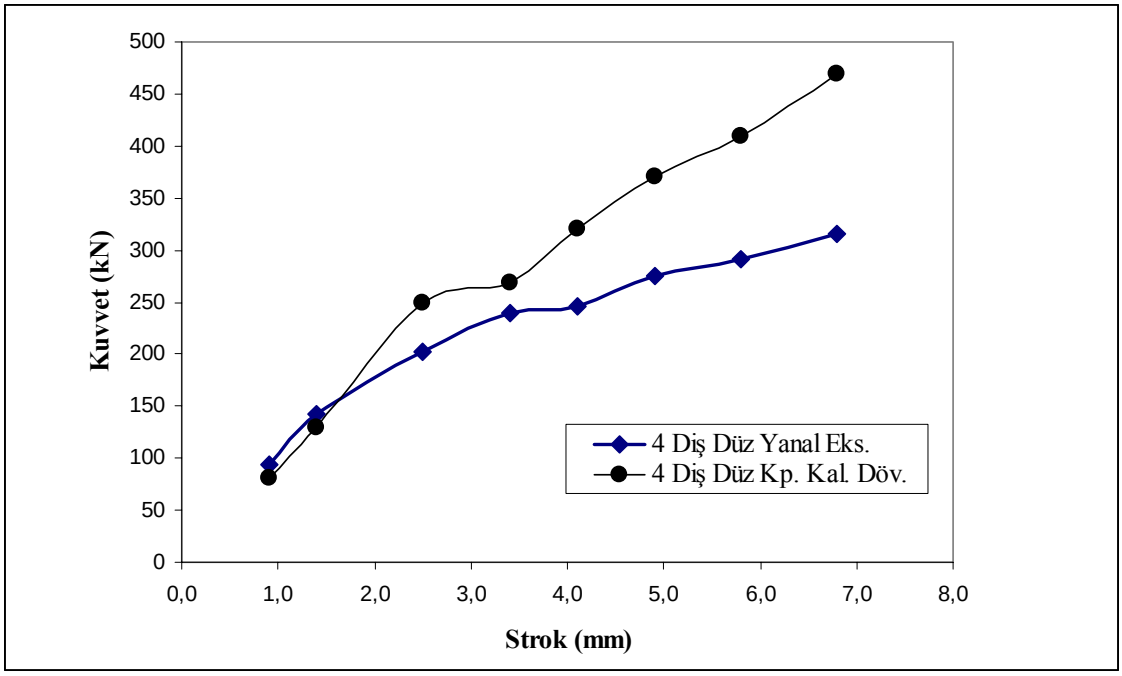
Şekil 6.14. Kapalı kalıpla klasik dövmede dört dişe sahip düz ve konik formların kuvvet-strok grafiği



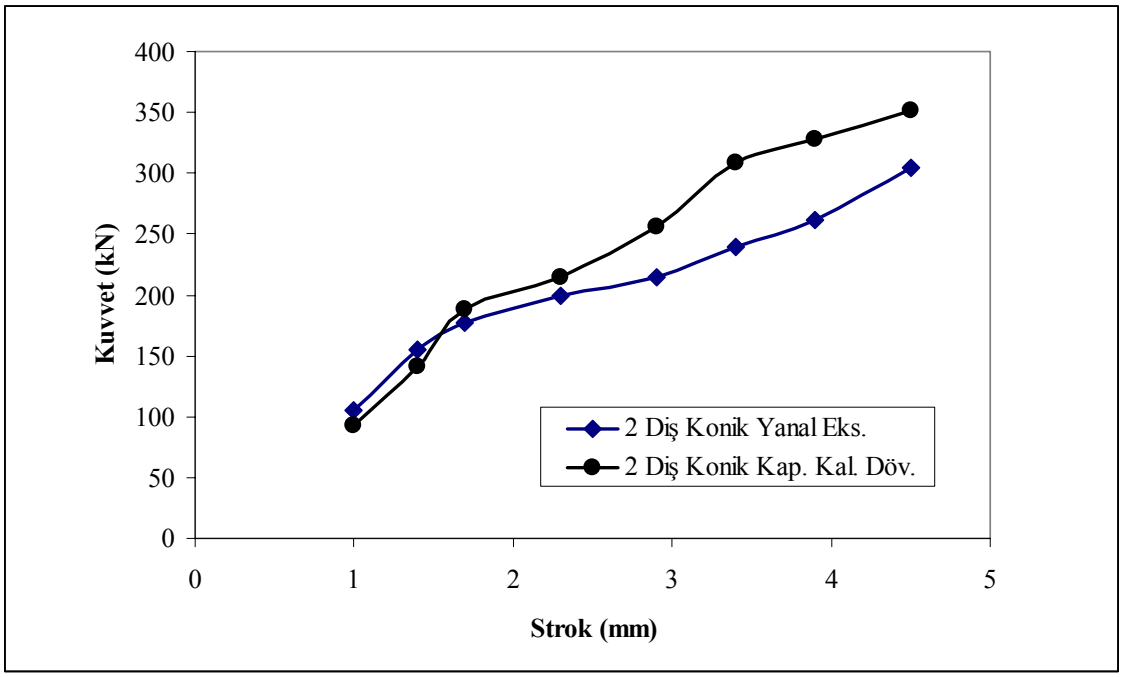
Şekil 6.15. İki dişe sahip düz dişli benzeri formun yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme kuvvet-strok eğrileri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda asıl varılmak istenen nokta, aynı diş sayısına ve aynı geometriye sahip yanal ekstrüzyon yöntemi ve kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi sonucu elde edilen dişli benzeri taslakların aynı stroklarda kuvvetlerinin karşılaştırılmasıydı. Şekil 6.15.'de iki dişe sahip düz dişli benzeri formun yanal ekstrüzyon yöntemi deneylerinden ve kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi deneylerinden elde edilen kuvvet-strok eğrileri verilmektedir.

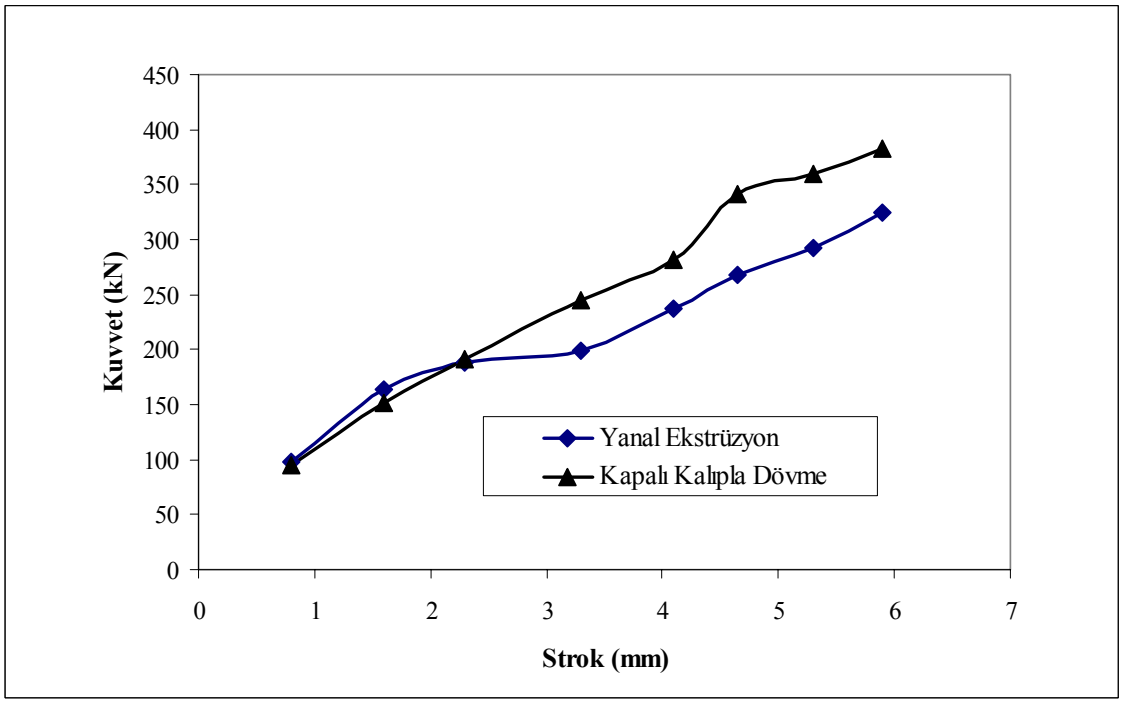
Kapalı kalıpla dövmede finiş boyutuna doğru kuvvetin daha yüksek olduğu görülmektedir. Çünkü kapalı kalıpla dövmede diş formunun finiş boyutu yüzey alanının ölçülerine sahip olan üst kalıp, deneyin ilk anından itibaren deney numunesine temas etmektedir. Böylelikle temas yüzeyine bağlı olarak kuvvet yanal ekstrüzyondan daha fazla çıkmaktadır. Ancak, malzemenin kalıbın içine akmaya başladığı ilk anlarda yanal ekstrüzyon kuvvetinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise, kalıp içine az malzeme girdiği için kapalı kalıpta üst kalıbın alt yüzeyi fazla miktarda malzeme yüzeyine temas edememekte, buna karşılık yanal ekstrüzyonda ise, kalıba malzeme girmeye başladığı ilk anda sap kısmından dolayı sürtünme daha fazla olmaktadır.



Şekil 6.16. Dört dişe sahip düz dişli benzeri formun yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme kuvvet-strok eğrileri



Şekil 6.17. İki dişe sahip konik dişli benzeri formun yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme kuvvet-strok eğrileri

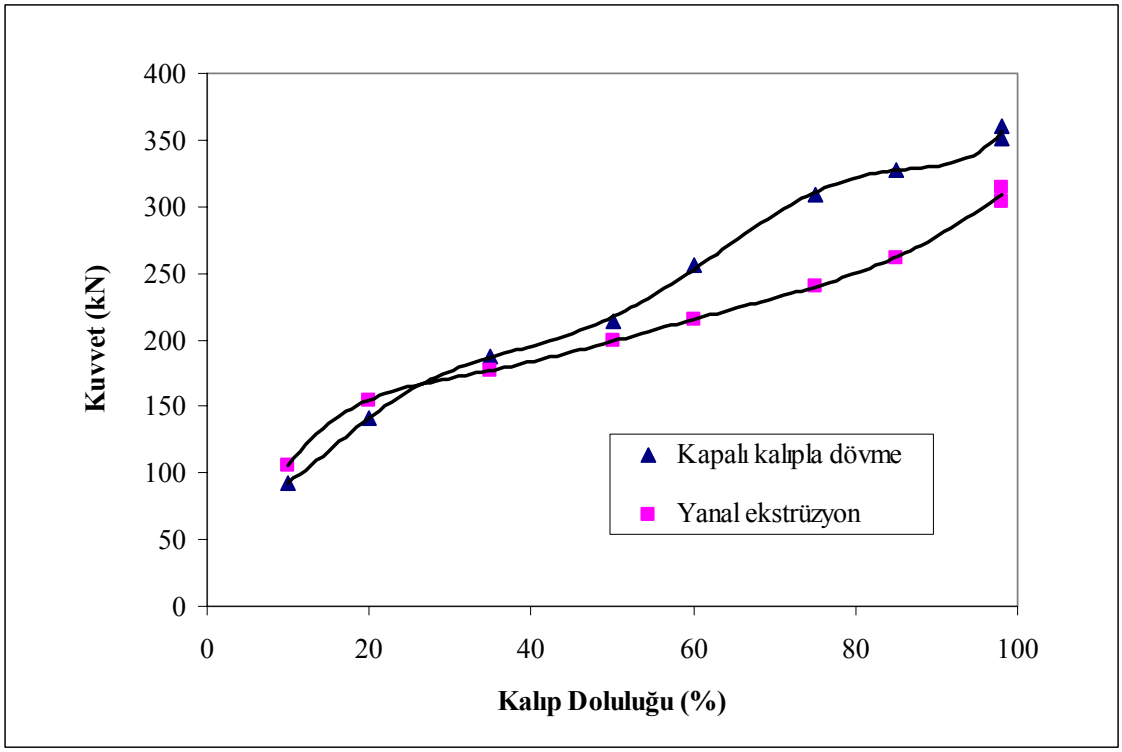


Şekil 6.18. Dört dişe sahip konik dişli benzeri formun yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme kuvvet-strok eğrileri

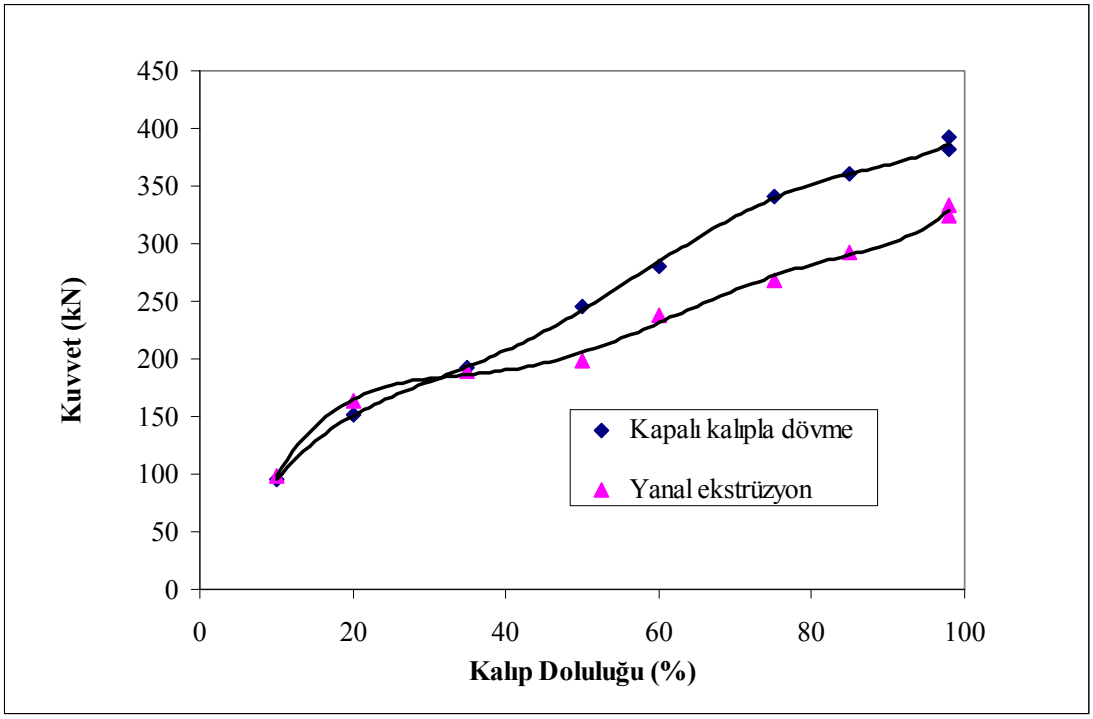
Şekil 6.16., Şekil 6.17. ve Şekil 6.18.'deki kuvvet-strok eğrilerinde de finiş boyutuna sahip ürünlerin kapalı kalıpla dövme kuvveti, yanal ekstrüzyon kuvvetinden büyüktür. Şekil 6.15. için yapılan yorumlar bu grafiklerin her biri için aynı mantıkla yapılabilir. Yapılan deneyler sonucunda; iki ve dört dişe sahip düz dişli benzeri formlar için yanal ekstrüzyonda, kapalı kalıpla dövmeye oranla sırasıyla %31 ve %37, iki ve dört dişe sahip konik dişli benzeri formlar için yanal ekstrüzyonda, kapalı kalıpla dövmeye oranla sırasıyla %13 ve %17, oranında kuvvet kazancı elde edilmiştir.

6.1.2. Kuvvet-Kalıp Doluluğu Ölçüm Sonuçları

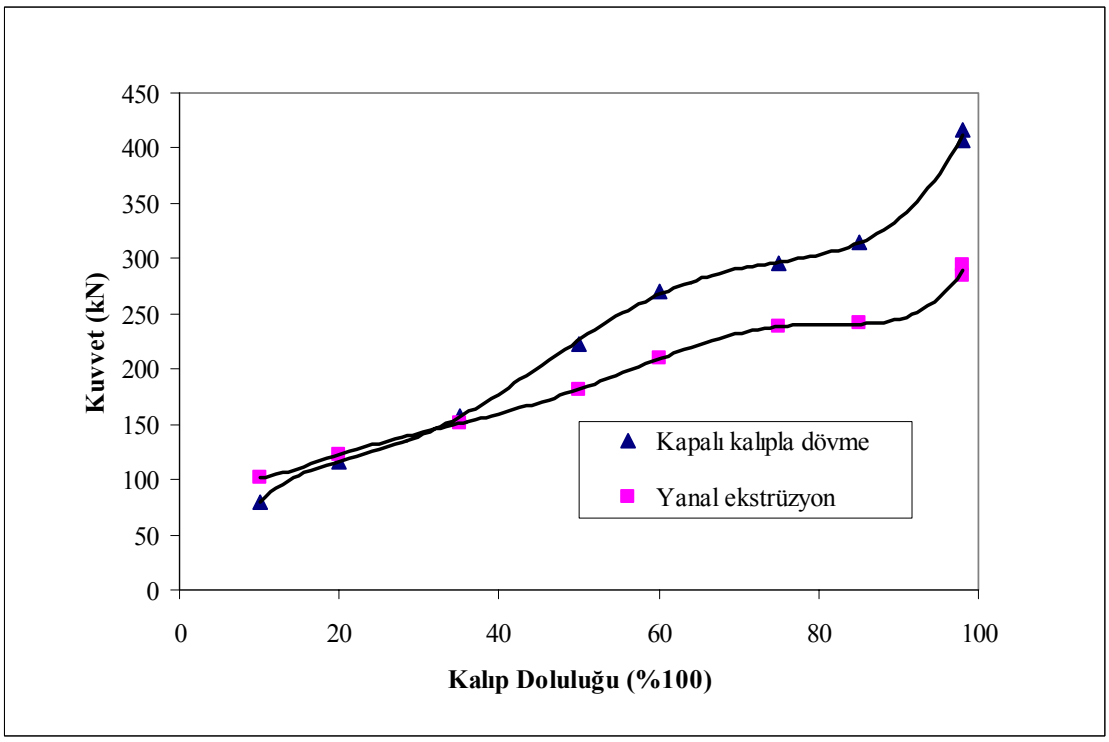
Yanal ekstrüzyon yöntemi ve kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi ile üretilen parçaların farklı geometri ve diş sayıları için dövme kuvvetinde kalıp doluluğunun etkisini gösteren grafikler aşağıda sunulmaktadır.



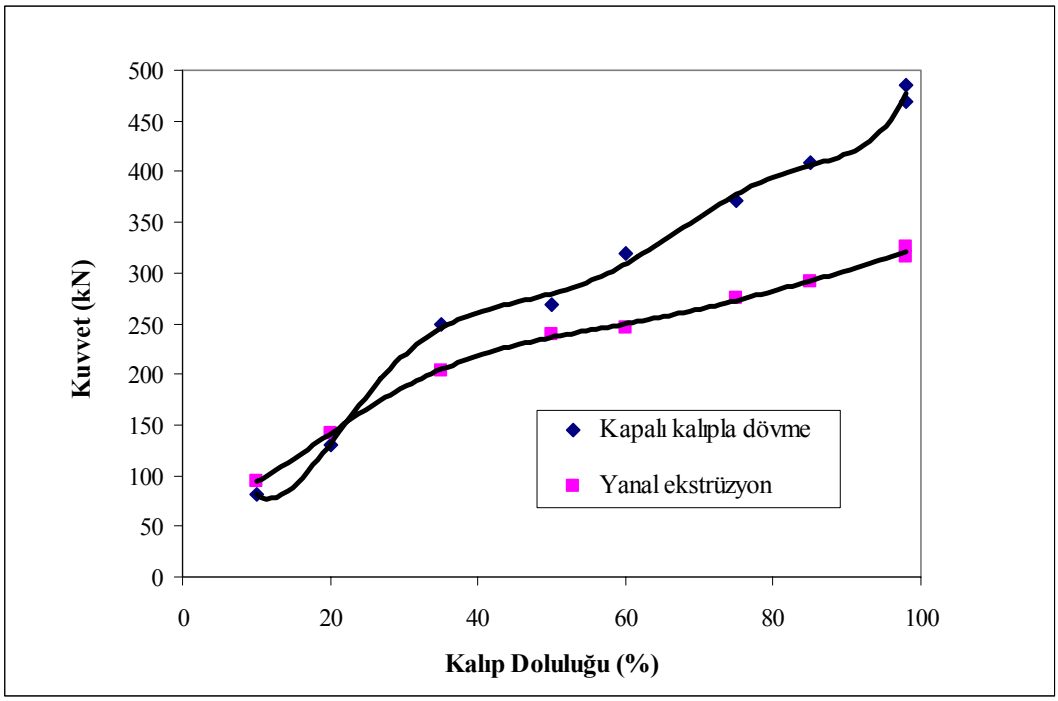
Şekil 6.19. İki dişli konik formda farklı iki yöntemde kalıp doluluğunun kuvvete etkisi



Şekil 6.20. Dört dişli konik formda farklı iki yöntemde kalıp doluluğunun kuvvete etkisi



Şekil 6.21. İki dişli düz formda farklı iki yöntemde kalıp doluluğunun kuvvete etkisi



Şekil 6.22. Dört dişli düz formda farklı iki yöntemde kalıp doluluğunun kuvvete etkisi

Yukarıda Şekil 6.19.-Şekil 6.22. arasındaki grafikler incelendiğinde her iki yöntemde de malzemeye uygulanan kuvvetle birlikte kalıp doluluğunun da arttığı görülmektedir. Grafiklerin tümünde net şekle yakın kalıp doluluğu elde etmek için kapalı kalıpla yapılan dövmede yanal ekstrüzyona oranla daha fazla kuvvet harcandığı gözlenmiştir. Buna bağlı olarak dişli benzeri parçaların üretiminde net veya nete yakın şekle sahip parçaların kalıp doluluğunun sağlanmasında yanal ekstrüzyonda kapalı kalıpla klasik dövmeye oranla daha az kuvvet harcandığı söylenebilir. Bu yorumu doğrular bir sonuç Altınbalık, T. (Altınbalık, T., Çan Y., 2006) tarafından benzer bir çalışmada bulunmuştur.

6.2. EĞİLME YORULMASI DENEYLERİ SONUÇLARI

Yanal ekstrüzyon yöntemi ve kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi kullanılarak elde edilmiş dişli benzeri taslaklar arasında eğilme yorulması farklarını incelemek

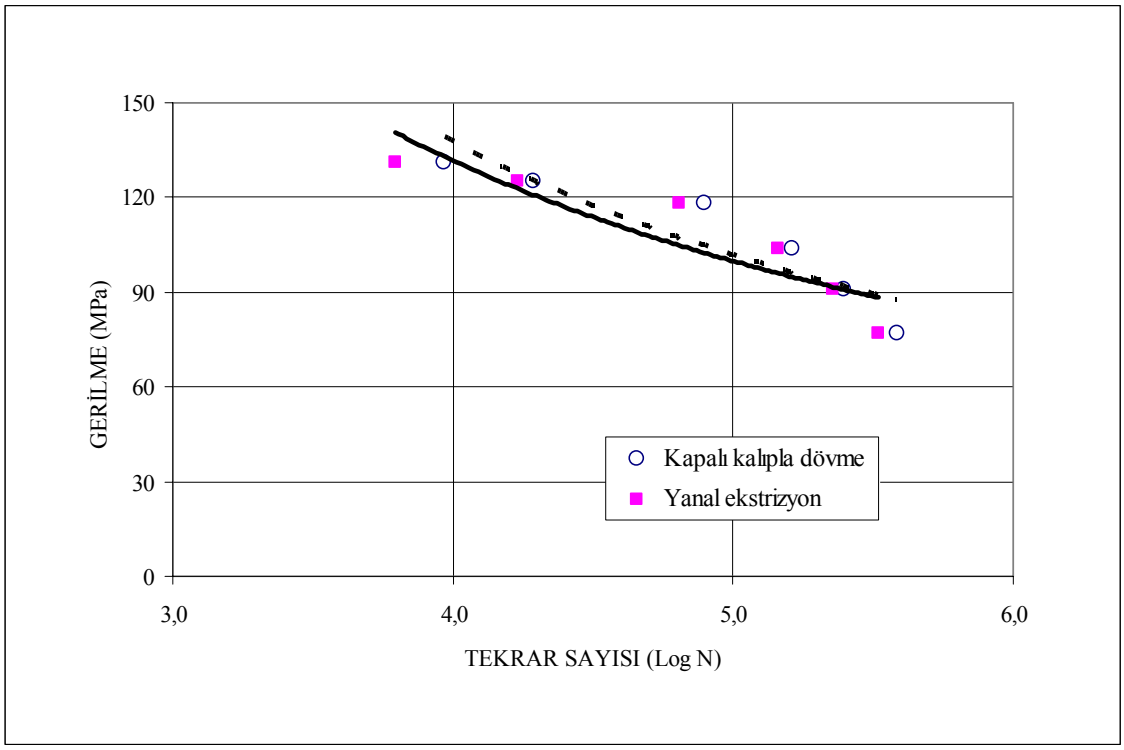
açısından Bölüm 4.'de bahsedilen eğilme yorulması deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bir malzemenin belirli bir çevrim sayısı sonunda kırılmasına neden olan gerilme değeri yorulma dayanımı olarak tanımlanmaktadır.

Yapılan eğilme yorulması deneylerinde farklı iki yöntemle üretilen aynı geometri ve aynı diş sayılarına sahip dişli benzeri taslakların malzemenin çekme gerilmesi değeri ile çekme gerilmesi değerinin yarısı civarındaki yorulma dayanımı değerleri arasında kalan değişik gerilmelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. En düşük yorulma dayanımı değerinin çekme gerilmesi ($\sigma_ç$) değerinin yarısına karşılık gelen değerlerin altına düşürülmemesinin sebebi, çevrim sayısını uzatmamaktır. Böylelikle her iki yöntemin aynı geometri ve diş sayılarındaki finiş boyutuna sahip numuneler üzerinde yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin eşit yorulma dayanımlarında kırıldıkları andaki çevrim sayısı belirlenmiş ve birbirleriyle mukayese edilmiştir.

Dişli benzeri taslakların geometrileri ve diş sayıları da hesaba katılarak değişken kuvvetlerde tek dişe gelen gerilme değerleri her farklı form için aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Ayrıca, aynı dişli benzeri form için her iki yöntem sonrası uygulanan eğilme yorulması deneyleri Wöhler diyagramlarında gösterilmiştir.

Tablo 6.1. İki dişli konik form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş yorulma numunelerine uygulanan kuvvet ve eğilme gerilmesi değerleri

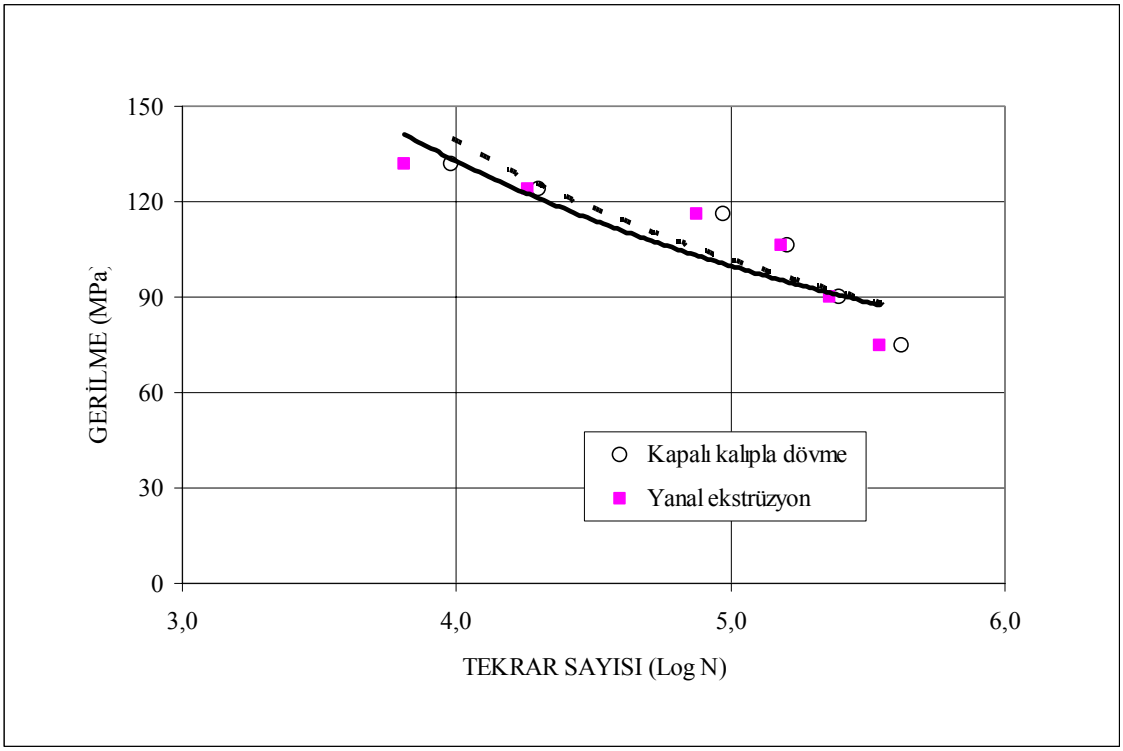
Uygulanan Eğilme Kuvveti (F) (N)	**Tek Diş Max. Eğilme Kuvveti (F_t) (N)**	**Diş Dibi Eğilme Gerilmesi (Mpa)**
-3.000 ± 2.750	2.875	77
-3.500 ± 3.250	3.375	91
-4.000 ± 3.750	3.875	104
-4.500 ± 4.250	4.375	118
-4.750 ± 4.500	4.625	125
-5.000 ± 4.750	4.875	131



Şekil 6.23. Yorulma deneylerine tabi tutulan iki dişli konik form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarının Wöhler Diyagramı

Tablo 6.2. Dört dişli konik form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş yorulma numunelerine uygulanan kuvvet ve eğilme gerilmesi değerleri

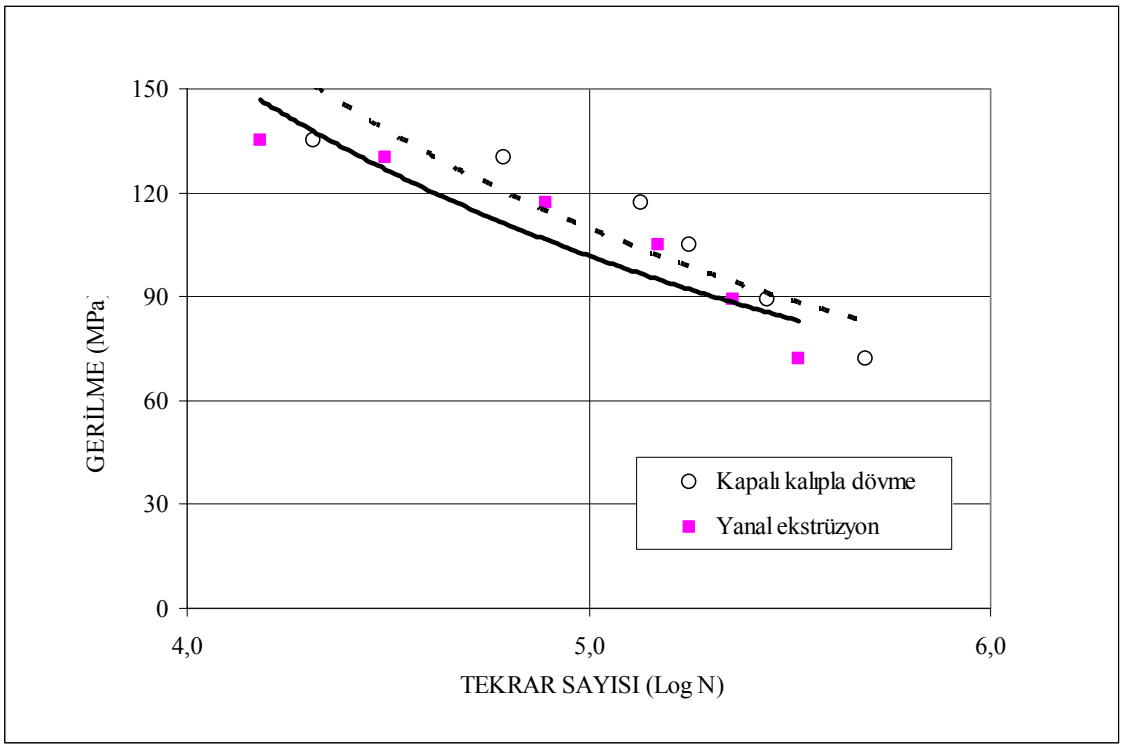
Uygulanan Eğilme Kuvveti (F) (N)	**Tek Diş Max. Eğilme Kuvveti (F_t) (N)**	**Diş Dibi Eğilme Gerilmesi (Mpa)**
-2.250 ± 2.000	2.125	75
-2.750 ± 2.500	2.625	90
-3.250 ± 3.000	3.125	106
-3.500 ± 3.250	3.375	116
-3.750 ± 3.500	3.625	124
-4.000 ± 3.750	3.875	132



Şekil 6.24. Yorulma deneylerine tabi tutulan dört dişli konik form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarının Wöhler Diyagramı

Tablo 6.3. İki dişli düz form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş yorulma numunelerine uygulanan kuvvet ve eğilme gerilmesi değerleri

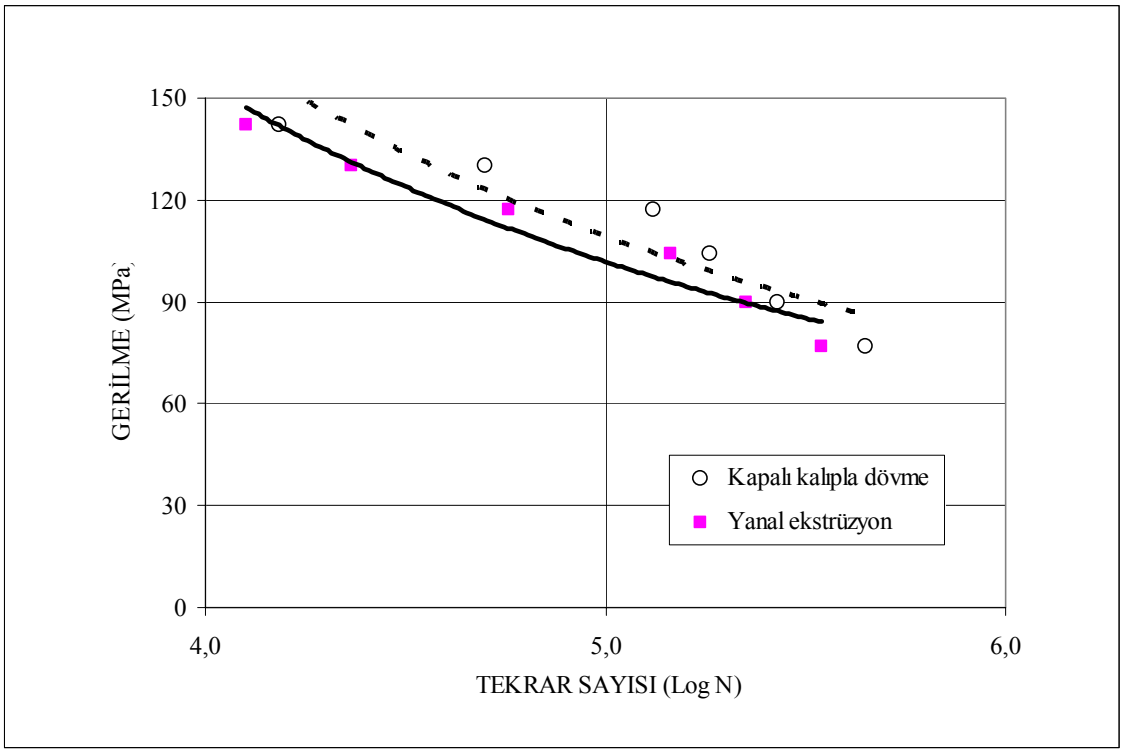
Uygulanan Eğilme Kuvveti (F) (N)	**Tek Diş Max. Eğilme Kuvveti (F_t) (N)**	**Diş Dibi Eğilme Gerilmesi (Mpa)**
-2.250 ± 2.000	2.125	72
-2.750± 2.500	2.625	89
-3.250 ± 3.000	3.125	105
-3.625 ± 3.375	3.500	117
-4.000 ± 3.750	3.875	130
-4.125 ± 3.875	4.000	135



Şekil 6.25. Yorulma deneylerine tabi tutulan iki dişli düz form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarının Wöhler Diyagramı

Tablo 6.4. Dört dişli düz form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş yorulma numunelerine uygulanan kuvvet ve eğilme gerilmesi değerleri

Uygulanan Eğilme Kuvveti (F) (N)	**Tek Diş Max. Eğilme Kuvveti (F_t) (N)**	**Diş Dibi Eğilme Gerilmesi (Mpa)**
-875 ± 625	750	77
-1.000 ± 750	875	90
-1.125 ± 875	1.000	104
-1.250 ± 1.000	1.125	117
-1.375 ± 1.125	1.250	130
-1.500 ± 1.250	1.375	142

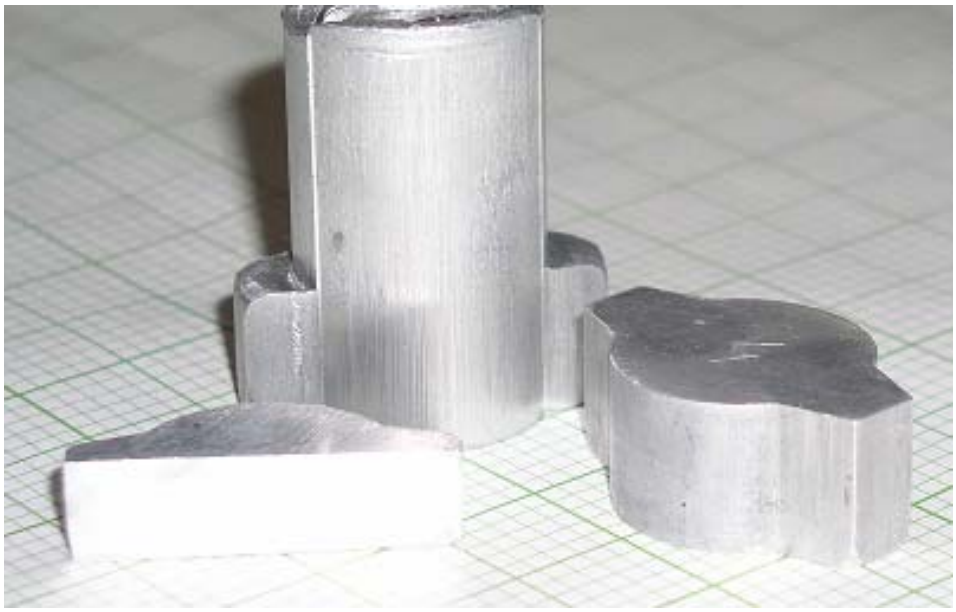


Şekil 6.26. Yorulma deneylerine tabi tutulan dört dişli düz form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarının Wöhler Diyagramı

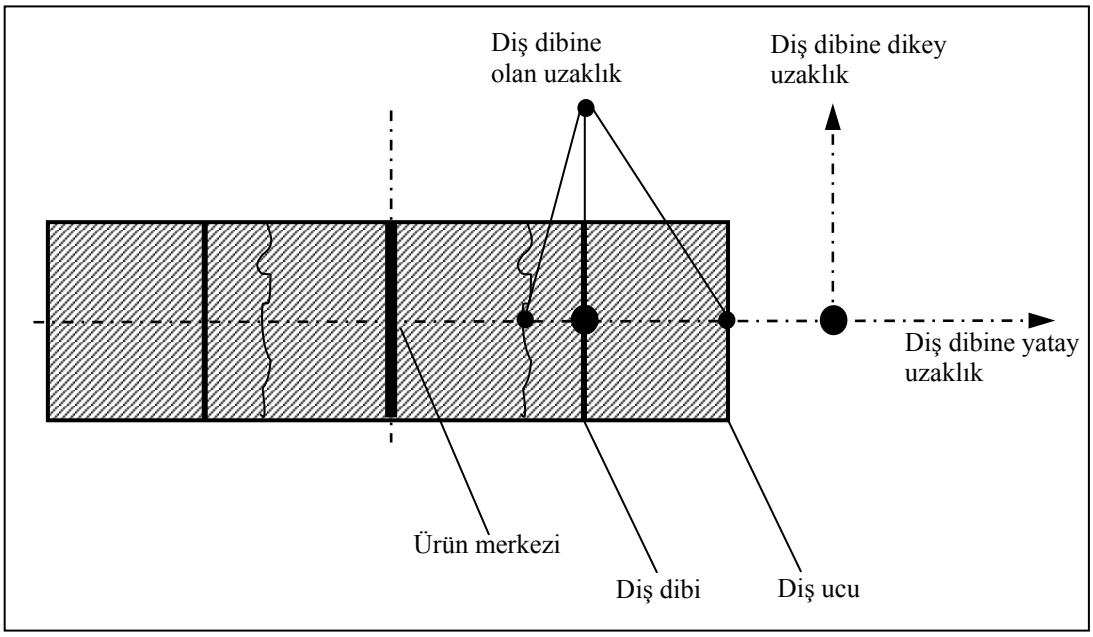
Finiş boyutuna sahip ürünlere uygulanan eğilme yorulması deneyleri sonucunda her iki yöntemin aynı diş sayısı ve aynı geometri için karşılaştırıldığı Wöhler diyagramları Şekil 6.23., Şekil 6.24., Şekil 6.25. ve Şekil 6.26.'da verilmiştir. Diyagramlardan da görüldüğü üzere aynı diş dibi gerilme değerlerinde, kapalı kalıpla dövme prosesi için elde edilen tekrar sayıları yanal ekstrüzyon prosesi için aynı gerilme değerinde elde edilen tekrar sayılarından yüksek çıkmaktadır. Her iki yöntemin konik formları arasındaki tekrar sayısı farkı, düz formlar arasındaki tekrar sayısı farkından daha azdır. Yukarıdaki grafiklere bakarak konik formlar için her iki proses arasında yorulma dayanımı açısından önemsenecek derecede bir fark olmadığı fakat, düz formlarda meydana gelen yorulma dayanımının kapalı kalıpla dövmede bir miktar daha fazla olduğu söylenebilir. Yapılan yorulma deneylerinde yorulma dayanım sınırı aranmamıştır. İki yöntem arasındaki fark arandığı için gerilme değerleri yüksek tutulmuş ve deneyler diş dibinde kırılmanın olduğu ana kadar gerçekleştirilmiştir.

6.3. MİKRO-SERTLİK DENEYLERİ SONUÇLARI

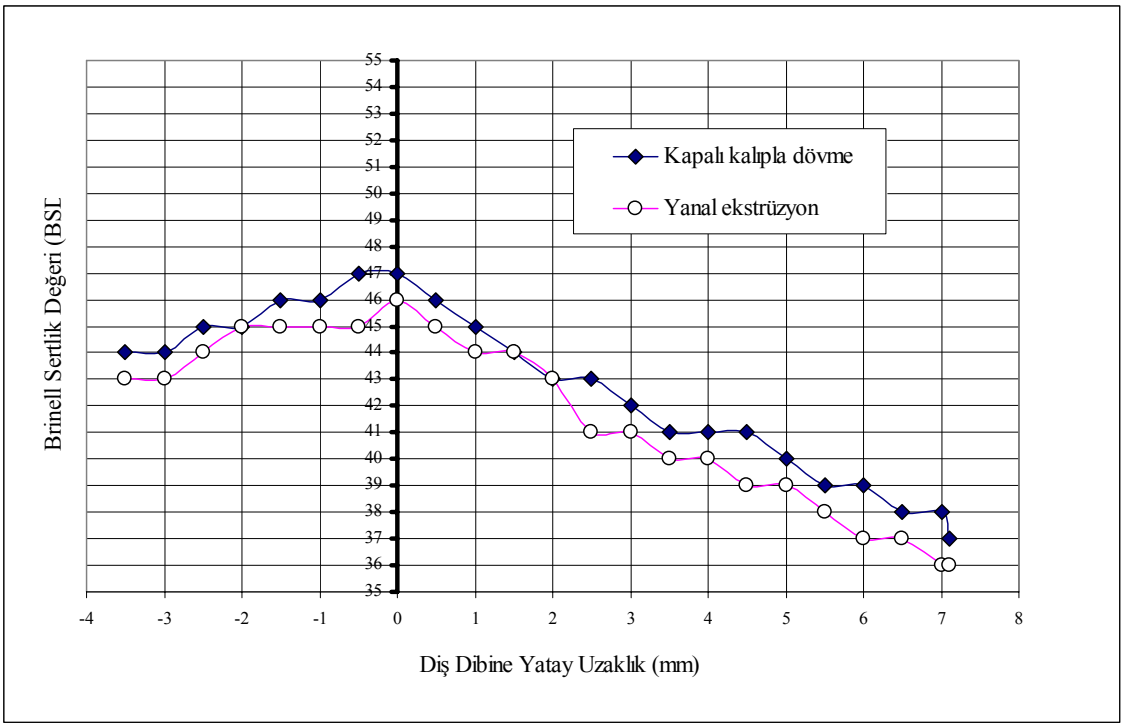
Mikro-sertlik deneyleri Bölüm 4.'te anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Ölçümlerin daha doğru sonuçlar vermesi açısından her deney grubu için üç farklı deney parçası kullanılmıştır. Üç farklı numune için de yaklaşık olarak aynı noktalardan elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 6.27.'de mikro-sertlik işlemine tabi tutulan iki farklı yöntemle üretilmiş dişli benzeri parçanın sertlik ölçümüne hazır hale getirildiği ortadan kesilmiş ürün fotoğrafı görülmektedir. Şekil.6.28.'de ise Bölüm 4.'te kroki çizimleri verilen farklı geometride ve diş sayılarındaki formların diş dibinden diş ucuna – diş dibinden ürün merkezine olan ölçüm yönleri gösterilmektedir. Şekil 6.29., Şekil 6.30., Şekil 6.31., Şekil 6.32.'de de yapılan mikro-sertlik deneyleri sonrasında elde edilen ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması sunulmaktadır. Dövme ve ekstrüzyon işlemlerine tabi tutulmadan önce deney numunelerinin sertlik değerleri 33 Brinell Sertlik Değeri (BSD) olarak ölçülmüştür.



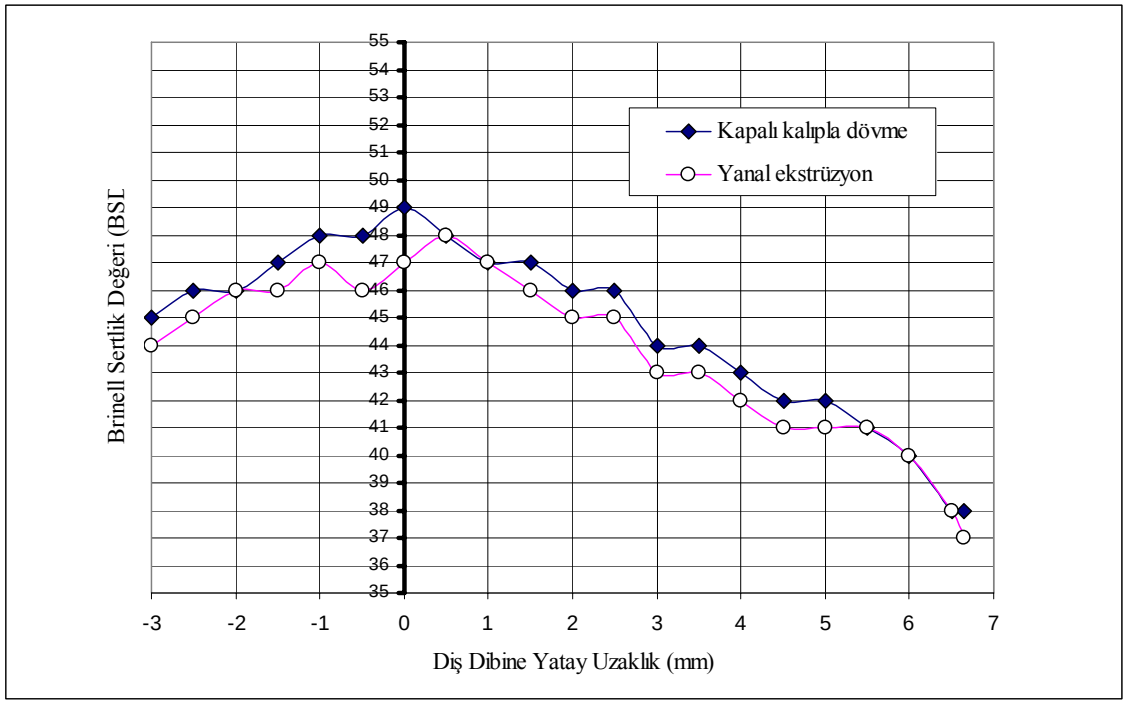
Şekil 6.27. Mikro-sertlik için iki diş ucu boyunca ortadan kesilen ürünler



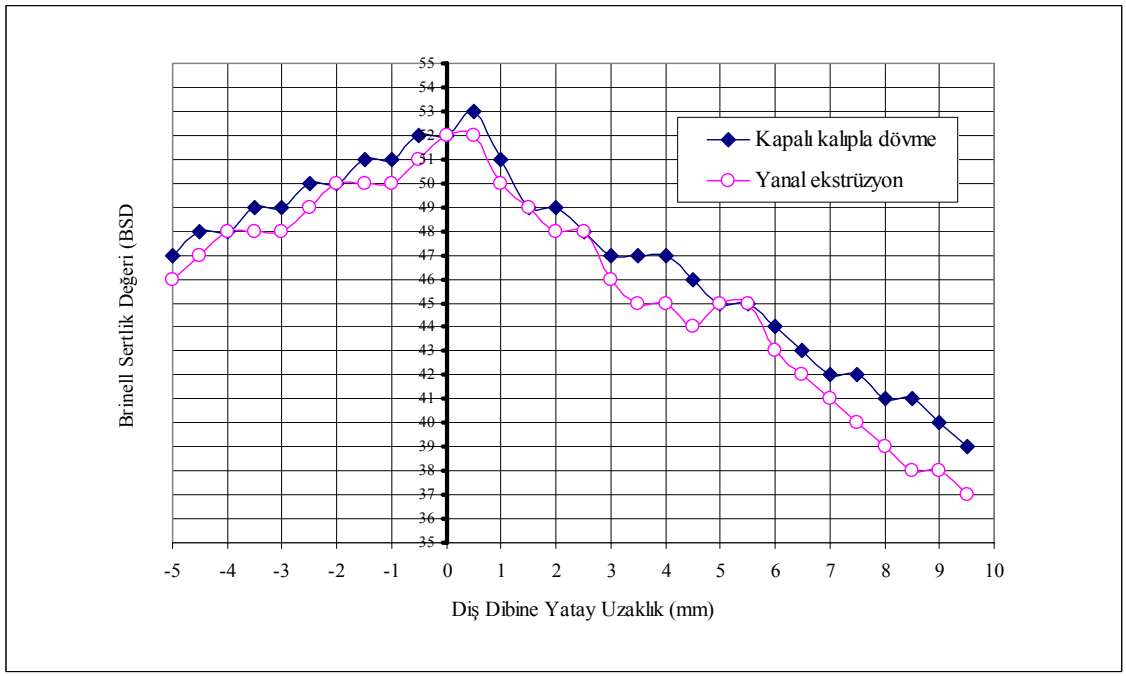
Şekil 6.28. Sertlik testi ölçüm yönleri



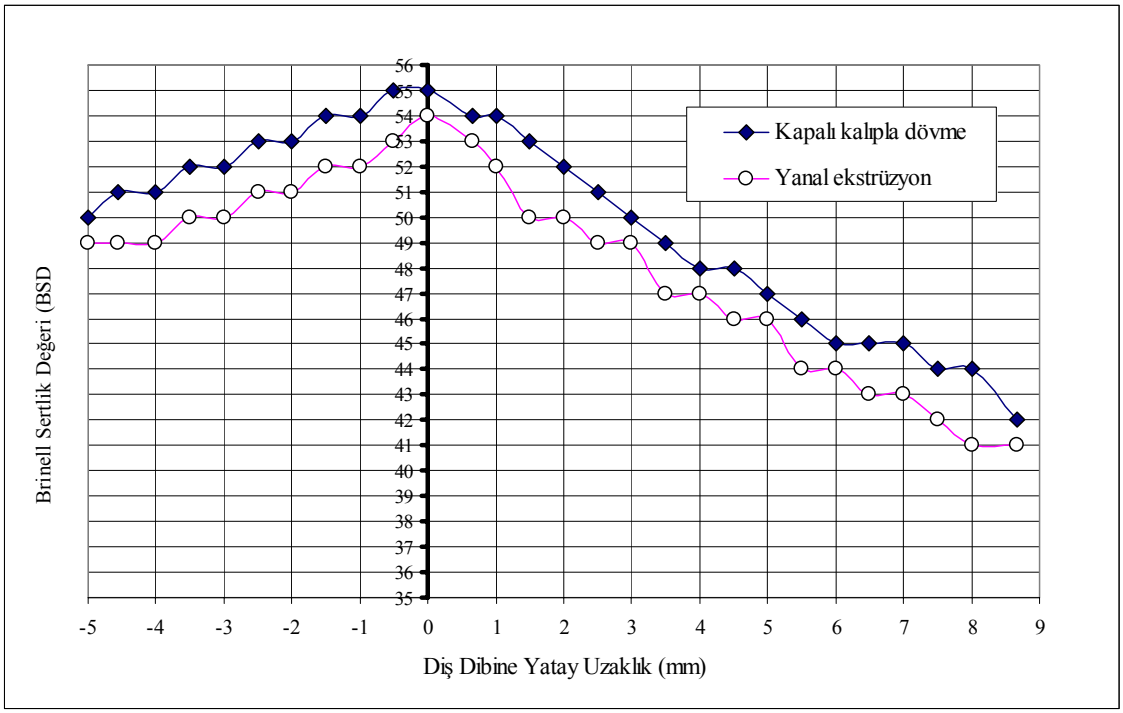
Şekil 6.29. İki dişli konik form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarında sertlik değişimi



Şekil 6.30. Dört dişli konik form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarında sertlik değişimi



Şekil 6.31. İki dişli düz form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarında sertlik değişimi



Şekil 6.32. Dört dişli düz form için yanal ekstrüzyon ve kapalı kalıpla klasik dövme ile üretilmiş deney parçalarında sertlik değişimi

Yukarıda verilen diyagramlarda her iki yöntemin farklı form ve diş sayılarında diş dibinden diş ucuna doğru gittikçe sertliğin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Finiş boyutuna sahip ürünün merkezinden diş dibine doğru ilerledikçe ise, sertlik değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum diş dibindeki efektif genlemelerin diş ucuna doğru ilerledikçe azalmasından kaynaklanmaktadır **(**Alves, M.L. ve diğ., 2001). Aynı şekilde ürün merkezine doğru gittikçe daha az oranda da olsa, efektif genlemelerde diş dibine kıyasla azalmaların mevcut olabileceği ve sertlik değerinin ürün merkezinde diş dibine oranla daha az çıkmasının buna bağlanabileceği söylenebilir. Grafikler incelendiğinde, kapalı kalıpla klasik dövme yöntemi veya yanal ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş aynı diş sayılarında ve aynı geometrilerdeki ürünlerin aynı bölgelerindeki sertlik değerlerinin kayda değer bir farklılık göstermediği anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Mühendislik biliminin hızlı gelişimi ile birlikte makine parçalarının üretiminde farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu gelişim neticesinde benzer makine parçaları birbirinden farklı üretim yöntemleri ile elde edilir hale gelmiştir. Bu duruma bağlı olarak da üretilecek parça için en uygun üretim yönteminin hangisi olduğuna karar verilmesi, yani üretim optimizasyonu ile karşılaşılmıştır.

Üretim yöntemi optimizasyonunda üretilecek parça malzemesi, üretilecek parçadan beklenen mekanik özellikler, üretilecek parça sayısı, ilk yatırım masrafları gibi kriterler göz önünde bulundurularak seçim yapılır. Sunulan bu tez çalışmasında, plastik şekil verme yöntemlerinden olan kapalı kalıpla klasik dövme ve son yirmi yıldır kullanılmakta olan yanal ekstrüzyon yöntemi ile aynı malzemeden ve aynı geometride iki ve dört dişli benzeri parçalar üretilmiş ve bu üretilen parçalar aynı strokta elde edilen farklı kuvvetler bakımından karşılaştırılmıştır. Ayrıca her iki yöntem ile üretilen parçalar yorulma dayanımları ve parça sertliği açısından karşılaştırılmıştır. Laboratuar şartlarında gerçekleştirilen deneylerde iki ve dört dişe sahip konik dişli benzeri parçaların yanal ekstrüzyon yöntemi ile üretilmesiyle ilgili olarak teorikteki pres kapasitesini tespit etmek amacı ile kuvvet yaklaşımları uygulanmış ve gerçeğe yakın sonuçlar bulunmuştur.

Yapılan yanal ekstrüzyon deneylerinde ölçülen kuvvetler ile Üst Sınır Analizi (ÜSA) yaklaşımları sonucunda hesaplanan kuvvetlerin bir arada gösterildiği diyagramlar incelendiğinde; deneyler sonrası elde edilen kuvvetlerin belirli bir strok değerinden sonra daha fazla olduğu görülmektedir. Bu strok değerinin de dişin ön duvarına malzemenin değdiği strok değeri olduğu görülmüştür. Bu durum malzemenin kalıp ön duvarına değdiği andan itibaren diş köşelerinin dolmaya başladığını ve köşe doluluğu için gerekli kuvvet artışının belirtilen yaklaşımda dikkate alınmamasından

kaynaklandığını göstermektedir. Aradaki farkların çok büyük olmamasından dolayı, en azından yaklaşık olarak pres kapasitesi seçiminde kullanılabilecek durumdadır.

Aynı diş sayıları için konik formlar kullanılarak yapılan yanal ekstrüzyon deneylerinin kuvvetleri düz formlar kullanılarak yapılan yanal ekstrüzyon deneyleri kuvvetlerinden daha fazla çıkmaktadır. Konik formlarda diş dibinden diş ucuna kadar olan mesafede kesit daralması olduğundan diş boşluğuna giren malzeme daralan kesit boyunca dişi doldurabilmek için daha fazla zorlanmaktadır. Bu durumda kuvvetin düz kesitli dişten yüksek çıkmasına sebep olarak gösterilebilir. Farklı diş dibi açısına sahip dişli benzeri profillerle koniklik açısı-kuvvet arasındaki ilişki incelenebilir.

Bitmiş parça boyutlarına sahip aynı geometri ve aynı diş sayısı için kapalı kalıpla klasik dövme sonrası elde edilen kuvvetler yanal ekstrüzyon kuvvetlerinden daha fazla çıkmıştır. Bu durumun sebebi olarak, malzemenin kapalı kalıpla klasik dövmede daha fazla sürtünme yüzeyine maruz kaldığı ve böylelikle sürtünmelere bağlı olarak kuvvetlerin arttığı gösterilebilir. Ayrıca, yanal ekstrüzyonda her strokta ürün yüksekliğinin sabit kalması da yanal ekstrüzyon kuvvetlerinin daha az çıkmasında etkili olmaktadır.

Her iki yöntemin bitmiş parça boyutları için aynı kalıp doluluğunda yanal ekstrüzyon yönteminde daha az kuvvet harcanmaktadır. Daha az dövme kuvvetiyle aynı kalıp doluluğuna ulaşmak daha az enerji sarfiyatı demektir. Enerji maliyetleri düşünüldüğünde yanal ekstrüzyonun kapalı kalıpla dövmeye kıyasla avantajı ortadadır.

Yanal ekstrüzyon yönteminin parçalara sağlayabileceği mekanik özelikler, her iki üretim yöntemiyle elde edilen dişli benzeri taslaklarda, dişe tekrarlı eğilme yorulması yükleri uygulanarak incelenmiştir. Kapalı kalıpla dövme ile üretilen dişli benzeri taslakların aynı diş dibi gerilmesinde çok az da olsa mukavemetinin yanal ekstrüzyon ürünlerine göre yüksek olduğu fakat bunun çok önemsenebilir bir fark olmadığı görülmüştür. Belirtilen fark, konik kalıplarda yok denecek kadar azdır.

Kapalı kalıpla dövme ve yanal ekstrüzyon yöntemi sonrası üretilen dişli benzeri parçalara uygulanan mikro-sertlik işlemi sonrası diş ucuna doğru ilerledikçe sertlik değerinin düştüğü gözlenmiştir. Aynı geometri ve diş sayısı için iki farklı yöntem ile üretilmiş dişli benzeri parçalarının sertliklerinin ölçüldüğü aynı noktalarda önemsenecek derecede bir sertlik farkı olmadığı görülmüştür.

Yanal ekstrüzyon yöntemi kalıp maliyetleri açısından kapalı kalıpla dövme yönteminden daha avantajlıdır. Çünkü, yanal ekstrüzyonda zımbanın içinde hareket ettiği bir kovan ve ürünün diş boşluklarına aktığı bir alt kalıp mevcuttur. Kapalı kalıpla dövmede ise, malzemenin bitmiş ürün boyutundan daha uzun bir alt kalıp ve alt kalıbın içinde hareket edebilen bitmiş ürün şekline sahip bir üst kalıp mevcuttur. Farklı iki yöntemin kalıp düzenekleri karşılaştırıldığında kapalı kalıpla dövmede kullanılan kalıp düzeneği maliyetinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu tür işlemlerde en sık karşılaşılabilecek hasar bitmiş parça boyutuna sahip ürün hazırlarken strokun gereğinden fazla verilerek alt kalıbın çatlaması veya kırılmasıdır. Böyle bir durumda yanal ekstrüzyon yönteminde kullanılan alt kalıbın yeniden hazırlanması zaman ve maliyet açısından kapalı kalıpla dövmeye göre daha avantajlıdır.

Yukarıda anlatılanlar ışığında yanal ekstrüzyon ile üretilen dişli benzeri parçaların kapalı kalıpla dövme yöntemi ile üretilenlere göre yorulma dayanımı ve parça sertliği açısından önemsenebilir bir dezavantajının olmadığı görülmüştür. Bunun yanında gerek enerji gereksiniminin düşük olması gerekse kalıp tasarımının basit ve daha az maliyetli olması yanal ekstrüzyon yönteminin seçiminde bir tercih sebebidir.

KAYNAKLAR

ABDUL, N. A. and DEAN, T. A., 1986, "An Analysis of The Forging of Spur Gears Form", Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol. 26, pp. 113-123.

ABDUL-RAHMAN, R. O., DEAN, T. A., 1981, "The Quality of Hot Forget Spur Gear Forms", Part I. Mechanical and Metallurgical Properties, Int. J. Mach. Tool Des. Res. 21 (1981) 109-127.

AKATA, H. E., 1987, "Çeliğin Dövülmesinde Kuvvet ve Malzeme Akışına Etkiyen Faktörlerin İncelenmesi", Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

AKATA, E., ALTINBALIK, T., ÇAN Y., 2004, "Three Point Load Application in Single Tooth Bending Fatigue Test for Evaluation of Gear Blank Manufacturing Method", Int. Journal of Fatigue, vol. 26, p. 785-789.

ALTINBALIK, T., 2000, "Dişli Taslakların Kapalı Kalıpla Yığılmasında Kuvvet ve Malzeme Akışının İncelenmesi", Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

ALTINBALIK, T., ÇAN Y., 2004, "Enjeksiyon Yığma Yönteminde Kuvvet ve Malzeme Akışına Deformasyon Bölgesi Boyut Oranının Etkileri", Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt:9, sayı:2, sayfa.59-67.

ALTINBALIK, T., ÇAN Y., 2006, "An Experimental Study of Lateral Extrusion of Splines", Materials and Design, vol. 27, p. 727-734.

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.

ALVES, M.L., RODRIGUES, J.M.C., MARTINS, P.A.F., 2001, "Cold Forging of Gears: Experimental and Theorical Investigation", Finite Elements in Analysis and Design, vol:37, pp. 549-558

AVITZUR, B., 1985, "Handbook of Metal-Forming Processes", John Wiley and Sons Inc., New York.

BALENDRA, R., 1985, "Process Mechanics of Injection Upsetting", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol.25, No.1, pp.63-73.

BALENDRA, R., 1987, "Considerations in the Modelling of Injection Upsetting",International Journal of Production,Vol.25, No.6, pp.889-906.

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.

BALENDRA, R., HİJAZİ, M.A., 1989, "Evaluation of injection upsetting models", Int. J. of Mach. Tool Manuf., 29(3), pp.345-360.

BALENDRA, R., QIN, Y, 2004, "Injection Forging: Engineering and Research", J. Mater. Process. Technol. Vol. 145, pp. 189-206.

BALENDRA, R., QIN Y., 1997, "Material-Flow Consideration For the Design of Injection Forging", Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.119, pp. 350-357.

BALENDRA, R., QIN Y., 2000, "Identification and Classification of Flow-Dependent Defects in the Injection Forging of Solid Billets", J. Mater. Process. Technol. Vol.106, pp. 199-203.

CHITKARA, N.R., BHUTTA, M.A., 1996, "Near-net Shape Forging of Spur Gear Forms: An Analysis and Some Experiments", Int. J. Mech. Sci., vol:38, No.8-9, pp. 891-916.

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.

CHITKARA, N.R., KIM, Y., 1996, "An Analysis of External Spline Gear Forming by An Upper Bound Energy Method", Int. J. Mech. Sci. Vol.38(7), p.777-789.

CHO, H., CHOI, J., MIN, G., CHOI, Y. and CHOI, J., 1997, "An Upper Bound Analysis of the Closed-Die Forging of Spur Gears", Journal of Materials Processing Technology, vol.67, pp.83-88.

CHOI, H.J., CHOI, J.H., HWANG, B.B., 2001, "The Forming Characteristics of Radial-forward Extrusion", J. Mater. Process. Tech., vol.113, p.141-147.

CHOI, J.C., CHOI, Y., HUR, K.D., KIM, C.H., 1996, "A Study on the Forging of Spur Gears", International Journal of Mechanical Sciences", vol.38, p. 1333-1347.

ÇAN, Y., 1998, "Incremental Metal Forming and Analysis of Tube Spinning", Ph.D., University of Bath, Mechanical Engineering Department, bath, U.K.

ÇAN, Y., ALTINBALIK, 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.

ÇAN, Y., ALTINBALIK, M.T., AKATA, H. E., (2005), "A study of lateral extrusion of gear like elements and spline", Journal of Materials Pro. Tech..

ÇAPAN, L.J., 1999, "Metallere Plastik Şekil Verme", Çağlayan Kitapevi.

DUDLEY, D.W., 1991, "Gear Handbook", McGraw-Hill, New York.

EYERCİOĞLU, Ö., 1995, "Development and Performance Analysis of Precision Forged Spur Gears", PhD. Thesis, Dept. of Mech. Engineering, The University of Birmingham.

EL-DOMIATY, A., SHABARA, M. and 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.

GEIGER, R., 1985, "Near-net Shaped Forming by Radial Extrusion, in: Proceedings of Seventh International cold Forging Congress, Birmingham, UK, pp.29- 38.

GOETSCH, L. D., 1991, "Modern Manufacturing Processes", Thomson İnf./Phublishing Group, Çağlayan Kitabevi.

GORDON, W.A., TYNE, C.Y., 1987, "Injection Upsetting-An Upper Bound analysis", In: Proceedings of 15th NAMRC, vol. 2, p.278-284.

GROVER, O., P. and JUNEJA, B. L., 1984, "Analysis of Closed-Die Forging of Gear Like Elements", Advanced Technology of Plasticity, II, pp. 888-893.

HENDRY, J.C., 1973, "An investigation of the injection upsetting of six steels", N.E.L. report No: 494.

HSIANG, S.H., HO, H.L., 2004, "Investigation of the Influence of Various Process Parameters on the Radial Forging Processes by the Finite Element Method", Int. J. Adv. Man. Tech., vol.23, p.627-635.

HSU, H.H., 2002, "A study on Precision Forging of Spur Gear Forms and Spline by Upper Bound", Int. J. Mech. Sci., vol. 44(8), p. 1543-1558.

KAYALI, E.S., ENSARİ, C., 2000, "Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları", İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi.

KO, B. D., KIM, D.J., LEE, S. H., HWANG, B.B, 2001, "The Influence of the Die Geometry on the Radial Extrusion Process", J. Mater. Process. Technol. 113, 109-114.

KUSCU, H., MISIRLI, C., AKATA, E., CAN, Y., 2006, "Automatic Control Hardware for Hydraulic Pres", Unitech'06, Int. Conf. Gabrovo-Bulgaria.

LANGE, K., 1985, "Handbook of Metal Forming", Copyright by McGraw-Hill Book Company. Printed in the United States of America.

LEE, Y.S., HWANG, S.K., CHANG, Y.S., HWANG B.B., 2001, "The Forming Characteristics of Radial-forward Extrusion", J. Mater. Process. Tech., vol.113, p.136-140.

MACCARINI, G., GIARDINI, C., PELLEGRINI, G., BUGINI, A., 1991, "The Influence of Die Geometry on Cold Extrusion Forging Operations: FEM and Experimental Results", Mat. Proc. Tech., Vol:27, pp:227-238.

MILNER, P.R., 1971, "The Injection Upsetting Process", Ph.D. Thesis, University of Leeds, UK.

MISIRLI, C., 2002, "Ekstrüzyon Tipi Dövme Proseslerinin Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

MIZUNO, T., MIZUNO, T., KITAMURA, K., 1999, "An Experiment on Injection Upsetting", Materials Processing Technology, vol. 96, pp. 234-239.

NARAYANASAMY, R., PANDEY, K.S., 1997, "Phenomenon of Barreling in Aluminium Solid Cylinders during Cold Upset Forming", J. Mater. Process. Tech. vol.70, p.17-21.

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.

PLANCAK, M., BRAMLEY, A. N., OSMAN, F., 1992, "Non-Conventional Cold Extrusion", J. Mater. Process. Technol. vol. 34, pp. 465-472.

PLANCAK, M., VILOTIC, D., VUJOVIC, V. and SKAKUN, P., 1996, "Theorietical and Experimental Investigation of Cold Extrusion of Gear Like Elements", Jornal for Technology of Plasticity, vol.21, pp.31-42.

PRAGER, W., HODGE, P.G., 1951, "Theory of Perfectly Plastic Solids", John Wiley, Newyork.

QIN, Y., BALENDRA, R., 1998, "Computer Aided Design of Nett–Forming by Injection Forging by Engineering Components", J. Mater. Process. Techn. vol. 76(1-3), pp. 62-68.

SADEGHI, M.H., 2003, "Gear Forging: Mathematical Modeling and Experimental Validation", ASME J. Man. Sci. Eng. Vol.125, pp.753-762.

SAVAŞKAN, T., 2000, "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", 2. Baskı, Derya Kitabevi-Trabzon

SHIGLEY, J.E., 1977, "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill Book Comp. Third Edition, Chapter 11.

SHIPLEY, R.J., 1985, "Precision Forging", Metals Handbook, vol. 14: Forming and Forging, American Society of Metals, Ohio.

TALBERT, S.H., AVITZUR, B., 1996, "Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming", John Wiley&Sons, England.

ÖZGEÇMİŞ

Cenk MISIRLI 1977 yılında Edirne'de doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Edirne'de tamamladı. 1995 yılında girdiği Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında mezun oldu. Aynı yıl Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı Yüksek Lisans eğitimini 2002 yılı Temmuz ayında tamamladı. 2002 yılı Eylül ayında Doktora eğitimine başladı. 1999 yılının Aralık ayından bu yana aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.