

**T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Düz Dişlilerin İmalat Yöntemi Optimizasyonu
ve
Analizler**

Mak. Yük. Müh. Önder AYER

**DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Tahir ALTINBALIK
EDİRNE-2012**

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZ DİŞLİLERİN İMALAT YÖNTEMİ OPTİMİZASYONU
VE
ANALİZLER

Mak. Yük. Müh. Önder AYER

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Tahir ALTINBALIK

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZ DIŞLİLERİN İMALAT YÖNTEMİ OPTİMİZASYONU
VE
ANALİZLER

Mak. Yük. Müh. Önder AYER

DOKTORA TEZİ

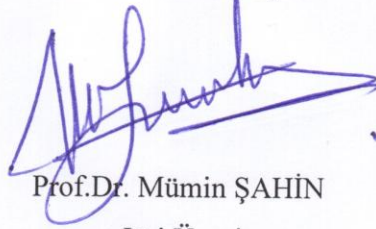
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu tez 27/04/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.



Prof. Dr. H. Erol AKATA

Jüri Üyesi



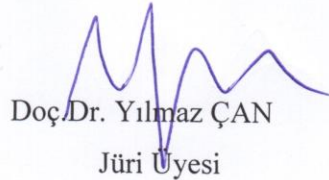
Prof. Dr. Mümin ŞAHİN

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Tahir ALTINBALIK

Danışman



Doç. Dr. Yılmaz ÇAN

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Ertan ARDA

Jüri Üyesi

İÇİNDEKİLER

Önsöz	i
Özet	ii
Abstract	iii
Şekil Listesi	iv
Tablo Listesi	xi
Sembol Listesi	xii

BÖLÜM 1. ÜRETİM KAVRAMI ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ

1.1. Üretim	1
1.2. Üretim Yöntemleri Ve Sınıflandırılması	2
1.2.1. Üretim Yöntemi Grupları	3
1.3. Üretim Yöntemi Olarak Plastik Şekil Verme	5
1.4. Ekstrüzyon	7
1.4.1. İleri ve Geri Ekstrüzyon	8
1.4.2. Yanal (Radyal) Ekstrüzyon	11
1.4.3. Hidrostatik Ekstrüzyon	12
1.4.4. Boru Ekstrüzyonu	12
1.4.5. Darbeli (Püskürtmeli) Ekstrüzyon Yöntemi	13
1.5. Ekstrüzyonda Malzeme Akışı	14

BÖLÜM 2. DİŞLİ ÜRETİM PROSESLERİ ve DİŞLİ HASAR MEKANİZMALARI

2.1. Talaşlı Şekil Verme Yöntemleri	16
2.1.1. Azdırma Çakısı İle Üretim	16
2.1.2. Modül Freze İle Üretim	17
2.1.3. Yüzey Frezeleme	17
2.1.4. Form Frezeleme	18
2.1.5. Form Taşlama	18
2.1.6. Traşlama (Raspalama)	19
2.1.7. Broşlama	19
2.1.8. Elektroerezyon ve Tel Erozyonu	19
2.2. Çapaksız Yöntemler	20
2.2.1. Haddeleme	20
2.2.2. Toz Metalurjisi	20
2.2.3. Döküm	20
2.2.4. Hassas Dövme	21
2.2.4.1. Soğuk Hassas Dövme	21
2.2.4.2. Ilık Hassas Dövme	22
2.2.4.3. Sıcak Hassas dövme	22
2.3. Dişli Hasar Tipleri	23
2.3.1. Yüzey Yorulması Hasarları	23
2.3.2. Aşınma	24
2.3.3. Plastik Akma	25
2.3.4. Kırılma	25
2.3.5. İmalat Sırasında Oluşan Hasarlar	26

BÖLÜM 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 27

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Giriş	42
4.2. Deneylerde Kullanılan İleri Ekstrüzyon Ve Radyal Ekstrüzyon Kalıpları	45
4.3. Deneylerde Kullanılan Hidrolik Pres Düzenegi	50

BÖLÜM 5.KUVVET ve ENERJİ YAKLAŞIMLARI

5.1. Genel Yöntemler	57
5.2. Üst Sınır Metodunun Formülasyonu	60
5.2.1. İdeal Deformasyon Enerjisi	61
5.2.2. Kayma Enerjisi	63
5.2.3. Sürtünme Kayıpları	64
5.2.4. Geriye Çekme	64
5.2.5. Toplam Enerji Dağılımı	65
5.3. 4 Ve 6 Dişli Parçalar İçin Üst Sınır Analizi Çözümleri	66
5.3.1. İleri Ekstrüzyon Üst Sınır Analizi Çözümleri	66
5.3.1.1. 4 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Hız Alanlar	68
5.3.1.2. 4 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Deformasyon Enerjisi	69
5.3.1.3. 4 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Kayma Hız Süreksizlikleri	70
5.3.1.4. 4 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Sürtünme Hız Süreksizlikleri	70
5.3.1.5. 4 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri	71
5.3.1.6. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Hız Alanları	71
5.3.1.7. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Kayma Hız Süreksizlikleri	72

5.3.1.8. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Sürtünme Hız Süreksizlikleri	72
5.3.1.9. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri	73
5.3.1.10. 6 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Ekstrüzyon Hız Alanları	73
5.3.1.11. 6 Diş Kosinüs Geçiş İleri Ekstrüzyon Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri	74
5.3.1.12. 6 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Ekstrüzyon Hız Alanları	75
5.3.1.13. 6 Diş Taper Geçiş Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri	76
5.3.2. Radyal Ekstrüzyon Kalıpları Üst Sınır Analizi Çözümleri	77
5.3.2.1. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Hız Alanları Çözümleri	78
5.3.2.2. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Efektif Genleme ve Deformasyon Enerjisi Çözümleri	80
5.3.2.3. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Kayma İş Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri	82
5.3.2.4. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Sürtünme İş Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri	85
5.3.2.5. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Toplam İş Çözümü	90
5.3.2.6. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Hız Alanları Çözümleri	90
5.3.2.7. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Efektif Genleme ve Deformasyon Enerjisi Çözümleri	92
5.3.2.8. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Kayma İş Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri	95
5.3.2.9. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Sürtünme İş Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri	97
5.3.2.10. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Toplam İş Çözümü	102

BÖLÜM 6.SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

6.1. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULAMALARI	103
6.2.Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Deneysel Çalışmanın Modellenmesi	104
6.3. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	106

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

7.1. Giriş	111
7.2. Deneysel Çalışma Sonuçları, Analiz Yöntemleriyle Elde Edilen Sonuçlar ve Karşılaştırmalı Grafikleri	113
7.2.1. Ekstrüzyon Deneylelerinin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	114
7.2.1.1. 4 Dişli Taper Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	114
7.2.1.2. 4 Dişli Cosinus Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	119
7.2.1.3. 6 Dişli Taper Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	124
7.2.1.4. 6 Dişli Cosinus Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	128
7.2.2. Radyal Ekstrüzyon Deneylelerinin Sonuçları Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	133
7.2.2.1. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Deneyleleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	133
7.2.2.2. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Deneyleleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri	135
7.3. Deneysel Ve Sayısal Çözüm Kuvvet Sonuçlarının Karşılaştırması	137
7.4. Yorulma Deneyleleri ve Sonuçları	140

7.4.1.Giriş	140
7.4.2. Deneyleerin Amacı	141
7.4.3. Test Makinası Ve Aparatları	142
7.4.4. Yükleme Noktası	143
7.4.5. Yorulma Deneyleerinin Sonuçları	147
7.5. Sertlik Dağılımı Deneyleeri ve Sonuçları	158
7.5.1. Giriş	158
7.5.2. Sertlik Dağılımı Deneyleeri Ve Sonuçları	159
7.6.Deneysel Hatalar ve Hata Hesabı	165
7.6.1.Deneysel Hatalar	165
7.6.2. Ortalama Değerlerdeki Belirsizlik	165
7.7. Profil Doğruluk Ölçüm Sonuçları	167
BÖLÜM 8. YORUMLAR VE TARTIŞMA	168
KAYNAKLAR	167
ÖZGEÇMİŞ	174

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, ileri ekstrüzyon yöntemi ile radyal ekstrüzyon yöntemi farklı diş sayılarına sahip parçalar üzerinden kuvvet analizi, diş dibi yorulma dayanımı ve sertlik dağılımı bakımından karşılaştırılmışlardır. Ayrıca her iki üretim yönteminden elde edilen deneysel veriler, Üst Sınır Analizi ve Sonlu Elemanlar Analizinden elde edilen kuvvet değerleri sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tezin deneysel çalışmalarının yürütülebilmesinde maddi destek aldığım Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesine, kalıpların işlenmesinde gösterdiği yakın ilgi için Makine Yüksek Mühendisi Serkan MUTLU'ya, temin edilen alüminyumun spektrometrik analizlerinin yapılmasında, sertlik dağılımı deneylerinde ve profil doğruluk ölçümlerinde yardımlarını esirgemeyen Makine Yüksek Mühendisi Yücel ŞEN'e ve HEMA Endüstri A.Ş.'ye ve değerli çalışanlarına, Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Atölyesi'nde gerçekleştirilen deneylerde desteğini esirgemeyen değerli usta Teknisyen Reyhan SAĞLAM'a, yorulma deneylerinde yaptığı yardımları için meslektaşım Arş. Grv. Ümit HÜNER'e, sonlu elemanlar çözümlerinde verdiği destekten ötürü Yrd. Doç. Dr. Sedat BİNGÖL'e, değerli katkıdan dolayı Yrd. Doç. Dr. Erdem UÇAR'a ve emeği geçen tüm hocalarıma, meslektaşlarıma, arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, yakın ilgilerini ve sevgilerini tüm kalbimle hissettiğim canım aileme sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Değerli fikirlerinden ve engin bilgi birikimlerinden yararlandığım hocalarım Sayın Doç. Dr. Yılmaz ÇAN ve Doç. Dr. Ertan ARDA'ya gönülden teşekkür ederim.

2003 yılından bu yana Yüksek Lisans Tezimde ardından da sunulan bu doktora tezinde benimle yakından ilgilenen, yardımlarını ve manevi desteğini hiçbir şekilde benden esirgemeyen, tezin yöneticisi hocam Sayın Doç.Dr. Tahir ALTINBALIK'a saygılarımı sunuyorum.

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.

Bu tezde, 4 ve 6 dişe sahip düz dişli benzeri parçaların ileri ekstrüzyonu ve radyal ekstrüzyonu için ilk defa önerilen kabul edilebilir hız alanları ile gerekli denklemler oluşturulmuş ve üst sınır analizi sonuçları elde edilmiştir. İleri ekstrüzyon kalıplarında kalıp içi geçiş profili ve matris uzunluğu parametre olarak alınmıştır. Tezin deneysel çalışmalarında ticari saflıkta Al 1070 alüminyum kullanılmıştır. Aynı kalıplar için ticari bir yazılım olan DEFORM 3D programı ile sonlu elemanlar çözümleri elde edilmiştir. İleri ekstrüzyon yöntemi ve radyal ekstrüzyon yöntemi ile üretilen farklı geometriye sahip dişli benzeri parçalar, gerekli kuvvet, yorulma dayanımları ve sertlik dağılımları ve boyutsal doğruluk kriterleri baz alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İleri Ekstrüzyon, Radyal Ekstrüzyon, Düz Dişli, Yorulma Dayanımı, Sertlik Dağılımı, Üst Sınır Analizi, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

There are many criteria for selecting manufacturing methods to produce a product. When considering the superiority of mechanical properties and rise of production speed, plastic deformation methods present very important advantages compared to other fabrication techniques. It is rather important to estimate the forming load required for plastically deforming the material in metal forming processes.

In this study, for direct extrusion and radial extrusion of gear like products with 4 and 6 cogs, with a new kinematically admissible velocity field, required equations were formed and the results of upper bound analysis were obtained. In direct extrusion die, die transition profile and length of a die were used as parameters. In experimental specimens of the study, commercially pure aluminum Al 1070 was selected. By using DEFORM 3D[®] software which is commercial software for same dies formation, finite element solutions were obtained. Gear like products with different geometrical shapes, which were produced with direct extrusion technique and radial extrusion technique were compared by basing on forming load, their fatigue strength and hardness distribution and dimensional accuracy criteria.

Keywords: Direct extrusion, radial extrusion, spur gear, fatigue strength, hardness distribution, upper bound analysis, finite element analysis.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. İleri Ekstrüzyon	9
Şekil 1.2. Geri Ekstrüzyon	10
Şekil 1.3. Kuvvet-Strok Değişimi	10
Şekil 1.4. Yanal Ekstrüzyon	11
Şekil 1.5. Direk Ekstrüzyonla Boru Üretimi (Şematik)	13
Şekil 1.6. Darbeli Ekstrüzyon Üretimi (Şematik)	13
Şekil 1.7. Ekstrüzyonda Tipik Malzeme Akışı	14
Şekil 2.1 Azdırma Tezgahında Dişli Açılması Ve Kullanılan Kesici Takım	16
Şekil 2.2: Fellow Tezgahında Dişli Çark Şeklindeki Bıçakla Dişlinin Açılması	17
Şekil 2.3. Form Taşlama	18
Şekil 2.4. Dişli Pitting Hasarları	24
Şekil 2.5. Dişlilerde Meydana Gelen Yorulma Hasarları	26
Şekil 4.1. 4 Dişli Parçalar İçin Giriş Profilleri	43
Şekil 4.2. Deneyleerde Kullanılan 4 Dişli Ürün Çıkış Profili	45
Şekil 4.3. 4 Dişli Parçalar İçin Cosinus Profil Kalıpları	45
Şekil 4.4. 4 Dişli Parçalar İçin Cosinus Profil Kalıp Geometrileri	46
Şekil 4.5. 4 Dişli Parçalar İçin Taper Profil Kalıpları	46
Şekil 4.6. 4 Dişli Parçalar İçin Taper Profil Kalıp Geometrileri	47
Şekil 4.7. Deneyleerde Kullanılan 6 Dişli Ürün Çıkış Profili	47
Şekil 4.8. 6 Dişli Parçalar İçin Cosinus Profil Kalıpları	47
Şekil 4.9. 6 Dişli Parçalar İçin Cosinus Profil Kalıp Geometrileri	48
Şekil 4.10. 6 Dişli Parçalar İçin Taper Profil Kalıpları	48
Şekil 4.11. 6 Dişli Parçalar İçin Taper Profil Kalıp Geometrileri	49

Şekil 4.12. 4 Ve 6 Dişli Radyal Ekstrüzyon Kalıpları	49
Şekil 4.13. İleri Ekstrüzyon Kalıp Seti	49
Şekil 4.14. Radyal Ekstrüzyon Kalıp Seti	49
Şekil 4.15. Deneylerde Kullanılan Hidrolik Pres	51
Şekil 4.16. Hidrolik Pompaya Bağlı Basınç Transmitteri Ve Basınç Valfi	51
Şekil 4.17. Basınç Transmitteri	52
Şekil 4.18. Hareket Sınırlayıcılar	52
Şekil 4.19. Temassız Lineer Cetvel	53
Şekil 4.20. Dokunmatik Lcd Komut Ekranı	53
Şekil 4.21. Kontrol Panosu İç Görünüm	54
Şekil 4.22. Kontrol Ekranı Giriş Sayfası	55
Şekil 4.23. Kontrol Ekranı Deney Kontrol Sayfası	55
Şekil 4.24. Kontrol Ekranı Sonuçlar Sayfası	56
Şekil 5.1. Hız Süreksizlikleri	63
Şekil 5.2. 4 Dişli Ürün İçin Koordinat Sistemi	67
Şekil 5.3. 6 Dişli Ürün İçin Koordinat Sistemi	68
Şekil 5.4. Radyal Ekstrüzyon Hız Alanları Bölgeler	77
Şekil 5.5. Radyal Ekstrüzyon 4 Ve 6 Diş İçin Hız Alanları (2,3,4,5,6 No'lu Bölgeler)	77

Şekil 6.1 4 Dişli Parçalar İçin Cosinüs Geçişli Kalıplarla Yapılan Deform Çözümleri	106
Şekil 6.2 4 Dişli Parçalar İçin Taper Geçişli Kalıplarla Yapılan Deform Çözümleri	107
Şekil 6.3 6 Dişli Parçalar İçin Cosinüs Geçişli Kalıplarla Yapılan Deform Çözümleri	108
Şekil 6.4 6 Dişli Parçalar İçin Taper Geçişli Kalıplarla Yapılan Deform Çözümleri	109
Şekil 6.5. Radyal Ekstrüzyon Yöntemi İçin Yapılan Deform Çözümleri	110
Şekil 7.1. İş Parçası Boyutları	112
Şekil 7.2. Ürünler Görünüm	113
Şekil 7.3. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	115
Şekil 7.4. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	115
Şekil 7.5. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=20mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	116
Şekil 7.6. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=20mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	117
Şekil 7.7. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=25mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	118
Şekil 7.8. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=25mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	118
Şekil 7.9. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	119

Şekil 7.10. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	120
Şekil 7.11. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli ve L=20mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	121
Şekil 7.12. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli ve L=20mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	121
Şekil 7.13. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli ve L=25mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	122
Şekil 7.14. 4 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli ve L=25mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	123
Şekil 7.15. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	124
Şekil 7.16. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	125
Şekil 7.17. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli Ve L=20mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	126
Şekil 7.18. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli Ve L=20mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	127
Şekil 7.19. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli Ve L=25mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	127
Şekil 7.20. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Taper Geçişli Ve L=25mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	128
Şekil 7.21. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli Ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	129
Şekil 7.22. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli Ve L=15mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	129

Şekil 7.23. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli Ve L=20 Mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	130
Şekil 7.24. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli Ve L=20 Mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	131
Şekil 7.25. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli Ve L=25 Mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	132
Şekil 7.26. 6 Dişli Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Cosinus Geçişli Ve L=25 Mm. Matris Uzunluğundaki Kalıplara Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	132
Şekil 7.27. 4 Dişli Parçaların Radyal Ekstrüzyonuna Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	133
Şekil 7.28. 4 Dişli Parçaların Radyal Ekstrüzyonuna Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	134
Şekil 7.29. 6 Dişli Parçaların Radyal Ekstrüzyonuna Ait Kuvvet-Strok Diyagramı	135
Şekil 7.30. 6 Dişli Parçaların Radyal Ekstrüzyonuna Ait Üst Sınır Analizi Kuvvet Bileşenleri	136
Şekil 7.31. 4 Dişli Parçalar İçin Radyal Ekstrüzyon-İleri Ekstrüzyon Deneysel Kuvvet Değerlerinin Karşılaştırılması	138
Şekil 7.32. 6 Dişli Parçalar İçin Radyal Ekstrüzyon-İleri Ekstrüzyon Deneysel Kuvvet Değerlerinin Karşılaştırılması	139
Şekil 7.33. Gerilme-Süre Yorulma Yüğü Değişim Grafiği	140
Şekil 7.34. Çelik Ve Demir Olmayan Malzemelerin Tipik Wöhler Diyagramı	141
Şekil 7.35. Instron 8501 Universal Test Cihazı	143
Şekil 7.36. Klasik Eğilme Yorulması Sonucu Diş Dibi Kırılması	144
Şekil 7.37. Eğilme Yorulmasındaki Kuvvetlerin Gösterimi	144

Şekil 7.38. 4 Ve 6 Diş Deney Aparatının Eğilme Yorulması Deney Düzeneği	145
Şekil 7.39. Yükleme Halinin Şematik Gösterimi	145
Şekil 7.40. Uygulanan Yükleme Çevrimi	146
Şekil 7.41. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Cosinus Geçişe Sahip L=15mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	148
Şekil 7.42. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Cosinus Geçişe Sahip L=20mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	149
Şekil 7.43. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Cosinus Geçişe Sahip L=25mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	149
Şekil 7.44. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Taper Geçişe Sahip L=15mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	150
Şekil 7.45. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Taper Geçişe Sahip L=20mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	150
Şekil 7.46. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Taper Geçişe Sahip L=25mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	151
Şekil 7.47. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Cosinus Geçişe Sahip L=15mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	151
Şekil 7.48. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Cosinus Geçişe Sahip L=20mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	152
Şekil 7.49. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Cosinus Geçişe Sahip L=25mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	152
Şekil 7.50. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Taper Geçişe Sahip L=15mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	153
Şekil 7.51. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Taper Geçişe Sahip L=20mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	153
Şekil 7.52. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Taper Geçişe Sahip L=25mm Uzunluğundaki Matrislerle Üretilen 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	154
Şekil 7.53. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Radyal Ekstrüzyon Yöntemi İle Üretilmiş 6 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	155
Şekil 7.54. Yorulma Deneylerine Tabi Tutulan Radyal Ekstrüzyon Yöntemi İle Üretilmiş 4 Dişli Parçaların Wöhler Diyagramı	155

Şekil 7.55. 6 Diş Sahip Ürünler İçin Yorulma Dayanımı Karşılaştırması	156
Şekil 7.56. 4 Diş Sahip Ürünler İçin Yorulma Dayanımı Karşılaştırması	157
Şekil 7.57. 4 Dişli Ürünün Sertlik Ölçüm Noktaları	159
Şekil 7.58. 4 Dişli Cosinus Geçiş Sahip İleri Ekstrüzyon Ürünlerinin Sertlik Değerleri Karşılaştırması	160
Şekil 7.59. 4 Dişli Taper Geçiş Sahip İleri Ekstrüzyon Ürünlerinin Sertlik Değerleri Karşılaştırması	160
Şekil 7.60. 4 Dişli Ürünün Üretim Yöntemine Göre Sertlik Değerleri Karşılaştırması	161
Şekil 7.61. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Sertlik Ölçüm Noktaları	162
Şekil 7.62. 6 Dişli Cosinus Geçiş Sahip İleri Ekstrüzyon Ürünlerinin Sertlik Değerleri Karşılaştırması	162
Şekil 7.63. 6 Dişli Taper Geçiş Sahip İleri Ekstrüzyon Ürünlerinin Sertlik Değerleri Karşılaştırması	163
Şekil 7.64. 6 Dişli Ürünün Üretim Yöntemine Göre Sertlik Değerleri Karşılaştırması	164
Şekil 7.65. 4 Ve 6 Dişli Ürünlerin Boyutsal Doğruluk Oranları	167

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Üretim Yöntemlerinin Gruplandırılması	3
Tablo 1.2. Plastik Şekil Verme Yöntemlerinin Gruplandırılması	6
Tablo 2.1. Üretim Yöntemleri	15
Tablo 5.1. İleri Ekstrüzyon İçin Ampirik Olarak Türetilen Formüller	60
Tablo 7.1. Deneylerde Kullanılan Ticari Saflıktaki Alüminyumun Kimyasal Kompozisyonu	110
Tablo 7.2. Deneysel, Üst Sınır Analizi ve Deform Sonlu Elemanları maksimum kuvvet değerleri	133
Tablo 7.3. Yorulma Deneylerinde kullanılan gerilme ve kuvvet değerleri	143
Tablo 7.4. Deneylerin İstatistik Değerleri	160

SEMBOL LİSTESİ

L	: Matris uzunluğu
H	: Matris uzunluğu
r, θ, z	: Silindirik koordinatlar
m	: Kalıp ile malzeme arasındaki sürtünme sürtünme faktörü
V_m	: Ortalama hız
V_0	: Giriş Hızı
V_r, V_θ, V_z	: Silindirik koordinatlardaki hız bileşenleri
ΔV	: Hız süreksizliği
W_d	: Deformasyon işi
W_f	: Sürtünme işi
W_s	: Kayma enerjisi işi
μ	: Sürtünme Katsayısı
σ_0	: Malzemenin akma gerilmesi
σ_m	: Ortalama akma gerilmesi
τ	: Kayma gerilmesi
S_{ij}	: Gerilme deviatör tensörü
δ_{ij}	: Birim tensör
ε	: Genleme
$\dot{\varepsilon}$: Genleme hızı
$\dot{\omega}$: İş oranı

σ_{ij}	: Gerilme tensörü
$\dot{\epsilon}_{ij}$: Genleme hızı tensörü
J_2	: Gerilme deviatörü inveryantı
k	: Basit kaymada akma sınırı
V	: Deformasyon bölgesinin hacmi
J^*	: Toplam enerji
E^p	: Dışarıdan verilen toplam enerji
F	: Deformasyon için dışarıdan uygulanan kuvvet
$F_{sür}$: Kovanla numune arasındaki sürtünme
P	: Sürtünmeye maruz kalan yüzey basıncı
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
α	: İkinci ve dördüncü bölgedeki açı
β	: Dördüncü bölgedeki açı
φ	: Üç, dört ve beşinci bölgeler sınırlarını belirleyen açı
\emptyset	: Altıncı bölgedeki açı
θ	: Değişken açı

r_t : Dişüstü Yarıçapı

r_r : Dişdibi Yarıçapı

r_p : Yuvarlanma Dairesi Yarıçapı

BÖLÜM 1.

1.ÜRETİM KAVRAMI ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ

İnsanoğlu tarihin eski çağlarından itibaren doğada yaşadığı zorlukları çeşitli aletler üretmek yoluyla aşarak günlük hayatını kolaylaştırmaya çalışmıştır. İlk zamanlarda doğada bulduğu malzemeleri kullanmış, sonraları ise geliştirdiği yöntemleri kullanmak yoluyla yeni malzemeler üretmiş, bu malzemelerden çeşitli aletler yaparak bunları geliştirmiştir. Sanayi devriminin etkisiyle daha büyük miktarlarda üretim yapma zorunluluğu ön plana çıkarak ve makineleşmeye yol açan ve bir yol izlenmiştir. Sanayi devriminin ilk dönemlerinde oldukça hantal ve ilkel mekanizmalar ile üretim yapılırken gelişerek daha verimli ve yüksek üretim düzeyine çıkabilen üretim sistemleri oluşturulmuştur.

1.1. ÜRETİM

Sanayi anlamı olarak üretim, eldeki hammaddenin işlenerek istenilen özellik ve biçimdeki bitmiş ürün haline getirilmesinde hammadde, proses ve üründen oluşan bir süreç olarak tanımlanır. (Goetsch, D., 1991)

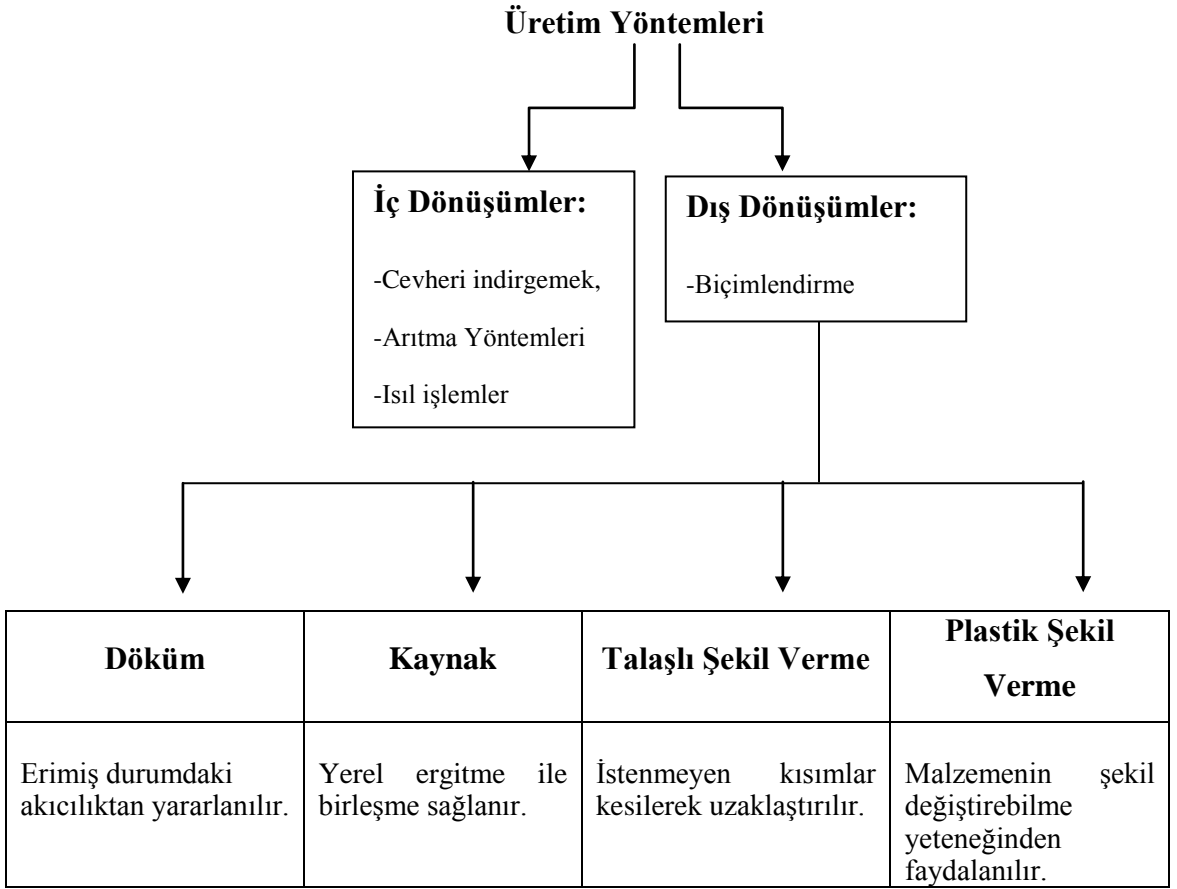
Üretim çok geniş bir disiplin olduğundan detaylı olarak anlaşılması sadece makine veya imalat mühendislerine değil, amaçları insan ihtiyaçlarını karşılamak olan diğer mühendislik dallarına da yardımcı olur. Üretime başlangıç olarak enerji, zaman ve insan kaynakları konusunda yeterli fizibilite çalışması yapıldığı takdirde 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 artırılması bakımından önemlidir. Pazarlama konusu da ürünün en iyi ve

karlı şekilde alıcıya ulaşmasında etkin bir rol üstlenmektedir. Son aşama yani sonuç aşamasında 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.

1.2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

İlerleyen teknoloji ile birlikte yüksek kaliteli ürünlerin tasarımı ve bunların seri olarak ve aynı zamanda ucuz üretimini sağlayan yöntemlerin geliştirilmesini beraberinde 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, temel anlamda her bir üretim yönteminin yararlarını, üstünlüklerini ve sınırlarını bilerek amaçladıkları tasarıma en ucuz ve doğru olarak ulaşmak için gerekenleri yapmak durumundadırlar. Mühendislik disiplini içinde üretim yöntemlerini iç ve dış dönüşümler olarak iki gruba ayırmak mümkündür. İç dönüşümler cevherlerin indirgenmesi, arıtılması ve ısıl işlemleri olarak sıralanırken dış dönüşümler malzemelerin biçimlendirilmesi olarak söylenebilir. Bu kategoride de 4 ana üretim yöntemi olan *döküm, kaynak, talaşlı şekil verme ve plastik şekil verme* yer alır.

Tablo 1.1. Üretim Yöntemlerinin Gruplandırılması



Yukarıda bahsedilen üretim yöntemlerinin genel bir sınıflandırmasını yapmak istediğimizde ise 6 grup söz konusudur (Lange,K., 1985). Bu grupları şu şekilde sıralayabiliriz.

1.2.1. Üretim Yöntemi Grupları

- **Bağ oluşturma**

Grup 1. Birincil Biçimlendirme:

Belirli herhangi bir şekle sahip olmayan katı parçacıklardan birincil şeklin yaratılması veya parçacıklar arasında bağıntılar oluşturulması ile ilgili üretim yöntemleri bu grup içinde yer almaktadır. Döküm ve toz metalurjisi bu gruba dahil edilebilir.

- **Bağın arttırılması**

Grup 2. Şekil Değişirme:

Bir katı cismin kütlesini veya bileşimini değiştirmeden şeklini başka bir şekle dđnüşürmeye yada bağın arttırılması ile ilgili üretim anlaşılır. Plastik şekil verme yöntemleri bu grupta yer alır.

- **Bağın Kopartılması**

Grup 3. Ayırma:

Bağın kopartılarak talaşlı biçimlendirme ile malzemenin ana kütleden kopartılması ile ilgili üretim yöntemi anlaşılır. Talaşlı şekil verme ve taşlama bu grupta yer alır.

- **Bağın Büyütülmesi**

Grup 4. Birleştirme:

Birbirinden ayrı parçalar arasında bağlantı oluşturarak başka elemanlar meydana getirmeyle ilgili üretim yöntemleri anlaşılır. Kaynak, lehim ve yapıştırma bu gruba dahil edilebilir.

Grup 5. Kaplama:

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.

Grup 6. Malzeme Özelliklerinin Değiştirilmesi:

İş parçasında optimum özellikler elde etmek amacıyla malzeme özelliklerinin değiştirilmesi olarak bilinir. Burada malzemedен parçacıklar çıkarmak, parçacıklar ilave

etmek veya parçacıkların yeniden düzenlenmesi ile ilgili işlemler söz konusudur.

1.3. ÜRETİM YÖNTEMİ OLARAK PLASTİK ŞEKİL VERME

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

Karbonlu ve alaşımlı çelikler, alüminyum, çinko, bakır ve bunların alaşımları gibi demir dışı malzemeler plastik şekil verme yöntemi ile şekillendirilebilmektedir. 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. (Akata, 1987)

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 değer 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 değiştirerek 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 yöntemlerinin etkin gerilme türünün esas alındığı bir gruplandırma ile sınıflandırılması gerekirse, 5 etkin gerilme haline göre hazırlanan gruplandırma şekli, Tablo 1.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Plastik Şekil Verme Yöntemlerinin Gruplandırılması (Altınbalık, 2000)

Plastik Şekil Verme

Basma Türü Biçimlendirme	Çekme-Basma Türü Biçimlendirme	Çekme Türü Biçimlendirme	Eğme Türü Biçimlendirme	Kesme Türü Biçimlendirme
<ul style="list-style-type: none"> •Ekstrüzyon •Delme •Kapalı Kalıpla Dövme •Açık Kalıpla Dövme •Haddeme 	<ul style="list-style-type: none"> •Sıvama •Flanş yapma Biçimlendirme •Derin Çekme •Tel-Çubuk Çekme 	<ul style="list-style-type: none"> •Kabartma •Genişletme •Gerdirme 	<ul style="list-style-type: none"> •Döner ve Lineer Kalıp Hareketiyle Bükme 	<ul style="list-style-type: none"> •Burkulma •Döndürme

1) Basma Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçası veya hammaddenin esas olarak tek veya çok eksenli basma gerilmelerinin etkisi altında şekil değiştirdiği biçimlendirmelerdir.

2) Birleşik Çekme ve Basma Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçasının şekil değişiminin esas olarak birleşik tek veya çok eksenli çekme ve basma gerilmelerinin etkisiyle sağlandığı biçimlendirmelerdir.

3) Çekme Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçasının şekil değişiminin tek veya çok eksenli çekme gerilmeleri etkisinde olduğu biçimlendirmelerdir.

4) Eğme Türü Biçimlendirme İşlemleri: İş parçasının eğilme gerilmeleri ile şekil değiştirdiği işlemler ile biçimlendirmelerdir.

5) Kesme Türü Biçimlendirme İşlemleri: Şekillenen iş parçalarında kayma ve kesme gerilmelerinin daha etkin olmasından kaynaklanan biçimlendirmelerdir.

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

Yapılan çalışma etkin gerilme türüne göre plastik şekil verme yöntemlerinin sınıflandırılmasında basma türü biçimlendirme grubundan ekstrüzyon ile ilgilidir. Bu nedenle takip eden bölümde ekstrüzyon yöntemi açıklanmaktadır.

1.4. EKSTRÜZYON

Ekstrüzyon; bir metal bloğun, kovanlara yerleştirilerek, bir ıstampa yardımıyla basınç altında, belirli profillere sahip matrisler içerisinde geçirilerek şekillendirildiği bir plastik şekil verme tekniğidir. Ekstrüzyon yönteminin günümüz teknolojisine benzer bilinen ilk kullanımı ünlü hidrolik mühendisi Joseph Bramah'ın 1797 yılında demir bir pota içinde erimiş bir şekilde bulunan kurşunun kalıp olarak kullanılan bir tüp içerisine basılmasını sağlayan bir pres tasarlayıp bunun patentini almasıyla ortaya çıkmıştır.

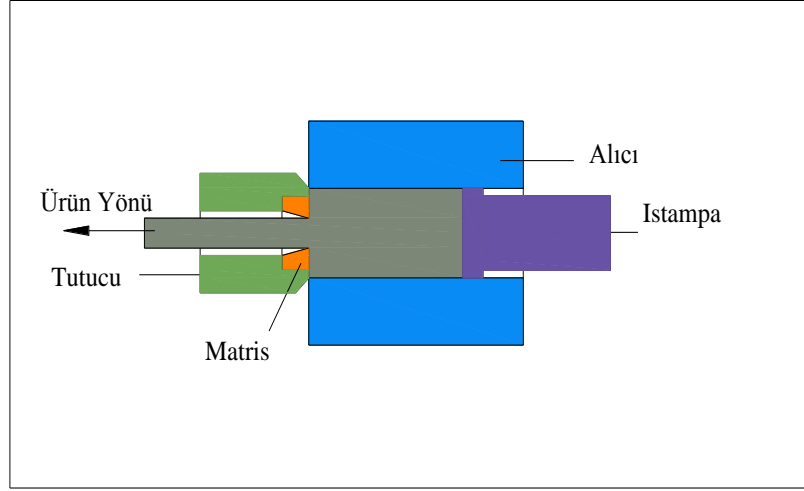
Yöntemin geliştirilmesi de 1823 yılında İngiltere’de Shrewsbury’li bir su tesisatçısı olan Thomas Burr’un ekstrüzyon yöntemi kullanarak kurşun borular üretmek amacıyla tasarladığı hidrolik bir pres sayesinde olmuştur. (Saha, 2000)

Günümüzde geliştirilmiş modelleri sanayi de sıkça kullanılan hidrolik presin keşfi aynı zamanda ekstrüzyon yönteminin de beraberinde gelişmesini sağlamıştır. Ekstrüzyon hafif metal sanayinin en çok kullandığı plastik şekil verme yöntemlerinden bir tanesidir. Elde edilen ürünlerin kesitleri çubuk, boru gibi basit kesitlerden düz dişli çark ve içerisinde boşluklar barındıran karmaşık kesitlere kadar geniş bir yelpazede incelenebilir. Yöntemin temelinde gerilme tipi olarak basma gerilmeleri hakimdir. Bu sebeple malzeme çatlama olmadan büyük oranlarda plastik şekil değiştirebilmektedir.

1.4.1. İleri ve Geri Ekstrüzyon

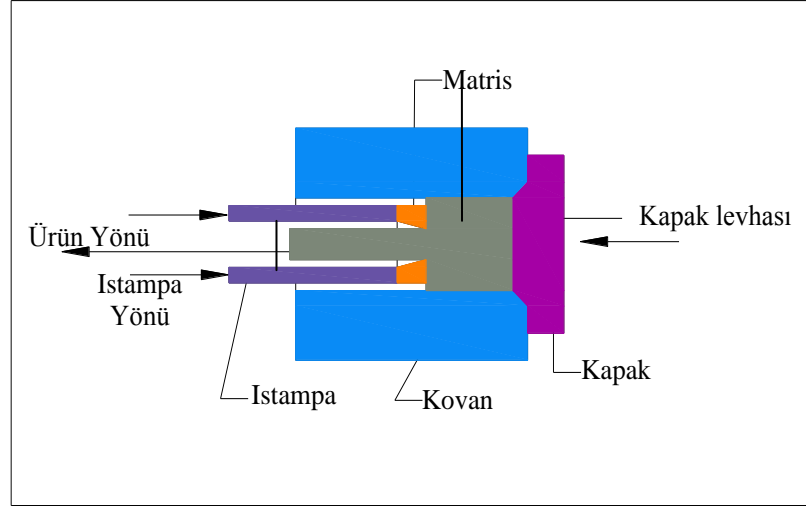
Ekstrüzyon yöntemini ürün ile zımba hareketine göre sınıflandırmak istediğimizde; ürün ile zımba aynı yönde hareket ettiği İleri (direk) Ekstrüzyon, ürün ile zımbanın hareketlerinin birbirlerine göre zıt yönlerde olduğu Geri (endirek) Ekstrüzyon ve ürünün zımba hareket doğrultusuna dik yönde hareket ettiği Yanal (radyal) ekstrüzyon olmak üzere temel olarak üç farklı yöntemle karşılaşılır.

Yukarıda adı geçen yöntemlerin yanı sıra ileri ekstrüzyon yöntemi esas alınarak hidrostatik basınç altında gerçekleştirilen Hidrostatik Ekstrüzyon, boru üretimi yapmak amacıyla mandrel kullanmak suretiyle ileri veya geri ekstrüzyon yöntemi esasına dayanan Boru Ekstrüzyonu ve ani olarak büyük kuvvetlerin uygulanmasıyla, et kalınlığı çapına kıyasla küçük olan tüp şeklinde parçaların üretildiği Darbeli Ekstrüzyon yöntemleri de alt başlıklar halinde sıralanabilir.



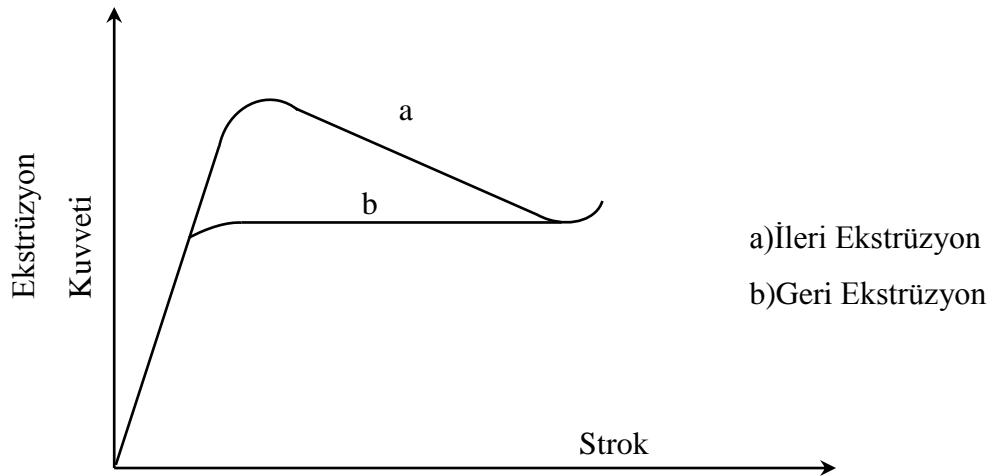
Şekil 1.1. İleri Ekstrüzyon

İleri ekstrüzyon yönteminde kovan içerisinde bulunan iş parçası, zımba tarafından uygulanan kuvvetin etkisi ile kalıbın diğer tarafında bulunan matris adı verilen ve elde edilmek istenen ürün kesitine sahip kalıp elemanının içerisinde geçirilmesi yoluyla üretim gerçekleştirilmektedir. Uygulanan kuvvetin yönü ürünün çıkış yönü ile aynıdır. Zımba ile iş parçası kalıbın sabit olması nedeniyle birbirine göre bağıl olarak hareket ederler. Bu bağıl hareket nedeniyle ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerini yenmek amacıyla çok daha büyük şekillendirme kuvvetlerine ulaşma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Malzeme, kalıp içerisinde homojen olmayan bir şekilde akış gösterir. Sürtünme nedeniyle kalıp duvarlarına temas eden biyet yüzeyi ile serbest bir şekilde akışa zorlanan malzemenin iç kısmında farklı hızlarda akış gözlenir ve malzemenin tamamı büyük kuvvetler ile ekstrüze edilse bile ileri ekstrüzyonda kovan içindeki malzemenin %15 ile 20 kadar miktarı olabilecek kusurları ürüne taşımamak ve şekillendirme kuvvetini düşük tutmak amacıyla işleme sokulmaz. İleri ekstrüzyonda kalıp düzenlemesi diğer ekstrüzyon tiplerinden çok daha basit, kullanışlıdır ve işletme açısından daha az maliyetlidir. Bu yöntemle çeşitli çap, uzunlukta içi boş ve dolu profiller üretilmektedir. Bu avantajlarına karşılık; takım ömrü; biyet ve alıcı arasındaki sürtünmelerden dolayı, indirekt ekstrüzyona göre daha kısadır. Uzun biyetlerin kullanılmasının önlenmesi, işlem sonu kalıpta bırakılan ekstrüzyon artığının fazla olması, malzeme akışının indirekt ve hidrostatik ekstrüzyon yöntemlerindeki gibi daha düzensiz olması ileri ekstrüzyon yönteminin diğer dezavantajlarıdır.



Şekil 1.2. Geri Ekstrüzyon

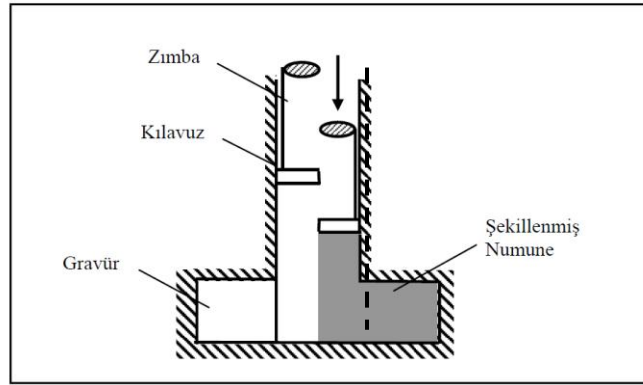
Geri (endirekt) ekstrüzyon yönteminde matris içi boş bir ıstampa ucuna monte edilmiş bir şekilde hareket ettirilir. İstampa ucuna doğru hareketinde uygulanan kuvvetin etkisi altındaki biyet (blok), matris ve ıstampa deliğine girer ve bu şekilde ürün çıkışı sağlanır. Geri ekstrüzyon yönteminde ıstampa hareket yönü ile ürün çıkış yönü birbirine göre terstir. Kalıp hareketli ancak biyet sabit olduğundan bağıl hareket olmamaktadır ve bu nedenle takoz ile alıcı ara yüzeyinde malzeme hareketi yoktur, dolayısıyla sürtünme ihmal edilecek seviyede azdır. Bu nedenle şekillendirme için gereken toplam kuvvette ileri ekstrüzyona kıyasla daha düşük mertebelerde olmaktadır. Aynı zamanda sürtünmenin olmaması nedeniyle malzeme daha homojen bir akış göstermektedir. Sürtünmenin ihmal edilecek mertebelerde az olması takım ömrünün uzamasına da yol açmaktadır.



Şekil 1.3. Kuvvet-Strok değişimi

1.4.2. Yanal (Radyal) Ekstrüzyon

Kafa şişirme yöntemlerinin bir alternatifi olarak düşünülen radyal ekstrüzyon veya diğer bir deyişle enjeksiyon yığıma yöntemi genellikle net şekillere yakın parçalar elde etmek için kullanılıyor olsa da uygun düzenlemelerle net şekilli parçaları da elde etmek mümkün olmaktadır. Malzeme hareket yönünün zımbanın doğrultusuna dik yönde olduğu ekstrüzyon tipidir. (Milner, P.R., 1971). Yanal ekstrüzyon yöntemi kullanılarak dairesel kesite sahip bir sap kısmı bulunan ve aksel olarak daha büyük çapta flanşı veya çeşitli profillerde çıkıntıları bulunan parçaların net şekle yakın olarak üretilmelerinde genel olarak tercih edilen bir yöntemdir. Yanal ekstrüzyon kavramı literatürde enjeksiyon yığıma, radyal ekstrüzyon veya enjeksiyon dövme isimleri ile de karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1.4. Yanal Ekstrüzyon

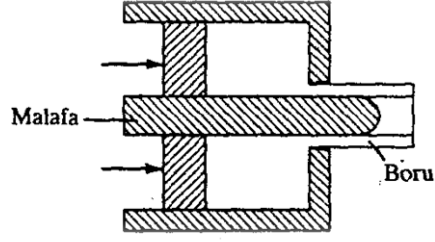
Malzeme akışı kapalı kalıpla klasik dövme yöntemine benzemektedir. Malzeme akışının çok eksenli olarak sınırlandırılması sebebiyle malzemenin düzgün bir akış sergilediği ve kalıpların bu nedenle yüksek gerilmelere maruz kalması yöntemin önemli dezavantajlarından. Ayrıca kalıpların yüzey kalitesi, ürünün yüzey kalitesine birebir olarak etki etmektedir. Bu yüzden gerek kalıp malzemesinin özellikleri gerekse işçilik kalitesi yüksek olmalıdır. Kalıplara etki eden yüksek takım gerilmeleri sebebiyle prosesin, özellikle çelik ve alaşımları kullanıldığında sıcak veya ılık olarak yapılması tavsiye edilir (Lee, Y.S. ve diğ., 2001). Malzeme kaybı oldukça azdır, ayrıca işlem sonunda üründe çapak kesme operasyonuna gerek kalmamaktadır.

1.4.3.Hidrostatik Ekstrüzyon

Hidrostatik ekstrüzyon, bloğun alıcı içerisinde ıstampa kuvvetinin etkisi ile değil belirli bir sıvı akışkanın yardımı ile elde edilen hidrostatik basınç altında matrizen geçmesinin sağlandığı ekstrüzyon yöntemidir. Malzeme ile takımlar arasında sürtünme olmadığından şekillendirme için gerekli olan ekstrüzyon kuvveti direk ekstrüzyona kıyasla alaşım ve ekstrüzyon şartlarına bağlı olarak daha düşük olmaktadır. Ancak bunun yanında hidrostatik basıncı yaratan sıvının sızdırmazlığı ve kalıp cidarlarına gelen yüksek radyal gerilmeler nedeniyle kalıp tasarımının ve imalatının daha zor ve pahalı olduğu bir gerçektir. Hidrostatik ekstrüzyon plastik olarak şekil değiştirilmesi zor olan metallerin ve metal alaşımlarının yanında alüminyum ve bakır alaşımlarında da kullanılmaktadır.

1.4.4. Boru Ekstrüzyonu

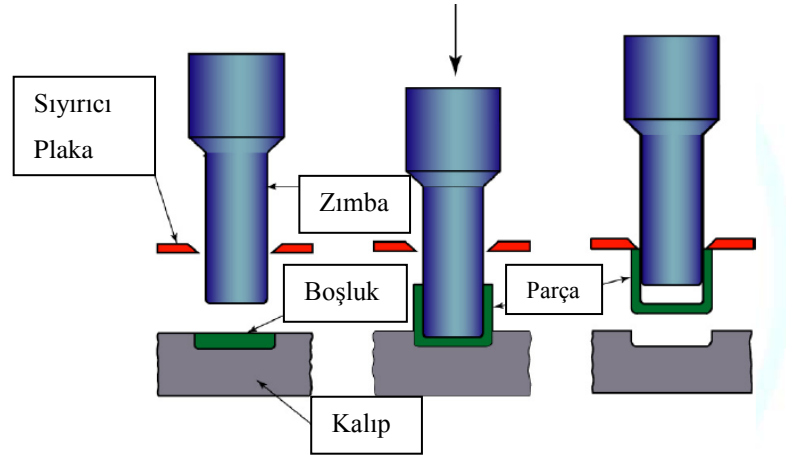
Dikişsiz boruların ekstrüzyonla üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Yöntemin temeli ileri ve geri ekstrüzyon yöntemine dayanır. Boru üretiminde kullanılan hammadde, direk ekstrüzyonda dolu ve delikli, endirek ekstrüzyonda ise ortasında uygun büyüklükte bir delik bulunan takozlardan oluşmaktadır. Direk boru ekstrüzyonunda ıstampaya tespit edilen bir malafa, ıstampanın ileri hareketiyle takozun ortasındaki deliği boydan boya geçerek ıstampa takozu temas etmeden önce matrise girer ve böylece matris deliğinde takoz malzemesinin geçebileceği halka şeklinde bir boşluk bırakır. Daha sonra ıstampa takozu basınç uyguladığında malzeme bu boşluktan boru şeklinde çıkar. Borunun et kalınlığı matris deliği ile malafanın çapına bağlıdır (Şekil 1.5.)



Şekil 1.5. Direk ekstrüzyonla boru üretimi (şematik).

1.4.5. Darbeli (Püskürtmeli) Ekstrüzyon Yöntemi

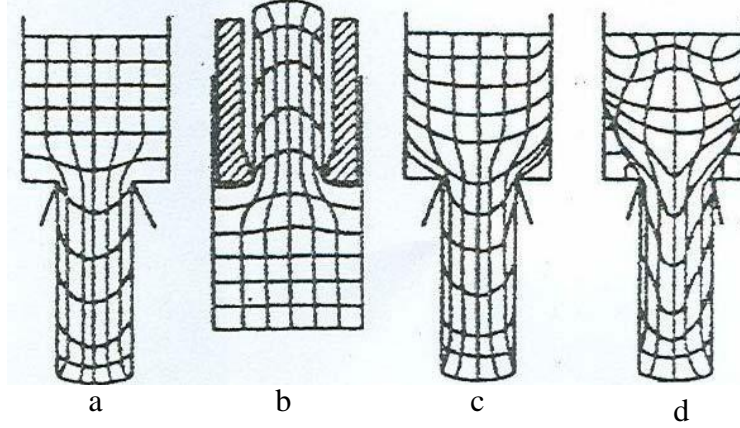
Dönel simetriye sahip içi boş ya da dolu parçaların imalatında kullanılan bir yöntemdir. İmal edilecek ürünün iç çapı istampa çapı, dış çapı da matris çapına eşittir. İstampa yardımıyla ani bir kuvvet uygulanması nedeniyle akma gerilmesi ve sertliği nispeten düşük, et kalınlığı az ve plastik olarak kolay şekillendirilebilen alüminyum ve alaşımları, çinko, pirinç, kurşun kalay gibi demir dışı metaller tercih edilir. Basınçlı tüpler, sübaplar ve ilaç sanayindeki ilaç tüpleri gibi ürünler elde edilir.



Şekil 1.6. Darbeli Ekstrüzyon üretimi (şematik).

1.5. EKSTRÜZYONDA MALZEME AKIŞI

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



Şekil 1.7. 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 1.7.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 1.3.b.'de görülen deformasyon şeklidir ve burada kalıp girişine kadar takozun şekil değişimi homojendir. Şekil 1.7.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 1.7.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)

BÖLÜM 2.

2. DİŞLİ ÜRETİM PROSESLERİ ve DİŞLİ HASAR MEKANİZMALARI

Dişlilerin dört bin yıldan daha uzun bir süredir kullanıldıkları bilinmektedir. (Dudley, D.W., 1969). 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 artırıp 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. Şekil 2.1’te talaşlı ve talaşsız şekil verme yöntemleri sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Üretim Yöntemleri

TALAŞLI ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ	TALAŞSIZ ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ
<ul style="list-style-type: none"> • Azdırma ile İmalat • Modül Freze ile İmalat • Yüzey Frezeleme • Form Frezeleme • Form Taşlama • Raspalama (Traşlama) • Broşlama • Elektroerozyon ve Tel Erozyon 	<ul style="list-style-type: none"> • Haddeleme • Toz metalurjisi • Döküm • Hassas dövme <ul style="list-style-type: none"> - Soğuk hassas dövme - Ilık hassas dövme - Sıcak hassas dövme

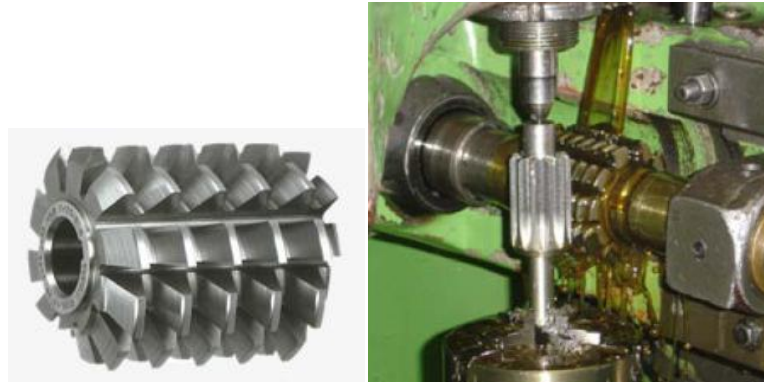
2.1. TALAŞLI ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ

Talaş kaldırma ucu (ağız) keskin bir takım ile parça üzerinden malzeme kaldırma işlemidir. Bu şekilde iş parçasını şekillendirmek amacıyla kaldırılan malzemeye **talaş** adı verilir. Talaş kaldırma işlemi, takım ile parça arasındaki bağıl hareketin bir sonucudur. Takım ile iş parçası arasındaki kesme (ana), ilerleme (avans) ve yardımcı (ayar) olmak üzere üç farklı hareket vardır.

Kesici takımlarla fazla malzemenin uzaklaştırılması dişli üretim prensibine dayanan prosesler bu gruba girer. Bu tip proseslerde kesici takım veya dişli taslağı sürekli dönmektedir. Yöntem hem dişli taslağı hemde bitirme işlemleri için kullanılabilir. Dişli dişlerinin karmaşık yapısı nedeniyle işleme zamanı artmakta ve bu da maliyetin yükselmesine sebep olmaktadır. Ayrıca talaşlı yöntemlerde malzeme kaybı bir diğer sorundur. Bu sorunları gidermek amacıyla alternatif talaşsız şekil verme yöntemleri geliştirilmiştir. Her iki yöntemde çeşitli avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmaktadır.

2.1.1. Azdırma Çakısı İle Üretim

Dişler arasındaki metalin kesilerek uzaklaştırıldığı yöntemde, bir silindirin 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.



Şekil 2.1 Azdırma tezgahında dişli açılması ve kullanılan kesici takım

2.1.2. Modül Freze İle Üretim

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. İş parçası aynı zamanda aşağı-yukarı dikey hareketlerde yapmaktadır. İkincisinde ise, düz bir blok üzerinde kremayer dişli gibi yerleştirilmiş olan kesici dişler diş açma operasyonunu gerçekleştirmektedir. İkinci işleme sürekli frezelemede denmektedir. İşlemin devamlı olabilmesi için kremayer bıçağının uzunluğunun yuvarlanma dairesi çevresinden bir miktar büyük olması zorunludur. Bu pek pratik olmadığından genellikle bıçak birkaç taksimat ilerledikten sonra başlangıç noktasına geri çekilir.

Düz dişli kremayerin diş ana doğruları üretilecek çark eksenine paraleldir. Helisel dişli kremayerinde ise bu doğrular eksenle helis açısı yaparlar. Modül frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar azdırma takımlarından daha ucuz olmasına rağmen yöntem azdırmadan daha yavaştır. Yöntemle üretilen dişlilerin boyutsal doğruluğu azdırma ile üretilenlere benzemektedir. Bazı durumlarda, azdırma ile işlenemeyecek sert malzemelere modül frezeleme ile diş açılabilir.



Şekil 2.2: FELLOW tezgahında dişli çark şeklindeki bıçakla dişlinin açılması

2.1.3. Yüzey Frezeleme

Bu yöntem genellikle spiral konik dişliler ve hipoid dişlilerin yapımında kullanılır. Azdırma, modül frezeleme veya diğer metodlarla üretilen dişlilerde son ürün kinematik olarak üretim yönteminden bağımsızdır.

Yüzey frezeleme ile üretilmiş spiral konik ve hipoid dişlilerde aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Bu proseste üç farklı sistem kullanılır. Birinci sistemde (Gleason) kesme merkezine göre sabit bir radyal mesafede dairesel olarak yerleştirilmiş kesici dişler mevcuttur. Diğer sistemde (Oerlikon) yine kesici dişler yine dairesel olarak ancak bu sefer değişken radyal mesafelerde yer almaktadır. Dönen dairesel bir tabla üzerine yerleştirilen bıçaklar kesme hareketini gerçekleştirir. Üçüncü sistemde ise (Klingelnberg) sürekli taksimatı sağlamak amacıyla çok başlangıçlı bir kesici takım mevcuttur.

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.

2.1.5. 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)



Şekil 2.3. Form Taşlama

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. 450HB'den daha yüksek yüzey sertliğindeki dişlilerin rahat traşlanabilmesi için özel bıçak ve kesme sıvısına ihtiyaç duyulmaktadır. Profil geometrisi, taksimat hatalarının bir kısmı traşlama ile düzeltilebilmektedir. Traşlama bıçakları, dişleri kesici kenarları oluşturmak üzere eksene dik düzlemlerle dilimlenmiş silindirik dişli veya kremayer şeklindedir. Küçük dişlilerin traşlanmasında bıçak dişliyi, büyük dişlilerde ise dişli bıçağı tahrik eder. Traşlanacak dişli ile bıçak, eksenleri arasında belirli bir açı olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Kesme miktarını fazlaştırmak eksenler arasındaki açığı arttırmak ile sağlanabilir. Ancak açı arttıkça kavrama doğrusu azaldığından 10^0 - 15^0 arasındaki değerler tavsiye edilmektedir. Az sayıdaki üretim için traşlamanın ekonomik olmadığı söylenebilir.

2.1.7. Broşlama

Yöntem, dişli üretimi için oldukça hızlı bir yöntemdir. Hem iç hem de dış alın ve helisel dişliler için kullanılsada, 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)

2.1.8. Elektroerezyon ve Tel Erozyonu

Bu yöntem hemen her sertlikteki malzemedan dişli üretimi için kullanılabilir. Burada, kesici takım görevini gören bir elektrodur ve elektrot ile iş parçası arasındaki ark, iş parçasında erozyon meydana getirir. Elektrot, işlenecek parçaya bağlı olarak basit veya karmaşık olabilmektedir. Dişli üretiminde sık kullanılan yöntem tel erozyonu yöntemidir. Bu yöntemde üretilen dişlilerin yüzey hassasiyetleri 0.4-0.8 μ olsada 0.2-0.4 μ gibi daha düşük pürüzlülükler de elde etmek için kullanılabilir.

2.2. ÇAPAKSIZ YÖNTEMLER

2.2.1. Haddeleme

Haddeleme malzemenin plastik şekil verilmesinde önemli bir prosestir. Haddelerek şekillendirme bitirme işlemi olarak kullanılabilceği gibi katı bir çubuktan dişli yapımında da tercih edilebilir. Haddeleme ovalama tipi kalıplarda gerçekleştirilir. Ovalama kalıpları karşılıklı olarak zıt yönde yatay hareket ederler ve iş parçası kalıplar arasında şekillendirilir. Bu yöntem haddelenenin en yavaş prosesidir. Kalıp masrafı az olmakla birlikte silindirik kalıplarda işlem hızı daha yüksektir.

Haddelerek bitirme işlemi ise hızlı ve ekonomik bir prosestir ve dişli yüzeyinin kalıntı basma gerilmelerine dayanımını artırır. Haddelerek bitirme işlemi yalnızca birbiri ile temas eden yüzeylerine uygulanır. Ancak, yöntem eğer ısıl işlemde evvel uygulanırsa ısıl işlem esnasında ortaya çıkabilecek distorsiyonları gidermek amacıyla dişli profili modifiye edilmelidir.

2.2.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi dişli üretiminde kullanılan esnek imalat yöntemidir. Düz, helisel, konik, düz-helisel, helisel-helisel dişliler bu yöntemle üretilebilir. Toz haline getirilmiş metal sıkıştırılıp sinterlenerek dişli haline getirilir. Dişlilerin dayanımları sınırlı olmakla birlikte çok sayıda üretim sözkonusu olduğunda maliyetleri aşırı derecede düşürmektedir. 50mm. 'den daha düşük çapa sahip ve fazla dayanım gerektirmeyen dişlilerin üretiminde kullanılırlar. Daha büyük, daha dayanıklı ve daha hassas dişli üretimi gerektiğinde toz metal dövme (powder forging) veya izostatik sıcak presleme (Hot Isostatic Pressing) yöntemleri kullanılır. Toz metalurjisi günümüzde askeri tanklar, türbin motorları, oyuncaklar, pompalar, ofis makineleri ve otomobillerde kullanılmaktadırlar.

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. Oyuncaklar, kontrol mekanizmaları ve iş makinelerinde düşük gerilmeler altında çalışan döküm yöntemi ile üretilmiş dişliler düz, helisel, konik ve diğer tüm tiplerde üretilebilirler. Döküm işlemi ile üretilen dişlilerde genel olarak boyut hassasiyeti kötüdür. Boyut toleranslarını modifiye etmek gerekirse de pek çok dişli döküldüğü boyutlarında kullanılır.

2.2.4.Hassas Dövme

Dişli dövme terimi parçaların net veya nete yakın boyutlarına dövülmesini içermektedir. Son yıllarda dişlilerin hassas dövülmesi konusunda büyük aşamalar kaydedilmiştir. Bunun sebebi böyle üretilen dişlilerin diğer tüm klasik yöntemlere olan doğal üstünlüğüdür. Bu avantajların başlıcaları daha az hammadde sarfiyatı, tasarım esnekliği ve ekonomikliğin yanında yöntem sonucunda artan dayanım olarak sıralanabilir.

Hassas dövme terimi yalnızca bir dövme prosesini değil aynı zamanda dövmeye filozofik bir yaklaşımı da ifade etmektedir. Bu yaklaşımın amacı net veya nete yakın boyutlarda 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 veya bitirme operasyonu uygulanır. Shipley (1985)'e göre hassas dövme bazen, boyutsal ve yüzey toleranslarının tam olarak sağlandığının bir göstergesi olarak "tam tolerans dövme" olarak da adlandırılır. Hassas dövme operasyonları soğuk, ılık ya da sıcak olarak gerçekleştirilebilir. Proseslerin avantajları ve sınırlamaları aşağıda açıklanmıştır:

2.2.4.1. 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, diğerleri ise şu şekilde sıralanabilir.

- Parça boyutları pres kapasitesi ile sınırlıdır.
- Pek çok parça soğuk olarak dövülmekle beraber karmaşık şekilli, yüksek oranda deformasyon gerektiren ve asimetric 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 tavlama ihtiyacı 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, H.E., 1987).

2.2.4.2. Ilık Hassas Dövme

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.

2.2.4.3. Sıcak Hassas dövme

Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleşen bir yöntemdir. Kalıp boşluğunu doldurmak soğuk dövme göre malzemenin akma dayanımının düşmesi nedeniyle 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 doktora çalışmasında, talaşsız imalat olarak da 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.

2.3.DİŞLİ HASAR TİPLERİ

Amerikan Dişli Üreticileri Birliği (AGMA) ulusal standardında diş bozuklukları 5 ayrı grupta incelenmektedir.

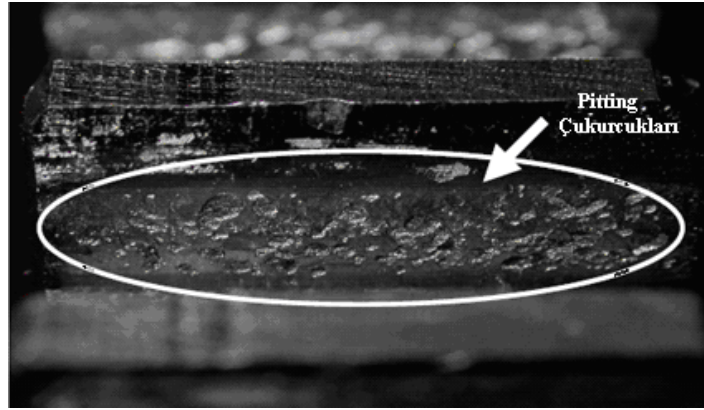
- 1-Yüzey Yorulma Hasarları
- 2-Aşınma
- 3-Plastik Akma
- 4-Kırılma
- 5-İmalat Sırasında Oluşan Hasarlar

2.3.1.Yüzey Yorulması Hasarları

Bu yorulma, malzemenin dayanım sınırı üzerinde uygulanan tekrarlı yüzey veya yüzey altı gerilmelerinin sonucunda ortaya çıkan bir hasar türüdür. Aşırı basınç altında fazla sayıda yük tekrarının (çevriminin) ardından, diş yüzeyinde veya yüzeyin altında

oluşan küçük çatlaklarının gelişip, birleşmesiyle meydana getirdikleri çatlak şebekesinin çevrelediği malzeme parçacığının bulunduğu konumda kopup ayrılması sonucu ortaya çıkar. Pitting (çukurcuk) ya da spalling (pullanma) adı ile anılır. Yetersiz yağlama sonucunda oluşan aşınma hasarlarından farklıdır. İyi yağlama şartlarında bile görülür.

Pittinglerin ortaya çıkış mekanizması olarak yeni dişlilerin pürüzlü yüzeyinden kaynaklanan yüksek gerilmeler, yuvarlanma çizgisi altında, yani dişin taksimat ve temel daireleri arasında kalan bölgesinde başlayan çukurcukların hem boyut hem de sayı bakımından dişli yüzeyinin hasar görmesine kadar artış göstermesi ile veya tam kapasite ile yüklenmiş ve ısıl işlem ile tamamen sertleştirilmiş dişlilerde yuvarlanma dairesi altında diş yüzeyinde yuvarlanma çizgisi altında kalan bölgede çukurcuklar şeklinde yer alırlar.



Şekil 2.4. Dişli Pitting hasarları

Spalling (Pullanma) ise tamamen sertleştirilmiş dişlilerde ve yumuşak malzemelerde tek bir noktada üst üste gelmiş ya da iç içe geçmiş geniş çukurcukların bir araya gelmesi şeklinde ortaya çıkar.

2.3.2. Aşınma

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde malzemenin, istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır. Bu şekilde, yüzeyler ilk şekillerini kaybederler; parçalar arasındaki boşluklar büyür ve buna bağlı olarak da dinamik kuvvetler büyür, gürültü ve titreşimler

meydana gelir, verim azalır. Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Aşınma hasarı abrasif ve adhesif aşınma olarak iki sınıfa ayrılabilir.

Abrasif aşınma; Sistem içerisine giren kir ve toz gibi yabancı maddeler, dökümden gelen çapaklar, dişlerden gelen veya yataklardan gelen aşınmış parçacıkların diş yüzeyleri boyunca kayması ve yuvarlanması sonucunda ortaya çıkan aşınma türüdür.

Adhezif aşınma; yük durumuna, malzeme sertliğine, temas eden malzemenin ve yağlayıcıların fizikokimyasıyla ilgili olarak da bağ kuvvetlerine bağlıdır. Adhezyon aşınmasının şiddetli haline “Yenme” denir. Yenme olayına diş formu, pürüzlülük, malzeme, dişlerin yüzey sertliği, yağ sıcaklığı ve miktarı, diş genişliği gibi faktörler yol açmaktadır. (Kızılaslan, K.,2000)

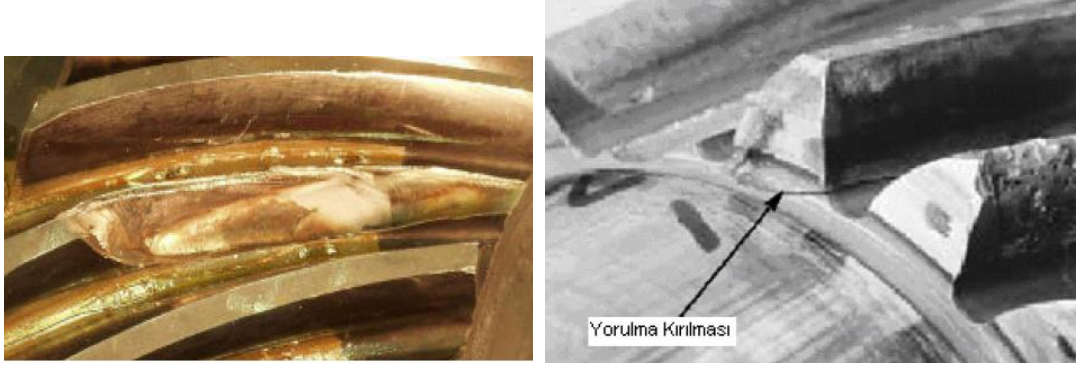
2.3.3.Plastik Akma

Plastik akma; düşük dönme hızlarında yüksek gerilmeler altında çalışan dişlilerde bir hasar mekanizmasıdır. Sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı şekilde karşımıza çıkmaktadır. Soğuk akmada orta sertlikteki dişli uygun yağlama şartlarında olmasına rağmen aşırı yüklenme ve yüksek kayma hızlarında meydana gelmekte sıcak akma ise genel olarak bir yağlama sorunu ile ortaya çıkan ve yağlamanın sürtünmeyi azaltamayacak şekilde yetersiz olduğu ve sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısıyı uzaklaştıramadığında kısa sürede dişlinin hasarlanmasına yol açan bir hasar türüdür.

2.3.4.Kırılma

Dişliler ile ilişkilendirilen hasar türlerinden en tehlikeli hasar tipi kırılmadır. Aniden ortaya çıkar ve güç ileten dişlilerde iletilen enerjiyi düşürür veya dişlinin kullanım dışı olmasına yol açar. Özellikle kırılmanın aniden ortaya çıkması dişlinin görev yaptığı yer olarak helikopter, asansör, vinç gibi kırılması ile can kaybı gibi çok acı sonuçlara yol açabilen durumlar için özellikle kırılmaya yol açacak etkenleri iyi bilerek takip etmek gerekir. Kırılma çok değişik sebeplerden ortaya çıkabilmektedir.

Bunlar eğilme yorulması, aşırı yükleme, rastgele kırılma gibi sebepler en çok rastlanılan kırılmaya yol açan mekanizmalardır.



Şekil 2.5. Dişlilerde meydana gelen yorulma hasarları

2.3.5. İmalat Sırasında Oluşan Hasarlar

Dişliler üretim safhasında çeşitli işlemlere tabi tutulurlar. Bu işlemler genelde talaşlı şekil verme operasyonları ile ısıl işlemler sonucunda meydana gelen hasarlardır.

BÖLÜM 3.

3.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dişli formunun kapalı kalıpta dövülmesinde ortaya çıkan yetersiz kalıp doldurma ve fazla yük gibi sorunlara çare bulmak bakımından Hu, C. ve ark. (2007), Sonlu Elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada radyal akış hız dağılımı efektif radyal malzeme akışını verecek kadar üniform olarak kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Uygun dişli şekillendirmeyi sağlamak ve hammaddenin şekillendirmenin ilk safhasındaki serbest yağma zamanını düşürmek için hammadde dış çapı, ürün diş dibi çapına yakın olarak seçilmiştir. Yazarlar daha verimli bir 3 Boyutlu bir sayısal benzetim yapabilmek için zımba ve kalıpları rijit cisimler olarak kabul edilmişler ve mesh işlemi uygulamamışlardır. Modelleme yalnızca tek bir diş için oluşturulmuş, işlem sonucunda tek bir diş için elde edilmiş sonuçlar bütün dişlerin deformasyonunu verecek şekilde çoğaltılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre, malzeme akışı kalıp üst ve alt bölgelerinde birbirine eşit ve daha sınırlı iken, orta kısımda malzeme akışı daha belirgindir. Malzeme kalıp duvarlarına ulaşp diş profilini doldurmaya başladığı anda kalıp üst bölgesindeki malzeme akış hızının alt bölgeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Yazarlar deneysel çalışmalarında ticari saflıkta kurşun tercih etmişlerdir. Deneysel sonuçların SEM analizi ile uyumlu olduğu sonuçlar kısmında açıklanmıştır.

Kalıp açısı, yükleme oranı (ekstrüzyon hızı) ve ekstrüzyon oranının ürün kalitesine olan etkisinin deneysel olarak incelendiği bir başka çalışmada Onuh, S.O., ve ark. (2003) kurşun ve alüminyum numuneler kullanmıştır. Dişli benzeri bir profil seçilmiştir. Değişik ekstrüzyon oranları için maksimum ekstrüzyon kuvvetleri ekstrüzyon hızının artmasıyla birlikte artış göstermekte olduğu ve 60⁰ ve 120⁰ arasındaki kalıp açılarında kurşun numunelerin eğrilik yarıçaplarının sabit kaldığı 120⁰den sonra ani bir şekilde artış gösterdiği görülmüştür. Yazarlar bunun nedenini çalışmada yüksek kalıp açılarında daha yüksek ekstrüzyon kuvvetlerinin ortaya çıkmasına bağlamaktadırlar. Yüksek ekstrüzyon oranları, ekstrüzyon basıncının

ekstrüzyon hızıyla birlikte olan artışının çok daha değerlerde olmasına yol açmakta olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca ürünlerin sertlik değerleri artan ekstrüzyon oranlarıyla birlikte artış göstermektedir. Yazarlar bunun nedenini yüksek ekstrüzyon oranlarında yüksek genlemelerden dolayı ortaya çıkan çoklu dislokasyonlar olarak açıklamaktadırlar.

Azad-Noorani, M., ve arkadaşları (2005) şekillendirme kuvvetini azaltmak, ürünün metalurjik özelliklerinde iyileştirme sağlamak ve kalıp ömrünü uzatacak optimum kalıp profilini elde etmek amaçlayan yazarlar bunun için ileri ekstrüzyon yönteminde eğrisel kalıp profili ile gerilme ve kuvvet bağıntıları, dilim yöntemi ve ABAQUS programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile teorik sonuçlar, alüminyum numuneler kullanılarak da deneysel sonuçlar elde etmişlerdir. Diyagramlardan her iki kalıp profili için benzer eğrilerin oluştuğu görülmüştür. Şekillendirmenin her anında optimum eğrisel profilde gerekli olan kuvvetin optimum konik profile kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Eğrisel kalıpta maksimum kuvvet değeri konik kalıba göre %12 daha az olduğu görülmüştür. Yazarlar, proses şartları aynı olup, kalıp profilleri farklı olmak kaydıyla (eğrisel-konik) deformasyon kuvvetindeki azalma tamamen eğrisel profil ile uygunluk gösterdiğinden optimum kalıbın eğrisel profile sahip olan kalıp olduğu sonucuna varmışlardır.

Jung, S.-Y., ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada biyeti önce spur gear formuna ekstrüze edip sonrasında tekrar ekstrüzyon yöntemi kullanarak önceden elde ettikleri düz dişli profilini helisel dişliye dönüştürme yoluyla iki aşamadan oluşan bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntemin Samanta, S.K. (1976) ve Choi, J.C. ve ark. (1994)'nın önerdiği yöntemlere kıyasla kalıp ömrünü uzatmasını amaçlamışlardır. Şekillendirme için gerekli olan kuvvetleri hesaplamak amacıyla üst sınır analizi ve ticari bir paket program olan DEFORM ile sonlu elemanlar yöntemi sonucu elde edilen sonuçlar Cr-Mo alaşımlı çelik malzeme kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Değişik helis açıları kullanılarak elde edilen benzetim (simülasyon) sonuçlarına göre; 45^0 için efektif gerilme değerlerinin malzemenin çekme dayanımı değerinden daha yüksek bir değerde olduğu ve bunda şekillendirme için optimum helis açısının 45^0 olduğunu ortaya koyduğunu belirlemişlerdir.

Bakhshi-Jooybari, M., ve diğ. (2007) optimum eğrisel kalıpta alüminyum ve kurşun numunelerin soğuk ekstrüzyonunda kuvvet tahmini için birleştirilmiş yeni bir üst sınır ve dilim yöntemi öneren yazarlar karşılaştırma yapmak amacıyla da daha önceden tasarlayıp, çalıştıkları konik kalıpları seçmişlerdir. Yeni önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar deneysel olarak ve ABAQUS adlı ticari sonlu elemanlar yazılımından elde edilen sonlu elemanlar çözümleri ile karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-strok diyagramlarında kombine metod, simülasyon ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyum içerisinde olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca alüminyum ve kurşun numuneler için şekil değişiminin herhangi bir anında optimum eğrisel kalıp için gereken kuvvet, optimum konik kalıp için gerekli olan kuvvetten daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonucun şekillendirmenin optimum eğrisel kalıplarda konik kalıplara kıyasla daha az enerji gerektirdiğine işaret ettiğini ve sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlar içinde doğru olduğunu belirtmişlerdir.

Yazarlar (Choi, J., ve diğ., 1999) yaptıkları çalışmada trochoidal forma sahip dişli parçaların dövülerek şekillendirilmesini nümerik hesaplama sonuçları ile modellemişler ve proses değişkenlerinin etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Deney numuneleri olarak Al 2218 malzeme kullanmışlardır. 12 dişli trochoidal dişlinin dövme işleminde şekil değişimi- kuvvet grafiği dolu ve ortası delik dişli formları için elde etmişlerdir. Çalışmada son adımdaki dövme yükünü tahmin etmek için önemli olan serbest akma yüzeyini dairesel olarak kabul etmişlerdir. Hesaplanan kuvvetlerin deneysel olarak elde edilen verilerle uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Önerilen üst sınır çözümleri trochoidal dişlilerin dövülmesinde diş yüksekliğine bağlı olmaksızın uygulanabilir olduğunu öne sürmüşlerdir. Üst sınır yöntemiyle elde edilen sonuçlar incelemiş ve toplam enerjinin, deformasyon enerjisinden güçlü bir şekilde etkilendiği göstermişlerdir. Sürtünme için harcanan enerjinin kayma enerjisinden daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır. Diş sayısı azaldıkça gereken enerji azalmakta olduğunu belirten yazarlar yaptıkları üst sınırı yöntemi önerisi ve deneysel kalıp setlerine göre yaptıkları öngöründe 6 veya 7 dişlilerin dövülmesi için minimum enerjiye gerek olduğunu belirtmişlerdir.

Choi, J.C., ve Choi, Y., (1998) düz (spur gears) dişlilerin yanal ekstrüzyon (enjeksiyon yığıma) prosesi teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Bağlı zımba basıncı hesaplayarak, çeşitli modül ve diş sayıları için tekrarlanan analiz ve deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırmışlardır. İki farklı hassas dövme yöntemi kullanmışlardır. Eksenel simetrik parçaların dövülmesinde kullanılan bu iki farklı yöntem ticari sonlu elemanlar programı DEFORM ile ve üst sınır analizi programı kullanılarak analiz etmişlerdir. DEFORM ile iki yöntemde deforme edilmiş iş parçasının modellenmesi ile her iki yöntemdeki gerilme dağılımını incelemiştir. İş parçası Al alaşım sürtünme katsayısı $m=0.13$ olarak alınmıştır. Sonuçlardan kılavuz tip zımbanın dişli dövme prosesine daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Yazarlar elde ettikleri üst sınır yöntemi sonuçlarına göre; bağlı zımba basıncı dişin olduğu son bölümde her iki şekillendirme yöntemi için ani bir şekilde artış göstermiş olduğunu ve ayrıca değer olarak clamping tip kılavuz tipe göre daha yüksek sonuçları verdiğine değinmişlerdir. Diş dolarken bağlı ortalama diş sayısının artışıyla kılavuz tip için yumuşak bir şekilde artarken clamping tip için yumuşak bir azalma göstermiştir. Üst sınır yöntemi ile tahmin edilen dövme kuvvetinin final bölümünde deneysel sonuçlarla uygun bir yaklaşıklık gösterdiği ve kılavuz tip için daha düşük kuvvetlere ve daha düşük şekillendirme enerjisine ihtiyaç duyulduğu sonucuna varmışlardır.

Bir başka çalışmada Narayanasamy, R., ve diğerleri (2006) dairesel biyetten dairesel kesite sahip çıkış profiline, kosinüs profile sahip kalıplarla geçişte üst sınır yöntemiyle elde edilen sonuçlar, Gunasekera, J.S., ve Hoshino, S., (1982) ile Maity, K.P., ve diğerleri (1996)'nın yaptıkları çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üst sınır analizi yönteminde kartezyen koordinat sisteminde tanımlı olarak bir parçacığın kalıp giriş profili ile çıkış profili arasında izlediği yol bir fonksiyon şeklinde ifade etmişlerdir. Bu fonksiyon boyunca herhangi bir anında parçacığın ani yön değişimine uğramadığı kabul edilerek oluşturulan fonksiyon yardımıyla hız alanları hesaplamışlardır. Üst sınır yöntemi plastik şekil değişimi işini tahmin etmek amacıyla kullanılmışlardır. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış olan düz daralan kalıp ile dışbükey dairesel kalıpların sürtünmesiz şartlarda hesaplanmış sonuçları ile karşılaştırıldığında diğer kalıplara kıyasla cosinus profilin daha düşük ekstrüzyon

basıncına ihtiyaç duymasından dolayı üstünlük sağlamakta olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yapılan çalışmada benzer kalıp profilleri olan ancak düz daralan matris seçilerek hesaplanmış güç miktarları, bağıl ekstrüzyon basıncının değişimi ile bağıl kalıp uzunluğu değişimine göre karşılaştırmalı grafik olarak elde etmişlerdir. Karşılaştırmalı çalışma sonucunda cosinüs geçişe sahip profillerin toplam güç ihtiyacının plastik şekil değişimi ve sürtünme için harcanması gereken güç miktarlarının bağıl kalıp uzunluğuna karşılık gelen her değeri için daha düşük olarak gözlemişlerdir.

Ponalagusamy, R., ve arkadaşları (2005), akım çizgileri yardımıyla oluşturulan ekstrüzyon kalıplarında, Bezier eğrilerinin kullanarak yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Farklı sürtünme katsayıları için toplam ekstrüzyon basıncı teorik olarak hesaplanmış ve polinomial denklem tabanlı fonksiyonlarla tanımlanmış kalıplar ile Bezier eğrileriyle tanımlanmış kalıplar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bezier eğrileriyle oluşturulan kalıpların diğer kalıplara oranla sabit sürtünme katsayısı ve ekstrüzyon oranlarında daha düşük ekstrüzyon basınçlarıyla şekillendirme yapmayı mümkün kıldığı görülmüştür. Kübik parametrik Bezier eğrilerinin kullanılarak hesaplanan hız alanları oluşturulurken her bir parçacığın bir akım çizgisi boyunca aktığı ve hızların parçacıkların izledikleri akım çizgilerine teğet olduğu kabulü yapılarak, işlem süresince hacim sabitliğinin korunduğu kabul edilmiştir. Yazarların çalışmasında, bağıl ekstrüzyon basıncı; kalıp uzunluğu optimal kalıp uzunluğuna erişene kadar düşer sonrasında kalıp uzunluğunun artışıyla birlikte arttığı gözlenmiştir. Bağıl kalıp uzunluğuna bağlı olarak deformasyon kuvveti düşerken, sürtünme kuvvetinin her zaman artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bağıl ekstrüzyon basıncının ekstrüzyon oranı ve sürtünme katsayısı ile artış gösterdiği görülmüştür. En düşük değerleri Bezier eğrileriyle oluşturulmuş kalıpların vermekte olduğu belirlenmiştir.

Yang, D.Y., Han, C.H., ve Kim, M.U., (1986) değişik profillerde giriş ve çıkış kesitlerine sahip olan kalıplarda iki kesiti birbirine bağlayan kalıp yüzeyinin Bezier eğri veya Coon's yama fonksiyonları ile analitik ifadesini yapmanın silindirik koordinatlarda zor olduğunu belirtmişler, giriş ve çıkış kesitleri $R(\theta,0)$ ve $R(\theta,L)$ olarak tanımlayan bir

geçiş fonksiyonu $R(\theta, z)$ olarak yeni bir tanım yapmışlardır. Bu geçiş fonksiyonu adı verilen fonksiyon sınır şartlarını sağlayan, $z=0$ için giriş kesitini ve L boyundaki matris çıkışında $z=L$ için çıkış kesitini tanımlayan bir fonksiyon olarak seçilmiştir. Geçiş fonksiyonu elde edilirken belirli sayıda Fourier serisinden faydalanmışlardır. Tanımlanan geçiş fonksiyonu yardımıyla yeni bir hız alanı tanımı yapılmış ve üst sınır yöntemi eliptik ve dikdörtgen kesite sahip çıkış profilleri üzerinden elde ettikleri sonuçları Al 2024 deney malzemesi kullanılarak karşılaştırmışlardır. Çıkan ürünlerin yüzey kalitelerinin oldukça iyi olduklarını görmüşlerdir. Üst sınır yöntemi ile elde edilen sonuçları, deney sonuçlarından bir miktar daha yüksek olarak bulmuşlardır. Bu durum kısmen kare kesite sahip profilin eliptik profile göre çevreleyen çemberin daha büyük çevresel uzunluğa sahip olması nedeniyle şekillendirme için daha fazla enerji harcanması olarak açıklanmıştır.

Bir başka çalışmada Choi, J., Cho, H.Y., ve Jo, C.-Y., (2000), dişli profilin yarı-diş bölgesi yedi farklı alana ayrılarak oluşturulan kinematik olarak kabul edilebilir hız alanlarıyla elde edilen üst sınır analizi yöntemi sonuçları deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafiklerden 15 dişli modül sayısı 2 olan sürtünme faktörünün 0.1 olduğu hal için bağıl şekillendirme basınçları ve şekillendirme kuvvetlerinin çapların oranlarından bağımsız olarak benzer şekilde değişim göstermekte oldukları belirlenmiştir. Bağıl şekillendirme basınçları delikli ve tam dolu dişliler için diş sayısı 15, sürtünme katsayısı $m=0.1$ ve modülün 2 olduğu durum için çözülmüş ve delikli dişlilerin daha düşük bağıl dövme basınçlarında şekillendirildiği mantıklı bir sonuç olarak elde edilmiştir. Sürtünme faktörünün 0.1 olduğu durum için farklı diş sayılarına bağlı olarak elde edilen grafiklerde diş sayısının 10'dan küçük ve 25'ten büyük olduğu durumlarda dövme yönteminin uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Song, J.H., ve Im, Y.T., (2004) ise dolu veya ortası delikli dişlilerin soğuk ekstrüzyonu için bilgisayar destekli bir tasarım programı geliştirmişlerdir. Etkin bir kalıp tasarımı için temel tasarım prensipleri sonlu elemanlar analizi ve literatür taramasına bağlı olarak düzenlemişlerdir. Tasarım parametreleri olarak uygun şekillendirme kuvveti ile tam dişli formunu elde etmek için kullanılan sınır değerler, bilet yarıçap değeri ile dişdibi yüksekliğinden elde edilen ekstrüzyon oranı ile dişüstü

yüksekliğinden elde edilen ekstrüzyon oranlarından elde edilen katsayı ile ifade edilmiştir. Buna ek olarak yapılan çalışma temel alınarak sistemdeki şekillendirme kuvvetini tahmin eden makul ampirik bir denklem de önerilmiştir. Yazarların önerdikleri sistem soğuk olarak yapılan ileri ekstrüzyon için verimli bir kalıp tasarımı yapılması amacıyla etkin olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir.

Gunasekera, J.S., ve Hoshino, S., (1985), dairesel biletten çokgen profile sahip ürünlerin ekstrüzyonu için genel olarak kullanılan düz yüzeyli kalıplardan farklı olarak malzeme akışını kolaylaştıran eğrisel profilli kalıplar incelemiştir. Kalıp profilini tanımlayan 3. Mertebe bir polinom fonksiyon oluşturularak hız alanları elde edilmiştir. Ayrıca eğrisel profilli ve doğrusal daralan kalıplar için %60 ekstrüzyon oranı ve $m=0.1$ sürtünme faktörü değerlerinde üst sınır analizi oluşturulmuş ve ayrıca üst sınır çözümü bileşenleriyle birlikte grafikleri elde edilmiştir. Eğrisel profilli kalıplar için plastik şekillendirmeden gelen güç bileşeni kalıp uzunluğu azaldığında baskın olduğu görülmüştür. Bu güç bileşeninin kalıp uzunluğunun artmasıyla ani olarak düştüğü görülmüştür. Buna zıt olarak düz daralan kalıplarda güç bileşeni neredeyse şekillendirme boyunca sabit kalmakta olduğu görülmüştür. Grafiklerden elde edilen sonuçlara göre eğrisel profilli kalıp ile düz daralan kalıplar aynı ekstrüzyon şartları için karşılaştırıldığında plastik şekil değişimi güç bileşeninin büyüklüğü düz daralan kalıplar için daha düşük olduğu görülmüştür. Yazarlar, 3. mertebe polinom fonksiyonu ile tanımlanan eğrisel kalıplar şekillendirme gerilmeleri bakımından düz daralan kalıplara göre üstünlüğü açıkça görülmekte olduğu sonucuna varmışlardır. Optimal kalıp uzunluğunun, eğrisel kalıplar için daha kısa uzunlukta olduğunu ortaya koymuşlardır. Elde edilen sonuçlar oda sıcaklığında kurşun numuneler ile yapılan deneyler ile doğrulanmıştır.

Çan, Y., ve arkadaşları (2004), radyal ekstrüzyon prosesine dişli benzeri parçalar için hız alanı önermişler ve elde ettikleri teorik sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bağlı zımba basıncı-strok diyagramı çeşitli diş sayıları için sap ile diş eğrisi arasında kalan kayma yüzeyinin şeklini tanımlayan bir λ optimizasyon parametresine göre elde edilmiştir. Ayrıca bilet çapı ile diş kalınlığının zımba basıncı üzerine olan etkisi de incelemiştir. Diş kalınlığının bilet yarıçapına olan bölümüyle

ortaya çıkan orana (h/r_0) bağlı olarak verilen diş sayısı (6 diş) ve sürtünme faktörünün $m=0.3$ olduğu durum için grafik elde edilmiş olup h/r_0 oranının artmasıyla bağlı zımba basıncının düştüğü gözlenmiştir. Sabit bilet yarıçapı (r_0) için diş kalınlığındaki artış h/r_0 oranında da aynı zamanda artışa neden olduğu görülmüştür. Bu yüzden aynı diş sayısı ve sürtünme koşullarında daha ince bir dişli için malzemenin daha dar bir alandan akması zorlaştığından daha yüksek şekillendirme kuvvetlerine ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri bir diğer grafikte ise stroğa karşılık bağlı zımba basıncını oluşturan bileşenler gösterilmiştir. Sürtünme katsayısının $m=0.3$ ve $\lambda = \lambda_{opt}$ için ortalama zımba basıncının kayma bileşeni stroğun artmasına rağmen neredeyse sabit kaldığı ancak diğer bileşenlerin ise stroğun artmasıyla birlikte artış gösterdiği belirtilmiştir. Farklı sürtünme katsayıları için diş sayısının bağlı zımba basıncına olan etkisi incelendiğinde beklendiği gibi diş sayısının artışıyla ortalama zımba basıncıda artmakta olduğunu belirtmişlerdir.

Ebrahimi, R., (2008) ve arkadaşları, tüp ekstrüzyon için yeni bir üst sınır analizi yöntemi önermişlerdir. Sayısal ve analitik çözümle elde edilen optimum kalıp yarı açısı karşılaştırılması yapmışlardır. Verilen sabit sürtünme faktörü değerlerinde şekillendirme için gereken gücü minimuma indiren bir optimum açı değeri olduğunu belirtmişlerdir. Optimum kalıp açısı ayrı bir denklem oluşturularak hesaplamışlardır. Sabit olan sürtünme faktörünün artışıyla birlikte kalıp yarı açısının da artmakta buna rağmen sabit sürtünme faktörünün ölü metal bölgesi açısına herhangi bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır. Ekstrüzyon oranının artışıyla optimum kalıp yarı açısı artmakta olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır. Ekstrüzyon oranının etkisi yüksek sürtünme faktörü değerlerinde çok daha dikkat çekici olduğunu belirtmişlerdir.

Song, J.H., ve Im, Y.T., (2007) ise çalışmalarında soğuk ekstrüzyonun dolu ve ortası delik düz dişliler için otomasyon uygulanan tasarım sisteminin uygulanabilirliği deneyler ile doğrulanmıştır. Deneylerde dolu ve ortası delik düz dişliler (spur gear) için zımba ve hammadde çapı değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Ekstrüzyon kalıp seti geliştirilen sistem üzerine uygulamışlardır. İki farklı malzeme tipi ve yağlayıcı şartlarına bağlı olarak dolu ve ortası delik düz dişli ürünler elde etmişlerdir. Önerilen tasarım sistemi ile ortası delik düz dişliler için malzemenin kalıbı doldurma durumu

iyileştirilmeye çalışılmış ve önerilen tasarımın şekillendirme koşullarına bakılarak tahmin edilen yük değerlerinin deneysel verilerle uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Deneysel AISI 1015 çelik ve AA6061 alüminyum malzemeler kullanılmıştır. Tasarım süreci akış diyagramı çizerek modellediler. 3 boyutlu ticari şekillendirme paket programı kullanılarak shrink fitting oranının farklı değerleri için kalıp analizi yapılmış olup, yazarlar ortaya çıkan gerilmelere bağlı en uygun kalıp tasarımını elde etmeyi amaçlamışlardır.

Shrink fitting oranı değişimine bağlı olarak maksimum efektif gerilmenin alt, üst kalıp ile gerilme plakası üzerinde ortaya çıkan değerleri elde edilmiştir. Ayrıca solid ve hollow dişliler için AISI 1015 çelik ile ekstrüzyon-kuvvet eğrileri elde edilmiş ve solid dişli değeri beklendiği gibi daha yüksek olarak ortaya çıkmıştır. Çeşitli yağlama koşullarında elde edilen ekstrüzyon ürünlerinin diş dibi ve diş üstü çapları ölçülerek tasarımdaki belirlenen ölçülerle karşılaştırılmış ve bu şekilde malzemenin kalıbı doldurmasıyla ilgili bir fikir edinilmeye çalışılmıştır. Aynı ürünler ve yağlama şartları için modifiye edilmiş matematiksel yaklaşım ile hesaplanan kuvvet değerlerine ek olarak deneylerden elde edilen kuvvet değerleri tablo haline getirilerek önerilen tasarım sisteminin gerçek durum için oldukça tatmin edici ve uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Abrinia, K., ve Makaremi, M., (2009), genişleyerek kare, dikdörtgen eliptik kesitlere geçiş yapan bir malzeme akışını modellemek amacıyla yeni bir tasarım ve analiz metodu oluşturmuşlardır. Seçilen kalıplar malzemeyi yanal yüzeylere doğru akışa zorlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Farklı ekstrüzyon oranlarına sahip kalıpları incelemişlerdir. Sürtünme etkisi ve ekstrüzyon oranı gibi parametrelerin ekstrüzyon basıncı üzerine olan etkisi araştırmışlardır. Üst sınır analizi yöntemini maksimum ekstrüzyon basıncı için ve sonlu elemanlar yönteminde kalıp tasarımına kolaylık sağlamak amacıyla kullanmışlardır. Teoriyi doğrulamak amacıyla deneyler yapmışlar ve deneysel, sayısal ve teorik sonuçların uyumlu olduğu ve saçılan(yayılan-spread) kalıplar için kullanılabilceği sonucuna varmışlardır. Önerilen üst sınır analizi yöntemi yeni bir kinematik olarak kabul edilebilir hız alanı içermekte olup, şekillendirme için gerekli

maksimum enerjiyi tahmin etmek amacıyla tercih etmişlerdir. Yapılan deneylerde deney malzemesi olarak ticari saflıkta kurşun ve 10 farklı kalıp seti kullanmışlardır.

Choi, J., Cho, H., ve diğerleri (1998), involute düz spur dişli, trapezoid eğri dişli, trochoidal dişli, kare profile sahip dişliler için hız alanları elde edilerek dövme için modellemişlerdir, üst sınır yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve Al 2024 ve Al 2218 alüminyum malzemeler ile yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yapılan karşılaştırma neticesinde deneysel sonuçlardan daha yüksek şekillendirme kuvveti değerlerini veren üst sınır analizi teorik yaklaşım sonuçlarının dövme ekipmanlarının kapasitelerini belirlemek için kullanışlı olduğunu görmüşlerdir. Daha büyük delik çaplarına sahip dişliler için daha düşük dövme kuvvetlerinde şekillendirme gerçekleşeceğini belirtmişlerdir. Bu yüzden hasara yol açmayacak maksimum delik çapı dövme kuvvetlerini düşürücü bir etken olacaktır. 6 diş sayısında kare profile sahip dişlinin dolu ve ortası delik düz dişliye dövülmesinde deneysel ve teorik sonuçlar AA 2218 alüminyum malzemeler için incelemişlerdir. Hesaplanan kuvvet değerinin %10 yükseklik azalmasına kadar deneysel değerden yüksek olduğu ancak %10'a erişildiğinde hesaplanan kuvvetin daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Yazarlar bu durumu serbest akış yüzeyinin deneysel ve teorik yaklaşımlarda farklı olmasının nedeni olarak açıklamaktadırlar.

Sadeghi, M.H., (2003) 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

Kumar, S., ve Vijay, P., (2007) çalışmalarında Al 2024 alüminyum ile kurşun malzeme ile çeşitli profillerin düz ve konik kalıplarla H,L,T,eliptik ve çift delikli çıkış kesitlerine sahip profillerin ekstrüzyonunda sıcak ve soğuk ekstrüzyon için ortaya çıkan ekstrüzyon kuvveti-strok eğrilerini deneysel olarak çeşitli ekstrüzyon oranlarında elde etmişlerdir. Ayrıca literatürde yer alan kendi çalışmalarında yer alan deneysel veriler ile kurşun malzemenin soğuk ekstrüzyonun ticari bir sonlu elemanlar programı kullanılarak ortalama ekstrüzyon basıncı için bir karşılaştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada solid

kesitler için kalıp tasarımında, hassas ölçüler ve ürün şeklinin tamlığını sağlayan ve ek işlemleri ortadan kaldıran bir tasarım, maksimum ürün boyunu elde eden, çok sayıda ekstrüzyon ürününün, yüzey kalitesinin yüksek olması, yüksek ekstrüzyon hızı ve düşük üretim maliyeti gibi etkenleri tasarım için gereken şartlar olarak sınıflandırmışlardır. Sıcak ekstrüzyon modellemesi için Hyper-Xtrude paket programı kullanılmıştır. Deneyle ve hesaplamalar sonrasında elde edilen sonuçlara göre üst sınır yöntemi ve FEM ile hesaplanan teorik güç tatmin edici olmakla birlikte deneysel güç değerinden biraz daha yüksektir ancak kullanımının yinede uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kesitlerin karmaşıklığı arttıkça ekstrüzyon için gereken gücün artmakta olduğu görülmüştür bu da alüminyum ve kurşun numuneler için teorik sonuçların uyumlu olduğunu sonucuna varmışlardır.

Han, C.H., ve Yang, D.Y., (1986), soğuk ekstrüzyon yöntemi geniş bir kullanım alanına sahip olduğu ve basit kesite sahip parçalardan dişli gibi karmaşık kesitli parçalara kadar geniş bir kullanım alanı olduğundan dolayı dişli benzeri parçalardan yonca biçimli kesite sahip profillerin şekillendirilmesinde gerekli olan maksimum kuvvet sınırını belirleyebilmek adına üst sınır analizi yöntemini tercih etmişlerdir. Dairesel girişe ve yonca profil çıkışına sahip parçalar için hız alanı ifadesi elde etmişler ve sayısal olarak hesaplamışlardır. Deney malzemesi olarak, 1015 çeliği ile 2024 alüminyum kullanmışlardır. seçilen profil düz dişli benzeri olmasının yanı sıra kamlarda ve dişli pompalardaki trochoid şekilli dişlilere benzediğinden dolayı geniş bir kullanıma sahip bir dişli grubunu temsil ettiğinden ötürü tercih edilmiştir. Yazarlar giriş ve çıkış kesitleri arasında yumuşak bir geçişi sağlayarak malzeme akışını kolaylaştıracak bir yüzey seçmişlerdir. Yüzeyi matematiksel bir ifadeyle giriş ve çıkış kesitlerine bağımlı olarak yazmışlardır. Yapılan bu çalışmada sürtünmenin, ürünün şekil zorluk faktörü, kesit azalmasının ekstrüzyon basıncına, malzeme akışına ve ortalama genlemeye olan etkisi incelemişlerdir. Sürtünme faktörünün artışıyla birlikte ekstrüzyon basıncı lineer olarak artmakta olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca sürtünme faktörü artışına kalıp yüzeylerine yakın bölgelerin merkeze oranla daha duyarlı olduğunu görmüşlerdir.

Airod, A., ve arkadaşları (2003), geniş bir aralıkta ki genleme oranlarında ticari saflıktaki alüminyumun şekillendirilme davranışını açıklayan esas denklemi bulmak

amacıyla servo-hidrolik, bilgisayar kontrollü pres yardımıyla çok sayıda basma testi yapmışlardır. Deneyleri mineral yağ ve PTFE kullanılarak veya kullanılmaksızın gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda malzemenin pekleşme üstelinin değeri, dayanımın artmasıyla birlikte düşmekte olduğu görüldü. Malzemenin dayanımını çıkarılan formül yardımıyla düşük genleme oranlarında uygun olarak tahmin etmişlerdir.

Song, J.H., ve Im, Y.T., (2004), CAMPform 3D programını dişli ekstrüzyonundaki proses değişkenlerini incelemek amacıyla kullanılmışlardır. Sonlu elemanlar yönteminin sonuçları Han ve arkadaşları ile Yang ve arkadaşlarının yaptıkları [10,11] çalışmaların deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. İş parçası olarak Al 2024-O alüminyum tercih etmişlerdir ve sürtünme katsayısı 0.12 olarak bulunmuştur. Referanslardaki sınır şartlarını sağlamak için deneyler mandrel kullanılarak veya kullanılmadığı durumlar için çözüm elde etmişlerdir. Diş sayısı 7 ile 21 arasında seçilerek hesaplamalar yapmışlardır. Programdan elde edilen malzeme akışı ile referanslarda alınan deneysel verilerin uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre tam diş doluluğu 9 diş sayısına kadar sağlayabilmişlerdir. Ayrıca giriş açısı arttıkça kalıbı dolduramama halinin sürtünme şartları ile bir bağlantısının olmadığını ortaya koymuşlardır. Yine paket programdan elde edilen sonuçlara göre, mandrel yarıçapına bağlı olarak bir dişlinin geometrisinin kalıp doluluğunu belirleyen en önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir. Mandrel kullanılan ve kullanılmayan durumlar için diş sayısının artmasıyla birlikte kalıbı doldurma yeteneğinin azalmakta olduğunu ortaya koymuşlardır.

Chen ve arkadaşları (2007) yaptıkları çalışmada eksenel simetrik profile sahip konik kalıplarla, çeşitli şartlar altında ileri ekstrüzyon deneylerini alüminyum numuneler kullanarak simule etmişler ve çıkan sonuçları gerilme-genle dağılımı, kalıplara gelen yükler ve kalıp çıkışındaki malzeme hızı gibi çeşitli kriterleri araştırmışlardır.

Benzer şekilde Si ve arkadaşları da konik kalıplarla TiAl malzemelerin plastik şekil değiştirme kabiliyeti ile ilgili çalışmalarını yapmışlardır.

Han, C.H., ve Yang, D.Y., (1988), yaptıkları çalışmada dairesel billetten dişli benzeri (yonca ve trochoidal) çıkış profiline sahip olan cosinus geçişli matrisleri kullanmışlardır. Matematiksel modelleme için yeni bir hız alanı önermişlerdir. Elde edilen üst sınır çözümlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Ürün profillerinde ekstrüzyon oranı, matris uzunluğu ve sürtünme katsayısı her deney için aynı olmasını sağlayarak 3-8 diş arasında çeşitli çıkış profillerini tercih etmişlerdir. Normalize edilmiş ekstrüzyon basıncının diş sayısının artmasıyla birlikte arttığını gözlemişlerdir. Matrislerdeki malzeme akışını da inceleyen yazarlar elde edilen trochoidal ürünlerde diş üstlerinde meydana gelen balıksırtı benzeri bir oluşumu gözlemişler ve bunun sebebini kısmen üründe meydana gelen kalıntı çekme gerilmelerinin etkisi olarak açıklamışlardır. Ayrıca yazarlar teorik olarak hesapladıkları akım çizgilerini ürünleri ızgaralama yaparak karşılaştırmışlar ve teorik sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu gözlemişlerdir.

Benedetti, M., ve diğerleri (2002), yaptıkları çalışmada dişlilerin çelik bilye ile yüzey sertleştirilmesi yapılan dişlilerin mikro-sertlik değerlerini elde etmişler ve işlem uygulanan ve uygulanmayan dişliler arasındaki yorulma sınır değerlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Ayrıca yorulma sınır değerini uygulanan gerilmelere dayanan bir matematiksel model üzerinden teorik olarak hesaplamışlar ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. İşlem uygulanmamış numunelerin teorik olarak hesaplanan yorulma değerlerinin deneysel değerlerin üstünde elde edildiği bunun yanında işlem uygulanan numunelerde deneysel değerlerin nümerik olarak hesaplanan sınır değerlerinin ortalama olarak %20 daha yüksek olduğunu elde etmişlerdir.

Altınbalık ve Çan (2004) çalışmalarında enjeksiyon yığıma yönteminde kuvvet ve malzeme akışına deformasyon bölgesine boyut oranının etkisini incelemişlerdir. Buna göre iki farklı birincil deformasyon bölgesine sahip numunelerle farklı diş sayılarına sahip spline formlar elde etmişler, üst sınır analizi yöntemi ile deneysel sonuçlar ile teorik sonuçları karşılaştırmışlardır.

Ayer (2006) yaptığı yüksek lisans çalışmasında yonca biçimli profile sahip parçaların ileri ekstrüzyonunda üst sınır analizi yöntemi kullanarak için önerdiği

kinematik olarak kabul edilen hız alanı üzerinden kuvvet tahmini yapmıştır. Sonrasında ise teorik sonuçlardan yola çıkarak Altınbalık ve Ayer (2006) kurşun numuneler ile deneyler yaparak önerilen teorik sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve üst sınır analizi sonuçlarının deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır.

Fereshteh-Saniee, (2009) ve arkadaşları ileri ekstrüzyonda prosesi etkileyen parametreleri incelemeyi amaçlamışlar bunu yaparken de farklı sürtünme şartları, çeşitli kalıp profilleri ve matris uzunlukları için sonlu elemanlar yönteminin tabanlı ticari yazılım olan Deform 2D yardımıyla elde ettikleri verileri, kurşun numunelerle yaptıkları ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Ebrahimi ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada, şekillendirme analizi için deformasyon hacmi 3 farklı bölgeye ayrılarak Kartezyen koordinat sisteminde hız alanı bileşenleri ve genleme oranları elde etmişlerdir. Kuvvet-Strok eğrisi teorik ve deneysel sonuçları grafik halinde vermişler ve sonuçlar arasında %6 kadar bir fark olduğunu belirtmişlerdir. Kuvvet tahmininde ortaya çıkan bu fark üst sınır analizi yönteminin doğasından kaynaklanması olarak açıklamışlardır. Deneylerde kullanılan profilleri şekillendirmede ortaya çıkan yüksek genleme ve yüksek dayanım gibi engeller bilet çapının düşürülmesiyle aşmışlardır. Yüksek miktarda plastik şekil değişimi içeren ECAP gibi prosesler ile benzerlik gösteren yüksek oranlarına ulaşılan bir şekillendirme için uygun profil seçilmiş ve ECAP ile önerilen radyal ekstrüzyon yöntemi genleme-vickers sertlik değerine bağlı olarak karşılaştırılmalı olarak incelemişlerdir.

Alves, ve arkadaşları (2001) hassas dövme yöntemini soğuk olarak uygulayarak dişli profili elde etmeyi amaçlamışlardır. Dişli üretimi için gerekli olan kuvvet, malzeme akışı gibi değişkenleri deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Efektif genlemenin ürünün merkez kısmında neredeyse homojen bir dağılım gösterdiği sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunmuş, büyük miktarlarda sapmaların ise diş kısmına doğru akış gösteren malzemenin taban kısmında meydana geldiği görülmüştür. Genlemenin en yüksek değerlerinin iş parçası ile takım arasındaki dış arayüzeylerde olduğu bulunmuştur. Böyle homojen bir genleme dağılımının elde edilmesinin avantajı dişlinin üretim aşamasının en sonundaki mekanik özelliklerinin her bir kesit için aynı

olmasını sağlayan bir başarı olduğunu belirtmişlerdir. FEM yöntemi kullanılarak sürtünme etkisini de incelemişlerdir. Sürtünmenin etkisini malzeme akışının homojenliğini bozduğu gibi, üniform olmayan akış dağılımına yol açan fiçılaşmayı da tetiklediği belirlenmiştir.

Skunca, M., ve diğ. (2006) çalışmada dişli üretiminde yüksek boyut hassasiyeti, ek ısııl işlemler ve şekillendirme operasyonlarına ihtiyaç olmaması nedeniyle soğuk şekillendirmenin radyal ekstrüzyona uygulanması ile yapılan çalışmada MSC Marc paket programı yardımıyla sonlu elemanlar çözümü ile elde edilen teorik sonuçlar ile deney setinden alınan sonuçları karşılaştırmışlardır. Deney numunelerinin genleme dağılımları ile nümerik olarak paket programdan elde edilen genleme dağılımlarını incelemişlerdir. Ayrıca 0.1 ile 1.1 genleme aralığında deney ürünlerinin iç yapısını tane büyüklüğu bazında incelemişlerdir. Bunlara ek olarak ise deneysel, sürtünmenin olduğu ve sürtünmenin olmadığı durumlar için kuvvet strok eğrilerini elde etmişlerdir.

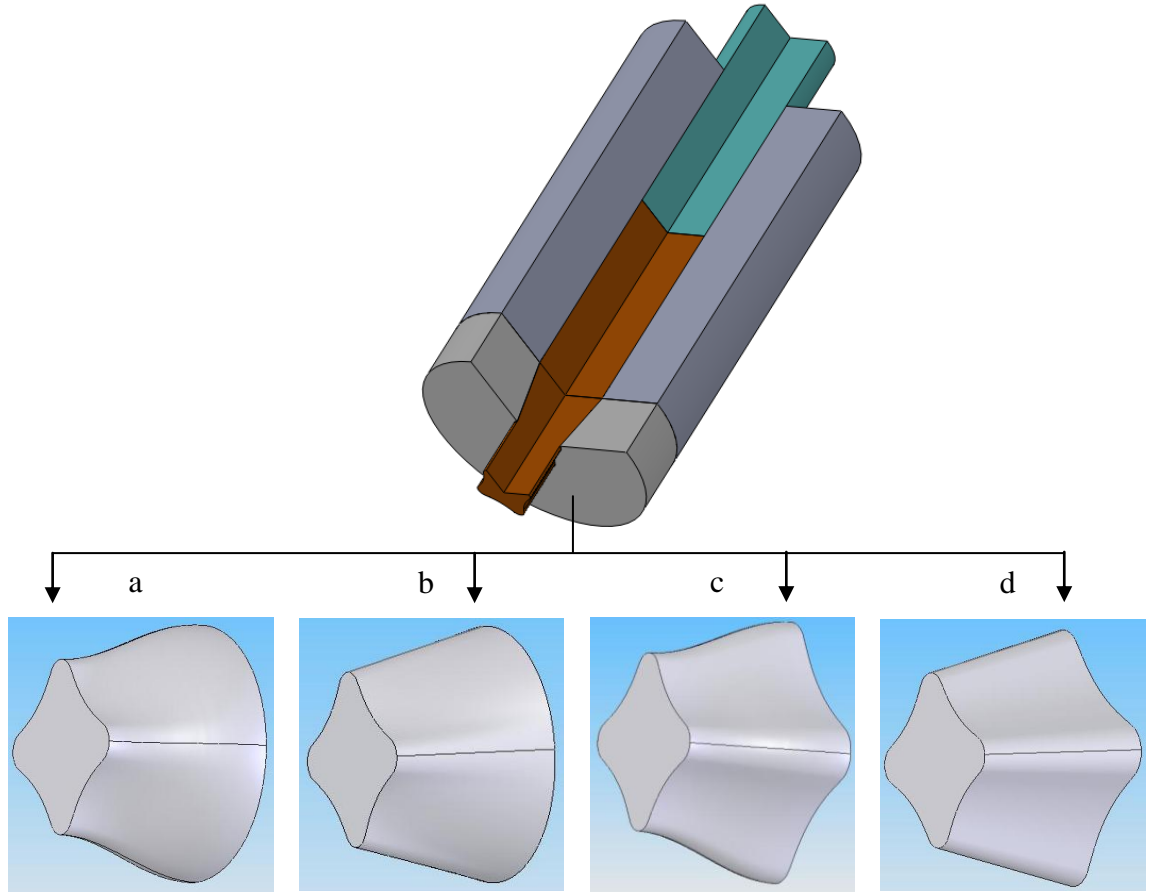
Mısırlı (2006) doktora tezi olarak yaptığı çalışmasında klasik dövme yöntemi ve yanal ekstrüzyon yöntemi kullanarak elde ettiği dişli benzeri parçaların imalatı ile ilgili analiz ve deneyleri kapsayan bir araştırma yapmıştır. Düz ve konik geçişe sahip iki ve dört dişli sahip dişli parçalar için önerdiği hız alanına bağlı olarak elde ettiği üst sınır analizi yöntemiyle elde ettiği kuvvet sonuçlarını, her iki üretim yönteminin deneysel değerleriyle karşılaştırmıştır. Yanal ekstrüzyon yönteminin parçalara sağlayabileceği mekanik özellikler, her iki üretim yöntemiyle elde edilen dişli benzeri taslaklarda, dişli tekrarlı eğilme yorulması yükleri uygulanarak incelenmiştir. Ayrıca üretilen parçaların mikrosertlik değerleri de elde edilmiştir.

BÖLÜM 4.

4.DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1.GİRİŞ.

Tez çalışmalarının deneysel kısmı ile ilgili olarak, sabit bir çıkış profili için, ekstrüzyon matrislerinin giriş profiline önem verilmiştir. Giriş profilinin ve çıkış profilinin seçimi amacıyla dairesel ve yonca formunda giriş profilleri seçilmiştir. Çıkış profili yine yonca (clover) kesitli olan matrisler bu amaca yönelik yonca giriş-yonca çıkış ve daire giriş-yonca çıkışa sahip matris profilleri tasarlanmıştır. Doktora çalışmasının deneysel kısmının ilk aşaması olan bu çalışma kapsamında ileri ekstrüzyon deneyleri Şekil 4.1.'de gösterilen cosinus geçiş ve taper geçişe sahip matrislerle, kurşun malzeme kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yonca-yonca giriş-çıkış kombinasyonuna sahip matrisler ile elde edilen kuvvet değerleri incelendiğinde daire-yonca formasyonlu matrislere göre %20 civarında bir fark ortaya çıkmıştır. Dairesel girişe sahip matrislerin yonca girişli matrislerle kıyaslandığında verdiği düşük kuvvet değerleri sebebiyle seçilmesine karar verilmiştir. Doktora çalışmasının deneysel kısmında matris parametreleri olarak matris giriş profilinin dairesel geometriye sahip olmasına ve çıkış profilinin de 4 ve 6 diş benzer ve standart dişli boyutlarına yakın ve matematiksel olarak modellenebilecek bir çıkış profili olmasına karar verilmiştir. Bunun yanında matris uzunluğunun 15,20 ve 25mm. olması ve giriş ve çıkış profilleri arasındaki geçiş formunun taper ve cosinus geçiş olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. 4 Dişli parçalar için giriş profilleri

- a) Daire-Yonca matris Cosinus geçiş b) Daire-Yonca matris Taper geçiş
c) Yonca-Yonca matris Cosinus geçiş d) Yonca-Yonca matris Taper geçiş

Yapılan deneyler sonucunda giriş profili daire olan kalıp uygulamasının malzeme akışı ve kuvvet bakımından avantajlar sağladığı görülmüştür. Geliştirilen kalıp geometrisinde ürün profilleri olarak, ekstrüzyon oranları aynı ancak bunun yanında farklı profile sahip geometriler seçilmiştir. Seçilen geometrilerin dişli profiline benzer özellikte olması istenmiştir. 4 ve 6 diş profiline sahip geometriler araştırmanın temelini oluşturmaktadır. Ekstrüzyon oranı, her iki geometri için eşit olacak şekilde 2,39 olarak belirlenmiştir. Seçilen 4 ve 6 diş ürün çıkış profilleri standart modül sayılarına sahip olmamalarına rağmen standart değerlere en yakın olacak şekilde matematiksel olarak formüle edilmiş olduğundan dişli benzeri olarak adlandırılmaktadırlar. Bunun yanında her iki farklı çıkış profiline (4 diş ve 6 diş) uygulanmak üzere cosinus (denklem 4.1.) ve

taper (denklem 4.2.)matris geçiş formu olarak adlandırılan giriş ve çıkış profiline bağlı olan bir geçiş fonksiyonu tanımlanmıştır.

$$R_{giriş}(\theta, z) = 14 \quad 4.1.$$

Giriş profili bütün kalıp formasyonlarında aynı şekilde dairesel olarak seçilmiştir. Çıkış profili 4 dişe sahip çıkış için;

$$R_{çıkış}(\theta, z) = 8.7 + 3.5\cos(4\theta) \quad 4.2.$$

6 dişe sahip çıkış için,

$$R_{çıkış}(\theta, z) = 8.7 + 3.5\cos(6\theta) \quad 4.3.$$

olacak şekilde formüle edilmişlerdir. Giriş ve çıkış profiline bağlı olarak ifade edilen matris formunu oluşturan geçiş fonksiyonu ise aşağıdaki gibi cosinus ve taper geçişler için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$R_{cos}(\theta, z) = \frac{(R_{giriş}+R_{çıkış})}{2} + \frac{(R_{giriş}-R_{çıkış})}{2} \cos\left(\frac{\theta z}{L}\right) \quad 4.4.$$

$$R_{taper}(\theta, z) = R_{çıkış} + \frac{R_{giriş}-R_{çıkış}}{L} (L - z) \quad 4.5.$$

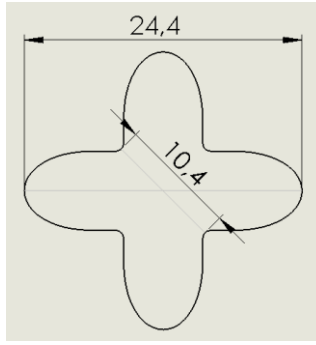
Tasarım aşamasında ekstrüzyon için üretilecek kalıp setinin doktora çalışmasının diğer ayağı olan radyal ekstrüzyon (enjeksiyon yığma) içinde kullanılabilir olacak şekilde modüler bir formda olması sağlanmıştır.

Giriş ve çıkış profilleri sabit kalmak koşulu ile matris boylarına göre ekstrüzyon prosesinin modellenmesi kararlaştırılmış ve bunun için matris boyu 15mm., 20mm., ve 25mm. olacak şekilde kalıp formasyonu tanımlanmıştır. Radyal ekstrüzyon (enjeksiyon yığma) prosesinde kullanılacak matrisler ise en küçük ekstrüzyon matrisi boyuna eşit olacak şekilde 15mm. kalınlığında tasarlanmıştır.

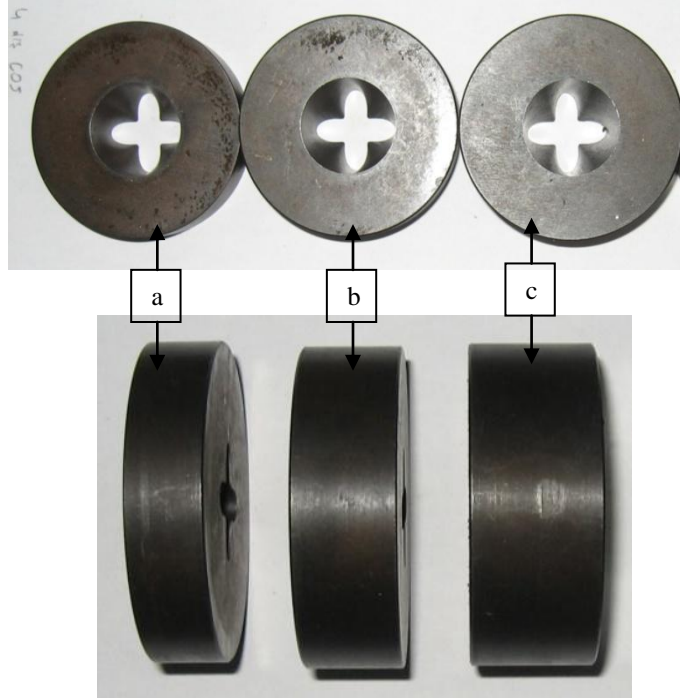
İleri ekstrüzyonun matris giriş alanı 615.44 mm^2 , çıkış alanları 4 dişli ürün ile 6 dişli üründe eşit olacak şekilde geometri belirlenmiş olup yüzey alanları 257 mm^2 dir. İleri ekstrüzyonda ekstrüzyon oranı bütün kalıp setleri için eşit ve 2,39'dur.

Tez çalışması sırasında gerçekleştirilen ileri ekstrüzyon ve radyal ekstrüzyon deneyleri için gerekli kalıp malzemeleri, bu kalıpların işlenmesi için gerekli işçilik maliyetleri, deneylerde kullanılan alüminyum malzemeler, mevcut presin modernize edilerek PLC kontrollü hale getirilmesi için gerekli olan ekipmanlar ve hizmet alımları tez ile beraber yürütülen ve maddi olarak Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Fonu tarafından desteklenen “ *Düz Dişlilerin İmalat Yöntemi Optimizasyonu ve Analizler* ” isimli TÜBAP 2008-126 numaralı proje ve bütçesi hazırlanarak Tüba bürosuna sunulmuştur ve Doktora Projesi olarak kabul edilmiştir.

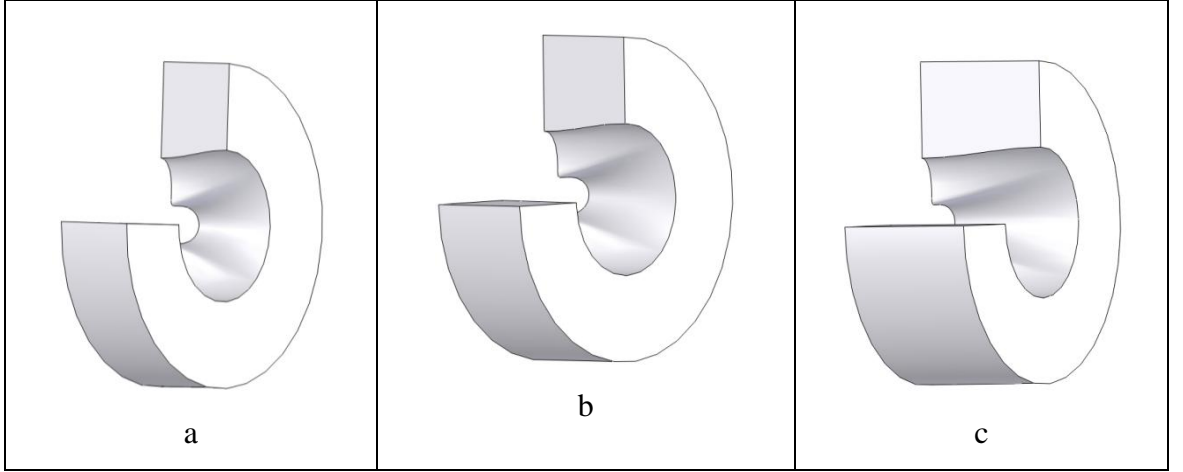
4.2. DENEYLERDE KULLANILAN İLERİ EKSTRÜZYON VE RADYAL EKSTRÜZYON KALIPLARI



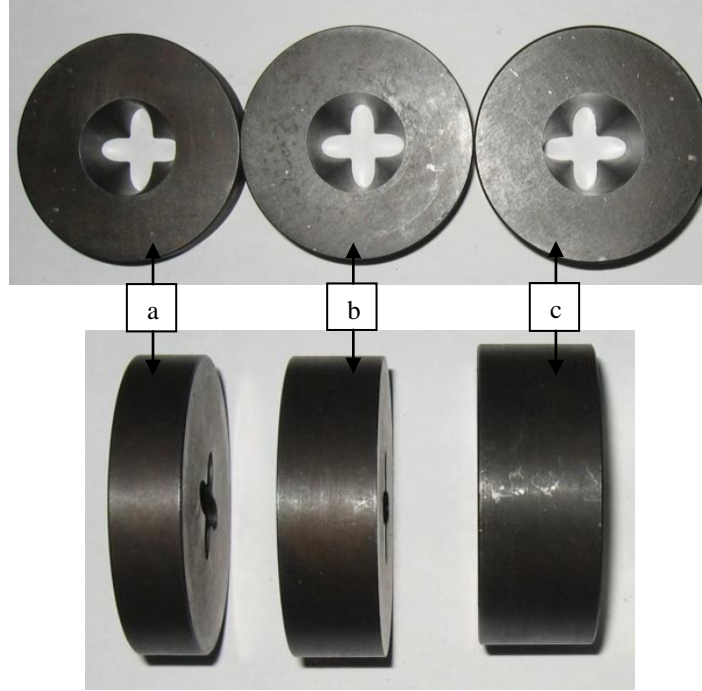
Şekil 4.2. Deneyleerde kullanılan 4 dişli ürün çıkış profili



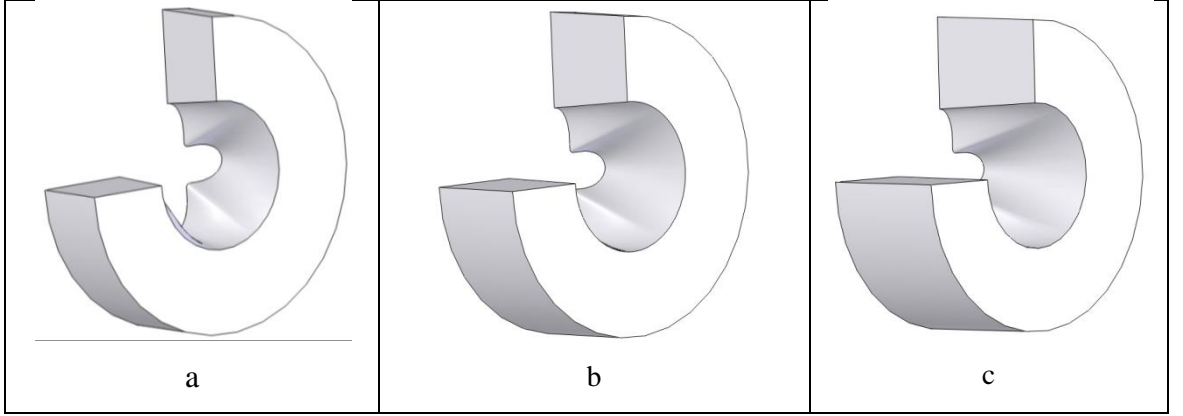
Şekil 4.3. 4 dişli parçalar için Cosinus Profil Kalıpları a) L=15, b) L=20, c) L=25



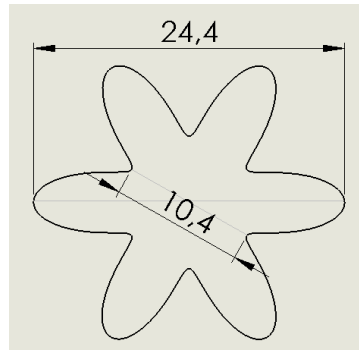
Şekil 4.4. 4 dişli parçalar için Cosinus Profil Kalıp Geometrileri a) $L=15$, b) $L=20$, c) $L=25$



Şekil 4.5. 4 dişli parçalar için Taper Profil Kalıpları a) $L=15$, b) $L=20$, c) $L=25$



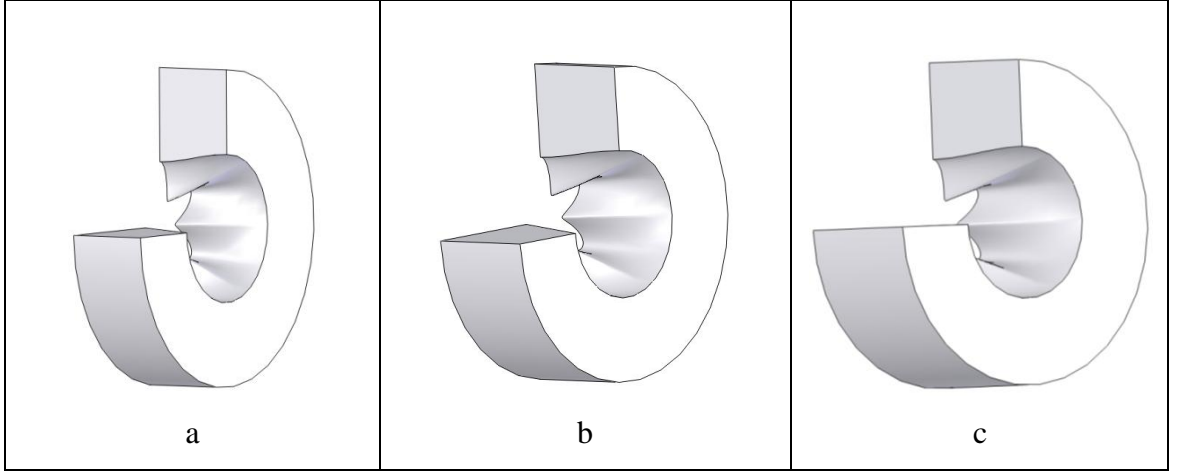
Şekil 4.6. 4 dişli parçalar için Taper Profil Kalıp Geometrileri a) L=15, b) L=20, c) L=25



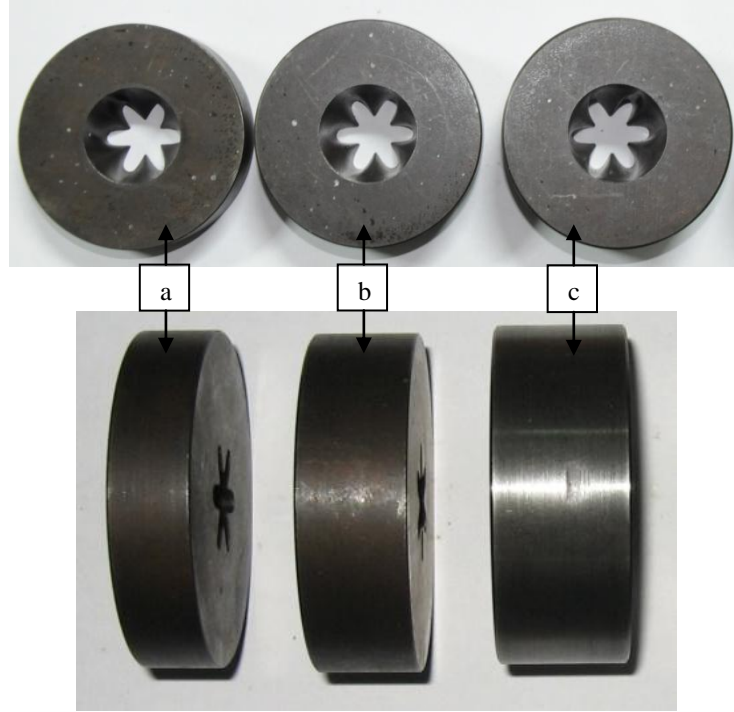
Şekil 4.7. Deneylede kullanılan 6 dişli ürün çıkış profili



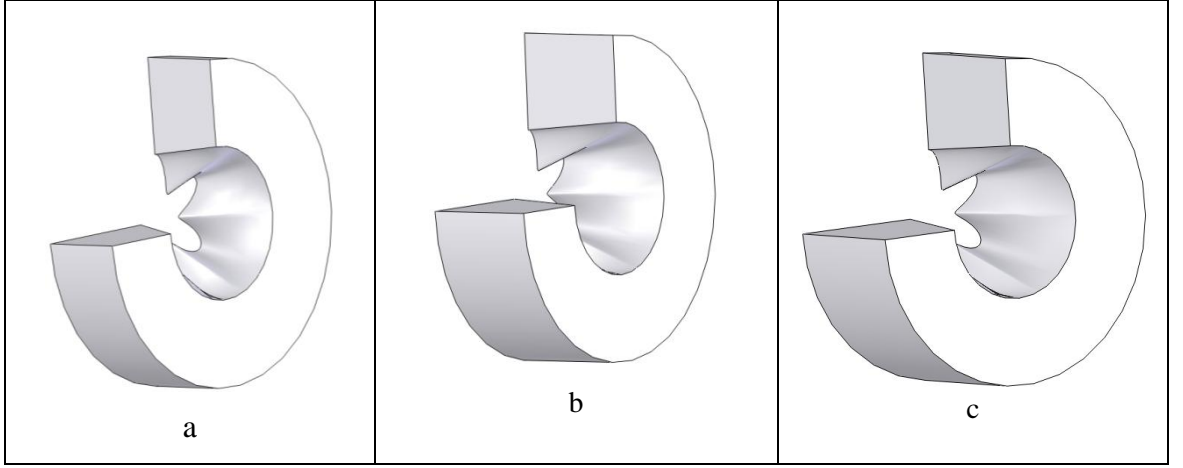
Şekil 4.8. 6 dişli parçalar için Cosinus Profil Kalıpları a) L=15, b) L=20, c) L=25



Şekil 4.9. 6 dişli parçalar için Cosinus Profil Kalıp Geometrileri a) $L=15$, b) $L=20$, c) $L=25$



Şekil 4.10. 6 dişli parçalar için Taper Profil Kalıpları a) $L=15$, b) $L=20$, c) $L=25$



Şekil 4.11. 6 dişli parçalar için Taper Profil Kalıp Geometrileri a-) L=15, b-) L=20, c-) L=25



Şekil 4.12. 4 ve 6 dişli Radyal Ekstrüzyon Kalıpları a-) 4 dişli, b-) 6 dişli



Şekil 4.13. İleri Ekstrüzyon Kalıp Seti



Şekil 4.14. Radyal Ekstrüzyon Kalıp Seti

Tez çalışması sırasında gerçekleştirilen ekstrüzyon ve radyal ekstrüzyon deneyleri için gerekli kalıp malzemeleri, bu kalıpların işlenmesi için gerekli işçilik maliyetleri, deneylerde kullanılan alüminyum malzemeler, mevcut presin PLC kontrollü hale getirilmesi için gerekli olan ekipmanlar ve hizmet alımları tez kapsamında yürütülen ve maddi olarak Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Fonu tarafından desteklenen “Düz Dişlilerin İmalat Yöntemi Optimizasyonu ve Analizler ” isimli TÜBAP 2008-126 numaralı projeden karşılanmıştır.

4.3. DENEYLER KULLANILAN HİDROLİK PRES DÜZENEGİ

Deneylerde T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği atelyesinde mevcut bulunan 150 tonf kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Hidrolik pres PLC otomasyonu uygulanmak suretiyle otomatik olarak kontrol edilebilmekte ve kuvvet değerlerine karşılık gelen strok değerleri kaydedilebilmektedir. Oluşturulan PLC sistem ile hidrolik presin valfi üzerine yerleştirilen basınç transmitterından alınan basınç sinyali, PLC sistem tarafından **2bar = 1kgf** olacak şekilde dönüştürülerek kuvvet değerleri elde edilmektedir. Sistem, kullanılan kalıpların ve presinin güvenliği açısından belirli limitler dahilinde çalışabilmesi amacıyla bir emniyet sistemine sahiptir. Bu emniyet sistemi presin üst sınırı olan 150 metrik tonf kuvveti istenildiğinde daha düşük kuvvetlere sınırlandırabilmektedir. Doktora çalışması sırasında presin kuvvet değeri 125 metrik tonf olarak sınırlandırılmıştır. Presin hareketi ve konumu Şekil 4.18 deki temassız lineer cetvel üzerinden gelen bilgilere göre belirlenmektedir. PLC sistem, temassız lineer cetvelden aldığı konum bilgilerine karşılık gelen basınç valfinden gelen sinyaller ile okunan kuvvet değerlerini birleştirerek Kuvvet-Strok değerlerini hesaplamaktadır.



Şekil 4.15. Deneyleerde kullanılan hidrolik pres



Şekil 4.16. Hidrolik pompaya bağlı basınç transmitteri ve basınç valfi



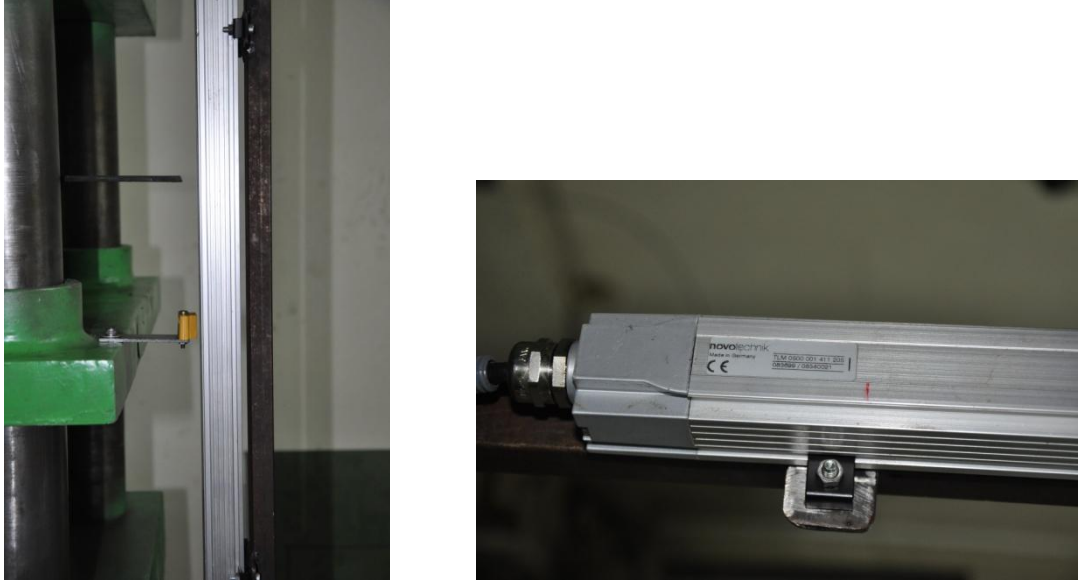
Şekil 4.17. Basınç transmitteri

Şekil 4.17.'de görüldüğü şekilde basınç valfine bağlantılı olan Turck marka basınç transmitterinden alınan sinyaller yardımıyla kuvvet ölçümü yapılması sağlanmıştır.



Şekil 4.18. Hareket sınırlayıcılar

Presin tablasının hareketi Şekil 4.18.'de görülen limit sviçler kullanılarak alt ve üst noktalarda sınırlandırılmıştır.



Şekil 4.19. Temassız Lineer Cetvel

Pres tablasının ve dolayısıyla prese bağlı kalıpların hareketi ve konumlandırılması, Şekil 4.19.'de görülen temassız lineer cetvel yardımıyla sağlanmaktadır. Temassız lineer cetvel olarak Novotechnik marka ürün seçilmiştir.



Şekil 4.20. Dokunmatik LCD Komut ekranı



Şekil 4.21. Kontrol Panosu iç görünüm

PLC sistemin beyni olarak adlandırılabilir olan kontrol panosu ön kapağında dokunmatik lcd ekran ve panonun iç tarafında elektriksel bağlantılarının bulunduğu pano görülmektedir. (Şekil 4.20-21.) Basınç transmitteri ve temassız lineer cetvelden aldığı bilgileri derleyerek kuvvet-strok değerlerini her bir deney için kaydetmektedir. Ayrıca PLC kontrol ekran sayfalarında kullanıcı tarafından istenen girdilere göre presin çalışmasını sağlar. Bu amaçla basınç valfine elektrikli sinyaller göndererek tablanın lineer hareketini sağlayarak ve istenen strok değerinde durmasını sağlar. Elde edilen kuvvet-strok değerleri içeren dosyalar taşınabilir bellek yardımıyla başka bilgisayarlara ve dijital ortamlara aktarılabilir.



Şekil 4.22. Kontrol Ekranı Giriş Sayfası

Sistemin çalıştırılması ve presin aşağı ve yukarı hareketi ile sistemin emniyetini sağlayacak olan maksimum çalışma kuvveti sınırlandırmasının yapıldığı PLC kontrol sayfası Şekil 4.22.'de görülmektedir



Şekil 4.23. Kontrol Ekranı Deney Kontrol Sayfası

Şekil 4.23.'deki deney kontrol sayfasında, deneyin uygulanacağı strok değeri ile deney sırasında alınacak verilerin "ÖLÇÜM SIKLIĞI" komutuyla belirlendiği sayfadır.

Burada sistemin genel emniyet değerinin yanında her bir deney için ayrı olarak belirli bir sınır değer “**TEST KORUMA BASINCI**” belirlenerek sistem koruma altına alınabilmektedir. Yapılan ön ayarlardan sonra deneye başlangıç için “**TESTE BAŞLA**” komutuyla deney başlatılmaktadır.

DOSYA NO	2050	5500	5900	0	0
	3000	5650	5900	0	0
0	4800	6000	5500	0	0
	6000	5300	5900	0	0
	6300	5950	0	0	0
	6200	5900	0	0	0
	5500	5950	0	0	0
	5800	5800	0	0	0
	5900	5650	0	0	0
	6000	5300	0	0	0

1-10 11-20 21-30 31-40 41-50

sonuçlar kgf cinsindedir

Şekil 4.24. Kontrol Ekranı Sonuçlar Sayfası

Şekil 4.24. de görüldüğü gibi deney sonrası elde edilen değerler deney öncesinde belirtilen ölçüm sıklığına uygun olarak sıralanarak ekranda görünmesi sağlanmaktadır.

BÖLÜM 5.

KUVVET ve ENERJİ YAKLAŞIMLARI

5.1. GENEL YÖNTEMLER

Metallerin plastik biçimlendirme işlemlerinin karakteristiği oldukça karmaşıktır. Bu yüzden malzeme akışı ile ilgili kesin sonuçlara ulaşmak oldukça güçtür. Bu zorluğu aşmanın yolu; varsayılan gerilme ve genleme alanlarının tüm deformasyon hacminde geçerli olmasıdır. Herhangi bir metal biçimlendirme işleminde elde edilmesi istenen ürün veya yarı ürünün şekillendirilmesi, hammadde malzemesi, işlem sıcaklığı, kalıp/malzeme ara yüzeyindeki sürtünme durumu gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Diğer yandan proses için şekillendirmenin gerçekleştirilmesi için gereken kuvvet ve enerji miktarının bilinmesi şekillendirme için kullanılacak olan pres kapasitesi, kalıp ve iş parçası malzemesinin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Ancak hacim şekillendirme proseslerindeki malzeme akışının kendine has kaotik durumu nedeniyle tahmin edilip, matematiksel olarak tam olarak formüle edilmesinin mümkün olmaması nedeniyle kuvvet ve malzeme akışı problemleri gerçek anlamda çözüme ulaştırılamamıştır. Bununla beraber geçmişten günümüze kadar pek çok araştırmacı konu ile ilgilenmiş ve çeşitli yaklaşımlar öne sürmüşlerdir. Bu yaklaşımlar gerçek prosese göre nispeten kaba veya oldukça hassas sonuçlar vermektedir. Bazen gerçeğe en yakın sonuç için uzun bir zaman ve iyi bir derecede bilgiye ihtiyaç duyulduğundan ötürü bazen daha az yaklaşık sonuçları veren analizde tercih edilir olmaktadır.

Bunlara ek olarak günümüzde metal biçimlendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan analitik ve nümerik metotlar Dilim Yöntemi, Kayma Çizgileri Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sınır Analizleri Yöntemi olarak sınıflandırılabilir.

Dilim yönteminde uniform malzeme deformasyonu gözönüne alınmaktadır. Deforme olduğu farzedilen düz ve sonsuz incelikteki, malzeme akış yönüne dik duran bir dilimde radyal yöndeki kuvvet dengesi yazılır ve elde edilen diferansiyel denklemin integrasyonu ile sonuca ulaşılır. Yöntem malzeme şekil değiştirmesinin tamamen plastik olduğu ve iş parçasının geometrisinin büyük ölçüde önceden tahmin edildiği basit şekilli parçalarda gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Levha çekme, levha haddeme, kapalı kalıp dövme bunlara örnek uygulama alanlarıdır. Genel olarak bakıldığında ise doğruluk derecesi yüksek olmamakla birlikte sonuca hızlı ulaşmak adına tercih edilen bir yaklaşımdır.

Kayma çizgileri metodu metal şekillendirme proseslerinde gerilme ve genleme dağılımı vermekle birlikte yöntem yalnızca düzlem genleme problemlerinin çözümüne uygundur. Bu yöntemde plastik akış, kayma çizgileri olarak adlandırılan çizgilerle ifade edilen düzlemler boyunca gerçekleşen kayma deformasyonları ile tanımlanır. (Çan, Y., 1998) Bu yöntemi kullanırken bazı kabuller yapmak gereklidir. Malzeme izotropik, homojen ve rijit-plastik olarak kabul edilir. Düzlemsel birim uzama hali geçerlidir. Ayrıca sıcaklık, birim şekil değiştirme hızı ve zaman etkileri ihmal edilmektedir. Bazı sınırlarda sabit kesme gerilmesi mevcut olduğu için genellikle sürtünmesiz durum ya da yapışan sürtünme kabul edilmiştir.

Sonlu farklar yönteminde düğüm noktaları adı verilen yapının üzerindeki seçilmiş noktalarda, diferansiyel denklemin sayısal çözümü, yer değiştirme ya da gerilme sonuçları cinsinden elde edilir. Her bir düğüm noktasında şekil değiştirmeyi veya gerilmeyi içeren diferansiyel denklem, şekil değiştirmeyi dış uygulanan yüke, belirlenen düğüm noktasında ve çevresindeki düğüm noktalarında ilişkilendirecek şekilde bir fark formunda uygulanır. Bu yolla şekil değiştirme veya gerilme için yeterli sayıda eşzamanlı denklem elde edilir (Ghali, A.,1986) Sınırın üzerindeki ya da yakınındaki düğüm noktalarına uygulanmış denklemlerin sonlu farklar katsayıların iç noktalardaki katsayılarla karşılaştırılarak problemdeki sınır durumlarının sağlanması için düzeltilmeleri gerekir. Bu durum sonlu farklar metodunun sonlu elemanlar metoduna karşı ortaya çıkan en önemli zorluğu ve dezavantajıdır. Bu yöntem, sonlu elemanlar yönteminin gelişmesine ve yaygın kullanımına kadar geçen sürede birçok

metal şekillendirme probleminde Takezona, S. , Tao, K., (1982) ve Şenalp, A.Z., (1998) tarafından sıkça kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi de nümerik bir yöntemdir ve günümüz mühendislik uygulamalarında bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle ortaya çıkan güçlü işlemcilerin ve problemleri çözümünde kolaylık sağlayan paket programlar sayesinde elde edilen çözümlerin gerçeğe yakın olması nedeniyle giderek artan oranda kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde matematiksel olarak çözülmesi zor olan büyük ve karışık problemler diferansiyel ya da integral denklem yaklaşımından cebirsel probleme çevrilmektedir. Bu yöntem iki ya da üç boyutlu süreklilik gösteren problemlere uygulanır. Bugün dünya piyasasında bazı ticari sonlu elemanlar yöntemi kullanan programlar bulmak mümkündür. Bunlardan bazıları Ansys, Abaqus, Aska, Marc, Nastran olarak listelenebilir.

Sınır analizi yöntemi toplam enerji ve yük ihtiyacının hesabında kullanılan analitik bir yöntemdir. Yöntem alt sınır ve üst sınır olmak üzere iki kategoride ele alınabilir. Alt sınır yöntemi plastik deformasyon için gerekli enerjiye eşit veya daha az sonuçlar verir. Yöntemin temeli, statik genleme alanı kabulüne dayanmaktadır. Üst sınır teoremi ise temel olarak kinematik hız alanı kabulüne dayanır ve plastik deformasyon için gerekli enerjiye eşit veya bundan daha büyük değerler verir. Üst sınır metodu kalıptan çekme (Johnson, W., 1958), kapalı kalıp dövme (Liu, J.Y., 1971), dövme (Nagpal ve arkadaşları, 1978), levha haddeleme alanlarına uygulanabilir. Bu yöntem kullanılarak kuvvetlerin kısa sürede elde edilmesine karşın elastik şekil değiştirmenin ya da akış dağılımı detaylarının elde edilmesi mümkün olmamaktadır.

Bunların yanında bazı araştırmacılar yukarıda yazılı karmaşık analiz yöntemlerinden farklı olarak deneysel yollardan elde edilmiş ve ekstrüzyon kuvvetini tahmin etmek amacıyla farklı ampirik formüller türeterek, ileri ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirme için gereken kuvveti hesaplama yoluna gitmişlerdir. Bu ifadeler tam bir kesinlikle hesaplama yapmak için yeterli değilse bile şekillendirme kuvveti hakkında fikir vermesi açısından kullanılabilir.

Tablo 5.1. İleri Ekstrüzyon İçin Ampirik Olarak Türetilen Formüller

İleri Ekstrüzyon İçin Ampirik Olarak Türetilen Formüller		
Kaynak	Formül	Notlar
Siebel, 1950 Feldman, 1961	$P = A_0\sigma_0 \ln R + \frac{2}{3}\alpha A_0\sigma_0 + \frac{A_0\sigma_0 \ln R\mu}{\cos \alpha \sin \alpha} + \pi DL\sigma_0$	P, deformasyon kayma ve sürtünmeden meydana gelen kuvveti içerir.
P.E.R.A., 1973	$P = A_0\sigma_0(3.45 \ln R + 1.15)$ $P = A_0\sigma_0(\ln R + 0.6)\left(1.25 + 2\mu\sqrt{\frac{\pi L}{A_0}}\right)$	%0.1-0.3 arası karbon içeren çelikler için
Pugh et. al. 1966	$P = 8.2A_0\sigma_u^{0.78}(\ln R)^{0.73} = 2.7A_0H^{0.78}(\ln R)^{0.73}$	H=çeliğin ekstrüzyondan önceki sertlik değeri(kg/mm ²), σ_u (ton/in ²), P(ton)
James ve Kottcamp, 1965	$P = 0.5A_0(\sigma_0 + \sigma_u F_n)\varepsilon_a \exp \frac{4\pi L}{D}$ $F_n = \left(\frac{e\varepsilon_a}{n}\right)^n$ $\varepsilon_a = 1.24 \ln R + 0.53$	Ortalama genleme değerine göre hesaplanır.

5.2. ÜST SINIR METODUNUN FORMÜLASYONU

Üst sınır yöntemi uygulanırken bazı kabuller yapılması gerekmektedir.

- Malzeme izotropik ve sıkıştırılmazdır.
- 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.

5.2.1. İdeal Deformasyon Enerjisi

Von Misses malzemesi için iş oranı şöyle yazılabilir,

$$\dot{w} = \sigma_{11}\dot{\epsilon}_{11} + \sigma_{22}\dot{\epsilon}_{22} + \sigma_{33}\dot{\epsilon}_{33} + 2(\sigma_{12}\dot{\epsilon}_{12} + \sigma_{23}\dot{\epsilon}_{23} + \sigma_{31}\dot{\epsilon}_{31}) \quad (5.1)$$

Bu tensör notasyonunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{w} = \sigma_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} \quad (5.2)$$

Gerilme tensörü keza gerilme deviatörü ve hidrostatik gerilme şeklinde yazılabilir.

$$\dot{w} = (S_{ij} + S \delta_{ij}) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5.3)$$

S_{ij} gerilme deviatör tensörü

$\dot{\epsilon}_{ij}$ genleme hızı tensörü

δ_{ij} birim tensör. Böylece (3.3) denklemi aşağıdaki şekilde genişletilebilir.

$$\dot{w} = (S_{11} + S)\dot{\epsilon}_{11} + (S_{22} + S)\dot{\epsilon}_{22} + (S_{33} + S)\dot{\epsilon}_{33} + 2(S_{12}\dot{\epsilon}_{12} + S_{23}\dot{\epsilon}_{23} + S_{31}\dot{\epsilon}_{31}) \quad (5.4)$$

$$\dot{w} = S_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} + S \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5.5)$$

Plastik deformasyonda hacim sabitliği denklem (5.6) daki gibi tanımlanabilir.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{11} + \dot{\epsilon}_{22} + \dot{\epsilon}_{33} = 0 \quad (5.6)$$

Böylece (5.4) eşitliği aşağıdaki hali alır.

$$\dot{w} = (S_{11})\dot{\epsilon}_{11} + (S_{22})\dot{\epsilon}_{22} + (S_{33})\dot{\epsilon}_{33} + 2(S_{12}\dot{\epsilon}_{12} + S_{23}\dot{\epsilon}_{23} + S_{31}\dot{\epsilon}_{31}) \quad (5.7)$$

Son eşitlik tensör notasyonuna göre,

$$\dot{w} = S_{ij}\dot{\epsilon}_{ij} \quad (5.8)$$

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

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = k^2 \quad (5.9)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{kl} \dot{\epsilon}_{kl}}}{k} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5.10)$$

böylece;

$$\dot{\omega} = \frac{1}{k} S_{ij} S_{ij} \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (5.11)$$

denklem (5.9) daki von Mises akma koşulu yerine konduğunda,

$$\dot{\omega} = 2k \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (5.12)$$

$$k = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad (5.13)$$

$$\dot{\omega} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (5.14)$$

σ_o malzemenin akma gerilmesidir.

Temas alanı altında metalde iç enerji ihtiyacı (5.14) eşitliğinin deformasyon hacmi üzerinden integrasyonu ile elde edilir.

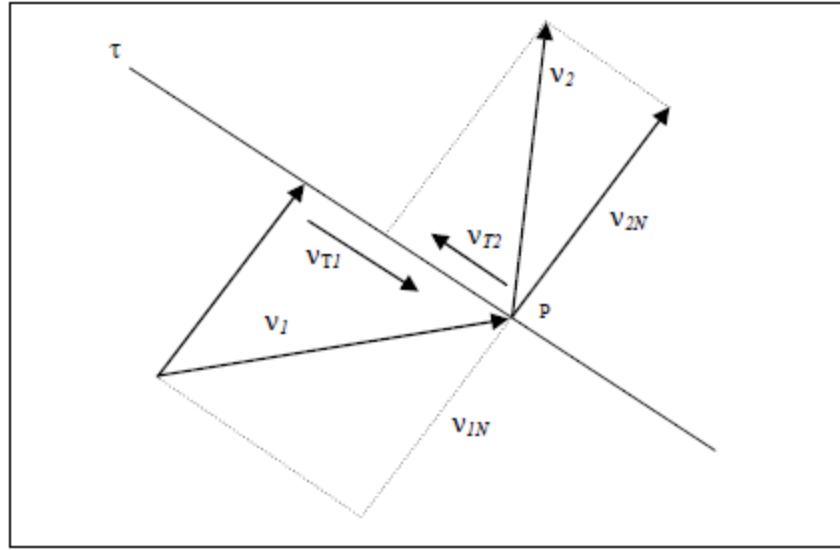
$$\dot{W}_i = \int_V \dot{\omega} dV \quad (5.15)$$

V deformasyon bölgesinin hacmidir.

$$\dot{W}_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV \quad (5.16)$$

5.2.2. Kayma Enerjisi

Tüm deformasyon bölgesi için hız alanı için tek bir matematiksel ifade kullanmak ya mümkün değil yada 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. Bunun yanında yapılan çalışmada hız süreksizliği giriş ve çıkış kesitlerinde farklılık olmamasından dolayı kayma enerjisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.1. Hız Süreksizlikleri

Teğetsel bileşenler arasındaki fark hız süreksizliği diye adlandırılır.

$$|\Delta V| = v_{t1} - v_{t2} \quad (5.17)$$

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

$$\tau = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad (5.18)$$

kayma sınırları üzerindeki maksimum enerji ihtiyacı,

$$\dot{W}_s = \int_{\Gamma} \tau |\Delta v| dS \quad (5.19)$$

5.2.3. Sürtünme Kayıpları

Her zaman takımlar ve nesnelere arasındaki temas, bağlı bir hareket vardır. Bu hareket için sürtünme diye adlandırılan bir mukavemet vardır. Sürtünmenin mekanizması karışıktır. Sürtünme mukavemeti τ ile gösterilir. Sürtünmenin matematiksel ifadesi çok fazla olmasına rağmen iki tanım diğerlerine kıyasla çok fazla kullanılmaktadır. Coulomb katsayısı ve kayma katsayısı sabit plastisitede en çok kullanılanlardır. Coulomb Sürtünme Yasası kabul edildiğinde;

$$\tau = \mu p \quad (5.20)$$

Fakat, bilim adamları aşağıdaki denkleme tercih etmektedirler.

$$\tau = m \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \quad (5.21)$$

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

$$\dot{W}_f = \frac{m}{\sqrt{3}} \int_S \sigma_o \Delta V ds \quad (5.22)$$

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 yardımcı eder. Bundan dolayı kuvvet şu şekilde verilir.

$$\dot{W}_t = \int_{S_i} T_i V_i ds \quad (5.23)$$

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.

$$J^* = \dot{W}_d + \dot{W}_s + \dot{W}_f - \dot{W}_t \quad (5.24)$$

(5.16), (5.19), (5.22) denklemleri (5.23) denklemleri içerisinde yerine konduğunda,

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \int_V \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dv + \int_{\Gamma} \tau |\Delta v| ds + \frac{m}{\sqrt{3}} \int_S \sigma_o \Delta V ds - \int_{S_i} T_i V_i ds \quad (5.25)$$

dışarıdan verilen toplam enerji,

$$E_t = F \cdot v \quad (5.26)$$

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

Böylelikle toplam güç hesaplanabilir ve minimum enerji gereksinimi toplam enerji minimize edilerek bulunabilir. Denklem (5.25) de tüm güç terimleri bütün metal şekillendirme işlemleri için mevcut olmayabilir veya etkisi ihmal edilecek kadar zayıf olabilir. Bu da araştırmacılara kolaylık sağlar.

5.3. 4 VE 6 DİŞLİ PARÇALAR İÇİN ÜST SINIR ANALİZİ ÇÖZÜMLERİ

5.3.1. İleri Ekstrüzyon Üst Sınır Analizi Çözümleri

Bir önceki bölümde anlatılan şekilde tasarımı yapılan giriş ve çıkış geometrileri için tanımlanan geometrilerden 4 dişe sahip matris için cosinüs ve taper matris geçişleri için tanımlar aşağıdaki gibidir;

$$R_{\text{çıkış}}(\theta, z) = A + B\cos(4\theta) \quad (5.27)$$

$$R_{\text{giriş}}(\theta, z) = C + D\cos(4\theta) \quad (5.28)$$

Giriş profili bütün kalıp formasyonlarında aynı şekilde dairesel olarak seçilmiş olup yarıçapı 14 mm.dir. Çıkış profili de 4 dişe sahip çıkış için denklem (5.30) da tanımlanmıştır;

$$R_{\text{giriş}}(\theta, z) = 14 \quad (5.29)$$

$$R_{\text{çıkış}}(\theta, z) = 8.7 + 3.5\cos(4\theta) \quad (5.30)$$

6 dişe sahip çıkış için ise giriş çapı aynı olmak üzere çıkış profili,

$$R_{\text{çıkış}}(\theta, z) = 8.7 + 3.5\cos(6\theta) \quad (5.31)$$

olarak tanımlanmıştır.

Oluşturulan profillerin genel ifadeler oluşturması amacıyla giriş ve çıkış profilleri denklem (5.29 – 5.31.) deki gibi oluşturulmuşlardır. Bu yöntemle giriş dairesel çıkışı 4 veya 6 dişe sahip farklı giriş ve çıkış profilleri tanımlanırken sadece sembolik parametrelerin yerine yazılması ve denklemin çözülmesi yeterli olacaktır. Elde edilen enerji ve kuvvet ifadeleri de bu şekilde farklı boyutlarda 4 veya 6 dişe sahip dişli profilleri için basit bir şekilde elde edilmiş olacaktır.

$$R_{giriş}(\theta, z) = C \quad (5.32)$$

$$R_{çıkış}(\theta, z) = A + B\cos(4\theta) \quad (5.33)$$

6 dişe sahip çıkış için ise giriş çapı aynı olmak üzere çıkış profili,

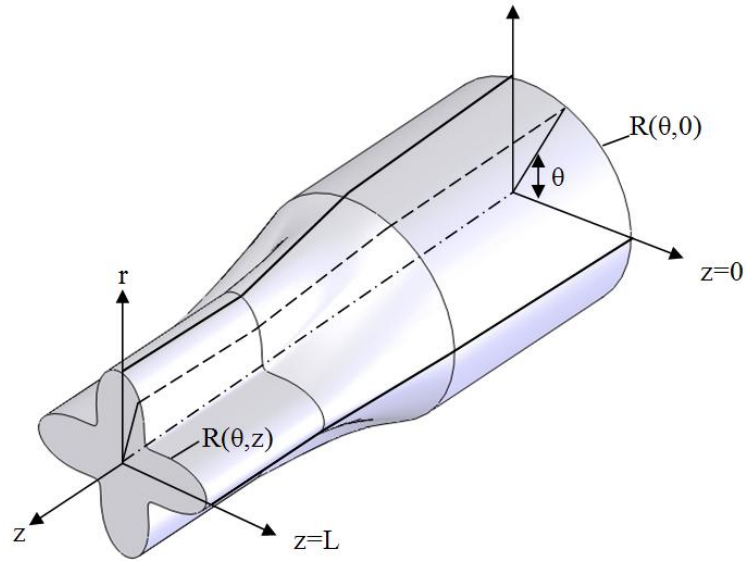
$$R_{çıkış}(\theta, z) = A + B\cos(6\theta) \quad (5.34)$$

şeklindedir.

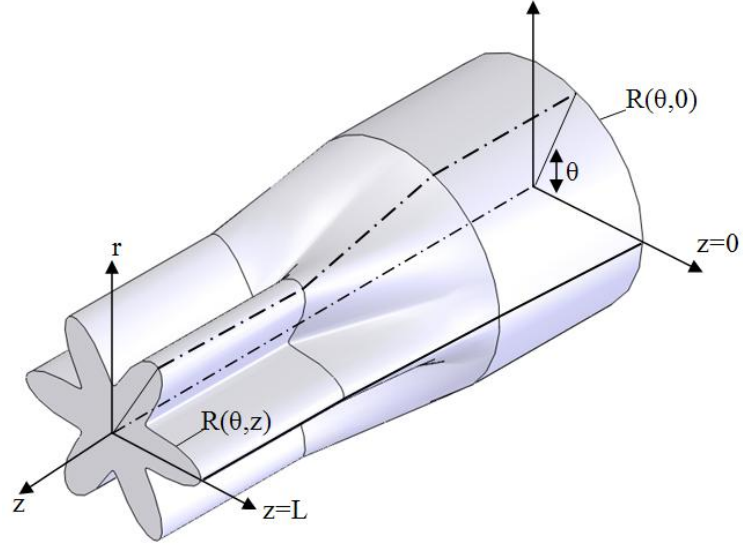
Giriş ve çıkış profiline bağlı olarak ifade edilen matris formunu oluşturan geçiş fonksiyonu ise cosinus ve taper geçişler için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$R_{cos}(\theta, z) = \frac{(R_{giriş} + R_{çıkış})}{2} + \frac{(R_{giriş} - R_{çıkış})}{2} \cos\left(\frac{\theta z}{L}\right) \quad (5.35)$$

$$R_{taper}(\theta, z) = R_{çıkış} + (R_{giriş} - R_{çıkış}) \frac{(L-z)}{L} \quad (5.36)$$



Şekil 5.2. 4 Dişli Ürün için Koordinat Sistemi



Şekil 5.3. 6 Dişli Ürün için Koordinat Sistemi

Üst sınır analizinin çözümü malzeme ve çözümlerle ilgili bazı kabullerin yapılmasını gerektirmektedir. Bu kabullerin yapılmasıyla birlikte sıkıştırılmazlık ve süreklilik şartını sağlayan bir hız alanı elde edilmelidir. Sonrasında bu hız alanına dayanarak çözüme ulaşılmaya çalışılır.

5.3.1.1. 4 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Hız Alanları

4 dişe sahip Cosinus geçişe sahip matris içerisindeki malzemenin akışının üst sınır analizi çözümüne esas teşkil eden hız alanları aşağıda verilmektedir.

$$V_z = \frac{R_{giriş} V_0}{R_{cos}(\theta, z)} \quad (5.37)$$

$$V_z = \frac{CV_0}{2 \left[C + A + B \cos(4\theta) + (C - A - B \cos(4\theta)) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right]} \quad (5.38)$$

$$V_r = \frac{V_z \left(R_{cos}(\theta, z) \frac{\partial R_{cos}(\theta, z)}{\partial z} \right) r}{(R_{cos}(\theta, z))^2} \quad (5.39)$$

$$V_r = \frac{-CV_0(C - A - B \cos(4\theta)) \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \pi}{\frac{L}{2} \left[C + A + B \cos(4\theta) + (C - A - B \cos(4\theta)) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right]^2} \quad (5.40)$$

$$V_\theta = r\Omega(\theta, z) \quad (5.41)$$

$$V_\theta = \frac{\left[-39.47r^2 CV_0 \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \left(\left[\left(-C - A - B + (A - B - C) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \left(-C - A - B + (A + B - C) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \left(B - A - C + (A - B - C) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right)}{\left[\frac{L \left((B - A - C) + (A - B - C) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \left(-(A + B + C) + (A + B - C) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right)}{\left[(A^2 - B^2 + C^2 + 2AC) + 2(B^2 + C^2 - A^2) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) + (A^2 - B^2 + C^2 - 2AC) \cos^2\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right]^{\frac{1}{2}}} \right]}^* \quad (5.42)$$

$$\left[\begin{array}{l} A^2 \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) - 1 - 2AC \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) + \\ B^2 \left(1 - \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) + C^2 \left(1 + \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \end{array} \right]$$

5.3.1.2. 4 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Deformasyon Enerjisi

Şekil değişimini ifade eden genleme denklemleri (5.43) ile (5.49) arasında verilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}_{rr}(r, \theta, z) = \frac{\partial V_r}{\partial r} \quad (5.43)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}(r, \theta, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} \quad (5.44)$$

$$\dot{\varepsilon}_{zz}(r, \theta, z) = \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (5.45)$$

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta}(r, \theta, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} \right) \quad (5.46)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta z}(r, \theta, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) \quad (5.47)$$

$$\dot{\varepsilon}_{rz}(r, \theta, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \quad (5.48)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{2} (\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{zz}) + \varepsilon_{r\theta} + \varepsilon_{rz} + \varepsilon_{\theta z}} \quad (5.49)$$

Efektif genleme ifadesi elde edildikten sonra şekillendirme için gerekli olan deformasyon enerjisine ulaşılabilir.

5.3.1.3. 4 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Kayma Hız Süreksizlikleri

Ekstrüzyon kalıplarında şekillendirme esnasında kayma için harcanacak enerji, malzemenin kalıp içerisinde akış gösterirken meydana gelen hız süreksizliklerinden dolayı harcanan enerji olarak adlandırılır ve hız süreksizliğini ifade eden denklem (5.50)'da olduğu gibi tanımlanmaktadır.

$$\Delta V = \sqrt{V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2} \quad r=R_{\cos}(\theta, z) \quad (5.50)$$

Hız süreksizliği malzeme akışında geometrinin değişmesi sebebiyle meydana gelmektedir ve şekillendirme için harcanacak enerjiye olumsuz etki yapmaktadır ve fazladan enerji ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

5.3.1.4. 4 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Sürtünme Hız Süreksizlikleri

Sürtünmeye harcanan enerji malzemenin akışı sırasında kalıp yüzeylerine temas etmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

$$W_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| \left[1 + \frac{1}{R_{\cos}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2 \right] R_{\cos}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.51)$$

İntegralin içerisindeki ifade, sürtünme dolayısıyla ortaya çıkan süreksizlikten kaynaklanmaktadır.

$$\sqrt{V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2} * \left[1 + \frac{1}{R_{\cos}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} R_{\cos}(\theta, z) \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} R_{\cos}(\theta, z) \right)^2 \right] \quad (5.52)$$

5.3.1.5. 4 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri

Şekillendirme için gereken toplam enerji ifadesi denklem (5.24) de belirtildiği gibi 4 ana bileşenden oluşmaktadır. Ancak genel ifade de yer alan geri çekme enerjisi ileri ekstrüzyonda bulunmadığından dolayı toplam enerji ifadesi; deformasyon, kayma ve sürtünme enerjisi bileşenlerinden oluşmaktadır. (denklem (5.56)). Bileşenlerin çözümleri nümerik analiz yöntemleri ile elde edilmekte ve bulunan toplam enerji ifadesinden şekillendirme için gereken kuvvet ifadesine denklem (5.57) ile ulaşılabilmektedir.

$$W_d = \bar{\sigma}_m \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\cos}(\theta, z)} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.53)$$

$$W_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| \left[1 + \frac{1}{R_{\cos}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2 \right] R_{\cos}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.54)$$

$$W_s = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| R_{\cos}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.55)$$

Toplam enerji ifadesi;

$$W_{toplam} = W_d + W_s + W_f \quad (5.56)$$

Şekillendirme için gereken kuvvet ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$F = \frac{W_{toplam}}{V_0} \quad (5.57)$$

5.3.1.6. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Hız Alanları

4 dişli sahip taper geçişli sahip matris formunda hız alanları aşağıda verilmektedir.

$$V_z = \frac{R_{girif} V_0}{R_{tap}(\theta, z)} \quad (5.58)$$

$$V_z = \frac{CV_0}{\left[A + B \cos(4\theta) + (C - A - B \cos(4\theta)) \left(\frac{L-z}{L} \right) \right]} \quad (5.59)$$

$$V_r = \frac{V_z \left(R_{tap}(\theta, z) \frac{\partial R_{tap}(\theta, z)}{\partial z} \right) r}{(R_{tap}(\theta, z))^2} \quad (5.60)$$

$$V_r = \frac{-CV_0(C - A - B \cos(4\theta))r}{L \left[A + B \cos(4\theta) + (C - A - B \cos(4\theta)) \left(\frac{L-z}{L} \right) \right]^2} \quad (5.61)$$

$$V_\theta = r\Omega(\theta, z) \quad (5.61)$$

$$V_\theta = \left[\frac{\left(-6.278r^2 CV_0 L (CLz)(A-B-C) \left[(CL+z(A+B-C))(CL+z(A-B-C)) \right]^{\frac{1}{2}} \right) \left(C^2(z-L) + ACL + z(A^2 - 2AC - B^2) \right)}{\left[C^2L^2 + 2ACLz - 2C^2Lz - 2Cz^2A + z^2(A^2 - B^2 + C^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (5.62)$$

5.3.1.7. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Kayma Hız Süreksizlikleri

Taper geçiş için kayma işi hız süreksizliğini ifade eden denklem (5.63)'de olduğu gibi tanımlanmaktadır.

$$\Delta V = \sqrt{V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2} \quad r=R_{tap}(\theta, z) \quad (5.63)$$

5.3.1.8. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Sürtünme Hız Süreksizlikleri

Taper geçiş için sürtünme işi denklem (5.64)'de olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$W_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| \left[1 + \frac{1}{R_{tap}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2 \right] R_{tap}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.63)$$

İntegralin içerisindeki ifade sürtünme dolayısıyla ortaya çıkan süreksizlikten kaynaklanmaktadır;

$$\sqrt{V_r^2 + V_\theta^2 + V_z^2} * \left[1 + \frac{1}{R_{tap}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} R_{tap}(\theta, z) \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \theta} R_{tap}(\theta, z) \right)^2 \right] \quad (5.65)$$

Sürtünme işi hesabı için integral çözümü nümerik yöntemler kullanılarak yapılmaktadır.

5.3.1.9. 4 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri

Toplam şekil değiştirme enerjisi ifadesi denklem (5.66-68) arasında verilen ifadelerin toplamı olarak denklem (5.69) deki gibi tanımlanmaktadır.

$$W_d = \bar{\sigma}_m \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{tap}(\theta, z)} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.66)$$

$$W_s = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| R_{tap}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.67)$$

$$W_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| \left[1 + \frac{1}{R_{tap}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2 \right] R_{tap}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.68)$$

Buradan toplam enerji ifadesi;

$$W_{toplam} = W_d + W_s + W_f \quad (5.69)$$

şeklinde elde edilebilir.

Şekillendirme için gereken kuvvet ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$F = \frac{W_{toplam}}{V_0} \quad (5.57)$$

5.3.1.10. 6 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Hız Alanları

6 dişli sahip cosinus geçişli sahip matris formunda hız alanları aşağıda verilmektedir. Hız alanlarının genel tanımları ve cosinus geçişi için ifade edilen özel çözümleri denklem (5.70-75) arasında verilmektedir.

$$V_z = \frac{R_{girif} V_0}{R_{cos}(\theta, z)} \quad (5.70)$$

$$V_z = \frac{2V_0C}{(C + A + B\cos(6\theta) + (C - A - B\cos(6\theta)))\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right)} \quad (5.71)$$

$$V_r = \frac{V_z \left(R_{\cos}(\theta, z) \frac{\partial R_{\cos}(\theta, z)}{\partial z} \right) r}{(R_{\cos}(\theta, z))^2} \quad (5.72)$$

$$V_r = -\frac{2CV_0 \left(C - A - B\cos(6\theta) \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \pi r}{L \left[C + A + B\cos(6\theta) + (C - A - B\cos(6\theta))\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right]^2} \quad (5.73)$$

$$V_\theta = r\Omega(\theta, z) \quad (5.74)$$

$$V_\theta = \frac{\left[\frac{\left(-39.47r^2CV_0 \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \left((B^2 + C^2 - A^2) + (A^2 - 2AC + B^2 + C^2)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right)}{L \left((-C - A + B) + (A - B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \left(-(A + B + C) + (A + B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right)} \right]^*}{\left[\left((A^2 - B^2 + C^2 - 2AC)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right)^2 + (A^2 - B^2 + C^2 + 2AC) + 2\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right)(B^2 - A^2 + 2C^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\left[\left((B - A - C) + (A - B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\left((-A - B - C) + (A + B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\left((B - A - C) + (A - B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\left((B - A - C) + (A - B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\left((-A - B - C) + (A + B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left[\left((B - A - C) + (A - B - C)\cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5.75)$$

5.3.1.11. 6 Diş Cosinus Geçiş İleri Ekstrüzyon Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri

6 diş için olan şekil değiştirme bileşenleri olan deformasyon, sürtünme ve kayma ifadeleri denklem (5.76-78) arasında verilmektedir.

$$W_d = \bar{\sigma}_m \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\cos}(\theta, z)} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.76)$$

$$W_s = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| R_{\cos}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.77)$$

$$W_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| \left[1 + \frac{1}{R_{\cos}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2 \right] R_{\cos}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.78)$$

Toplam enerji ifadesi, bileşenlerin çözümünün toplamından elde edilmektedir.

$$W_{toplam} = W_d + W_s + W_f \quad (5.79)$$

Şekillendirme için gereken kuvvet ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$F = \frac{W_{toplam}}{V_0} \quad (5.57)$$

5.3.1.12. 6 Diş Taper Geçiş İleri Ekstrüzyon Hız Alanları

6 dişli sahip taper geçişe sahip matris formunda hız alanları genel denklemleri ve 6 dişli ürünlerin taper geçişleri için özel ifadeleri aşağıda verilmektedir.

$$V_z = \frac{R_{giriş} V_0}{R_{tap}(\theta, z)} \quad (5.80)$$

$$V_z = \frac{CV_0}{(A + B \cos(6\theta) + (C - A - B \cos(6\theta))) \left(\frac{L-z}{L} \right)} \quad (5.81)$$

$$V_r = \frac{V_z \left(R_{tap}(\theta, z) \frac{\partial R_{tap}(\theta, z)}{\partial z} \right) r}{(R_{tap}(\theta, z))^2} \quad (5.82)$$

$$V_r = -\frac{CV_0(C-A-B\cos(6\theta))r}{L\left[A+B\cos(6\theta)+(C-A-B\cos(6\theta))\left(\frac{L-z}{L}\right)\right]} \quad (5.83)$$

$$V_\theta = r\Omega(\theta, z) \quad (5.84)$$

$$V_\theta = \left[\frac{\left(-2\pi V_0 r^2 L (CL+(A-B-C)z) \left[(CL+(A+B-C)z)(CL+(A-B-C)z) \right]^{\frac{1}{2}} \right) \left[(CL(A-C)+z(A^2-B^2-C^2-2CA)) \right]}{\left((CL+(A-B-C)z)(CL+(A+B-C)z) \left[C^2L^2+2CLz(A-C)+z^2(A^2-B^2+C^2-2AC) \right]^{\frac{1}{2}} \right)} \right] \quad (5.85)$$

5.3.1.13. 6 Diş Taper Geçiş Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi Bileşenleri

6 dişli ürünün taper geçişe sahip kalıplardan ileri ekstrüzyon ile elde edilmesinde ortaya çıkan bileşenler denklem (5.86-88) arasında verilmektedir.

$$W_d = \bar{\sigma}_m \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.86)$$

$$W_s = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| R_{tap}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.87)$$

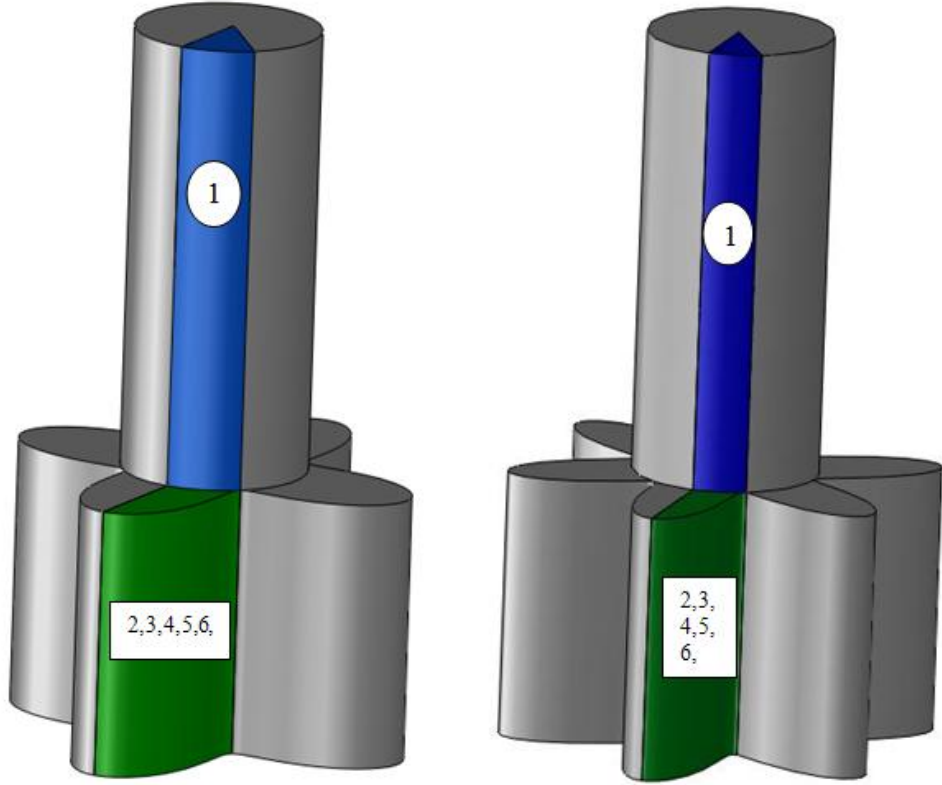
$$W_f = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^L \int_0^{2\pi} |\Delta V| \left[1 + \frac{1}{R_{tap}(\theta, z)^2} \left(\frac{\partial R}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial z} \right)^2 \right] R_{cos}(\theta, z) d\theta dz \quad (5.88)$$

Toplam şekil değiştirme enerjisi;

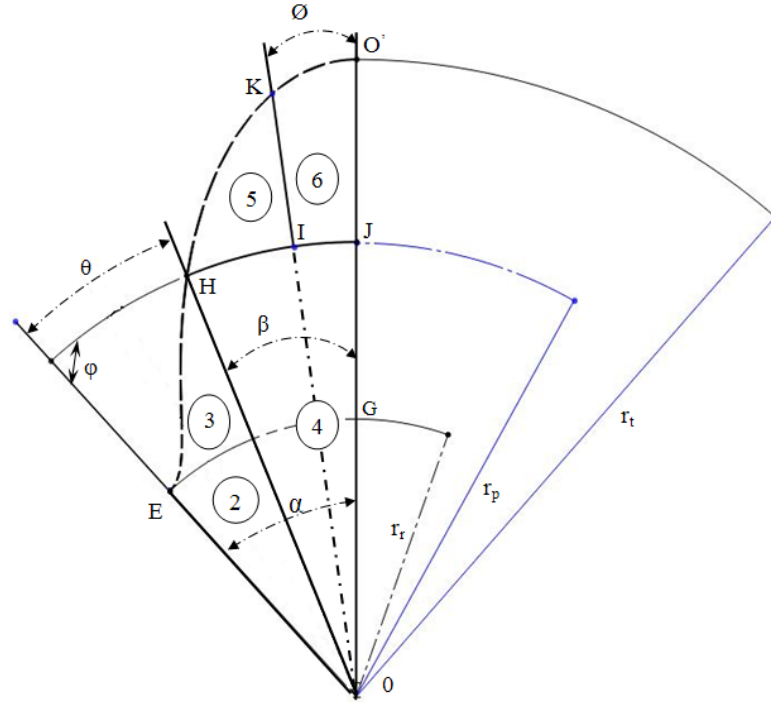
$$W_{toplam} = W_d + W_s + W_f \quad (5.89)$$

şeklindedir.

5.3.2. Radyal Ekstrüzyon Kalıpları Üst Sınır Analizi Çözümleri



Şekil 5.4. Radyal Ekstrüzyon hız alanları bölgeler a-) 4 Dişli, b-) 6 Dişli



Şekil 5.5. Radyal Ekstrüzyon 4 ve 6 diş için Hız Alanları Bölgeleri (2,3,4,5,6 no'lu)

5.3.2.1. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Hız Alanları Çözümleri

Hız alanı ifadeleri Şekil 5.4. ve Şekil 5.5 ile verilen 4 dişli ürün için ürün profilinin 8’de biri olarak dönele simetriden faydalanılarak elde edilmiştir. Bulunan deformasyon, sürtünme ve kayma enerjileri ve dolayısıyla toplam enerji ihtiyacı; bulunan değerlerin 8 ile çarpımlarının toplamı şeklinde hesaplanmaktadır.

1.Bölge:

Birinci bölgenin hız alanları tanımlanan koordinat sistemine göre aşağıdaki gibidir. Bölgenin sınırları $0 \rightarrow r_r$; $0 \rightarrow \theta$; şeklindedir. Birinci bölgede malzemenin sadece tek eksenli hareketi söz konusudur.

$$V_{r1} = 0 \quad (5.86)$$

$$V_{\theta1} = 0 \quad (5.87)$$

$$V_{z1} = -V_0 \quad (5.88)$$

2.Bölge:

İkinci bölgenin hız alanları tanımlanan koordinat sistemine göre aşağıdaki gibidir. Bölgenin sınırları $r_r \rightarrow r_p$; $0 \rightarrow \theta$; şeklindedir. Malzeme ikinci bölgeden itibaren çok eksenli akış göstermektedir.

$$V_{r2} = \frac{V_0 r (\alpha - \beta - \theta)}{h \alpha} \quad (5.89)$$

$$V_{\theta2} = \frac{-V_0 r \theta}{h \alpha} \left[1 + \left(1 - \beta - \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (5.90)$$

$$V_{z2} = -V_0 \frac{z}{h} \quad (5.91)$$

3.Bölge:

Üçüncü bölgenin hız alanları tanımlanan koordinat sistemine göre aşağıdaki gibidir. Bölgenin sınırları $0 \rightarrow r_p$; $0 \rightarrow \theta$; şeklindedir.

$$V_{r3} = \frac{V_0 r (\alpha - \beta - \theta) (A + B \cos(4\theta))}{h\alpha} \quad (5.92)$$

$$V_{\theta 3} = \frac{-V_0 r \theta}{h\alpha} \left[\begin{array}{l} \alpha A \theta + \frac{\alpha B \sin(4\theta)}{4} - \beta A \theta - \frac{\beta B \sin(4\theta)}{4} \\ -\frac{A \theta^2}{2} - \frac{5B \cos(4\theta)}{80} - \frac{B \theta \sin(4\theta)}{4} \end{array} \right] \quad (5.93)$$

$$V_{z3} = 0 \quad (5.94)$$

4.Bölge:

Dördüncü bölgedeki hız alanları $0 \rightarrow r_p$; $\theta \rightarrow \alpha$ arasında sınırları arasında olacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$V_{r4} = \frac{V_0 2r(\beta - \theta)}{h\alpha} \quad (5.95)$$

$$V_{\theta 4} = \frac{V_0 r \theta}{h} \left[1 - \left(\frac{2\beta - \theta}{\alpha} \right) \right] \quad (5.96)$$

$$V_{z4} = -V_0 \frac{z}{h} \quad (5.97)$$

5.Bölge:

Bu bölgenin sınırları $r_p \rightarrow r_t$; $\theta \rightarrow \emptyset$ şeklinde tanımlanmaktadır. Hız alanları ise denklem (5.98-100) arasında verilmektedir.

$$V_{r5} = \frac{V_0 r (\beta - \phi - \theta)}{h\alpha} + \frac{V_0 (\beta - \phi - \theta) r (A + B \cos(4\theta))}{h\alpha} \quad (5.98)$$

$$V_{\theta 5} = \frac{-V_0 r}{h\alpha} \left[\begin{array}{l} \frac{\theta}{2} (2\beta - 2\phi - \theta) + \left[\beta A \theta + \frac{\beta B \sin(4\theta)}{4} - \phi A \theta - \frac{\phi B \sin(4\theta)}{4} \right] \\ -\frac{A \theta^2}{2} - \left(\frac{5 \cos(4\theta)}{80} + \frac{\theta \sin(4\theta)}{4} \right) B \end{array} \right] \quad (5.99)$$

$$V_{z5} = 0 \quad (5.100)$$

6.Bölge:

Bu bölgenin sınırları $r_p \rightarrow r_t$; $\theta \rightarrow \alpha$; şeklinde tanımlanmaktadır. Hız alanı ifadeleri ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$V_{r6} = \frac{V_0 r(\phi - \theta)}{h\alpha} + \frac{V_0(\phi - \theta)r(A + B \cos(4\theta))}{h\alpha} \quad (5.101)$$

$$V_{\theta 6} = \frac{-V_0 r}{h\alpha} \left[\frac{\theta}{4}(4\phi - \theta) + \left[\begin{array}{l} A\phi\theta - \frac{A\theta^2}{4} - \frac{\phi B \sin(4\theta)}{4} \\ - \left(\frac{5 \cos(4\theta)}{80} + \frac{\theta \sin(4\theta)}{4} \right) B \end{array} \right] \right] \quad (5.102)$$

$$V_{z6} = 0 \quad (5.103)$$

5.3.2.2. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Efektif Genleme ve Deformasyon Enerjisi Çözümleri

1. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = 0 \quad (5.104)$$

Denklem (5.105) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d1} = \bar{\sigma}_m \int_0^{H(L)} \int_0^{2\pi R(\theta,z)} \int_0^r \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz = 0. \quad (5.105)$$

2. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[\frac{2V_0^2(\alpha - \beta - \theta)^2}{h^2\alpha^2} + 2 \left[\frac{V_0}{h} - \frac{V_0(\alpha - \beta - \theta)}{h\alpha} \right]^2 + \frac{2V_0^2}{h^2} + \frac{V_0^2}{h^2\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.106)$$

Denklem (5.107) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d2} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\theta_p} \int_{r_r}^r \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.107)$$

3. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[\frac{4V_0^2(\alpha - \beta - \theta)^2(A + B\cos(4\theta))^2}{h^2\alpha^2} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{-V_0r(A + B\cos(4\theta))}{h\alpha} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.108)$$

Denklem (5.109) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d3} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\theta} \int_0^{r_p} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.109)$$

4. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[\frac{2V_0^2(2\beta - 2\theta)^2}{h^2\alpha^2} + 2 \left[\frac{-V_0(2\beta - 2\theta)}{h\alpha} + \frac{V_0}{h} \right]^2 + \frac{2V_0^2}{h^2} + \frac{4V_0^2}{h^2\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.110)$$

Denklem (5.111) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d4} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\alpha} \int_0^{r_p} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.111)$$

5. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[\frac{2V_0^2(2\beta - 2\theta)^2}{h^2\alpha^2} + 2 \left[\frac{-V_0(2\beta - 2\theta)}{h\alpha} + \frac{V_0}{r} \right]^2 + \frac{2V_0^2}{h^2} + \frac{4V_0^2}{h^2\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.112)$$

Denklem (5.113) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d5} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\phi} \int_0^{r_p} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.113)$$

6. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[2 \left[\frac{V_0(\phi - \theta)(1 + A + B\cos(4\theta))}{h\alpha} \right]^2 + 2 \left[\frac{V_0(\phi - \theta)}{h\alpha} (-(A + B\cos(4\theta) + 1)) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{V_0r}{h\alpha} (-(1 + 4B\sin(4\theta)(\phi - \theta) + A + B\cos(4\theta))) \right]^2 \quad (5.114)$$

Denklem (5.115) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d6} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_{\theta} \int_{r_p}^{r_i} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.115)$$

Toplam deformasyon enerjisi bütün bölgelerdeki deformasyon enerjisinin toplamı olarak denklem (5.116) daki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_d = W_{d1} + W_{d2} + W_{d3} + W_{d4} + W_{d5} + W_{d6} \quad (5.116)$$

5.3.2.3. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Kayma İşi Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri

1. Bölge:

Birinci bölgede tek eksenli serbest bir akış bulunduğundan dolayı herhangi bir kayma işi ortaya çıkmamaktadır.

$$W_{s1} = 0 \quad (5.117)$$

şeklindedir.

2. Bölge:

Kayma işi malzemenin 1 numaralı bölgeden 2 numaralı bölgeye akışı sebebiyle meydana gelen hız süreksizliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

$$|\Delta V|_{1-2} = \left| \sqrt{V_{r_2}^2 + V_{\theta_2}^2} \right| \quad (5.118)$$

$$|\Delta V|_{1-2} = \left[V_0^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 \frac{r^2}{h^2 \alpha^2} + \left(\frac{V_0 \beta \theta}{h \alpha} + \frac{V_0 \theta^2}{2h \alpha} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.119)$$

Denklem (5.120) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s2} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\theta} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.120)$$

3. Bölge:

Üçüncü bölgede kayma işi malzemenin 2-3 numaralı bölgeleri arasında meydana gelen hız süreksizliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

$$|\Delta V|_{2-3} = \left| \sqrt{V_{r3}^2 + V_{z3}^2} \right| \quad (5.121)$$

$$|\Delta V|_{2-3} = \left[\frac{V_0^2 r^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 (A + B \cos(4\theta))^2}{h^2 \alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.122)$$

Denklem (5.123) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s3} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\theta} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.123)$$

4. Bölge:

Dördüncü bölgede kayma işi 1 ve 4 numaralı bölgeleri ayıran ara yüzeyde meydana gelen hız süreksizliği nedeniyle oluşmaktadır.

$$|\Delta V|_{1-4} = \left| \sqrt{V_{r4}^2 + V_{\theta 4}^2} \right| \quad (5.124)$$

$$|\Delta V|_{1-4} = \left[\frac{V_0^2 (2\beta - 2\theta)^2 r^2}{h^2 \alpha^2} + r^2 \left(\frac{-2V_0 \beta \theta}{h\alpha} + \frac{V_0 \theta^2}{h\alpha} + \frac{V_0 \theta}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.125)$$

Denklem (5.126) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s4} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\alpha} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.126)$$

5. Bölge:

$$|\Delta V|_{4-5} = \left| \sqrt{V_{r_5}^2 + V_{\theta_5}^2} \right| \quad (5.127)$$

$$|\Delta V|_{4-5} = \left[\frac{V_0 r (\beta - \phi - \theta) (1 + A + B \cos(4\theta))}{h\alpha} \right] \quad (5.128)$$

Denklem (5.129) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s5} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{\phi} \int_{\theta}^{\phi} |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.129)$$

6. Bölge:

$$|\Delta V|_{4-6} = \left| \sqrt{V_{r_6}^2 + V_{\theta_6}^2} \right| \quad (5.130)$$

$$|\Delta V|_{4-6} = \left[\frac{V_0 r (\phi - \theta) (1 + A + B \cos(4\theta))}{h\alpha} \right] \quad (5.131)$$

Denklem (5.132) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s6} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{\alpha} \int_{\theta}^{\alpha} |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.132)$$

Toplam kayma enerjisi bütün bölgelerdeki kayma için harcanan enerjinin toplamı olarak denklem (5.133) daki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_s = W_{s1} + W_{s2} + W_{s3} + W_{s4} + W_{s5} + W_{s6} \quad (5.133)$$

5.3.2.4. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Sürtünme İşi Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri

1.Bölge:

Birinci bölgede, iş parçasının kalıp duvarlarıyla temas halinde olması nedeniyle ortaya çıkan sürtünmedir. Strok arttıkça azalan hammadde boyu nedeniyle birinci bölgedeki sürtünme de strok ile birlikte azalma göstermektedir.

$$W_{f1} = \frac{1}{\sqrt{3}} m \sigma_0 \int_0^H \int_0^{2\pi} |\Delta V| R_0 d\theta dz \quad (5.134)$$

$$W_{f1} = \frac{1}{\sqrt{3}} m \sigma_0 V_0 2\pi R_0 (h_0 - h - V_0 t) \quad (5.135)$$

2.Bölge:

İkinci bölgede sürtünme malzemenin 2 bölgeye akışıyla birlikte ortaya çıkar ve yalnızca alt yüzeyler ile temas eder.

Alt yüzey :

$$|\Delta V_{alt2}| = \left| \sqrt{V_{r2}^2 + V_{\theta2}^2} \right| \quad (5.136)$$

$$|\Delta V_{alt2}| = \left[V_0^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 \frac{r^2}{h^2 \alpha^2} + r^2 \left(-\frac{V_0}{h} \theta + \frac{V_0}{h \alpha} \beta \theta + \frac{V_0 \theta^2}{2h \alpha} + \frac{V_0 \theta}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.137)$$

Denklem (5.138) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f2} = \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^{2\pi} |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.138)$$

3.Bölge:

Bu bölgede iş parçası kalıp yan duvarları ile alt ve üst yüzeyleri ile temas halindedir ve sürtünme işi bu yüzeylerde meydana gelen sürtünmenin hesaplanması ile elde edilir.

Yan duvarlar:

$$|\Delta V_{yan3}| = \left| \sqrt{V_{\theta 3}^2 + V_{z3}^2} \right| \quad (5.139)$$

$$|\Delta V_{yan3}| = \left[\alpha A \theta + \frac{\alpha B \sin(4\theta)}{4} - \beta A \theta - \frac{\beta B \sin(4\theta)}{4} - \frac{A \theta^2}{2} - \frac{B(\cos(4\theta) + 4 \sin(4\theta))}{16} \right]^2 \frac{V_0^2 r^2}{h^2 \alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.140)$$

Denklem (5.138) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f3-yan} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.141)$$

Alt-Üst Yüzeyler:

$$|\Delta V_{alt-üst3}| = \left| \sqrt{V_{r3}^2 + V_{\theta 3}^2} \right| \cdot 2 \quad (5.142)$$

$$|\Delta V_{alt-üst3}| = \left[\frac{V_0^2 r^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 (A + B \cos(4\theta))^2}{h^2 \alpha^2} + \left[\alpha A \theta + \frac{\alpha B \sin(4\theta)}{4} - \beta A \theta - \frac{\beta B \sin(4\theta)}{4} - \frac{A \theta^2}{2} - \frac{B(\cos(4\theta) + 4 \sin(4\theta))}{16} \right]^2 \frac{V_0^2 r^2}{h^2 \alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.143)$$

Denklem (5.144) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f-alt-üst} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.144)$$

3. bölge için toplam sürtünme enerjisi ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_{f3} = W_{f3-yan} + 2 * W_{f3-alt-üst} \quad (5.145)$$

4.Bölge:

Bu bölgede malzeme sadece kalıp alt ve üst yüzeyleri ile temas halindedir.

$$|\Delta V_{alt-üst4}| = \left| \sqrt{V_{r4}^2 + V_{\theta4}^2} \right| \quad (5.146)$$

$$|\Delta V_{alt-üst4}| = \left[V_0^2 (2\beta - 2\theta)^2 \frac{r^2}{h^2 \alpha^2} + r^2 \left(-2 \frac{V_0}{h\alpha} \beta \theta + \frac{V_0}{h\alpha} \theta^2 + \frac{V_0}{h} \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.147)$$

Denklem (5.144) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f4-alt-üst} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{\theta} \int_0^{\alpha} |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.148)$$

4. bölge için toplam sürtünme enerjisi;

$$W_{f4} = 2 * W_{f4-alt-üst} \quad (5.149)$$

şeklindedir.

5.Bölge:

Bu bölgede malzeme ile kalıp arasında alt, üst ve yan duvarlar ile sürtünme söz konusudur. Sürtünme işi hesabı aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Yan Duvarlar:

$$|\Delta V_{yan5}| = \left| \sqrt{V_{\theta5}^2 + V_{z5}^2} \right| \quad (5.150)$$

$$|\Delta V_{yan5}| = \left[r^2 \left[\left[\frac{\phi B \sin(4\theta)}{4} + \beta A \theta + \frac{\beta B \sin(4\theta)}{4} - \phi A \theta - \frac{A \theta^2}{2} + \left(-\frac{\cos(4\theta)}{16} - \frac{\theta \sin(4\theta)}{4} \right) B \right] \frac{V_0}{h\alpha} - \frac{V_0 \theta}{h\alpha} \left(-\beta + \phi + \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.151)$$

Denklem (5.152) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f5-yan} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\phi |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.152)$$

Alt ve Üst Yüzeyler:

$$|\Delta V_{alt-üst5}| = \left| \sqrt{V_{r5}^2 + V_{\theta5}^2} \right| * 2 \quad (5.153)$$

$$|\Delta V_{alt-üst5}| = \left[\left[\left(\frac{-\sin(4\theta)\phi B}{4} + \beta A \theta + \frac{\beta B \sin(4\theta)}{4} - \phi A \theta \right) \frac{V_0}{h\alpha} - \frac{V_0 \theta}{h\alpha} \left(\beta - \phi - \frac{\theta}{2} \right) + \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} * 2$$

$$+ \left[\frac{V_0 r}{h\alpha} \left(\beta - \phi - \frac{\theta}{2} \right) + \frac{V_0 r (A + B \cos(4\theta)) \left(\beta - \phi - \frac{\theta}{2} \right)}{h\alpha} \right]^2$$

(5.154)

Denklem (5.155) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f5-alt-üst} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\phi |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.155)$$

5. bölge için toplam sürtünme enerjisi ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_{f5} = W_{f5-yan} + 2 * W_{f5-alt-üst} \quad (5.156)$$

6.Bölge:

Altıncı bölgede yine malzeme alt, üst ve yan yüzeylerle temas halindedir.

Yan Duvarlar:

$$|\Delta V_{yan6}| = \left| \sqrt{V_{\theta6}^2 + V_{z6}^2} \right| \quad (5.157)$$

$$|\Delta V_{yan6}| = \left[\left[\left(\frac{\phi B \sin(4\theta)}{4} + \phi A \theta - \frac{A \theta^2}{2} - \frac{B}{4} \left(\frac{\cos(4\theta)}{4} + \theta \sin(6\theta) \right) \right) \frac{V_0}{h\alpha} + \frac{V_0 \theta}{h\alpha} \left(-\phi + \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 r^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.158)$$

Denklem (5.159) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f6-yan} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\alpha} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.159)$$

Alt ve Üst Yüzeyler:

$$|\Delta V_{alt-üst6}| = \left| \sqrt{V_{r6}^2 + V_{\theta6}^2} \right| * 2 \quad (5.160)$$

$$|\Delta V_{alt-üst6}| = \left[\left[\left(\frac{-\sin(4\theta)\phi B}{4} + \phi A \theta - \frac{A \theta^2}{2} \right) \frac{V_0}{h\alpha} - \frac{V_0 \theta}{h\alpha} \left(-\phi + \frac{\theta}{2} \right) + \left(-\frac{\cos(4\theta)}{16} - \frac{\theta \sin(4\theta)}{4} \right) B \right]^2 r^2 \right]^{\frac{1}{2}} * 2 + \left[\frac{V_0 r}{h\alpha} (\phi - \theta) + \frac{V_0 r (A + B \cos(4\theta)) (\phi - \theta)}{h\alpha} \right]^2 \quad (5.161)$$

Denklem (5.162) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f6-alt-üst} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\alpha} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.162)$$

6. bölge için toplam sürtünme enerjisi ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_{f6} = W_{f6-yan} + 2 * W_{f6-alt-üst} \quad (5.163)$$

Toplam sürtünme enerjisi ise; bütün bölgelerdeki sürtünme için harcanan enerjinin toplamı olarak denklem (5.116) daki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_f = W_{f1} + W_{f2} + W_{f3} + W_{f4} + W_{f5} + W_{f6} \quad (5.164)$$

5.3.2.5. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Toplam İş Çözümü

4 diş radyal ekstrüzyon üst sınır analizi toplam işi ifadesini elde etmek amacıyla her bir bölgede meydana gelen deformasyon, kayma ve sürtünme işlerinin toplamının 8 katı şeklinde ifade edilmektedir.

$$W_{toplam} = (W_d + W_s + W_f) * 8 \quad (5.165)$$

Şekillendirme için gereken kuvvet ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$F = \frac{W_{toplam}}{V_0} \quad (5.166)$$

5.3.2.6. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Hız Alanları Çözümleri

Hız alanı ifadeleri Şekil 5.4. ve Şekil 5.5 ile verilen 6 dişli ürün için ürün profilinin 12'de biri olarak dönele simetriden faydalanılarak elde edilmiştir. Bulunan deformasyon, sürtünme ve kayma enerjileri ve dolayısıyla toplam enerji ihtiyacı bulunan değerlerin 12 ile çarpılması sonucunda hesaplanabilmektedir.

1.Bölge:

Birinci bölgenin hız alanları tanımlanan koordinat sistemine göre aşağıdaki gibidir. Bölgenin sınırları $0 \rightarrow r_1$; $0 \rightarrow \theta$; şeklindedir. Birinci bölgede malzemenin sadece tek eksenle hareketi söz konusudur.

$$V_{r1} = 0 \quad (5.167)$$

$$V_{\theta1} = 0 \quad (5.168)$$

$$V_{z1} = -V_0 \quad (5.169)$$

2.Bölge:

İkinci bölgenin hız alanları tanımlanan koordinat sistemine göre aşağıdaki gibidir. Bölgenin sınırları $r_r \rightarrow r_p$; $0 \rightarrow \theta$; şeklindedir. Malzeme ikinci bölgeden itibaren çok eksenli akış göstermektedir.

$$V_{r2} = \frac{V_0 r (\alpha - \beta - \theta)}{h \alpha} \quad (5.170)$$

$$V_{\theta 2} = \frac{-V_0 r \theta}{h \alpha} \left[1 + \left(1 - \beta - \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (5.171)$$

$$V_{z2} = -V_0 \frac{z}{h} \quad (5.172)$$

3.Bölge:

Üçüncü bölgenin hız alanları tanımlanan koordinat sistemine göre aşağıdaki gibidir. Bölgenin sınırları $0 \rightarrow r_p$; $0 \rightarrow \theta$; şeklindedir.

$$V_{r3} = \frac{V_0 r (\alpha - \beta - \theta) (A + B \cos(6\theta))}{h \alpha} \quad (5.173)$$

$$V_{\theta 3} = \frac{-V_0 r \theta}{h \alpha} \left[\alpha A \theta + \frac{2\alpha B \sin(6\theta)}{12} - \left(\frac{\beta A \theta + 2\beta B \sin(6\theta)}{4} \right) \right] \quad (5.174)$$

$$\left[-\frac{A\theta^2}{2} + 0.0277B(\cos(6\theta) + 6\theta \sin(6\theta)) \right]$$

$$V_{z3} = 0 \quad (5.175)$$

4.Bölge:

Dördüncü bölgedeki hız alanları $0 \rightarrow r_p$; $\theta \rightarrow \alpha$ arasında sınırları arasında olacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$V_{r4} = \frac{V_0 2r (\beta - \theta)}{h \alpha} \quad (5.176)$$

$$V_{\theta 4} = \frac{V_0 r \theta}{h} \left[1 - \left(\frac{2\beta - \theta}{\alpha} \right) \right] \quad (5.177)$$

$$V_{z4} = -V_0 \frac{z}{h} \quad (5.178)$$

5.Bölge:

Bu bölgenin sınırları $r_p \rightarrow r_t$; $\theta \rightarrow \emptyset$ şeklinde tanımlanmaktadır. Hız alanları ise denklem (5.179-181) arasında verilmektedir.

$$V_{r5} = \frac{V_0 r (\beta - \phi - \theta)}{h\alpha} + \frac{V_0 (\beta - \phi - \theta) r (A + B \cos(6\theta))}{h\alpha} \quad (5.179)$$

$$V_{\theta5} = \frac{-V_0 r}{h\alpha} \left[\frac{\theta}{2} (2\beta - 2\phi - \theta) + \left[\frac{\beta A \theta + \frac{\beta B \sin(6\theta)}{6} - \phi A \theta - \frac{\phi B \sin(4\theta)}{6}}{-\frac{A \theta^2}{2} - \left(0.0277 \cos(6\theta) + \frac{\theta \sin(6\theta)}{6} \right) B} \right] \right] \quad (5.180)$$

$$V_{z5} = 0 \quad (5.181)$$

6.Bölge:

Bu bölgenin sınırları $r_p \rightarrow r_t$; $\theta \rightarrow \alpha$; şeklinde tanımlanmaktadır. Hız alanı ifadeleri ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$V_{r6} = \frac{V_0 r (\phi - \theta)}{h\alpha} + \frac{V_0 (\phi - \theta) r (A + B \cos(6\theta))}{h\alpha} \quad (5.182)$$

$$V_{\theta6} = \frac{-V_0 r}{h\alpha} \left[\frac{\theta}{2} (2\phi - \theta) + \left[\frac{A \phi \theta - \frac{A \theta^2}{4} - \frac{\phi B \sin(6\theta)}{6}}{-\left(0.0277 \cos(6\theta) + \frac{\theta \sin(6\theta)}{6} \right) B} \right] \right] \quad (5.183)$$

$$V_{z6} = 0 \quad (5.184)$$

5.3.2.7. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Efektif Genleme ve Deformasyon Enerjisi Çözümleri

1. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = 0 \quad (5.185)$$

Denklem (5.186) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d1} = \bar{\sigma}_m \int_0^{H(L)} \int_0^{2\pi R(\theta,z)} \int_0^{\theta} \varepsilon_{\text{eff}} r dr d\theta dz = 0 \quad (5.186)$$

2. Bölge:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \left[\frac{2V_0^2(\alpha - \beta - \theta)^2}{h^2\alpha^2} + 2 \left[\frac{V_0}{h} - \frac{V_0(\alpha - \beta - \theta)}{h\alpha} \right]^2 + \frac{2V_0^2}{h^2} + \frac{V_0^2}{h^2\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.187)$$

Denklem (5.188) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d2} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\theta} \int_{r_r}^{r_p} \varepsilon_{\text{eff}} r dr d\theta dz \quad (5.188)$$

3. Bölge:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \left[\frac{4V_0^2(\alpha - \beta - \theta)^2(A + B\cos(6\theta))^2}{h^2\alpha^2} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{-V_0r(A + B\cos(6\theta))}{h\alpha} - \frac{4V_0r(\alpha - \beta - \theta)B\sin(6\theta)}{h\alpha} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.189)$$

Denklem (5.190) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d3} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\theta} \int_0^0 \varepsilon_{\text{eff}} r dr d\theta dz \quad (5.190)$$

4. Bölge:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \left[\frac{2V_0^2(2\beta - 2\theta)^2}{h^2\alpha^2} + 2 \left[\frac{-V_0(2\beta - 2\theta)}{h\alpha} + \frac{V_0}{h} \right]^2 + \frac{2V_0^2}{h^2} + \frac{4V_0^2}{h^2\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.191)$$

Denklem (5.192) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d4} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\alpha} \int_0^{r_p} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.192)$$

5. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[\frac{2V_0^2(2\beta - 2\theta)^2}{h^2\alpha^2} + 2 \left[\frac{-V_0(2\beta - 2\theta)}{h\alpha} + \frac{V_0}{r} \right]^2 + \frac{2V_0^2}{h^2} + \frac{4V_0^2}{h^2\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.193)$$

Denklem (5.194) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d5} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\phi} \int_0^{r_p} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.194)$$

6. Bölge:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{2} \left[2 \left[\frac{V_0(\phi - \theta)(1 + A + B \cos(6\theta))}{h\alpha} \right]^2 + 2 \left[\frac{V_0(\phi - \theta)}{h\alpha} (- (A + B \cos(6\theta) + 1)) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{V_0 r}{h\alpha} (- (1 + 4B \sin(6\theta)(\phi - \theta) + A + B \cos(6\theta))) \right]^2 \quad (5.195)$$

Denklem (5.196) genel ifadesine ε_{eff} ifadesi konularak deformasyon enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{d6} = \bar{\sigma}_m \int_0^H \int_0^{\phi} \int_0^{r_p} \varepsilon_{eff} r dr d\theta dz \quad (5.196)$$

Toplam deformasyon enerjisi bütün bölgelerdeki deformasyon enerjisinin toplamı olarak denklem (5.197) daki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_d = W_{d1} + W_{d2} + W_{d3} + W_{d4} + W_{d5} + W_{d6} \quad (5.197)$$

5.3.2.8. 6 Dış Radyal Ekstrüzyon Kayma İşi Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri

1. Bölge:

Birinci bölgede tek eksenli serbest bir akış bulunduğundan dolayı herhangi bir kayma işi ortaya çıkmamaktadır.

$$W_{s1} = 0 \quad (5.198)$$

2. Bölge:

Kayma işi malzemenin 1 numaralı bölgeden 2 numaralı bölgeye akışı sebebiyle meydana gelen hız süreksizliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

$$|\Delta V|_{1-2} = \left| \sqrt{V_{r_2}^2 + V_{\theta_2}^2} \right| \quad (5.199)$$

$$|\Delta V|_{1-2} = \left[V_0^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 \frac{r^2}{h^2 \alpha^2} + \left(\frac{V_0 \beta \theta}{h \alpha} + \frac{V_0 \theta^2}{2h \alpha} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.189)$$

Denklem (5.200) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s2} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.200)$$

3. Bölge:

Üçüncü bölgede kayma işi malzemenin 2-3 numaralı bölgeleri arasında meydana gelen hız süreksizliği nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

$$|\Delta V|_{2-3} = \left| \sqrt{V_{r_3}^2 + V_{z_3}^2} \right| \quad (5.201)$$

$$|\Delta V|_{2-3} = \left[\frac{V_0^2 r^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 (A + B \cos(6\theta))^2}{h^2 \alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.202)$$

Denklem (5.203) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s3} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\theta} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.203)$$

4. Bölge:

Dördüncü bölgede kayma işi 1 ve 4 numaralı bölgeleri ayıran ara yüzeyde meydana gelen hız süreksizliği nedeniyle oluşmaktadır.

$$|\Delta V|_{1-4} = \left| \sqrt{V_{r_4}^2 + V_{\theta_4}^2} \right| \quad (5.204)$$

$$|\Delta V|_{1-4} = \left[\frac{V_0^2 (2\beta - 2\theta)^2 r^2}{h^2 \alpha^2} + r^2 \left(\frac{-2V_0 \beta \theta}{h\alpha} + \frac{V_0 \theta^2}{h\alpha} + \frac{V_0 \theta}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.205)$$

Denklem (5.206) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s4} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\alpha} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.206)$$

5. Bölge:

$$|\Delta V|_{4-5} = \left| \sqrt{V_{r_5}^2 + V_{\theta_5}^2} \right| \quad (5.207)$$

$$|\Delta V|_{4-5} = \left[\frac{V_0 r (\beta - \phi - \theta) (1 + A + B \cos(6\theta))}{h\alpha} \right] \quad (5.208)$$

Denklem (5.209) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s5} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\phi} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.209)$$

6. Bölge:

$$|\Delta V|_{4-6} = \left| \sqrt{V_{r_6}^2 + V_{\theta_6}^2} \right| \quad (5.210)$$

$$|\Delta V|_{4-6} = \left[\frac{V_0 r (\phi - \theta) (1 + A + B \cos(6\theta))}{h\alpha} \right] \quad (5.211)$$

Denklem (5.212) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{s6} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\alpha} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.212)$$

Toplam kayma enerjisi bütün bölgelerdeki kayma için harcanan enerjinin toplamı olarak denklem (5.213) deki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_s = W_{s1} + W_{s2} + W_{s3} + W_{s4} + W_{s5} + W_{s6} \quad (5.213)$$

5.3.2.9. 6 Dış Radyal Ekstrüzyon Sürtünme İş Enerjisi ve Hız Süreksizlikleri Çözümleri

1.Bölge:

Birinci bölgede, iş parçasının kalıp duvarlarıyla temas halinde olması nedeniyle ortaya çıkan sürtünmedir. Strok arttıkça azalan hammadde boyu nedeniyle birinci bölgedeki sürtünme de strok ile birlikte azalma göstermektedir.

$$W_{f1} = \frac{1}{\sqrt{3}} m \sigma_0 \int_0^{2\pi\Delta L} \int_0^\theta V_0 R_0 d\theta dz \quad (5.214)$$

$$W_{f1} = \frac{1}{\sqrt{3}} m \sigma_0 V_0 2\pi R_0 (h_0 - h - V_0 t) \quad (5.215)$$

2.Bölge:

İkinci bölgede sürtünme malzemenin 2 bölgeye akışıyla birlikte ortaya çıkar ve yalnızca alt yüzeyler ile temas eder.

Alt yüzey :

$$|\Delta V_{alt2}| = \left| \sqrt{V_{r2}^2 + V_{\theta2}^2} \right| \quad (5.216)$$

$$|\Delta V_{alt2}| = \left[V_0^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 \frac{r^2}{h^2 \alpha^2} + r^2 \left(-\frac{V_0}{h} \theta + \frac{V_0}{h \alpha} \beta \theta + \frac{V_0 \theta^2}{2h \alpha} + \frac{V_0 \theta}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.217)$$

Denklem (5.218) genel ifadesine kayma işi hız süreksizliği ifadesi konularak kayma enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f2} = \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.218)$$

3.Bölge:

Bu bölgede iş parçası kalıp yan duvarları ile alt ve üst yüzeyleri ile temas halindedir ve sürtünme işi bu yüzeylerde meydana gelen sürtünmenin hesaplanması ile elde edilir.

Yan duvarlar:

$$|\Delta V_{yan3}| = \left| \sqrt{V_{\theta3}^2 + V_{z3}^2} \right| \quad (5.219)$$

$$|\Delta V_{yan3}| = \left[\left[\alpha A \theta + 0.16 \alpha B \sin(6\theta) - \beta A \theta - 1.6 \beta B \sin(6\theta) \right]^2 - \frac{A \theta^2}{2} - 0.027 B (\cos(6\theta) + 6 \sin(6\theta)) \right]^{\frac{1}{2}} \frac{V_0^2 r^2}{h^2 \alpha^2} \quad (5.220)$$

Denklem (5.221) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f3-yan} = \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.221)$$

Alt-Üst Yüzeyler:

$$|\Delta V_{alt-üst3}| = \left| \sqrt{V_{r3}^2 + V_{\theta3}^2} \right| \cdot 2 \quad (5.222)$$

$$|\Delta V_{alt-üst3}| = \left[\frac{V_0^2 r^2 (\alpha - \beta - \theta)^2 (A + B \cos(6\theta))^2}{h^2 \alpha^2} + \left[\frac{\alpha A \theta + 0.16 \alpha B \sin(6\theta) - \beta A \theta - 0.16 \beta B \sin(6\theta)}{-\frac{A \theta^2}{2} - 0.027 B (\cos(4\theta) + 4 \sin(4\theta))} \right]^2 \frac{V_0^2 r^2}{h^2 \alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.223)$$

Denklem (5.224) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f3-alt-üst} = \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.224)$$

3. bölge için toplam sürtünme enerjisi ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_{f3} = W_{f3-yan} + 2 * W_{f3-alt-üst} \quad (5.225)$$

4.Bölge:

Bu bölgede malzeme sadece kalıp alt ve üst yüzeyleri ile temas halindedir.

$$|\Delta V_{alt-üst4}| = \left| \sqrt{V_{r4}^2 + V_{\theta4}^2} \right| \quad (5.226)$$

$$|\Delta V_{alt-üst4}| = \left[V_0^2 (2\beta - 2\theta)^2 \frac{r^2}{h^2 \alpha^2} + r^2 \left(-2 \frac{V_0}{h \alpha} \beta \theta + \frac{V_0}{h \alpha} \theta^2 + \frac{V_0}{h} \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.227)$$

Denklem (5.228) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f4-alt-üst} = \frac{m \sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\alpha |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.228)$$

4. bölge için toplam sürtünme enerjisi;

$$W_{f4} = 2 * W_{f4-alt-üst} \quad (5.229)$$

5.Bölge:

Bu bölgede malzeme ile kalıp arasında alt, üst ve yan duvarlar ile sürtünme söz konusudur. Sürtünme işi hesabı aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Yan Duvarlar:

$$|\Delta V_{yan5}| = \left| \sqrt{V_{\theta5}^2 + V_{z5}^2} \right| \quad (5.230)$$

$$|\Delta V_{yan5}| = \left[r^2 \left[\left(\begin{array}{l} -0.16 \sin(6\theta) \phi B + \beta A \theta + 0.16 \beta B \sin(6\theta) - \phi A \theta \\ -\frac{A \theta^2}{2} + (0.027 \cos(6\theta) - 0.16 \theta \sin(6\theta)) B \end{array} \right) \frac{V_0}{h\alpha} - \frac{V_0 \theta}{h\alpha} \left(\beta - \phi - \frac{\theta}{2} \right) + \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.231)$$

Denklem (5.232) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f5-yan} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\phi |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.232)$$

Alt ve Üst Yüzeyler:

$$|\Delta V_{alt-üst5}| = \left| \sqrt{V_{r5}^2 + V_{\theta5}^2} \right| \cdot 2 \quad (5.233)$$

$$|\Delta V_{alt-üst5}| = \left[\left[\left(\begin{array}{l} -0.16 \sin(6\theta) \phi B + \beta A \theta + 0.16 \beta B \sin(6\theta) - \phi A \theta \\ -\frac{A \theta^2}{2} + (-0.027 \cos(6\theta) - 0.16 \theta \sin(6\theta)) B \end{array} \right) \frac{V_0}{h\alpha} - \frac{V_0 \theta}{h\alpha} \left(\beta - \phi - \frac{\theta}{2} \right) + \right]^2 r^2 \right]^{\frac{1}{2}} * 2 \quad (5.234)$$

$$+ \left[\frac{V_0 r}{h\alpha} (\beta - \phi - \theta) + \frac{V_0 r (A + B \cos(6\theta)) (\beta - \phi - \theta)}{h\alpha} \right]^2$$

Denklem (5.235) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f5-alt-üst} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^H \int_0^\phi |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.235)$$

5. bölge için toplam sürtünme enerjisi ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_{f5} = W_{f5-yan} + 2 * W_{f5-alt-üst} \quad (5.236)$$

6.Bölge:

Altıncı bölgede yine malzeme alt, üst ve yan yüzeylerle temas halindedir.

Yan Duvarlar :

$$|\Delta V_{yan6}| = \left| \sqrt{V_{\theta 6}^2 + V_{z6}^2} \right| \quad (5.237)$$

$$|\Delta V_{yan6}| = \left[\left[\left(\begin{array}{c} 0.16\phi B \sin(6\theta) + \phi A \theta - \frac{A\theta^2}{2} \\ -B(0.027 \cos(6\theta) + 0.16\theta \sin(6\theta)) \end{array} \right) \frac{V_0}{h\alpha} + \frac{V_0\theta}{h\alpha} \left(-\phi + \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 r^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.238)$$

Denklem (5.239) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f6-yan} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{\alpha} \int_{\theta}^{\alpha} |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.239)$$

Alt ve Üst Yüzeyler:

$$|\Delta V_{alt-üst6}| = \left| \sqrt{V_{r6}^2 + V_{\theta 6}^2} \right| \cdot 2 \quad (5.240)$$

$$|\Delta V_{alt-üst6}| = \left[\left[\left(\begin{array}{c} 0.16 \sin(6\theta)\phi B + \phi A \theta - \frac{A\theta^2}{2} \\ + (0.027 \cos(6\theta) - 0.16\theta \sin(6\theta))B \end{array} \right) \frac{V_0}{h\alpha} - \frac{V_0\theta}{h\alpha} \left(-\phi + \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 r^2 \right]^{\frac{1}{2}} * 2 \quad (5.241)$$

$$+ \left[\frac{V_0 r}{h\alpha} (\phi - \theta) + \frac{V_0 r (A + B \cos(6\theta)) (\phi - \theta)}{h\alpha} \right]^2$$

Denklem (5.242) genel ifadesine sürtünme işi hız süreksizliği ifadesi konularak sürtünme enerjisi çözümü elde edilmektedir.

$$W_{f6-alt_üst} = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_0^{H\alpha} \int_0^\theta |\Delta V| r d\theta dz \quad (5.242)$$

6. bölge için toplam sürtünme enerjisi ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$W_{f6} = W_{f6-yan} + 2 * W_{f6-alt_üst} \quad (5.243)$$

Toplam sürtünme enerjisi ise; bütün bölgelerdeki sürtünme için harcanan enerjinin toplamı olarak denklem (5.244) deki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_f = W_{f1} + W_{f2} + W_{f3} + W_{f4} + W_{f5} + W_{f6} \quad (5.244)$$

5.3.2.10. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Toplam İş Çözümü

6 diş radyal ekstrüzyon üst sınır analizi toplam işi ifadesini elde etmek amacıyla her bir bölgede meydana gelen deformasyon, kayma ve sürtünme işlerinin toplamının 12 katı olacak şekilde ifade edilmektedir.

$$W_{toplam} = (W_d + W_s + W_f) * 12 \quad (5.245)$$

Şekillendirme için gereken kuvvet ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$F = \frac{W_{toplam}}{V_0} \quad (5.246)$$

BÖLÜM 6.

6.SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

6.1. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ UYGULAMALARI

Metal şekillendirme işlemleri gerek şekillendirilen geometriler gerekse etkin olan işlem parametreleri sebebiyle çözümü güç problemlerdir. Gerçek hayatta gerçekleşen prosesleri tam anlamıyla modellemek çoğu zaman çeşitli sebeplerden dolayı mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlarda yaklaşık çözüm geçerli olarak kabul edilebilmektedir. Bu yüzden çözüme ulaşmak adına çeşitli analiz yöntemleri üretilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi karmaşık geometrilere ve proses parametreleri içeren ana problemlerin daha basit olarak ifade edilebilen sonlu sayıda alt problemlere ayrıştırılarak bir model üzerinden elde edilen çözümler üzerinden tam çözüme ulaşılan bir analiz yöntemidir. Özellikle tam çözümün mümkün olmadığı metal şekillendirmenin çeşitli problemleri için sonlu elemanlar analizi önemli ve giderek yaygınlaşan bir çözüm yöntemi olmuştur. Yapılan bu doktora çalışması ekstrüzyon yönteminin dişli benzeri bir profile sahip ürünlerin farklı matris geçişine sahip kalıplara uygulanması gibi kompleks bir konu olduğundan sonlu elemanlar üretim yöntemi sonuçlarının değerlendirilerek deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Çok fazla ara işlem gerektiğinden dolayı el ile çözümün zor olduğu bu yöntem bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde giderek artan bir üne kavuşmuş ve etkin bir biçimde kullanılır olmuştur. Günümüzde sonlu elemanlar analizi tabanlı ticari paket programlar üretim sonrası analiz kısmında da yaygınlaşmıştır. Literatürde Jung, S.-Y., ve arkadaşları (2009), Bakhshi-Jooybari, M., ve diğ. (2007) gibi çok sayıda araştırmacı sonlu elemanlar paket programlarını kullanmışlardır.

Metal şekillendirmelerde kullanılan paket programlardan bazıları DEFORM, HyperXtrude, ABAQUS, DYNAFORM, PamStamp olarak sıralanabilir.

Bu yazılımlardan bir tanesi olan DEFORM ürün ailesinin bir versiyonu olan DEFORM 3D, karmaşık 3 boyutlu malzeme akışı içeren modellerin problemlerini sonlu elemanlar yöntemiyle çözmek için kullanılmaktadır. DEFORM 3D programı üç boyutlu çalışarak farklı geometrilere ve sınır şartlarına sahip metal şekillendirme işlemlerini modelleyebilmek amacıyla tasarlanan dinamik analiz yapabilen bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Deneme-yanılma yöntemi ortaya çıkardığı yüksek maliyetinin yanı sıra zaman kaybettiren bir yöntem olmasından dolayı DEFORM 3D farklı metal şekillendirme proseslerini modelleme yeteneği ile sözkonusu sorunları ortadan kaldıran verimli bir araştırma-geliştirme aracı olarak giderek artan bir kullanım alanına sahiptir.

DEFORM 3D; kapalı kalıpla dövme, açık kalıpla dövme, metal kesme, haddeme, ekstrüzyon, kafa şişirme (heading) gibi çok farklı metal şekillendirme operasyonlarının modellenmesinde doğru, hızlı sonuçlar vermesinden dolayı en çok tercih edilen paket program olarak kullanılmaktadır ve yapılan doktora çalışmasında da çalışılan problem karmaşık yapısı dolayısıyla 3 boyutlu olarak modellenmesinden dolayı sonlu elemanlar analizi için DEFORM 3D paket programı tercih edilmiştir.

6.2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DENEYSEL ÇALIŞMANIN MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar analizinin modellenmesinde deneylerin tam bir benzetimini yapmak amaçlanmıştır. Bu sebeple deneylerdeki sınır şartları modele aktarılmıştır. Deneylerde kullanılan kalıplar şekil 4.16-17'de görülmektedir. Kalıplar ve iş parçası sıcaklıkları deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirildiği için analizde 20⁰C olarak seçilmiştir. DEFORM 3D paket programının malzeme kütüphanesinde standartlara göre sınıflandırılmış, alüminyum, çelik, paslanmaz çelik, kalıpcılıkta kullanılan çelikler, kesici uç malzemeleri, titanyum, bakır, cam, elmas gibi farklı malzemeler yer almaktadır. İş parçası olarak tablo 7.1.de kimyasal kompozisyonu ve denklem 7.1.de akma denklemi verilen ticari saflıktaki %99,7 alüminyum malzeme seçilmiş ve kütüphaneden seçilen malzeme mekanik özellikleri numunelerin çekme deneylerinden elde edilen veriler üzerinden güncellenerek kullanılmıştır. Kalıp malzemesi olarak H-13 kalıp malzemesi özellikleri seçilmiştir.

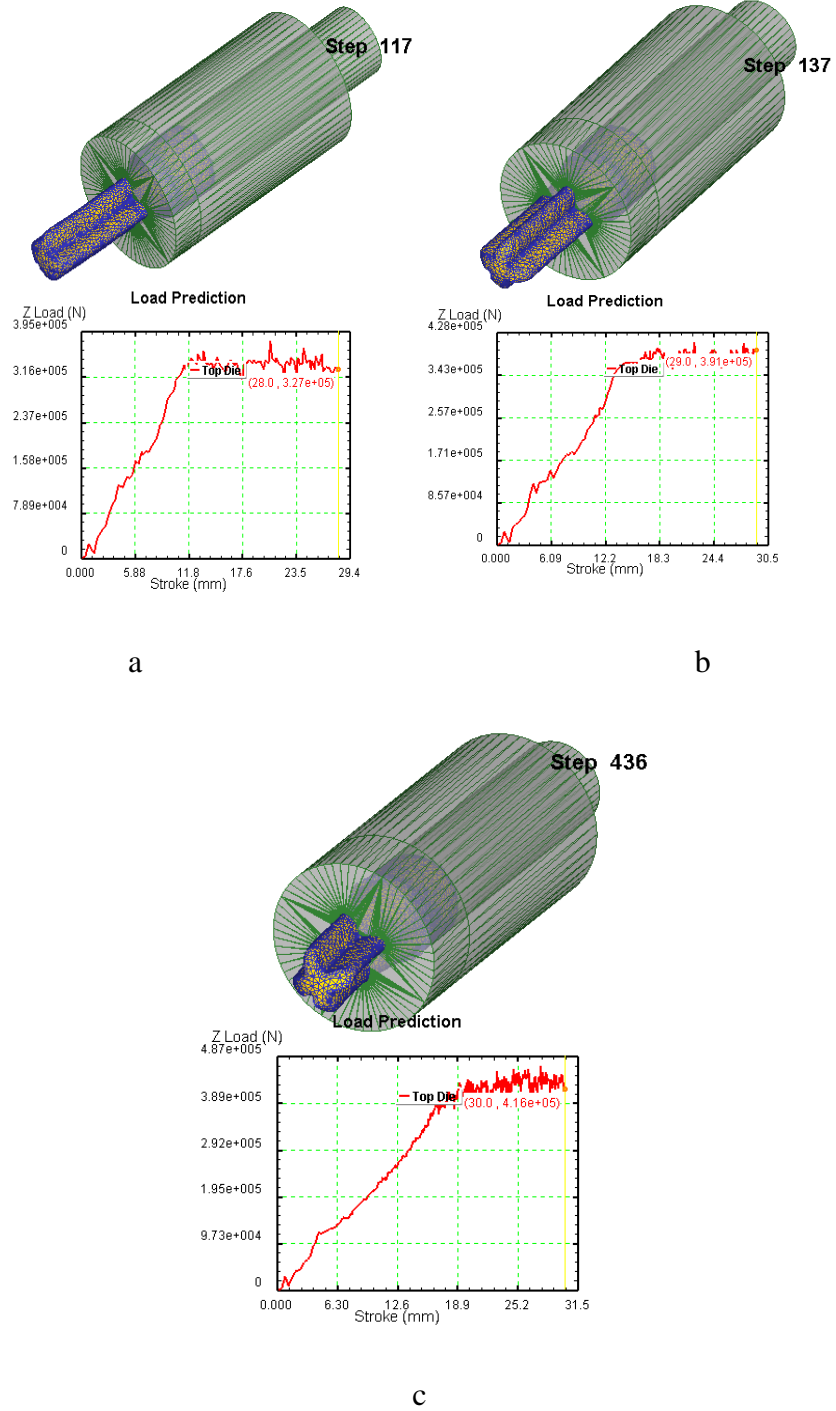
Kalıpların ve iş parçasının katı modelleri SolidWorks 2010 programında oluşturularak *.stl formatında DEFORM 3D ortamına aktarılmıştır. Kalıplar rijit, iş parçası rijit-plastik karakterli olarak programa tanıtılmıştır. Program malzemelerin karakterlerini elastik, plastik, rijit, elasto-plastik ve gözenekli olarak tanımlayabilmektedir. İş parçası ve kalıplar sonlu elemanlar programlarında belirli bir element sayısı üzerinden ağ örülerek daha basit geometrilere ayrılmaktadır. Sözkonusu işlemden iş parçası için element sayısı olarak 30000 seçilmiştir. Kalıplar 25000 element üzerinden ağ örgüsü (meshleme) yapılmıştır. Mesh işleminin element sayısının fazla olması işlem zamanını artırmasının yanında problemin sonucunun hassasiyetini iyileştirmesi açısından önemlidir. Ancak her bir problemde optimum bir değerden sonra element sayısının artması sonuca çok fazla etki etmeyeceği gibi işlem zamanının da gereksiz yere arttırabilmektedir. Dolayısıyla uygun bir element sayısı belirlemek önemlidir ve tecrübe gerektirir. Deneylerde kullanılan presin üst kalıbının hareketi, yapılan deneylerin DEFORM 3D programında benzetimi yapılan zımba hareketi ile uyumlu olması açısından 5mm/sn olarak seçilmiştir. Kalıplar ile iş parçası arasındaki bütün yüzeylerde sürtünme şartları; kayma sürtünmesi ve $m=0.4$ olarak seçilmiştir.

DEFORM 3D programı sınır şartları olarak problemi oluşturan nesnelerin geometrisi, mesh detayları, malzeme özellikleri, proseste kullanılan sıcaklık değerleri, sürtünme ve kalıp ile iş parçası arasındaki ısı geçişi gibi problemi tanımlamak için programa aktarılan giriş işlem parametrelerinin programa tanıtıldığı ve veri tabanı hazırlayan ön hazırlık kısmı (Pre Processor), problemin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözdürüldüğü işlem kısmı (Simulator) ve çözülen veritabanı dosyasını okuyarak elde edilen sonuçları grafik ve görsel olarak sunan ve sayısal sonuçları da kullanıcıya aktaran ve sonuçların yorumlandığı kısım (Post Processor) olmak üzere 3 temel aşamadan oluşmaktadır.

Post Processor kısmında kullanıcı; sonuç çıktısı olarak gerilme, genleme, genleme hızı, sertlik değişimi, sıcaklık değişimleri gibi çok farklı verilere ulaşabilmektedir. Örneğin gerilme ile ilgilenen bir kullanıcı efektif gerilme ve maksimum asal gerilmelerin yanında her bir eksen doğrultusunda ve her bir düzlemdeki gerilmeyi görebilmektedir.

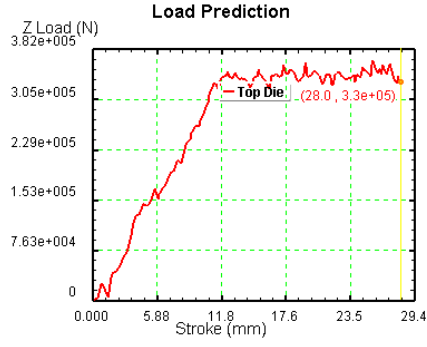
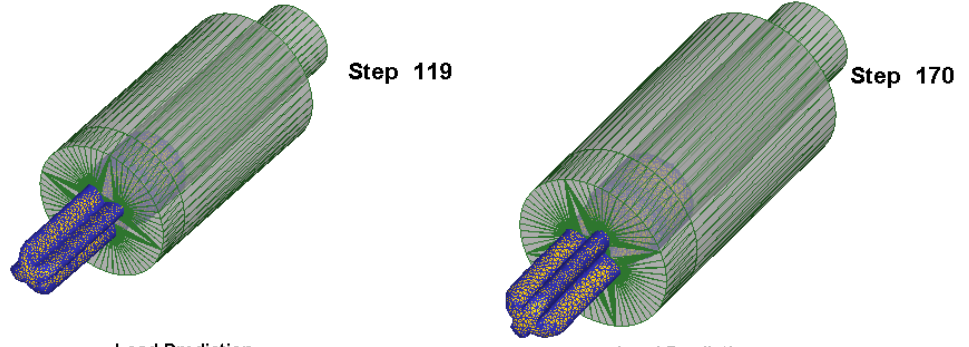
6.3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SONUÇLARI

Doktora çalışması içerisinde yer alan tüm kalıplar için Sonlu elemanlar analizi sonuçları Şekil 6.1-6.5 arasında verilmiştir.

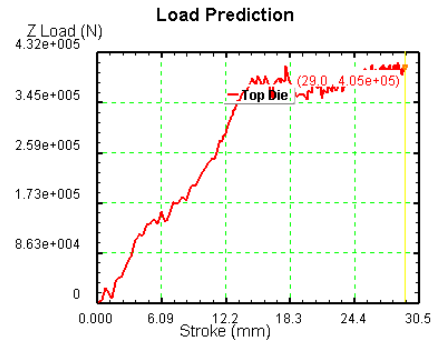


Şekil 6.1 4 dişli parçalar için cosinüs geçişli kalıplarla yapılan DEFORM çözümleri

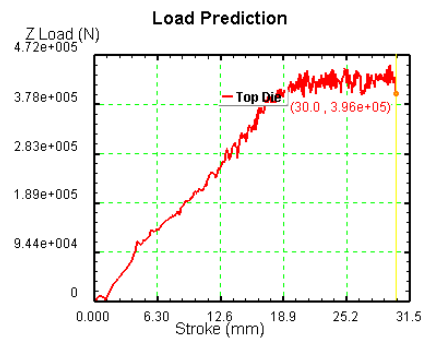
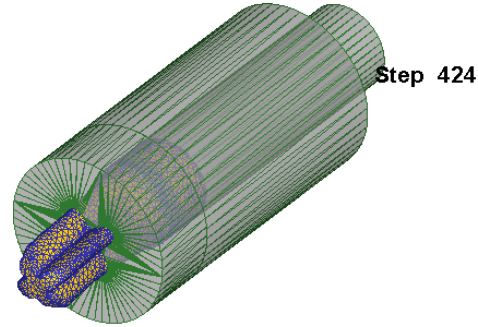
a)L=15, b)L20, c)L25



a

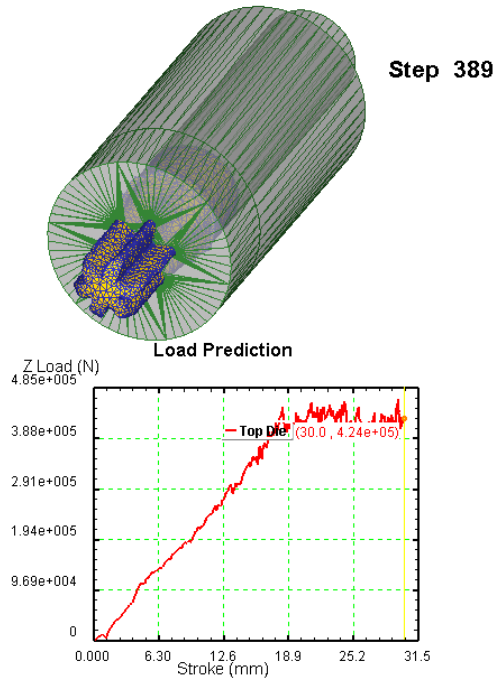
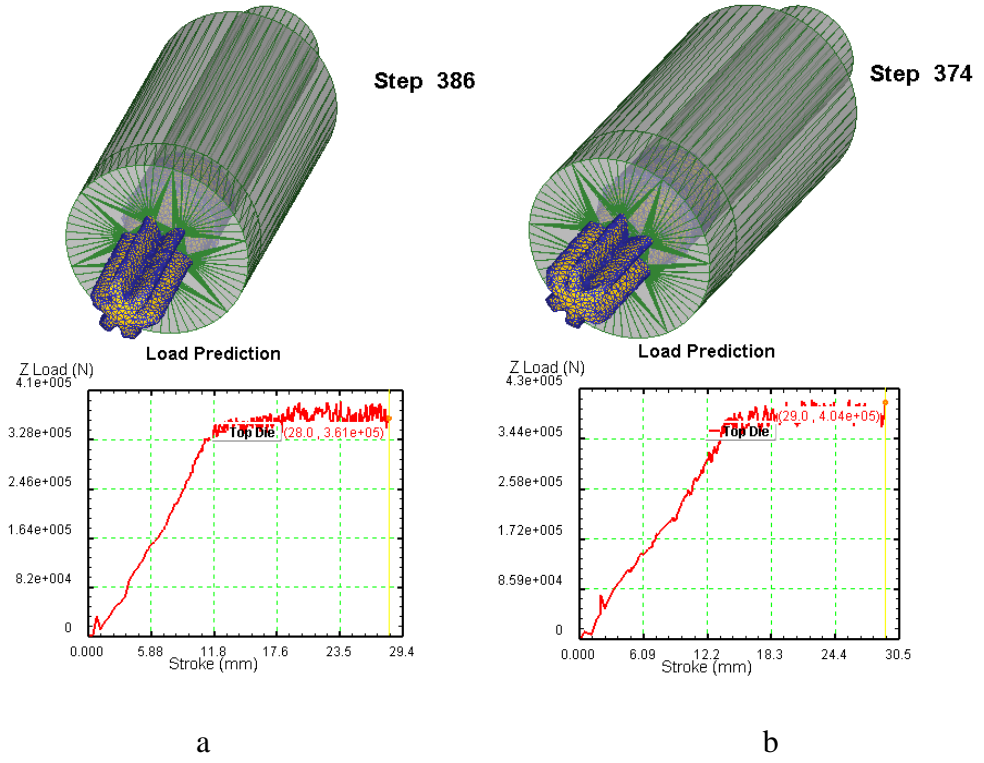


b

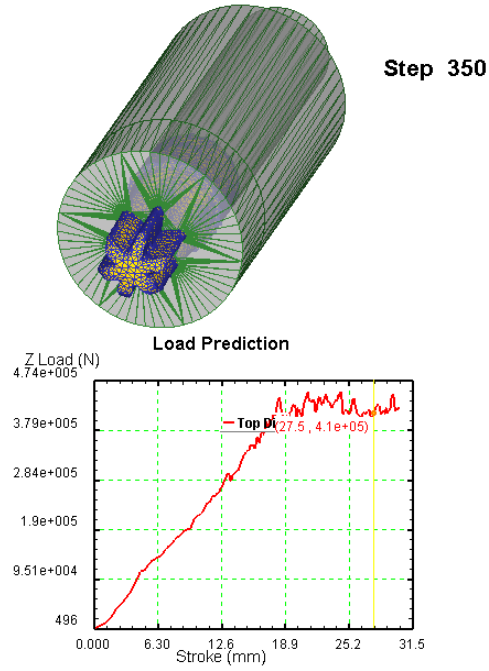
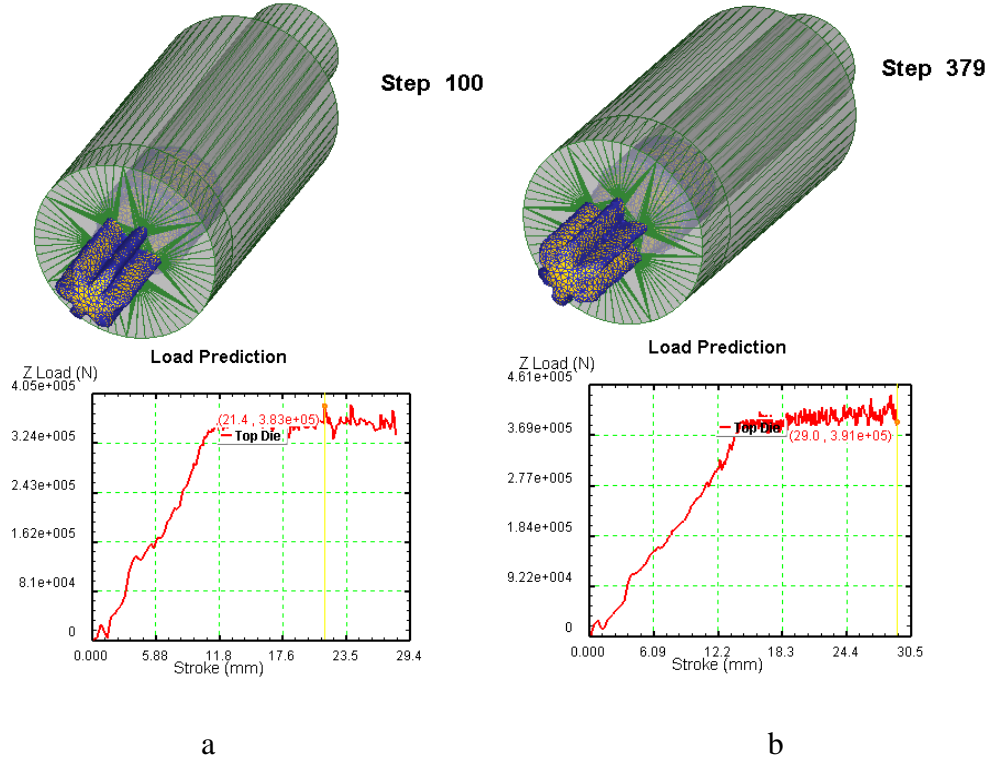


c

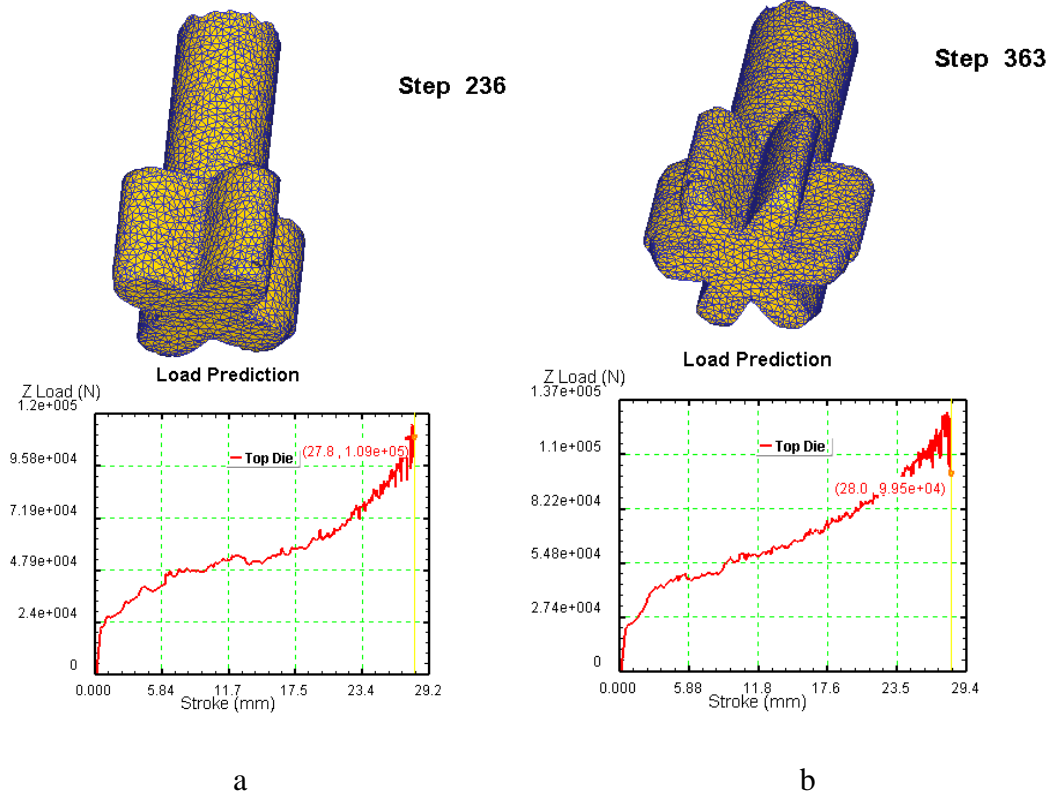
Şekil 6.2 4 dişli parçalar için taper geçişli kalıplarla yapılan DEFORM çözümleri
a)L=15, b)L20, c)L25



Şekil 6.3 6 dişli parçalar için cosinüs geçişli kalıplarla yapılan DEFORM çözümleri
a)L=15, b)L20, c)L25



Şekil 6.4 6 dişli parçalar için taper geçişli kalıplarla yapılan DEFORM çözümleri
a)L=15, b)L20, c)L25



Şekil 6.5. Radyal Ekstrüzyon yöntemi için yapılan DEFORM çözümleri

a) 4 dişli parçalar, b) 6 dişli parçalar

BÖLÜM 7.

7.SONUÇLAR

7.1.GİRİŞ

Doktora çalışmasının ana konusu olarak dişlilerin üretim yöntemi seçimi; hem deneysel hemde teorik çalışmalar ile şekil vermek için uygulanan kuvvet ve ürünlerin dişdibi eğilme yorulması dayanımları gibi çeşitli parametreler üzerinden incelenmiştir. Yapılan deneylerde ticari saflıkta (%99,7) alüminyum kullanılmıştır. Deney malzemesi olan alüminyumun pekleşme üsteli çekme deneyi yoluyla elde edilen gerçek gerilme-gerçek genleme eğrilerinden faydalanılarak, değiştirilmiş Ludwig Kanunu'na dayanarak,

$$\sigma = 144\varepsilon^{0.162} MPa \text{ olarak bulunmuştur.} \quad 7.1.$$

İş parçası olarak alüminyum hafif olmasının yanında alüminyuma eklenen alaşım elementleri sayesinde dayanımının yüksek değerlere kadar çıkabilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Ancak sahip olunan pres kapasitesi göz önüne alındığında ticari saflıkta alüminyumun deneylerde kullanılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir.

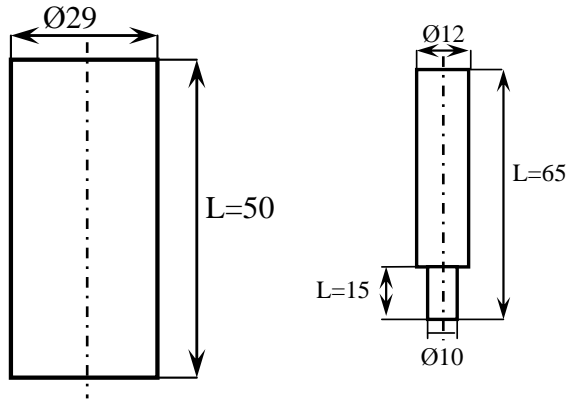
Deneylerde kullanılan ticari saflıktaki alüminyumun kimyasal kompozisyonu tablo 7.1de verilmektedir.

Tablo 7.1. Deneylerde Kullanılan Ticari Saflıktaki Alüminyumun Kimyasal Kompozisyonu

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
99,714	0,052	0,181	<0,01	0,006	0,002	<0,01	0,005
Pb	Ti	Na	V	Zr	Ni	Sn	Sr
0,005	0,006	0,003	0,005	0,003	0,003	<0,002	0,0031

Bölüm 4 de daha önce verilmiş olan Şekil 4.17-18. de görülen kalıp düzenekleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Kurtoğlu Alüminyum firmasından elde edilen ticari saflıktaki (%99,7) alüminyum $\text{Ø}40\text{mm}$. çapa sahip çubuklar CNC tornalarda kullanılarak $\text{Ø}29\text{mm}$. çap ve bütün ekstrüzyon kalıp formasyonları için boyları da 50mm . olacak şekilde işlenmişlerdir. Radyal ekstrüzyon için numune boyutları da aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.1. İş Parçası Boyutları

Deney numuneleri işlenerek hazır hale getirildikten sonra kalıplarda sürtünme koşullarını eşitlemek amacıyla aseton ile silinerek kalıplara yerleştirilmişlerdir.

7.2. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI, ANALİZ YÖNTEMLERİYLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMALI GRAFİKLERİ

Doktora çalışmasında yapılan ileri ekstrüzyon ve radyal ekstrüzyon ürünleri Şekil 7.2.'de görülmektedir.



Şekil 7.2. Ürünler Görünüm: a) 4diş ileri ekstrüzyon, b) 4diş radyal ekstrüzyon, c) 6diş radyal ekstrüzyon, d) 6diş ileri ekstrüzyon

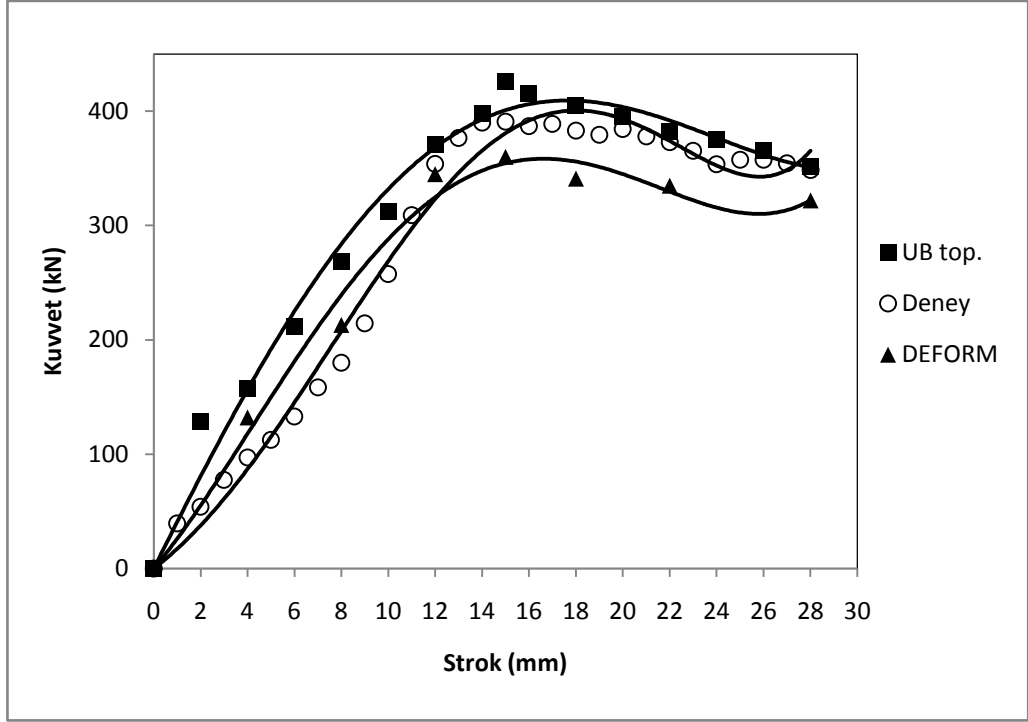
Doktora çalışmasının temelini oluşturan deneylerde gerçeğe yakın sonuçlara ulaşabilmek ve bunun yanında deneysel hatalardan uzaklaşabilmek adına her bir kalıp formasyonu için deneyler birden fazla sayıda tekrarlanmıştır.

7.2.1. Ekstrüzyon Deneylerinin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

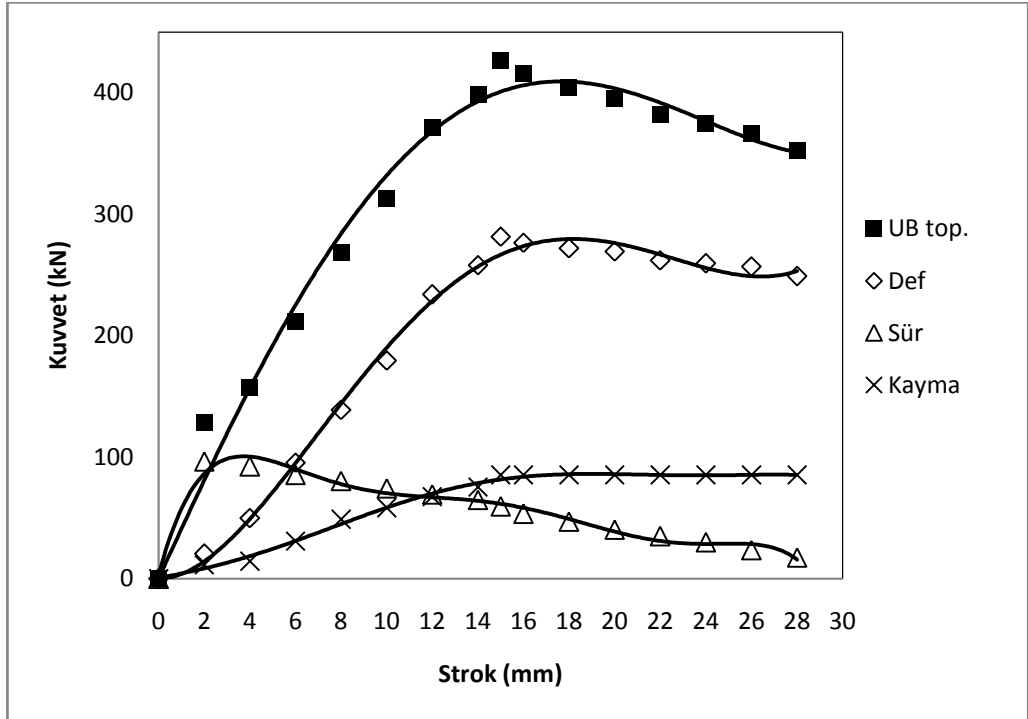
Elde edilen grafikler her bir kalıp formasyonu için şekillendirme için gereken kuvvet değerlerini ortaya koyan deneysel sonuçlar ve bunun yanında önerilen hız alanlarından elde edilen üst sınır analizi yöntemi sonuçları ve bir sonlu elemanlar paket programı olan DEFORM 3D sonuçlarının bir bütünü olarak verilmektedir ve bunun yanında her bir deney için üst sınır yönteminden elde edilmiş deformasyon, sürtünme ve kayma işleri için kullanılan kuvvet değerleri ayrı olarak gösterilmektedir.

7.2.1.1. 4 Dişli Taper Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

İleri ekstrüzyon yönteminde taper profile sahip 15, 20 ve 25mm. uzunluğunda matrisler kullanılarak elde edilen deney ve analiz yöntemi sonuçlarının verildiği grafikler aşağıda sunulmaktadır. Her bir matris uzunluğu için deney, üst sınır analizi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırmalı olarak yer almaktadır. Ayrıca üst sınır analizi yöntemi ile toplam şekillendirme kuvvetini oluşturan teorik bileşenlerin yer aldığı grafiklerde her bir matris uzunluğu için verilmektedir.

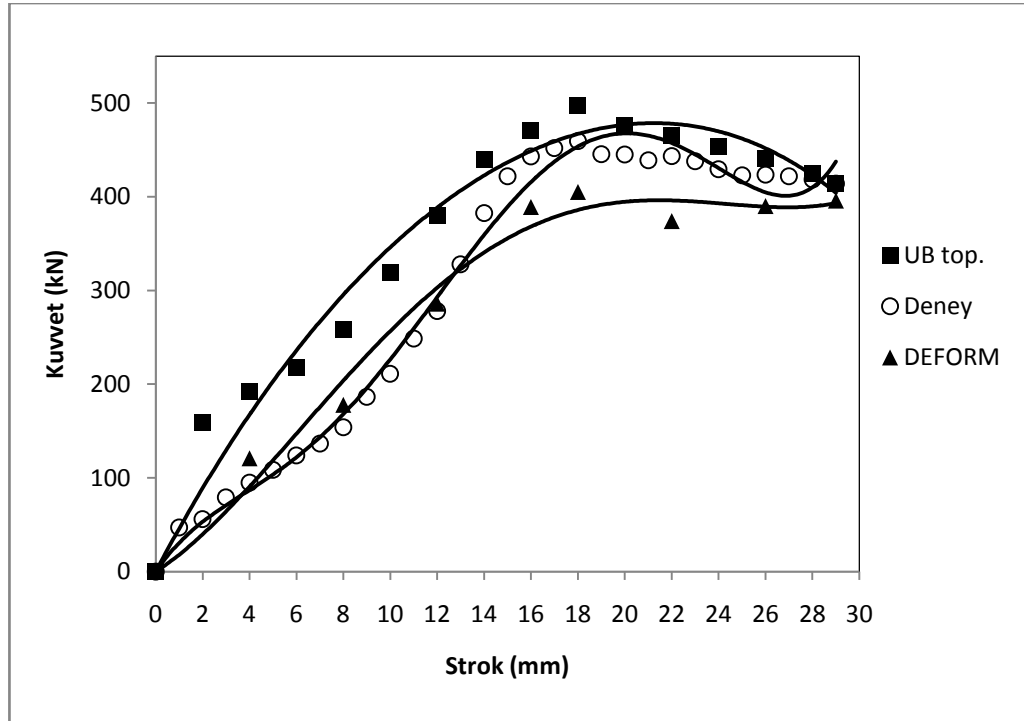


Şekil 7.3. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

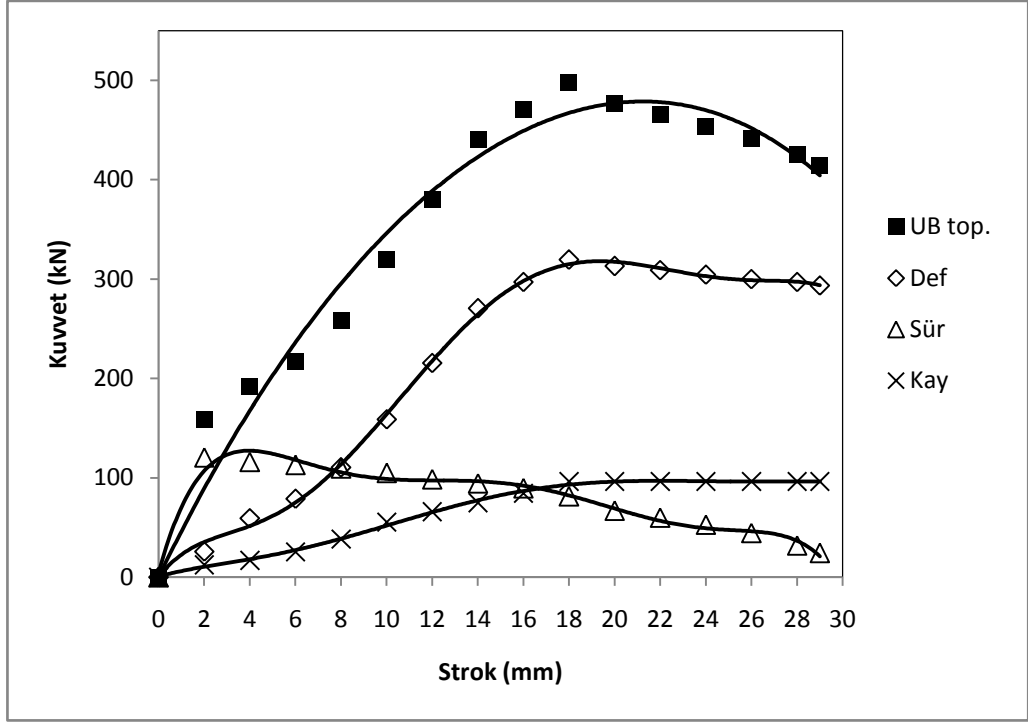


Şekil 7.4. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Şekil 7.3. de 4 dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper matris geçişli ve $L=15$ mm. matris uzunluğuna sahip parçaların ileri ekstrüzyonunda ortaya çıkan deneysel, üst sınır analizi ve sonlu elemanlar analizi sonuçları verilmektedir. Üst sınır analizi sonuçları, önerilen hız alanının doğruluğunu kanıtlar nitelikte deneysel sonuçlardan yüksektir. Ancak deneysel sonuçlar ile arasındaki farkın maksimum kuvvetin ortaya çıktığı noktada farkın %10 civarında olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar çözümleri ise deneysel sonuçlardan %12 kadar düşük çıkmaktadır. Grafiğin maksimum yükün ortaya çıktığı tepe noktasına kadar sonlu elemanlar analizi sonuçları deneysel sonuçlara oldukça yakın seyrederken, tepe noktasından sonra deneysel eğri üst sınır analizi eğrisi ile aynı uyumu göstermektedir. Deneyin tamamlandığı noktaya kadar sonlu elemanlar çözümleri ile deneysel sonuçlar arasında %11 civarında bir fark ortaya çıkmaktadır. Bu haliyle üst sınır analizi sonuçları sonlu elemanlar çözümlerine oranlar daha uygun kabul edilebilir. Şekil 7.4.'de ise üst sınır analizi toplam kuvvet ve bileşenleri verilmektedir. Toplam kuvvetin %65 oranını deformasyon kuvveti oluşturmaktadır. Kayma ve sürtünme bileşenleri ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Maksimum kuvvet noktasında neredeyse eşit değere sahip olmaktadır.

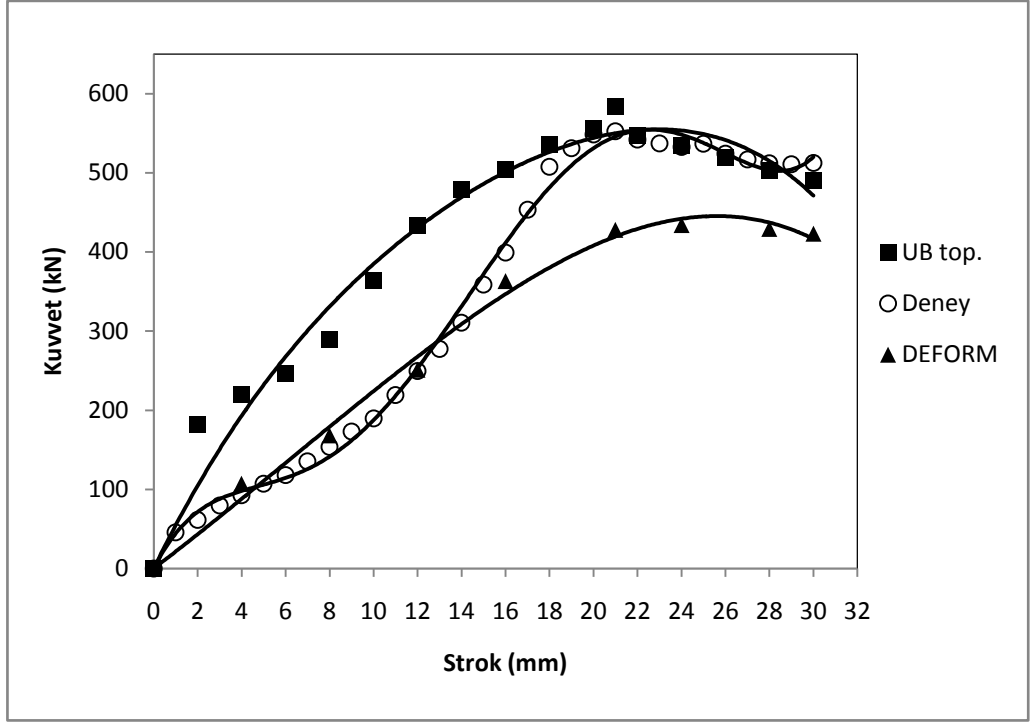


Şekil 7.5. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve $L=20$ mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

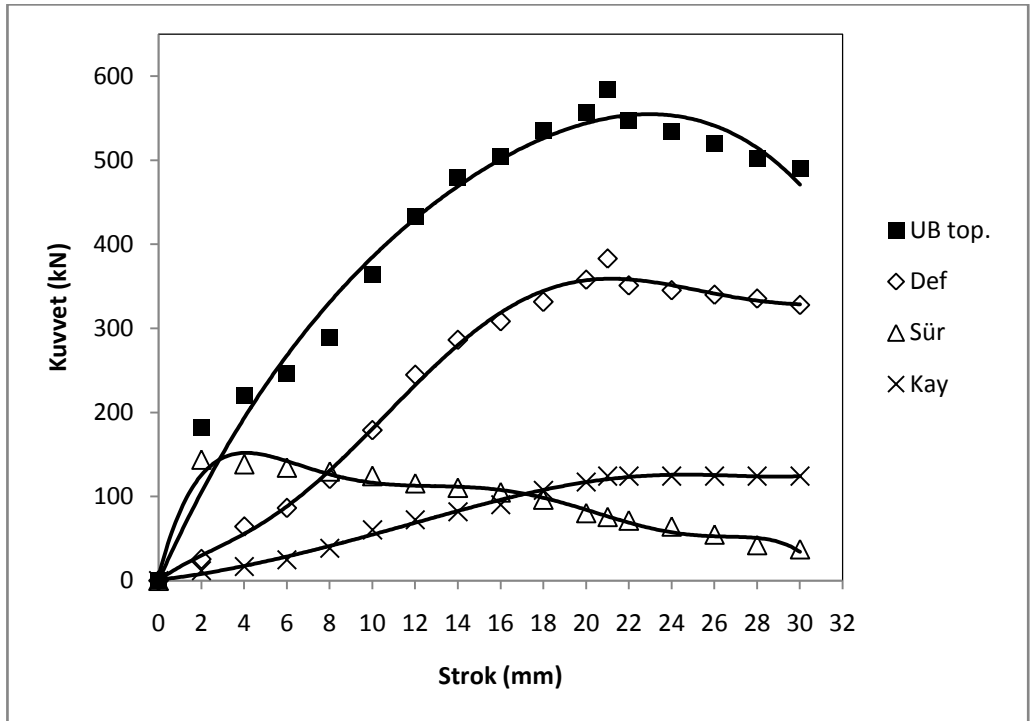


Şekil 7.6. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=20mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Şekil 7.5. için deneysel sonuçlar ile üst sınır analizi sonuçları arasındaki fark Şekil 7.3.'e benzer şekilde %11 civarındadır. Maksimum kuvvet noktasından sonra ise bu farkın kapandığı ve deneysel eğri ile farkın %3 civarında olmaktadır. Matris boyunun uzamasıyla sürtünme kuvveti değerinin arttığı görülmektedir. Kayma için harcanan kuvvette beraberinde artmaktadır. Deformasyon kuvvetinin arttığı Şekil 7.6 da görülmektedir. Benzer değişimlerin L=25mm. matris uzunluğuna sahip taper geçişli kalıplar içinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 7.7. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=25mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

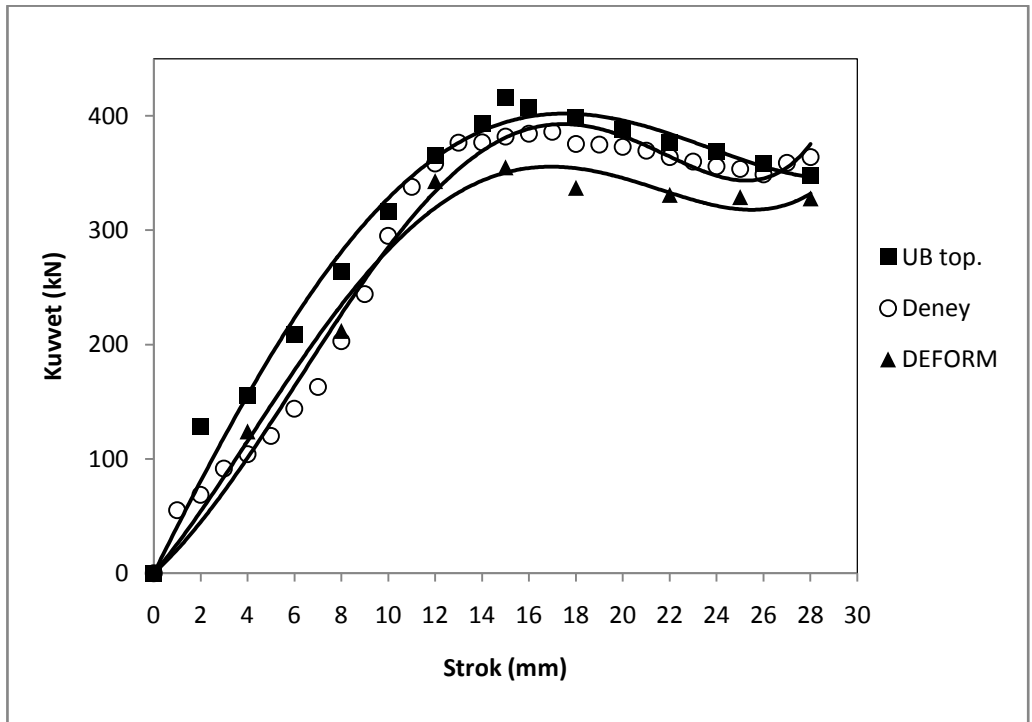


Şekil 7.8. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=25mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

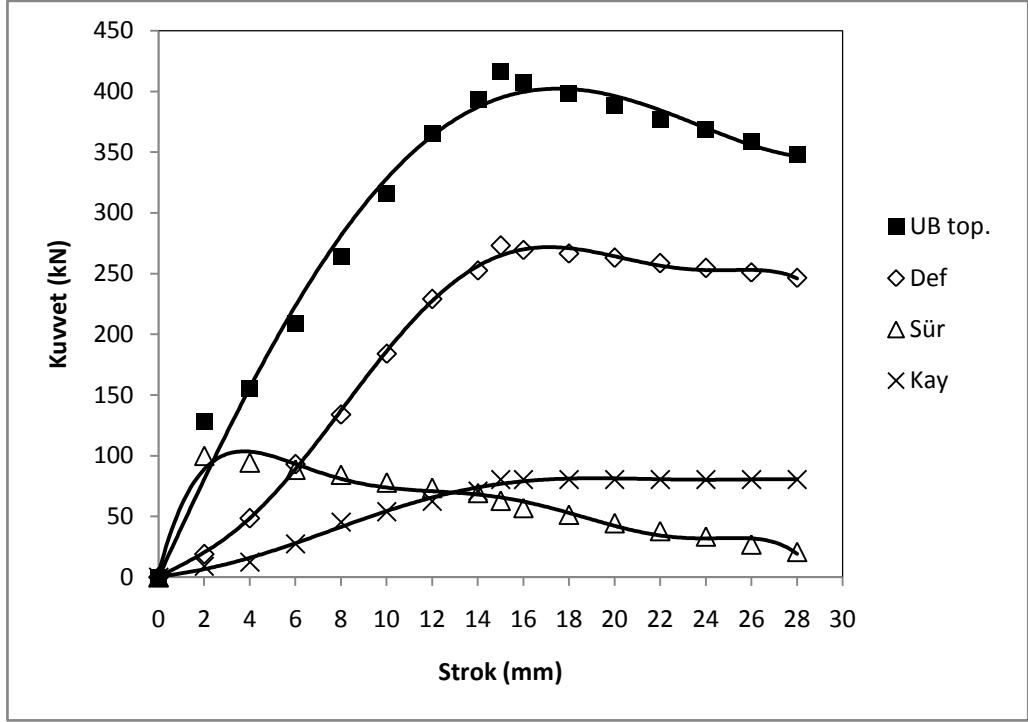
Kalıp uzunluğu 15mm. ile 25mm. arasında sürtünme için gereken kuvvet değerleri %46 kadar artış göstermektedir. Kayma kuvvet değerleri bu iki matris boyu için %48 artmakta olduğu görülmüştür. Deformasyon için harcanan kuvvet ise %36 artış göstermektedir.

7.2.1.2. 4 Dişli Cosinus Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

Cosinus profile sahip 15,20 ve 25mm. uzunluğunda matrisler kullanılarak elde edilen ileri ekstrüzyon deneyleri sonuçları ile üst sınır analizi ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının verildiği grafikler yer almaktadır. Analiz yöntemleri sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Buna ek olarak üst sınır analizi yöntemi kullanılarak toplam şekillendirme kuvvetini oluşturan teorik bileşenlerin yer aldığı grafiklerde her bir matris uzunluğu için verilmektedir.



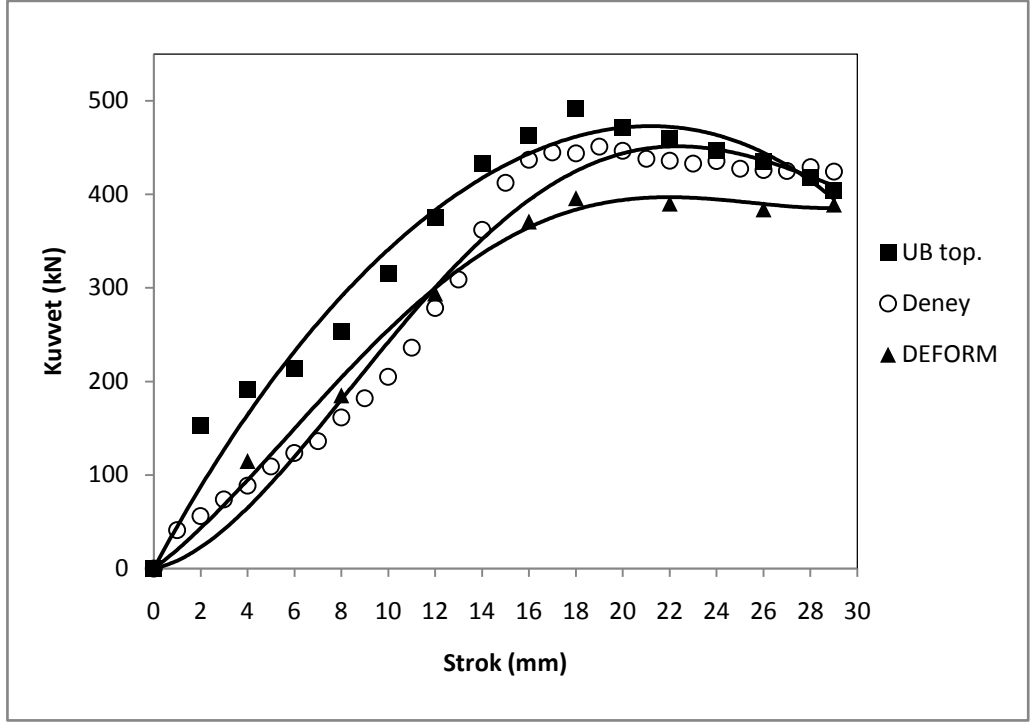
Şekil 7.9. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişi ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı



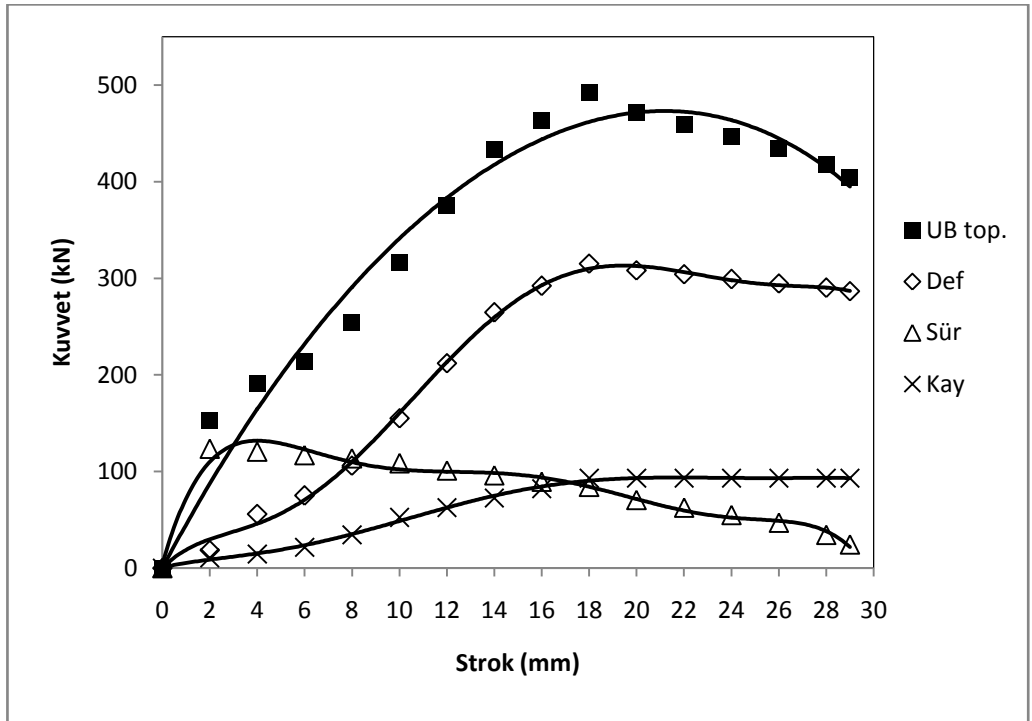
Şekil 7.10. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

4 dişli cosinus geçişe sahip matris uzunluğu L=15mm. olan kalıplar için kuvvet diyagramları Şekil 7.9 ve 7.10. da görülmektedir. Maksimum yük noktasına ulaşılan kadar sonlu elemanlar çözümünün deneysel eğriyle birebir değiştiği ancak tepe noktasında ortalama %9 kadar bir fark ortaya çıkmakta ve deneyin geri kalan kısmında aynı şekilde eğilim göstermektedir. Üst sınır analizi çözümü ise maksimum yük noktasına kadar % 8 civarında bir fark yaratırken sonrasında ise %5 olarak görülmektedir.

Kuvvet bileşenlerinin detaylı olarak görüldüğü Şekil 7.10.'da, deformasyon kuvvetinin oldukça baskın olduğu göze çarpmaktadır. Maksimum yük noktası için toplam kuvvet içerisinde ortalama olarak, deformasyon kuvveti bileşeni %65, sürtünme kuvveti bileşeni %16, kayma kuvveti bileşeni ise % 19 olarak belirlenmektedir. Ancak şekillendirmenin her basamağında prosesin doğası gereği yüksek sürtünme kuvveti söz konusudur. Deformasyon kuvvetinin işlemin ilerleyen safhasında etkin bileşen olmaya başladığı görülür. Kayma bileşeni deformasyon kuvvetindeki değişime benzer olarak grafikte yer almaktadır.

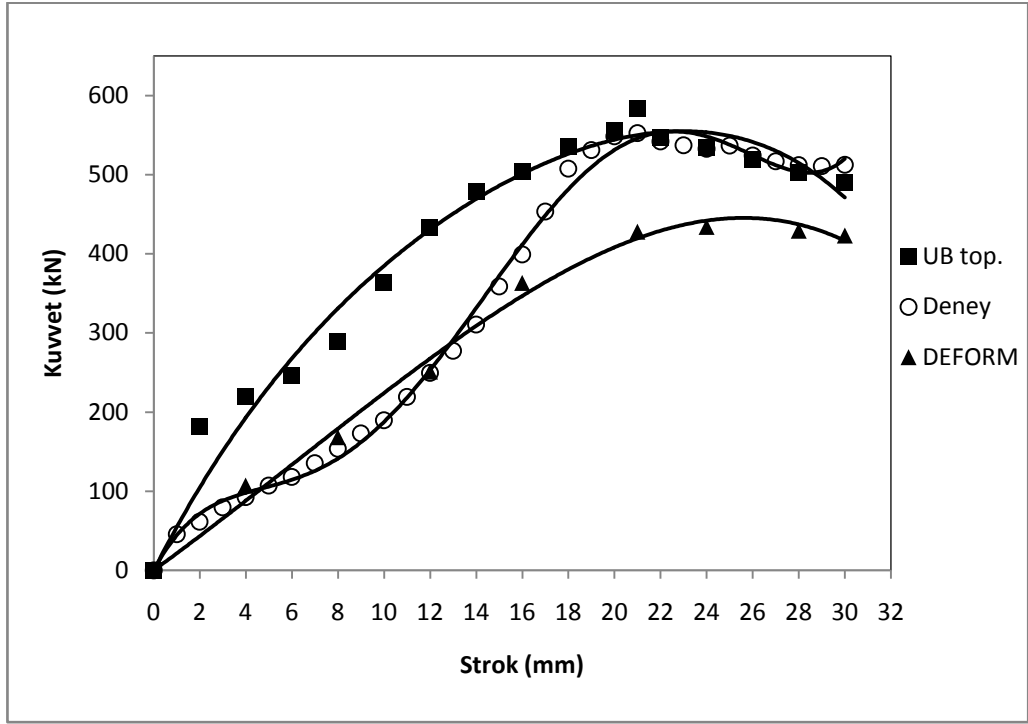


Şekil 7.11. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=20mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

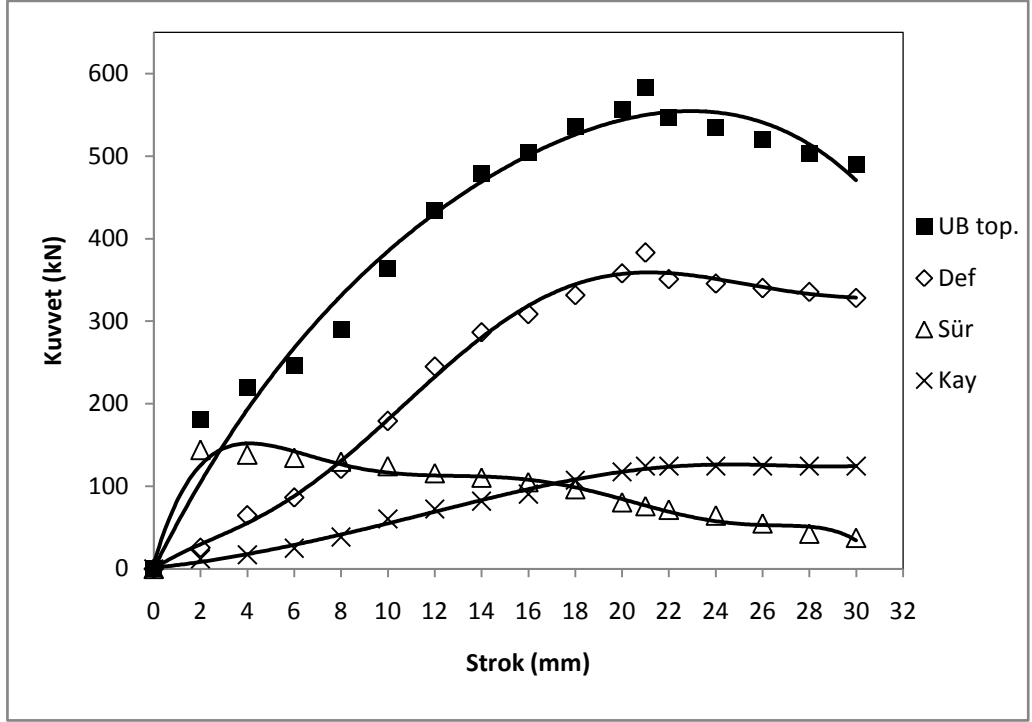


Şekil 7.12. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=20mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Şekil 7.12. de cosinus geçişe sahip matrisin uzunluğunun 5mm. artmasıyla sürtünme kuvveti %21 artmaktadır, matris uzunluğu 25m. olduğunda, 15mm. matris uzunluğuna sahip kalıplara göre sürtünme kuvveti %44 artış göstermektedir. Kayma için harcanan kuvvet ise 15mm. ile 25mm. kalıp uzunluğu arasında %55 artış göstermektedir. Deformasyon kuvvetindeki değişim ise %39 bir artış göstermektedir.



Şekil 7.13. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=25mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

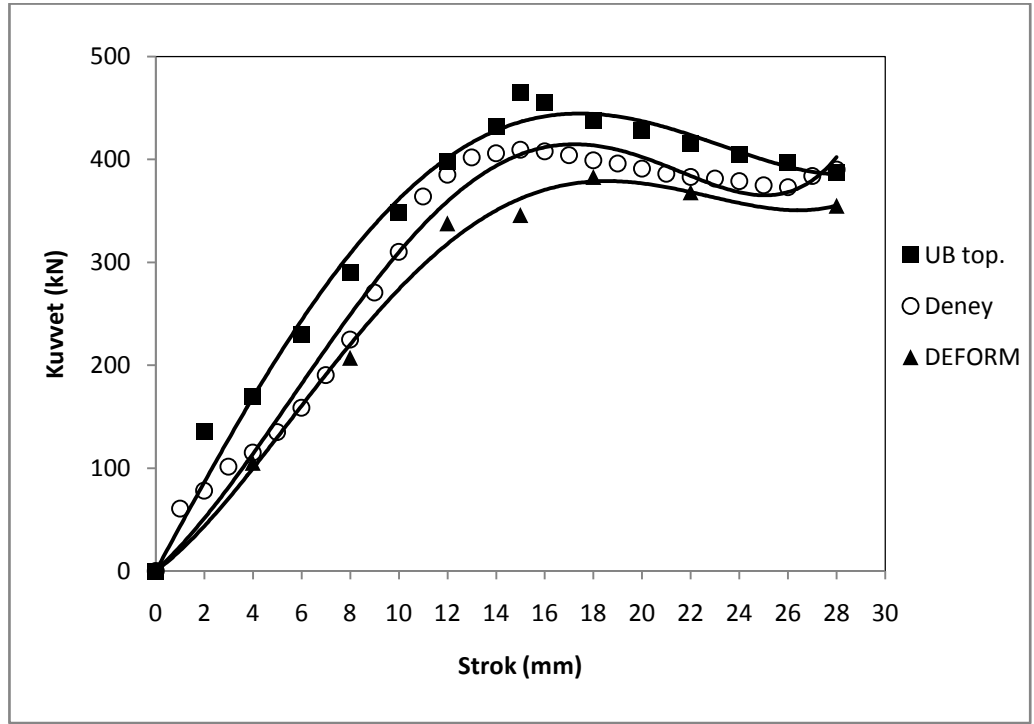


Şekil 7.14. 4 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=25mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Deneyel kuvvet eğrisi ile üst sınır analizi eğrisi maksimum yük noktasına kadar bütün kalıp uzunluklarında %15 civarında bir fark ile deneyel eğriyi takip ederken, maksimum yük noktasından sonra %5-6 oranına yaklaşmaktadır. DEFORM eğrisi ise maksimum yük noktasına kadar %3 civarındayken, maksimum yük noktasında bu değerden %20lere çıkmaktadır.

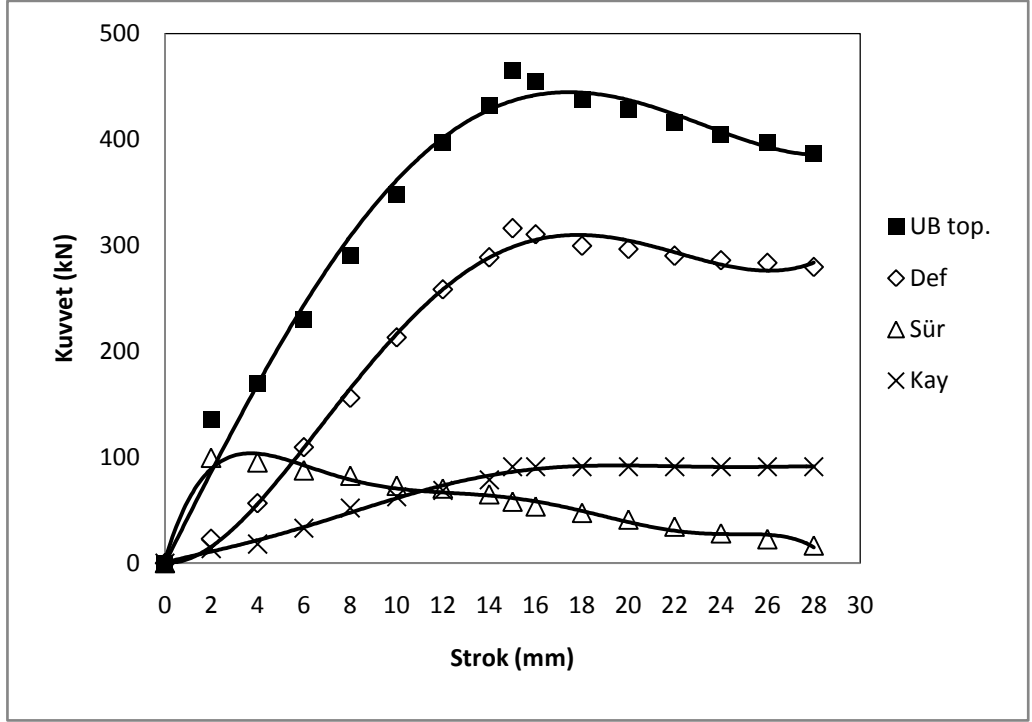
7.2.1.3. 6 Dişli Taper Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

6 dişli parçaların taper geçişli profile sahip kalıpların matris uzunluğu 15, 20 ve 25 mm. uzunlukları için deneysel, üst sınır analizi ve sonlu elemanı analizi sonuçları ve bunlara ek olarak üst sınır analizi kuvvet bileşenleri verilmektedir.



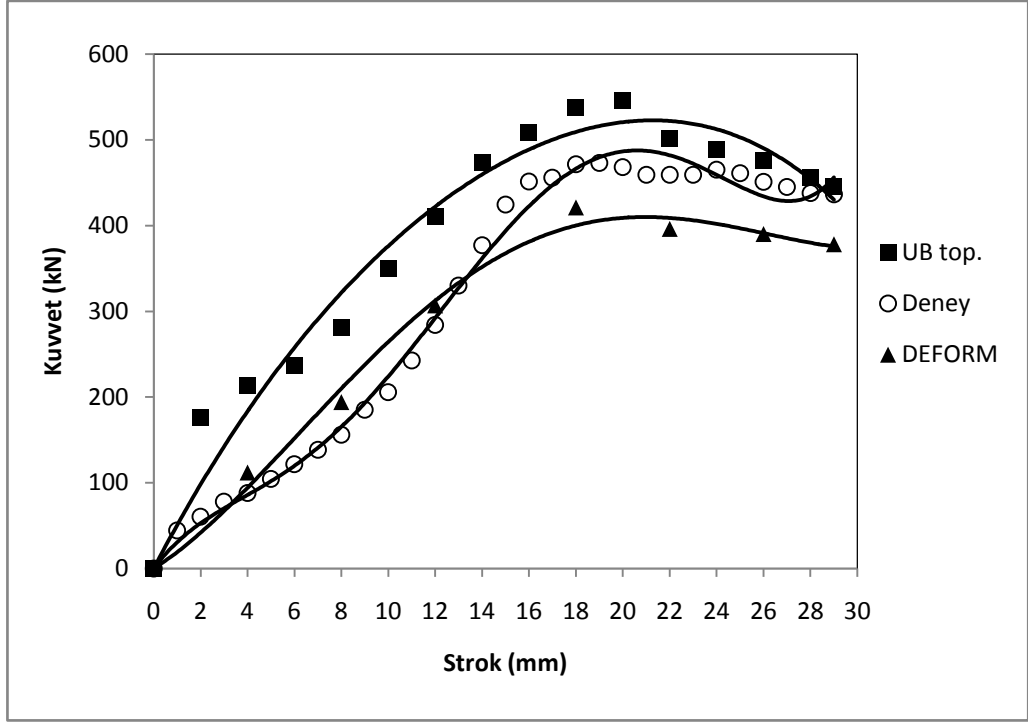
Şekil 7.15. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

Üst sınır analizi çözümleri deneysel verilerle maksimum yük noktasında %11 daha yüksek bir değer vermektedir. Sonlu elemanlar çözümünü veren DEFORM 3D sonuçları ise deneysel sonuçlardan daha düşük kuvvet değerinde ve yine %12 kadar sapma göstermektedir.



Şekil 7.16. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

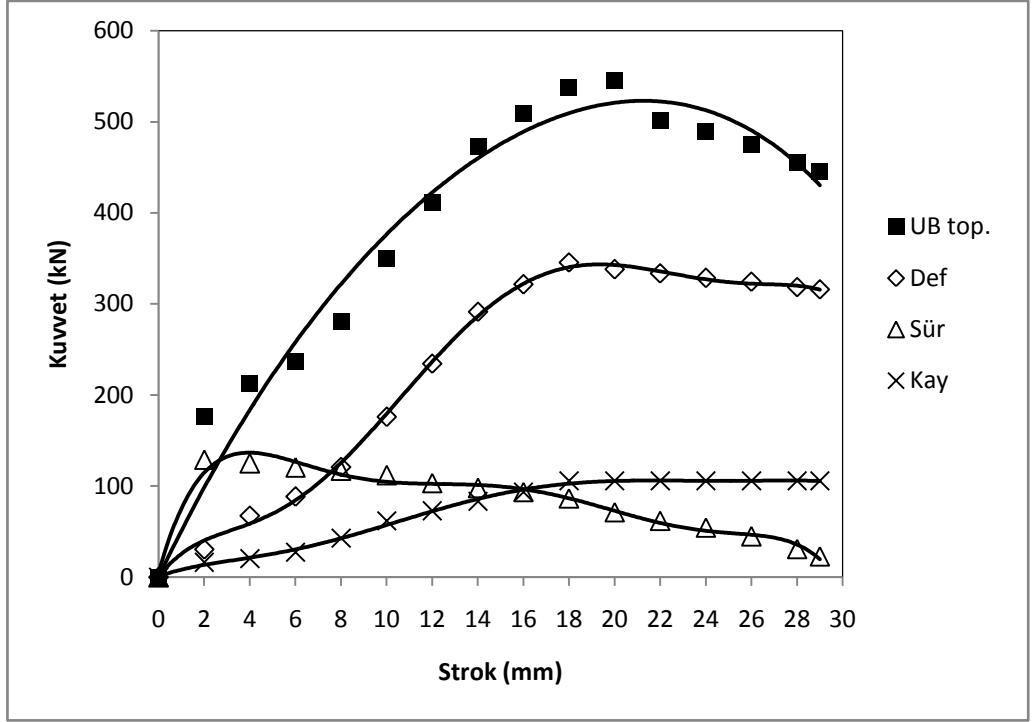
Üst sınır analizi kuvvet bileşenlerine maksimum yük noktası için bakıldığında toplam kuvvet değerinin %65sini deformasyon kuvveti, %13 sürtünme kuvveti ve %22 kayma bileşeni olarak görülmektedir. Bu değişimin geneli ise Şekil 7.16.'da detaylı olarak verilmektedir.



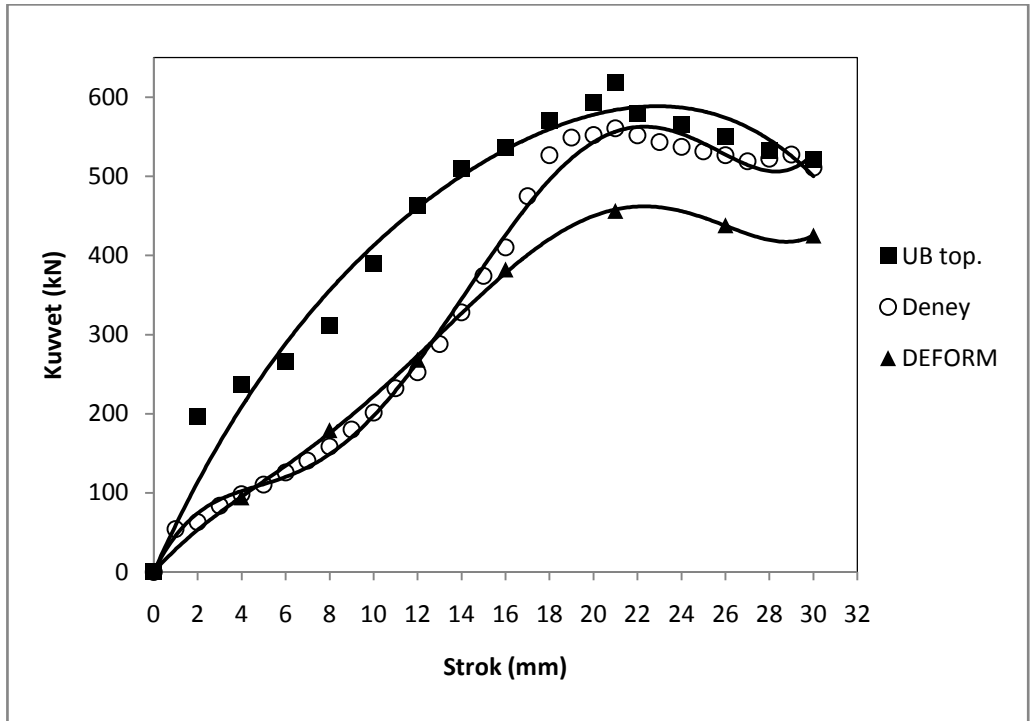
Şekil 7.17. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=20mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı

Deneysel verilerin maksimum yük noktasında üst sınır analizi ve DEFORM sonuçları ile karşılaştırılması yapıldığında matris uzunluğunun 15mm. olduğu duruma benzer bir değişim gözlenmektedir. Deneysel değerleri ile farklar benzer şekilde üst sınırı analizi %12 daha yüksek, sonlu elemanlar çözümünü veren DEFORM yazılım sonuçları ise deneysel sonuçlardan daha düşük kuvvet değerinde ve yine %13 kadar sapma göstermektedir. Kalıp uzunluğunun 25 mm. olmasıyla bu oranlar üst sınır için %12, DEFORM için ise %14 olmaktadır.

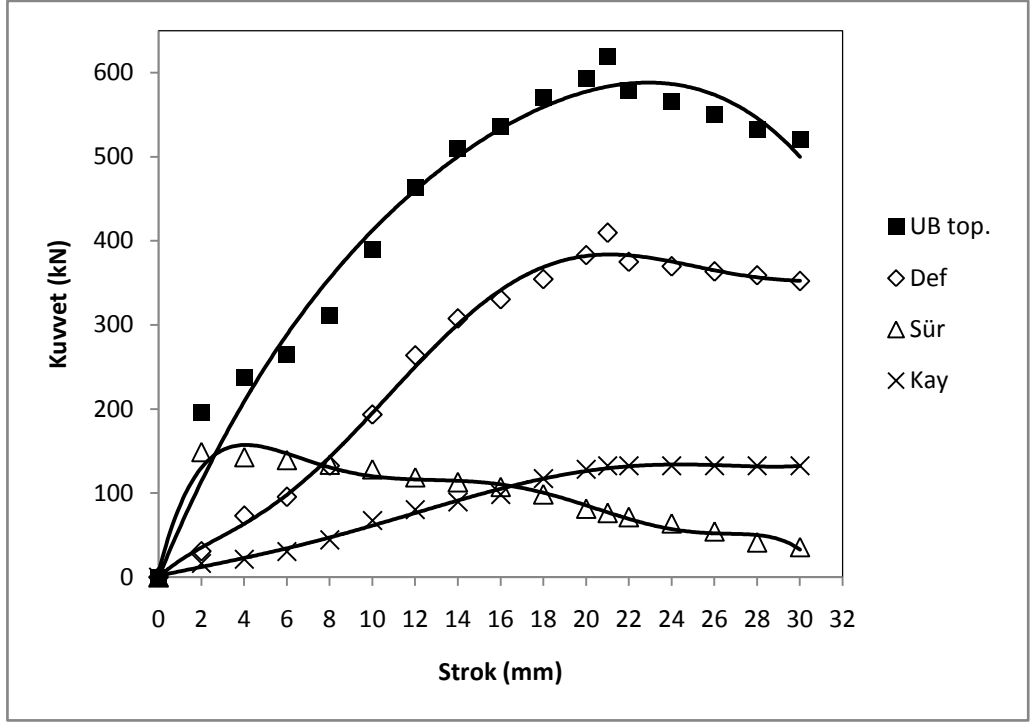
Maksimum kuvvet noktası için matris boyunun artışı sürtünme kuvvetinin %49, kayma kuvveti %45 ve deformasyon kuvveti ise %30 artmaktadır.



Şekil 7.18. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=20mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri



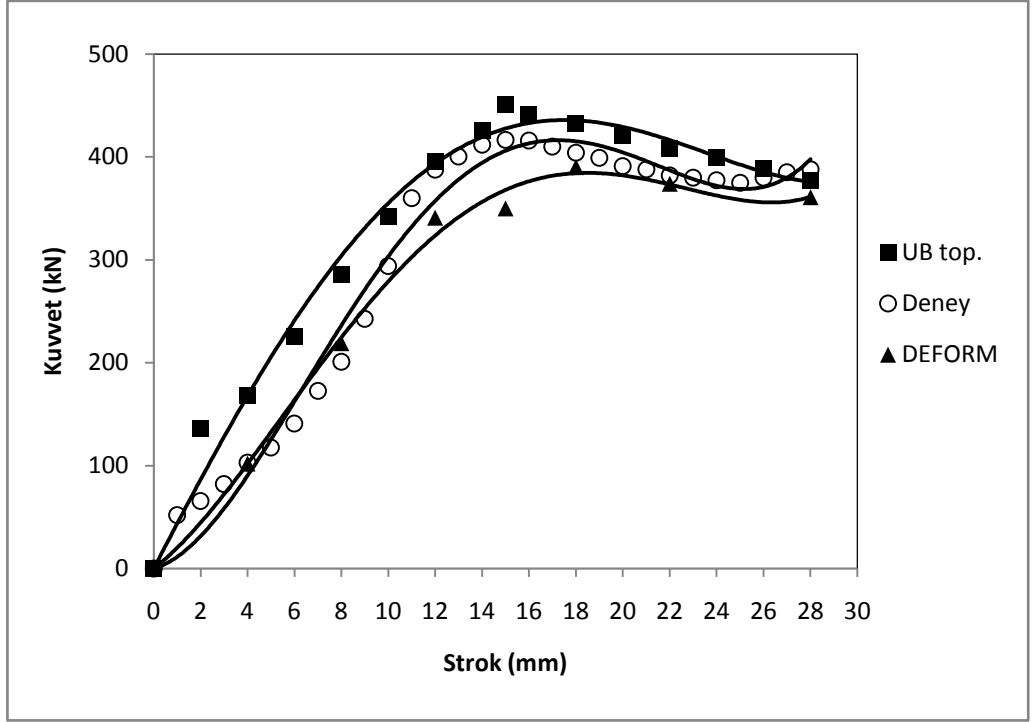
Şekil 7.19. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=25mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strook diyagramı



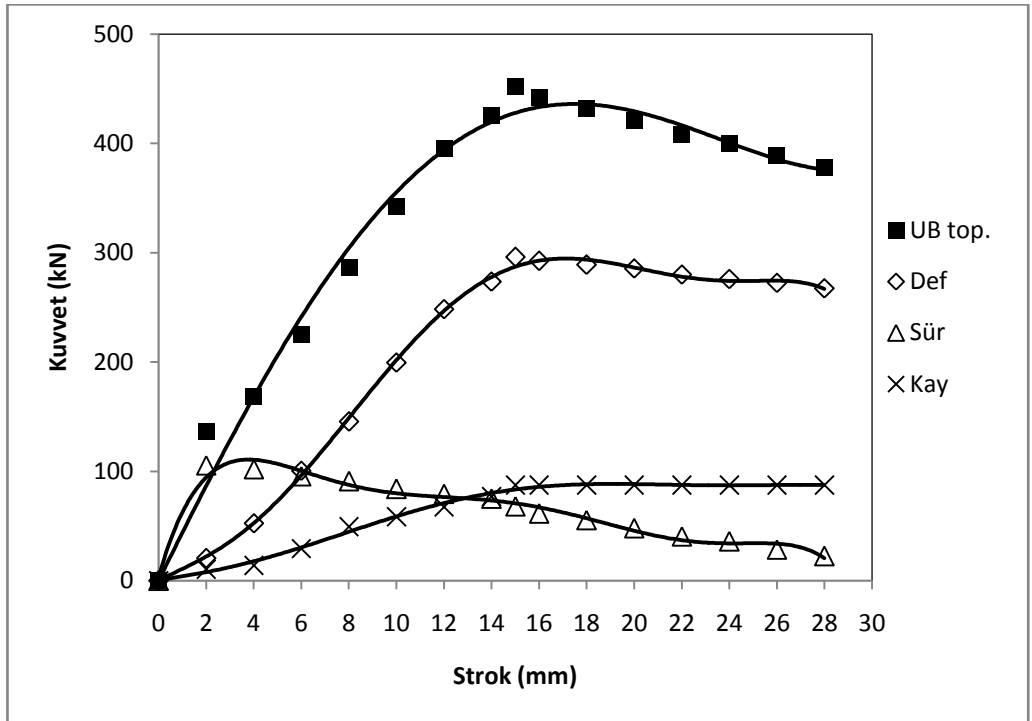
Şekil 7.20. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda taper geçişli ve L=25mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

7.2.1.4. 6 Dişli Cosinus Profil Ekstrüzyon Matrisleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

6 dişli ürünlerin ileri ekstrüzyon yöntemiyle cosinus profile sahip kalıplarla yapılan deneylerin sonuçlarının teorik sonuçlarla karşılaştırmalı grafikleri 15,20 ve 25mm. uzunluğundaki kalıplar için verilmiştir. Bunlara ek olarak üst sınır analizi kuvvet bileşenleri de grafik olarak sunulmaktadır.



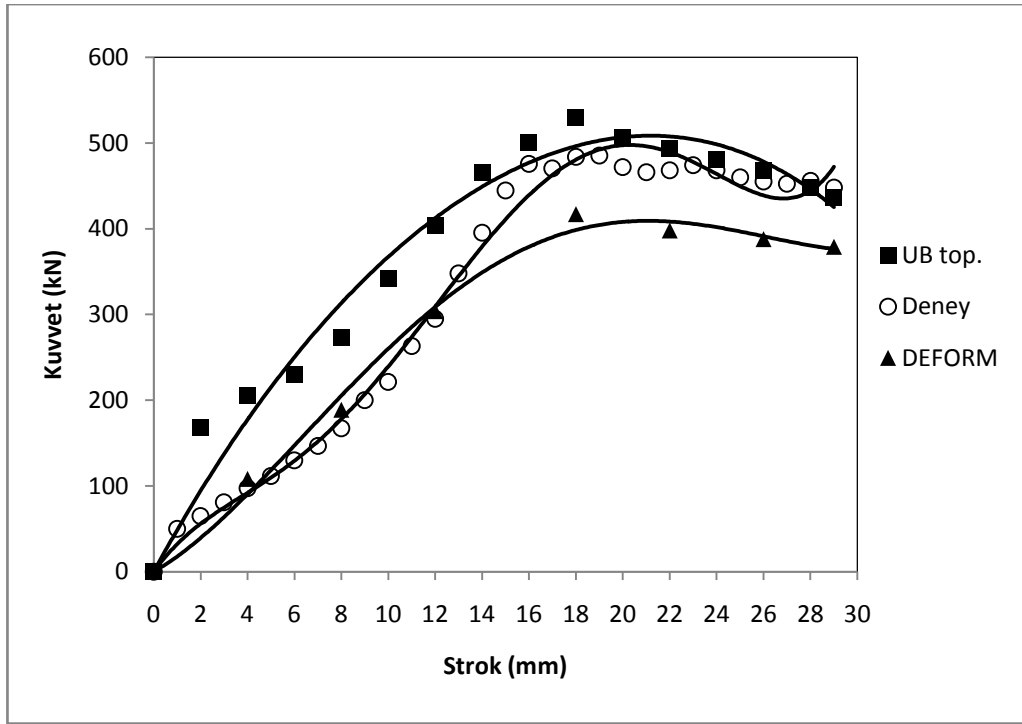
Şekil 7.21. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı



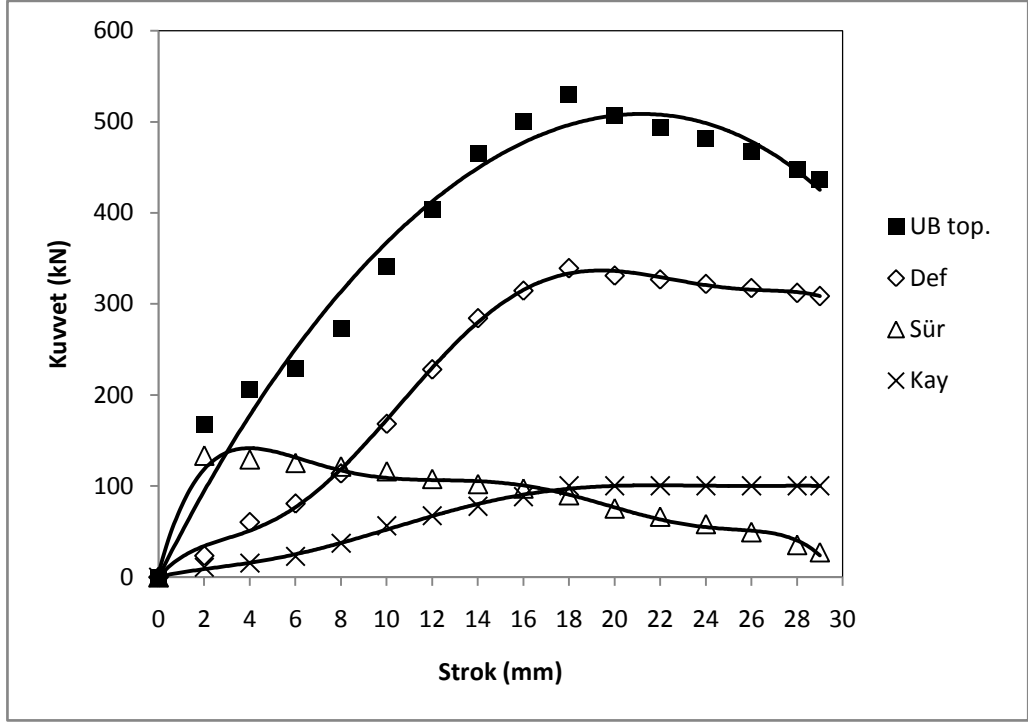
Şekil 7.22. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=15mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Deneysel kuvvet değerleri ile sonlu elemanlar ve üst sınır analizi sonuçlarının karşılaştırıldığı Şekil 7.21-23-25’de ki grafiklerden Şekil7.21 ve Şekil 7.23’de deneysel eğriyle uyumlu ve yakın seyreden bir üst sınır analizi eğrisi göze çarpmaktadır. Matris uzunluğunun 15 ve 20mm olduğu bu grafiklerde deneylerle üst sınır çözümleri arasındaki fark %11 ve %14 kadardır. Matris uzunluğu 25 mm. olduğunda ise bu fark deneyin başlangıcında ve hemen sonrasında % 19 civarındayken maksimum noktadan sonra ise aradaki fark kapanmakta ve deneysel değerlere yaklaşmaktadır. Genel olarak maksimum yük noktasından sonra deneyler ile üst sınır değerleri arasındaki fark %7-11 arasında değişmektedir.

Sonlu elemanlar çözümleri deneysel verilerden bütün matris uzunluklarında daha düşük değerler vermektedirler. Maksimum yük noktası üzerinden değerlendirildiğinde matris uzunluğu 15mm.den 25mm ye değiştiğinde aradaki fark %15-%18 aralığında değişmektedir.



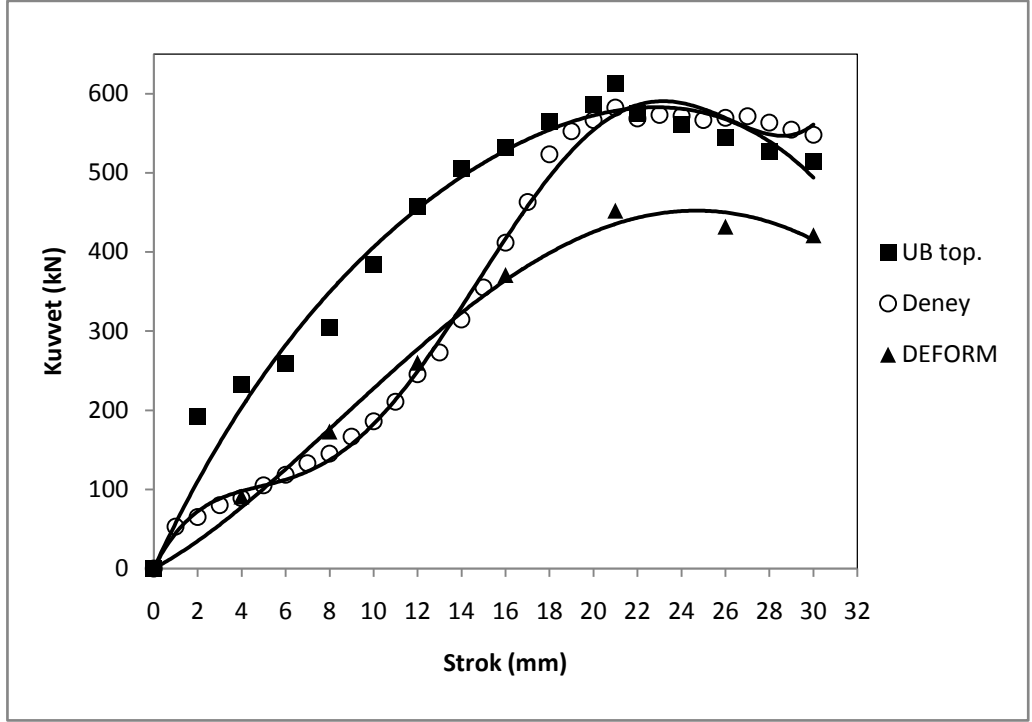
Şekil 7.23. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=20 mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı



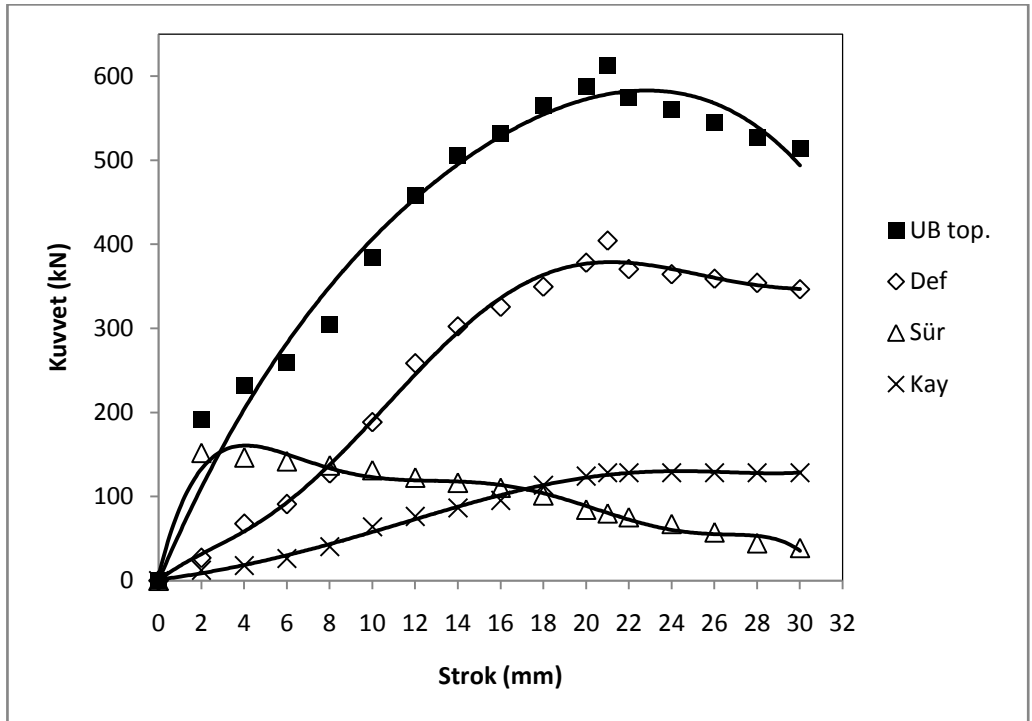
Şekil 7.24. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=20 mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

6 dişli parçaların cosinus geçişlerine ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri şekil 7.22.-24-26'da verilmektedir. Matris uzunluğu Şekil 7.22'de deformasyon kuvveti toplam kuvvetin içindeki payı % 78 iken şekil 7.24'de matris uzunluğu 25mm olduğunda %83 olmaktadır.

Kalıp uzunluğunun artmasıyla toplam şekillendirme kuvvetinin arttığı görülmektedir. Şekil 7.25'de görüldüğü gibi deneysel kuvvet eğrisinin maksimum yük noktasının 15mm matris boyuna oranlar arttığı görülmekte ve bunun nedeni matris içerisinde akış gösteren daha fazla ürün ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu etken aynı zamanda sürtünme bileşeninde artışa yol açmaktadır. Şekil 7.22 ile 7.26 karşılaştırıldığında bu artış göze çarpmaktadır. Sürtünme bileşeninde ki artış %45 civarında ciddi bir artıştır.



Şekil 7.25. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=25 mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait kuvvet-strok diyagramı



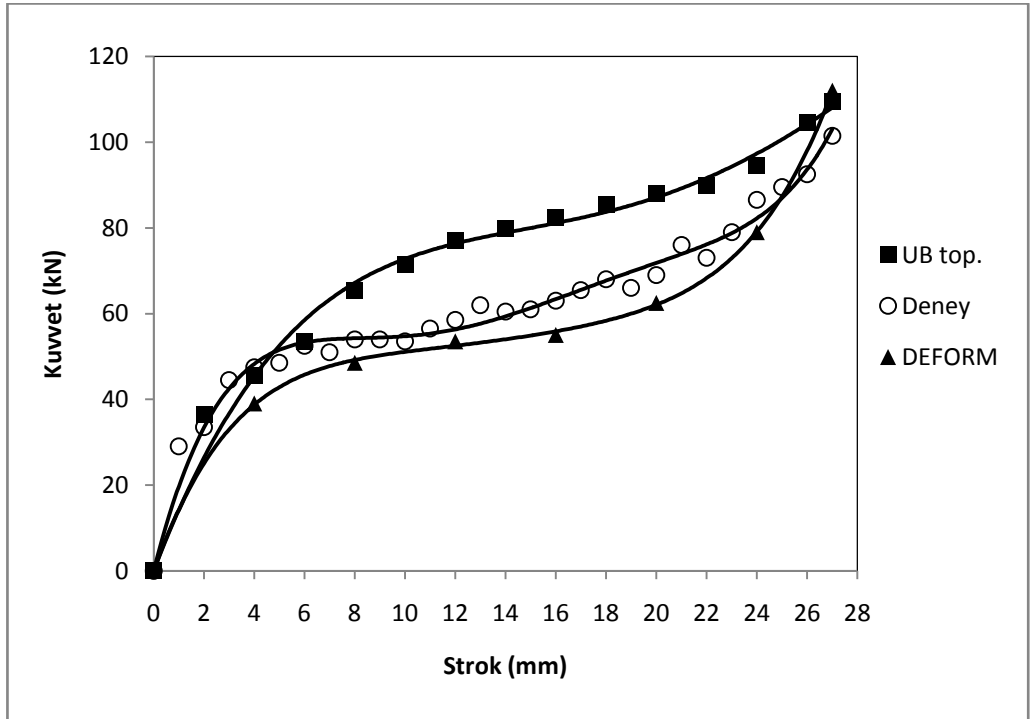
Şekil 7.26. 6 Dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişli ve L=25 mm. matris uzunluğundaki kalıplara ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

7.2.2. Radyal Ekstrüzyon Denejlerinin Sonuçları Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

Doktora çalışmasının bir diğerk bölümünde 4 ve 6 dişesahip ürünleri ileri ekstrüzyon yönteminden farklı olarak radyal ekstrüzyon yöntemi kullanarak üretmek amaçlanmıştır. Radyal ekstrüzyon yöntemi ile üretilen parçaların deneysel sonuçları, üst sınır analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak üst sınır analizinde kuvvet bileşenleri de detaylı olarak sunulmaktadır.

7.2.2.1. 4 Diş Radyal Ekstrüzyon Denejleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

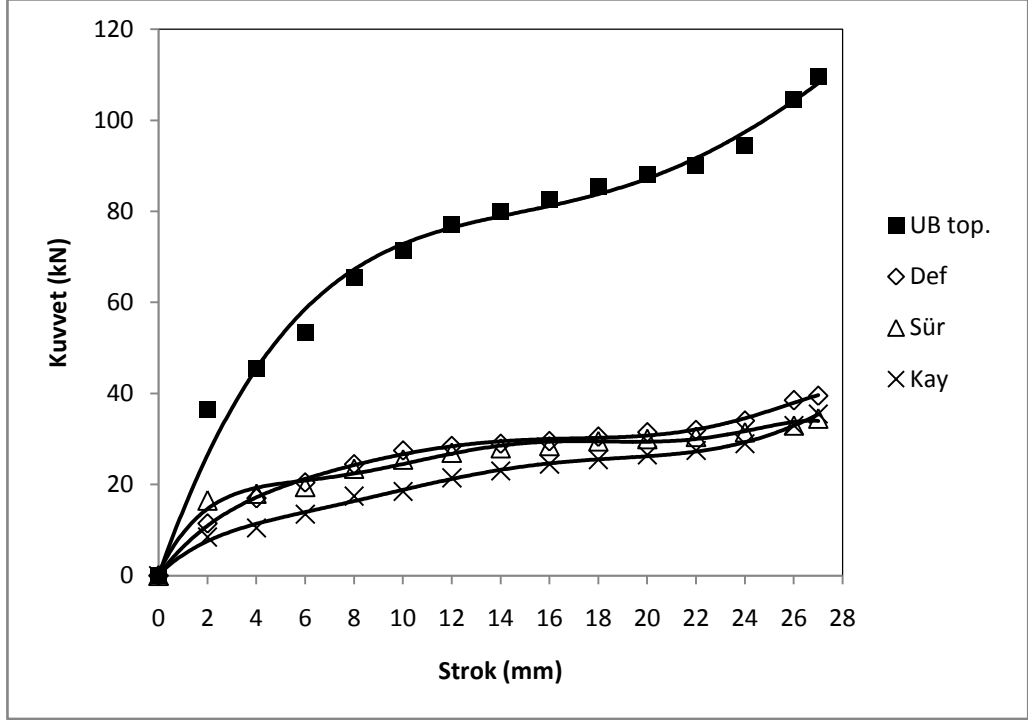
4 dişli parçaların radyal ekstrüzyonuna ait deneysel kuvvet değerklerinin üst sınır analizi ve sonlu elemanlar çözümleri ile karşılaştırmalı grafiğı Şekil 7.27.de verilmektedir.



Şekil 7.27. 4 Dişli parçaların radyal ekstrüzyonuna ait kuvvet-strok diyagramı

Şekil 7.27. deki grafikte üst sınır analizi eğrisinin deneysel eğriden yüksek sonuçlar verdiği ve bu farkın %18 civarında olduğu görülmektedir. Ancak maksimum

yük değeri için ise aradaki fark prosesin sonlarına doğru kapanarak %6'ye yakınsamaktadır. Sonlu elemanlar eğrisi ise prosesin genelinde deneysel sonuçlardan daha düşük kuvvet değerleri vermesine rağmen prosesin sonunda ulaşılan maksimum yük değeri bakımından %12 yüksek çıkmaktadır.

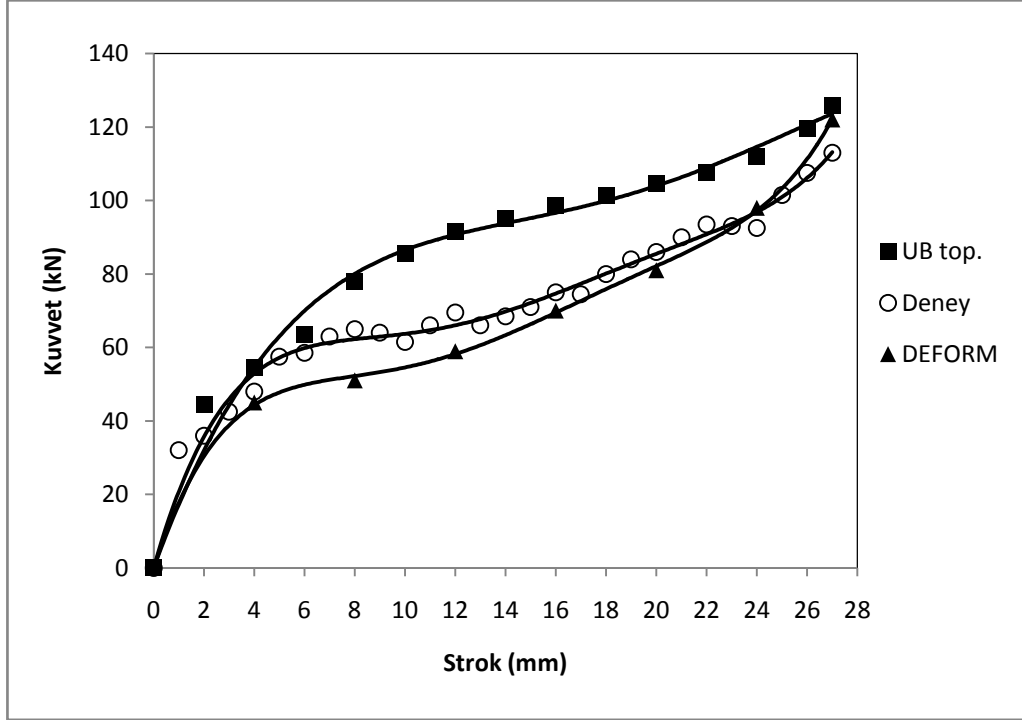


Şekil 7.28. 4 Dişli parçaların radyal ekstrüzyonuna ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Şekil 7.28 da ise üst sınır analizi eğrisinin kuvvet bileşenleri görülmektedir. Kuvvet bileşenleri birbirine yakın değerlerdedir. Bu kuvvetlerden deformasyon kuvveti için olanı diğer bileşenlere kıyasla bir miktar daha yüksektir.

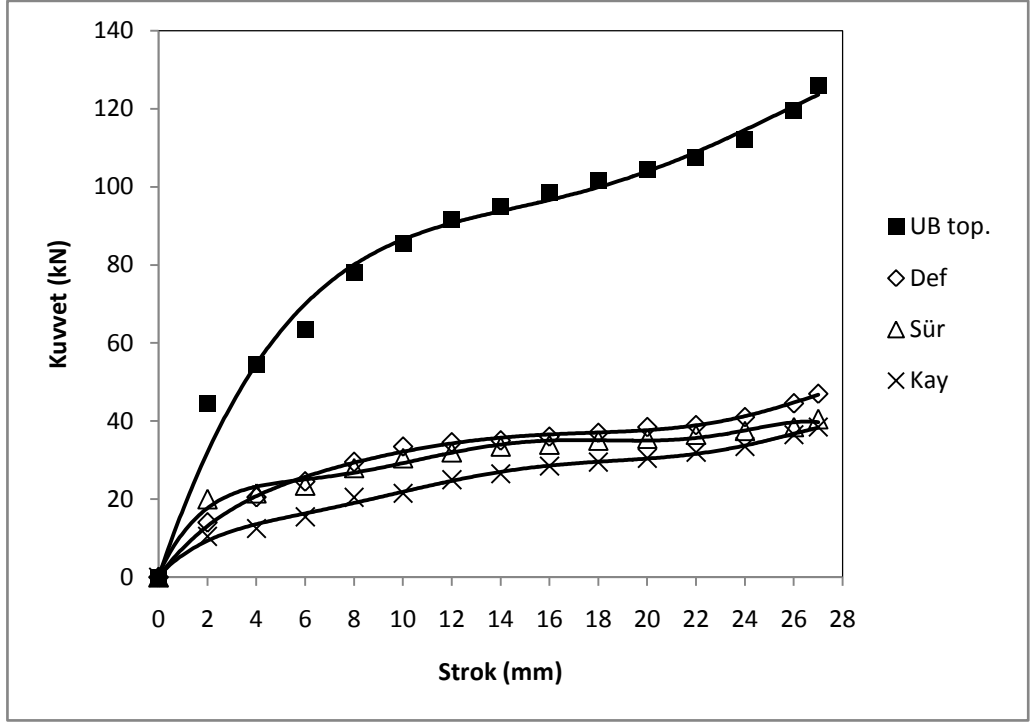
7.2.2.2. 6 Diş Radyal Ekstrüzyon Deneyleri İçin Karşılaştırmalı Kuvvet Grafikleri

6 diş sahip parçaların radyal ekstrüzyon deneylerinde ölçülen kuvvet değerleri üst sınır analizi sonuçları ve sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.29'da verilmektedir.



Şekil 7.29. 6 Dişli parçaların radyal ekstrüzyonuna ait kuvvet-strok diyagramı

Grafikte üst sınır analizi eğrisinin 4 dişli radyal ekstrüzyondaki gibi deneysel eğriden % 14 civarında bir fark ile yüksek sonuçlar vermektedir ancak maksimum yük değeri için aradaki fark işlemin sonunda maksimum kuvvet değeri bakımından %10 yüksek çıkmaktadır. Sonlu elemanlar eğrisi, deneysel sonuçlardan daha düşük kuvvet değerleri vermektedir. Deneysel eğriyle oldukça uyumlu bir seyir göstermektedir. Maksimum kuvvet değeri olarak sonlu elemanlar sonuçları deneysel sonuçlara kıyasla %8 oranında daha yüksektir.



Şekil 7.30. 6 Dişli parçaların radyal ekstrüzyonuna ait üst sınır analizi kuvvet bileşenleri

Şekil 7.30'da 6 dişli parçaların radyal ekstrüzyon prosesine uygulanan üst sınır analizinde toplam kuvveti oluşturan bileşenler verilmektedir. Bileşenlerin toplam kuvvete etkileri genelde eşit oranlarda görülmektedir. Deformasyon kuvvetinin yine etkin bileşen olduğu göze çarpmaktadır. Sürtünme bileşeni kayma bileşenine kıyasla daha etkin olup aralarında % 5 kadar bir fark olduğu görülür.

7.3. DENEYSEL VE SAYISAL ÇÖZÜM KUVVET SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRMASI

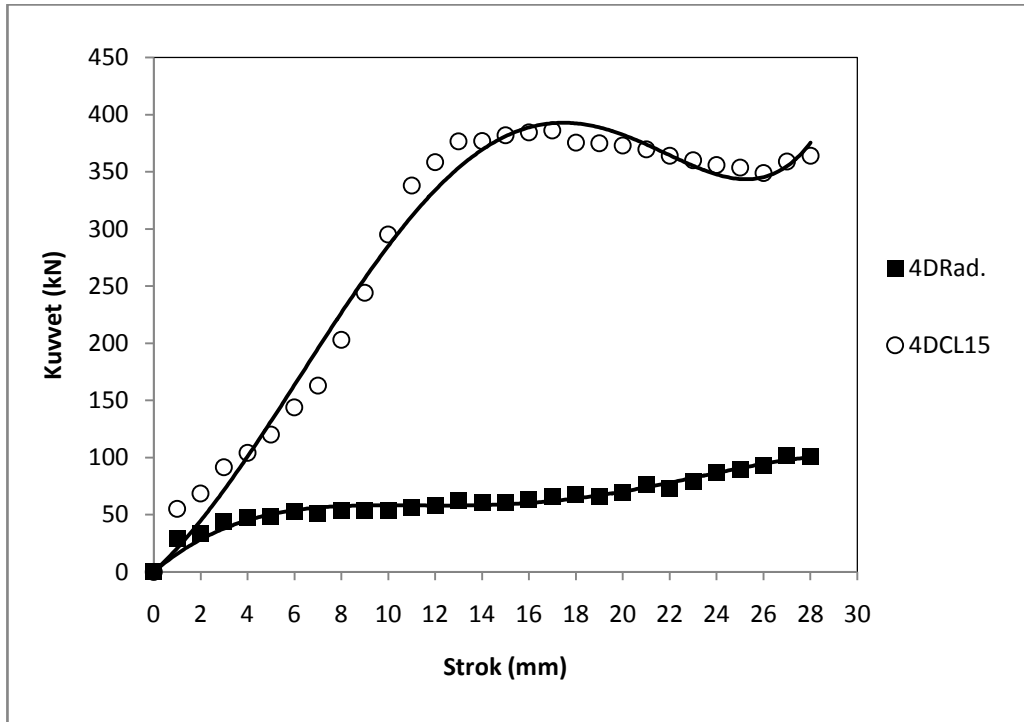
Deneysel sonuçlar arasından seçilen deney setinin en yüksek kuvvet değeri, üst sınır analizi sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarında ulaşılan maksimum yük değerleri bakımından karşılaştırmalı şekilde Tablo 7.2. 'de verilmektedir.

Tablo 7.2. Deneysel, Üst Sınır Analizi ve Deform Sonlu Elemanlar maksimum kuvvet değerleri

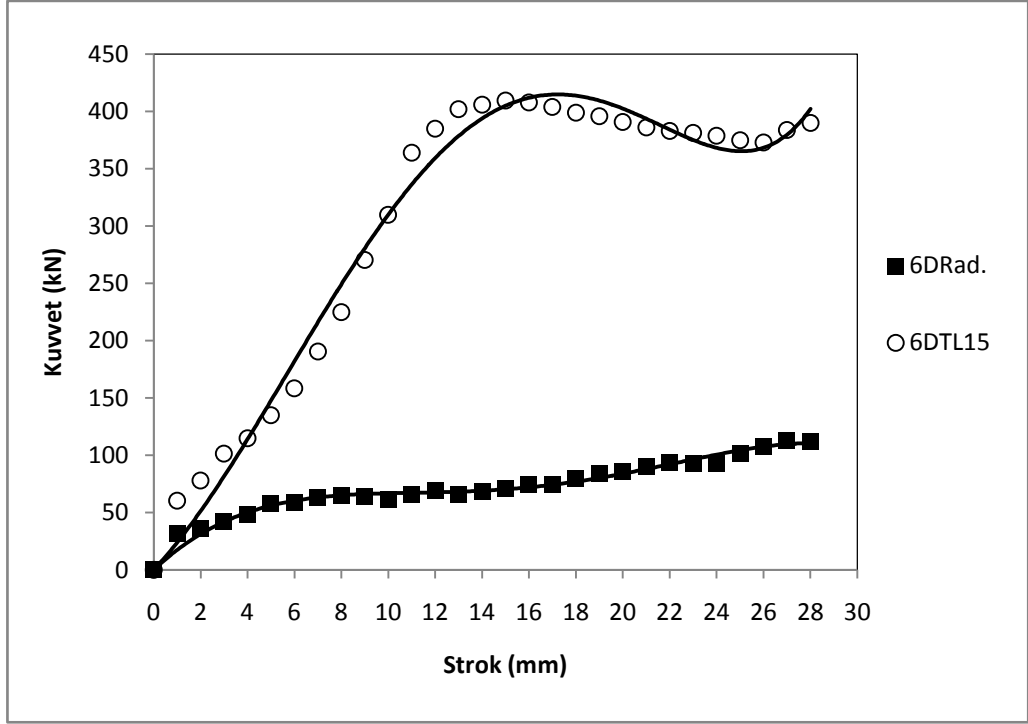
	Ekstrüzyon (kN)		<i>Deney</i>	Üst Sınır	Deform
	4Diş	L15	<i>Cos</i>	376,41	416,5
<i>Tap</i>			379,22	426,5	360
L20		<i>Cos</i>	440,73	492	393
		<i>Tap</i>	451,30	497,5	403
L25		<i>Cos</i>	541,89	583,5	445
		<i>Tap</i>	530,61	587,5	444
	Ekstrüzyon (kN)		<i>Deney</i>	Üst Sınır	Deform
	6Diş	L15	<i>Cos</i>	409,87	451,5
<i>Tap</i>			406,23	465	384
L20		<i>Cos</i>	476,62	530,5	419
		<i>Tap</i>	475,46	541	422
L25		<i>Cos</i>	544,71	613	452
		<i>Tap</i>	547,54	618,5	456
4Diş	Radyal Ekstrüzyon (Enjeksiyon Yığılma) (kN)		<i>Deney</i>	Üst Sınır	Deform
			96,62	109,5	112
6Diş	Radyal Ekstrüzyon (Enjeksiyon Yığılma) (kN)		<i>Deney</i>	Üst Sınır	Deform
			113,45	126	122

Önerilen üst sınır analizi yönteminin kuvvet değerlerinin deneysel sonuçlardan yüksek çıktığı görülmektedir. Bu durum üst sınır analizinin temelini oluşturan önerilen kinematik olarak kabul edilebilir hız alanlarının doğruluğunu ve yöntemin geçerliliğini

ispatlamaktadır. Şekil 7.31 ve 7.32.'de aynı profile sahip dişlilerin üretiminde kullanılacak yöntemi seçmek amacıyla kuvvet değerleri üzerinden bir karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar ortaya konmuştur. İleri ekstrüzyon yönteminde hem 4 dişli hemde 6 dişli ürünler için en düşük şekillendirme kuvvetini veren kalıpların 15mm. uzunluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle ileri ekstrüzyon yöntemi sonuçları 15mm. matris uzunluğunda elde edilen kuvvet değerleri radyal ekstrüzyon kuvvet değerleri ile karşılaştırılmıştır. İleri ekstrüzyon yöntemi için; 4 dişli parçalarda cosinus geçişe sahip matrisler, 6 dişli parçalarda ise taper geçişli matrisler en düşük kuvveti verdiklerinden dolayı karşılaştırma grafiklerinde kullanılmışlardır.



Şekil 7.31. 4 Dişli parçalar için radyal ekstrüzyon-ileri ekstrüzyon deneysel kuvvet değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.32. 6 Dişli parçalar için radyal ekstrüzyon-ileri ekstrüzyon deneysel kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

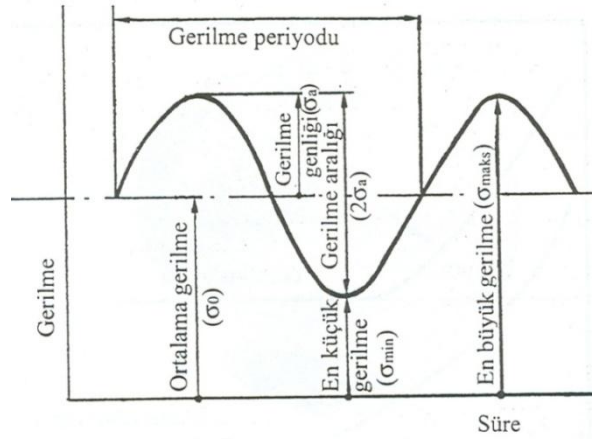
Ulaşılan kuvvet değeri olarak ileri ekstrüzyon ile radyal ekstrüzyon yöntemi arasındaki fark 4 ve 6 dişli kalıpların her ikisinde de yaklaşık olarak 3 kat kadardır. Aynı parçayı üretmek söz konusu olduğunda şekillendirme kuvveti referans olacak şekilde bir karşılaştırma yapıldığında radyal ekstrüzyon yönteminin ileri ekstrüzyon yöntemine göre oldukça üstün olduğu göze çarpmaktadır.

7.4. YORULMA DENEYLERİ VE SONUÇLARI

7.4.1.Giriş

Birçok makine parçaları ve yapı elemanları kullanılmaya esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadırlar.

En yüksek değeri statik kırılma büyüklüklerine ulaşmayan ancak zamanla değişen ve tekrarlanan bir zorlamanın, malzemede kırılmaya kadar gidebilen olumsuz etkilerine “yorulma” denir. Yorulma ilk defa 1850 - 1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem taşımıştır. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık %90'ı yorulma sonucunda olmaktadır.

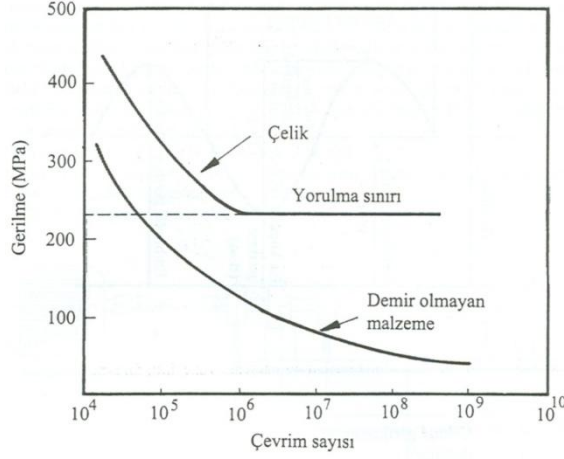


Şekil 7.33.Gerilme-Süre yorulma yükü değişim grafiği

σ_0 = ortalama gerilme değeri; σ_{maks} = üst gerilme değeri; σ_{min} = alt gerilme değeri; σ_a = gerilme genliği; N: çevrim sayısı (N) ile gösterilir.

Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan, malzemenin maruz kaldığı yorulma yüklerince ne zaman hasara uğrayacağı kestirilmesi mümkün değildir. Geçmişte birçok kazalara neden olan malzeme yorulması konusu üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış olup, halen de bu tür çalışmalar devam etmektedir. Bununla beraber yorulma, çok değişik etkenlerin rol oynadığı karmaşık bir olaydır ve bu nedenle henüz tam olarak

anlaşılamamıştır. Parça büyüklüğü, yüzey kalitesi artışı, tane boyutu azalması, korozyon içeren ortamlar, oksit gibi metalurjik faktörler ve sıcaklık artışı, artık gerilmeler, gerilme yığılmaları ve gerilme frekansının azalmasıyla yorulma dayanımı azalmaktadır.



Şekil 7.34. Çelik ve demir olmayan malzemelerin tipik Wöhler Diyagramı

Yorulma eğrilerinden iki önemli büyüklük belirlenir. Bunlardan birisi yorulma ömrü, diğeri ise yorulma dayanımıdır. Yorulma ömrü; belirli büyüklükte tekrarlı gerilme etkileyen bir malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısını belirtir. Yorulma dayanımı ise; malzemenin belirli bir çevrim sayısı sonunda kırılmasına neden olan gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır.

7.4.2. Deneylerin Amacı

Dişliler genel çalışma koşulları itibariyle değişken zorlamalara maruz kaldıklarından dolayı devamlı olarak yorulma etkisi altında görevlerini yerine getirmektedirler. Yapılan tezde üretilen dişli benzeri parçaların yorulmaya karşı dayanımının belirlenmesi amacıyla tek yönlü eğilme yorulması işlemi sonucunda diş etkileyen ve dişin dayanımını tayin eden bir deney tipi kullanılmıştır. Yapılan deney, üretim yöntemi, hammadde geometrisi ve malzeme gibi parametrelerin ürünün dayanımına olan etkilerinin belirlenmesi açısından son derece uygundur.

Normal dişli deneyleri oldukça pahalı olmasının yanında beraberinde de zaman kayıpları meydana getirmektedir. Fazla yükleme halinde dişli kırılabileceği gibi, eksenlemenin düzgün yapılmaması ise sonuçların yanlış analiz edilmesine sebep olmaktadır. Eğilme yorulması deneylerinin yapılışında dönme hareketinin olmaması için aparatlar yapılarak sadece tek tip bir yüklemenin olduğu bir deney şartı oluşturulması sağlanmıştır. Bu deneylerde radyal ekstrüzyon yöntemi ile üretilen parçalar ile ekstrüzyon yöntemi ile elde edilen dişli benzeri parçaların yorulma dayanımlarının belirlenmesine çalışılmıştır. İlerideki bölümlerde ise eğilme yorulması deneyinin detayları anlatılacaktır.

7.4.3. Test Makinası Ve Aparatları

Yapılan tez çalışmasındaki eğilme yorulması deneyleri Şekil 7.45.'de görülen 0.5-50 Hz frekans aralığında çalışan 50 kN kapasiteli INSTRON 8501 Üniversal Test Cihazı'nda yapılmıştır. Yorulma deneyleri yapılırken iki farklı üst aparat ile bir alt aparat yaptırılmıştır. Şekil 7.49.'da fotoğrafları görülen yorulma deney aparatları 1.2344 DIN normlu sıcak iş takım çeliğinden imal edilerek $1040^{\circ}C$ ' de yağda su verilmiş ve $550^{\circ}C$ 'de temperlenmiş olup, yaklaşık olarak $52R_c$ sertlik değerinde olacak şekilde işlenmiştir.



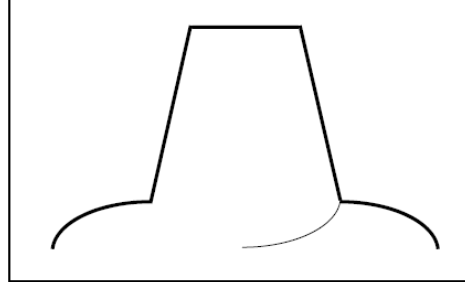
Şekil 7.35. Instron 8501 Universal Test Cihazı

7.4.4. Yükleme Noktası

Yorulma deneyleri yukarıda açıklanan cihaz ve aparatlarla, yük, belirlenen maksimum yük noktasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 4.22’de belirtilen eğilme yorulması aparatında, deney tezgahı tarafından tek dişe uygulanan kuvvet $F_t = F/2$ olacak şekilde belirlenmiştir. Bu yolla diş, bu kuvvet etkisinde dibinden eğilmeye ve kırılmaya zorlanacaktır. Dişli bir ucu mesnetli bir çubuk olarak kabul edilebileceği şekil 7. 50.’de gösterilmektedir

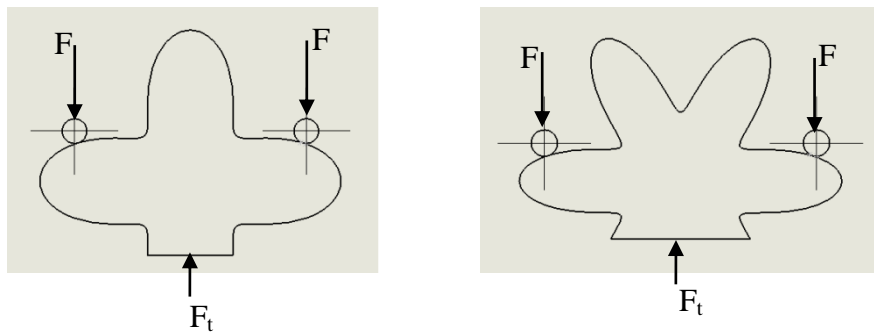
Elde edilen deney sonuçlarının sağlıklı bir biçimde yorumlanması açısından dişli benzeri taslakların dişlerinin yükleme yeri oldukça önemlidir. Üstelik gerilme, diş dibindeki kritik bir noktada olduğundan bu durum yükleme noktasının yerinin doğru olarak tespiti ile yakından ilgilidir (Shigley, J. E., 1977). Klasik eğilme yorulması sonucu diş dibi kırılması Şekil 7.36.’da 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 rastgele 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.

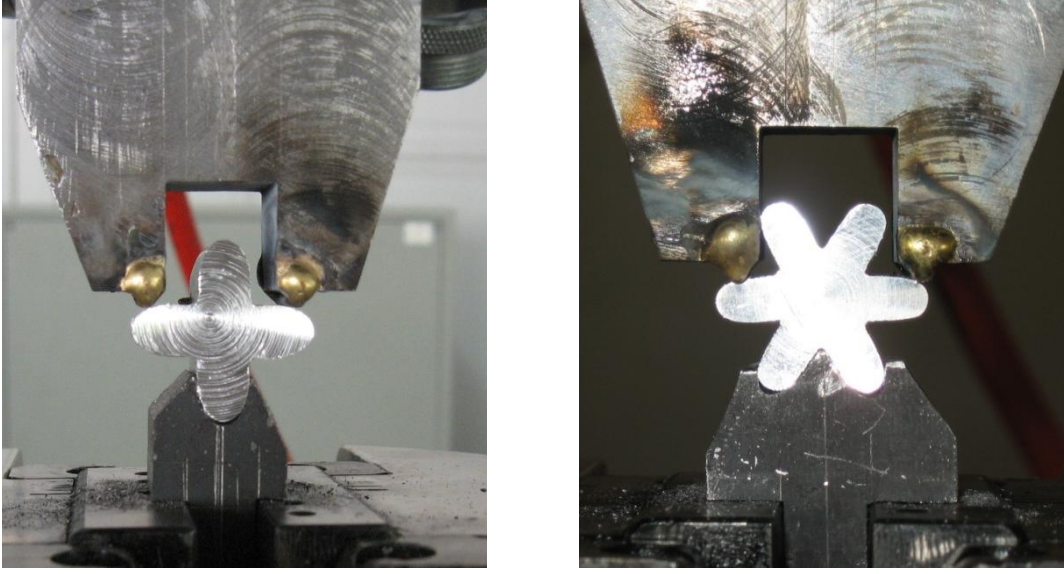


Şekil 7.36. Klasik eğilme yorulması sonucu diş dibi kırılması

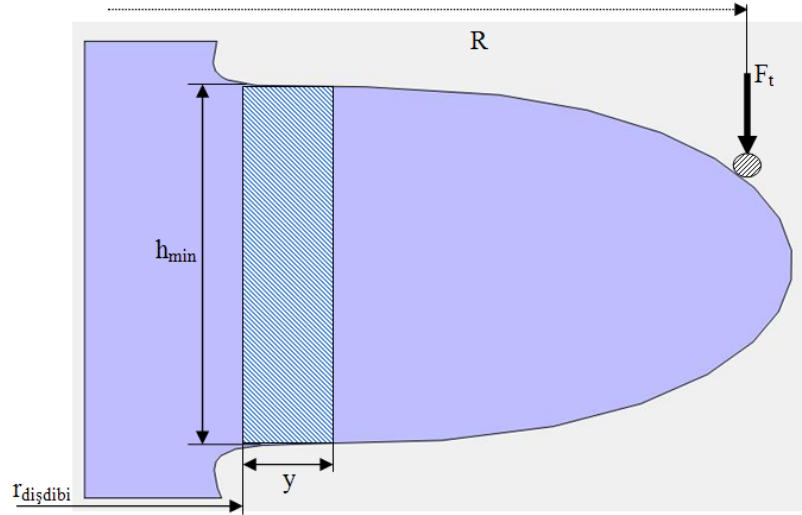
Üst taraftan 4 sahip dişlilere basma kuvveti uygulayan aparatta aralarında 18,2 mm. ve 6 dişe sahip dişliler için 20 mm. mesafe olan iki adet kanal açılarak 2 mm. çapında iki adet pim bu kanallara yapıştırılmıştır. Söz konusu uzaklık diş dibi yorulmasının tayini için kuvvetin uygulandığı, şekil 7.39.'da şematik yükleme hali görülen 2R uzaklığıdır. Bu şekilde dişliler üzerine kuvvetin tek bir noktadan etkimesi sağlanmıştır. Şekil 7.37.'de dişe etkiyen kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 7.37. Eğilme yorulmasındaki kuvvetlerin gösterimi



Şekil 7.38. 4 ve 6 diş deney aparatının eğilme yorulması deney düzeneği



Şekil 7.39. Yükleme halinin şematik gösterimi

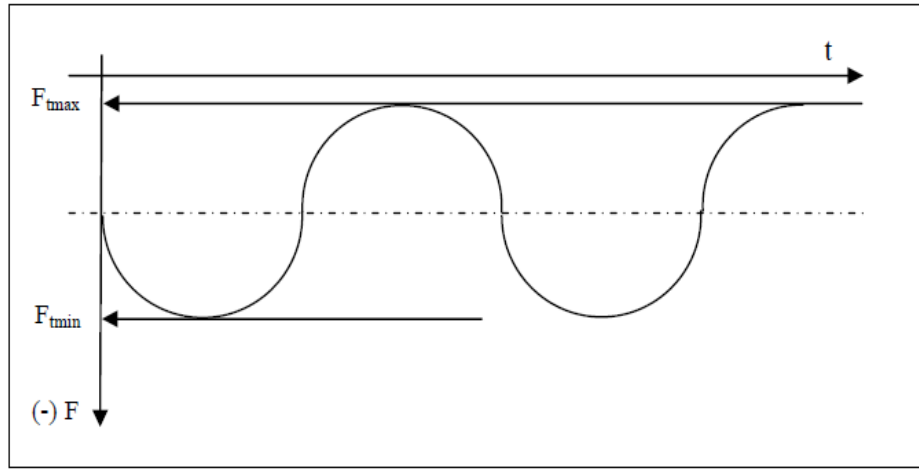
Uygulanan yük etkisinde maksimum gerilme diş dibinde oluşacaktır. Eğilme gerilmesini, $W_{eğ}$ eğilme mukavemet değeri ve $W_{eğ} = I/c$ olmak üzere;

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

Parça geometrisine bağlı olarak ; $M_{eğ} = 5.133 * F_t$ olarak belirlenmiştir.

$$W_{eğ} = \frac{I}{c} = \frac{yh^2}{6} \quad \text{olarak hesaplanabilir.}$$

Böylece eğilme gerilmesi $\sigma_{eğ} = (30 * F_t)/yh^2_{min}$ olacak şekilde belirlenebilir. Deneylerin mümkün olduğunca hassas olması için her deneyden önce h_{min} ve y değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Önceden belirlenmiş gerilme değerleri eşitlikte yerine konarak, uygulanacak kuvvet değerleri belirlenmiştir. Şekil 7.50'de yorulmada kullanılan değişkenlerin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 7.40. Uygulanan yükleme çevrimi

Bir ön basma gerilmesine tabii tutulan numunelerde σ_{ort} ile σ_g arasındaki fark sabit kalacak şekilde $\tilde{\sigma} = \sigma_{ort} \mp \sigma_g$ ifadesi gereği eşdeğer gerilme uygulanmıştır. Amaçlanan yükleme hali, parçanın her bir çevrimde basma yükü ve yüksüz halde olması iken, parçaların yükleme aparatlarından kurtulmaması amacıyla $F_{max} = -0.125kN$ bir yük etkiyecek şekilde her çevrimde maksimum yük olmasına karar verilmiştir. Böylece cihaza bağlı olan numune F_{max} ve F_{min} kuvvet değerlerinde daima basma kuvvetine maruz kalarak dişlerin devamlı olarak yükleme altında kalması sağlanmaktadır.

7.4.5. Yorulma Deneylerinin Sonuçları

Yorulma deneyleri Instron cihazı ve aparatlarla belirlenen noktaya uygulanan yükleme değeri ile yapılmıştır. İki farklı diş sayısına sahip radyal ekstrüzyon ürünleri ile ileri ekstrüzyonun cosinus ve taper matrislerinin 15, 20, 25 uzunlukları için yorulma deneyleri yapılmıştır. Radyal ekstrüzyon parçalarının yorulma deneyleri yapılırken sap kısımları kesilmiştir.

Radyal ekstrüzyon yöntemi ve direk ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş dişli benzeri parçalar arasında eğilme yorulması üzerinden aynı profile sahip ürün elde ederken hangi üretim yönteminin daha verimli olacağını tespiti amacıyla bir dizi yorulma testi yapılmıştır.

Bir malzemenin belirli bir çevrim sayısı sonunda kırılmasına neden olan gerilme değeri yorulma dayanımı olarak tanımlanmaktadır.

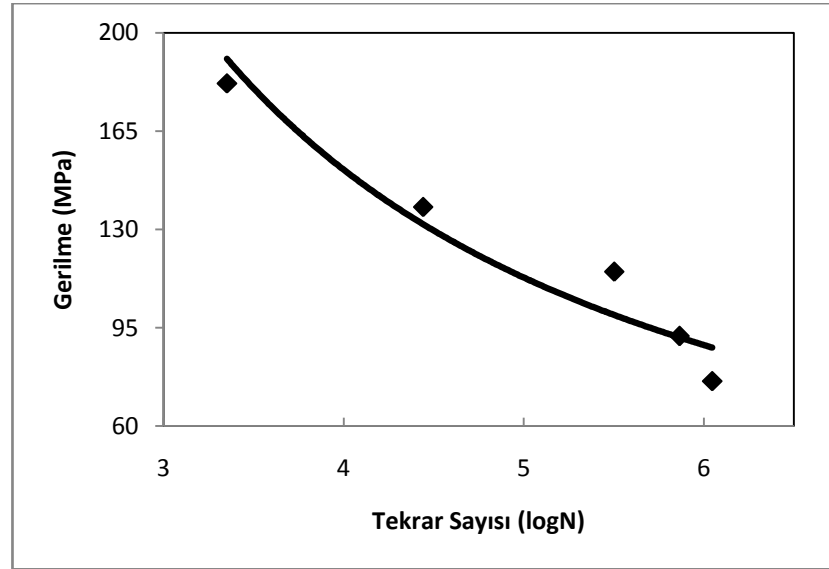
Yapılan eğilme yorulması deneylerinde farklı iki yöntemle üretilmiş olan aynı profile ve diş sayısına sahip dişli benzeri parçaların malzemenin çekme gerilmesi değeri ile çekme gerilmesi değerinin yarısı civarındaki yorulma dayanımı değerleri arasında kalan değişik gerilmelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. En düşük yorulma dayanımı değerinin çekme gerilmesi (σ_c) değerinin yarısına karşılık gelen değerlerin altına düşürülmemesinin sebebi, çevrim sayısını düşük tutmaktır. Böylelikle her iki yöntemin aynı geometri ve diş sayılarındaki numuneler üzerinde yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı diş sayısına sahip ve farklı kalıplarla elde edilen 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 ve bununla birlikte uygulanan kuvvet değerleri Tablo 7.3. de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ileri ekstrüzyon yönteminde en yüksek yorulma dayanımını veren kalıp uzunluğu ile radyal ekstrüzyon ürünleri ile karşılaştırılmıştır.

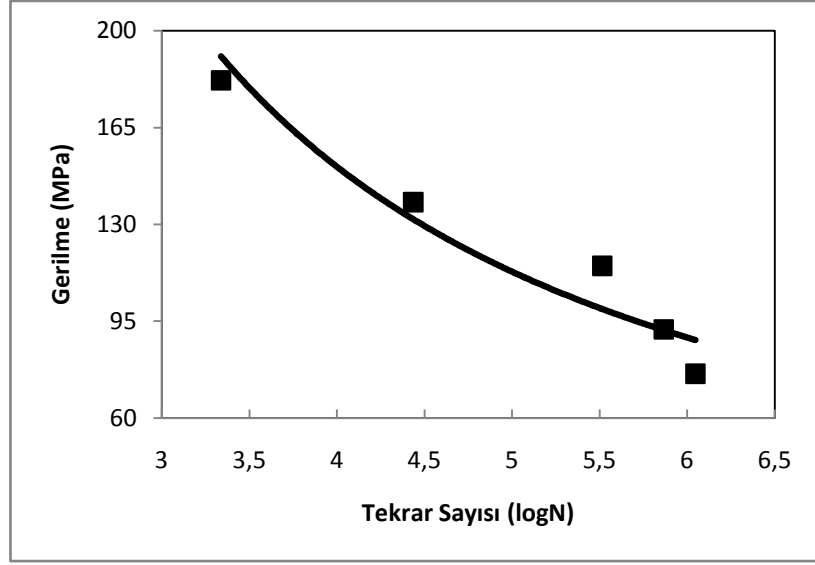
Tablo 7.3. Yorulma Deneylerinde kullanılan gerilme ve kuvvet değerleri

<i>4 Diş Ekstrüzyon</i>		<i>6 Diş Ekstrüzyon</i>	
Gerilme (MPa)	Kuvvet (kN)	Gerilme (MPa)	Kuvvet (kN)
74	-1,75±1,5	76	-0,95±0,7
91	-2,125±1,875	92	-1,125±0,875
113	-2,625±2,375	115	-1,375±1,125
136	-3,125±2,875	138	-1,625±1,375
181	-4,125±3,875	182	-2,125±1,875
<i>4 Diş Radyal</i>		<i>6 Diş Radyal</i>	
91,113,136,181 ve 203,304 MPa		92,115,138,182 ve 205,307 MPa	
203	-4,625±4,375	205	-2,375±2,125
304	-6,875±6,625	307	-3,5±3,25

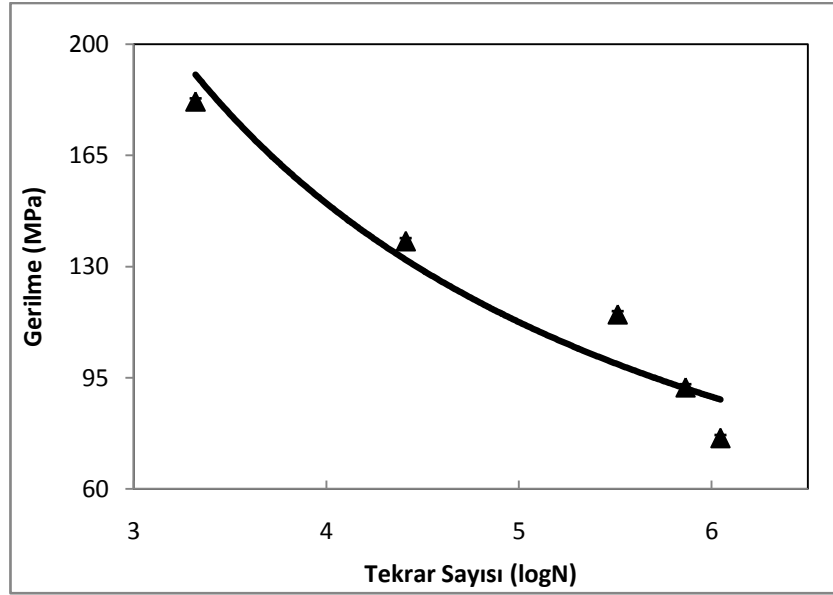
4 ve 6 dişli parçaların ileri ekstrüzyon yöntemiyle üretilen parçaların cosinus ve taper geçişli parçalar için yorulma dayanımları Şekil 7.41 ile Şekil 7.52. arasında verilmektedir.



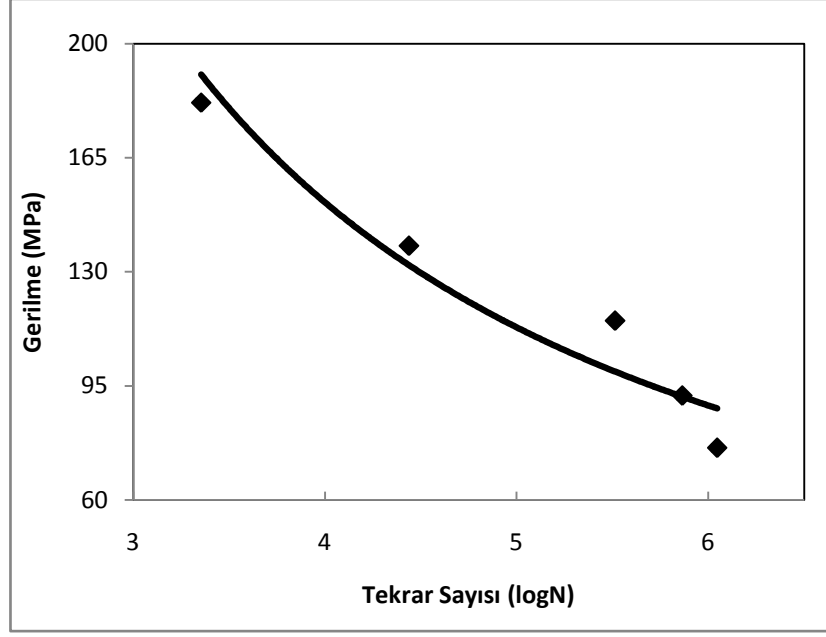
Şekil 7.41. Yorulma deneylerine tabi tutulan Cosinus geçişe sahip L=15mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



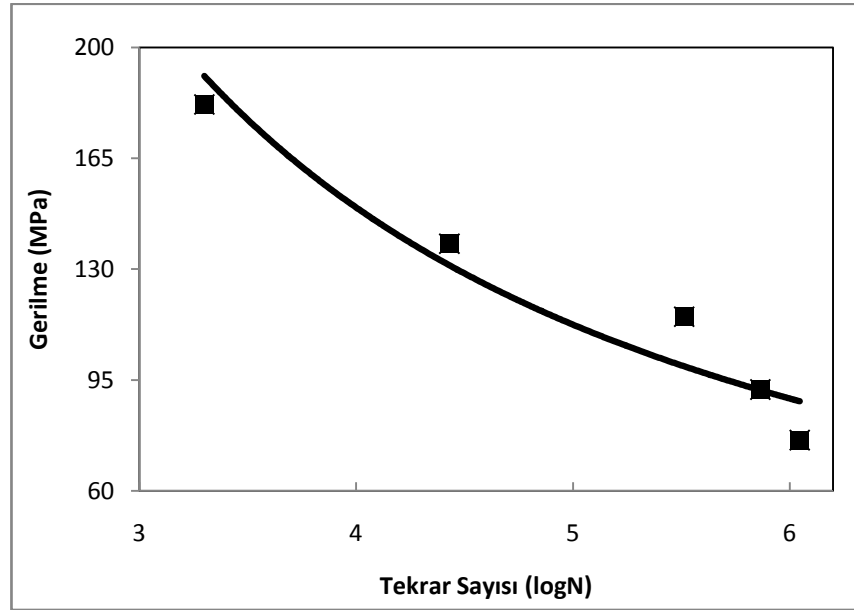
Şekil 7.42. Yorulma deneylerine tabi tutulan Cosinus geçiše sahip L=20mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



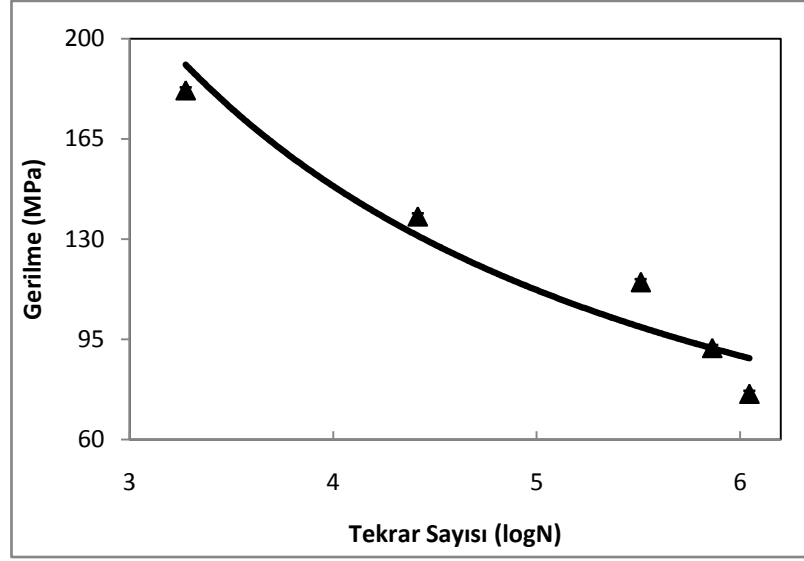
Şekil 7.43. Yorulma deneylerine tabi tutulan Cosinus geçiše sahip L=25mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



Şekil 7.44. Yorulma deneylerine tabi tutulan Taper geçişe sahip L=15mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı

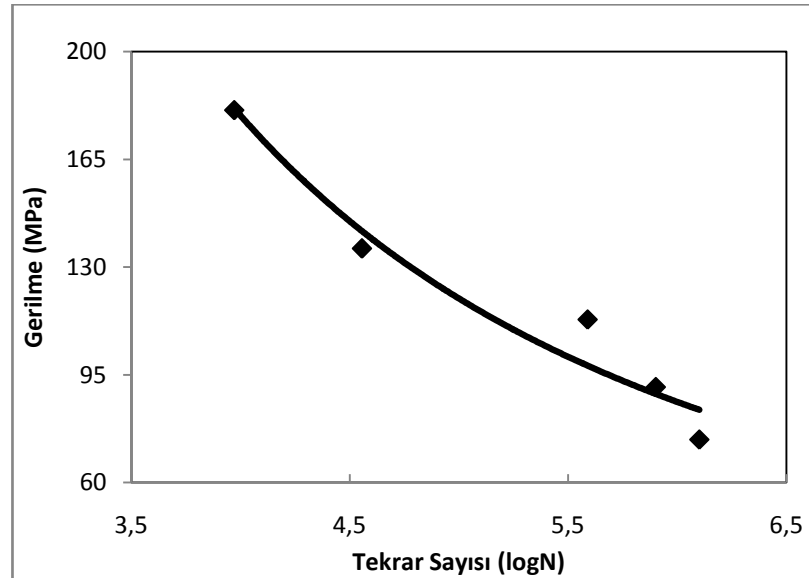


Şekil 7.45. Yorulma deneylerine tabi tutulan Taper geçişe sahip L=20mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı

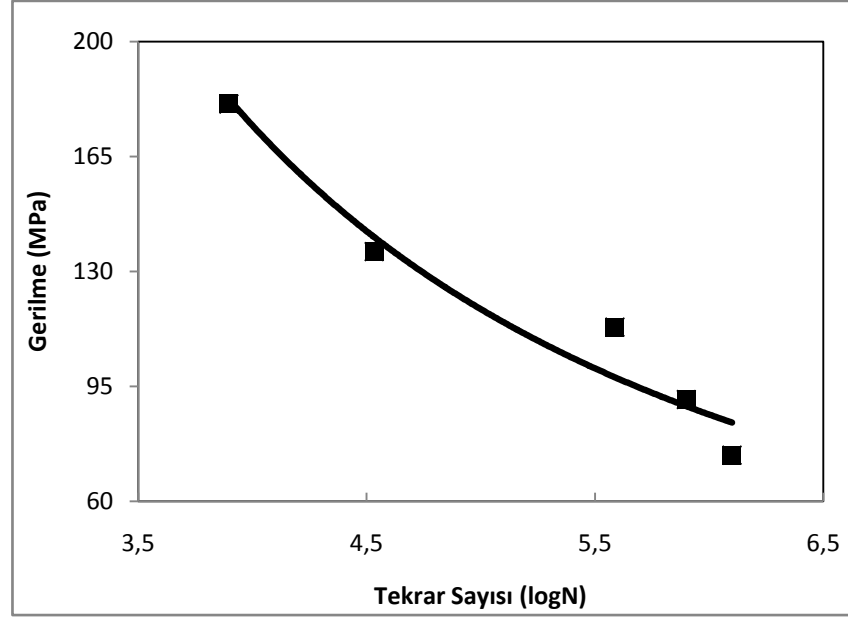


Şekil 7.46. Yorulma deneylerine tabi tutulan Taper geçişe sahip L=25mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı

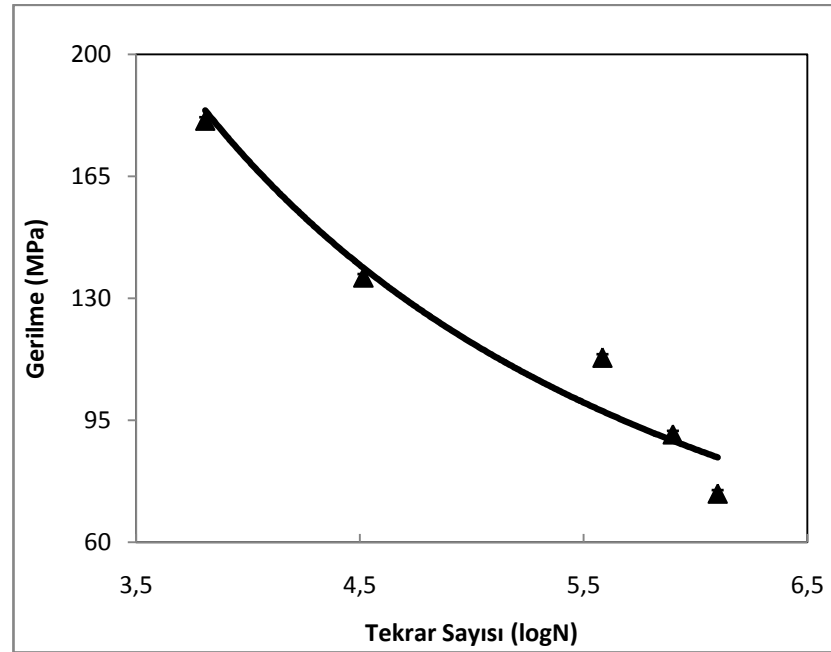
6 dişli parçalar için cosinus geçişe sahip matrislerden elde edilen ürünlerin yorulma dayanımları incelendiğinde genel olarak yorulma dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu ancak matris uzunluğunun artışıyla yorulma dayanım değerlerinin çok ufak bir düşüş yaşadığı görülmüştür. Benzer değişim taper geçişli matrislerde de gerçekleşmektedir.



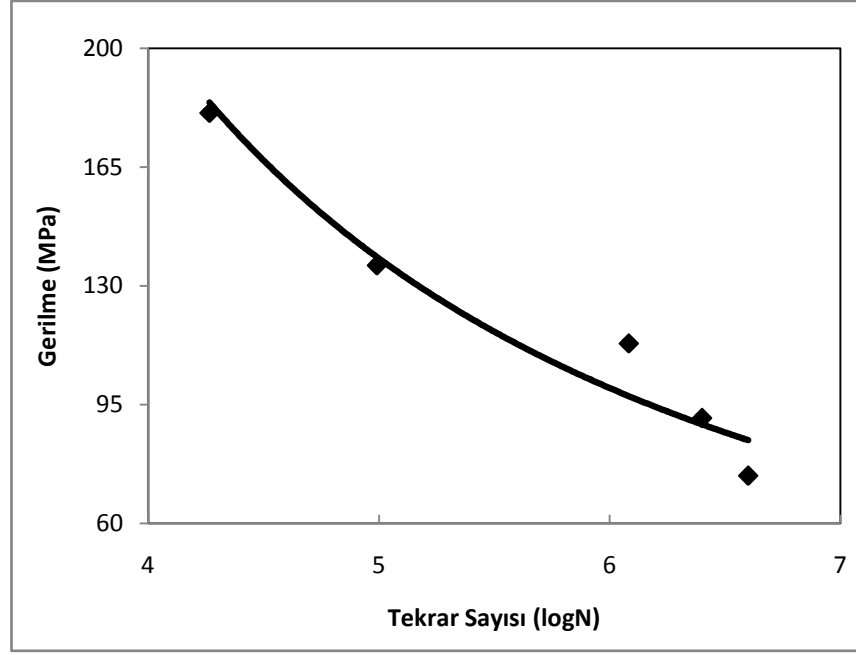
Şekil 7.47. Yorulma deneylerine tabi tutulan cosinus geçişe sahip L=15mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



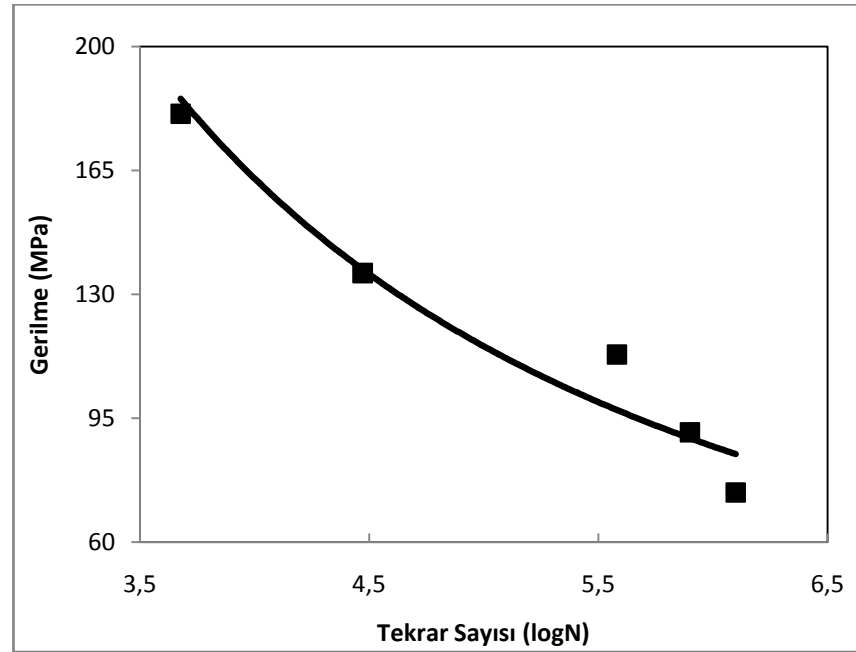
Şekil 7.48. Yorulma deneylerine tabi tutulan cosinus geçiše sahip L=20mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



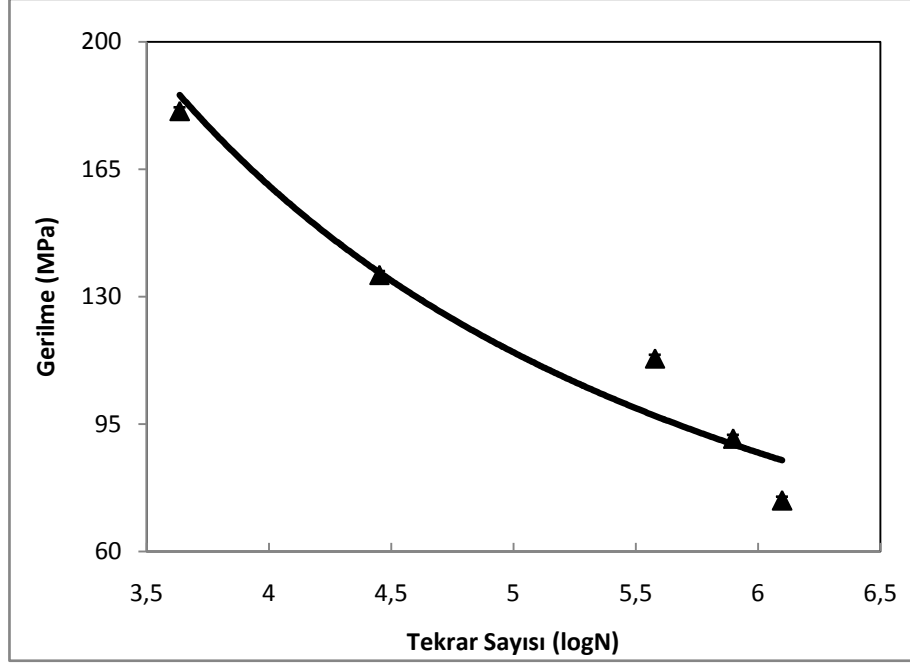
Şekil 7.49. Yorulma deneylerine tabi tutulan cosinus geçiše sahip L=25mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



Şekil 7.50. Yorulma deneylerine tabi tutulan taper geçişe sahip L=15mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



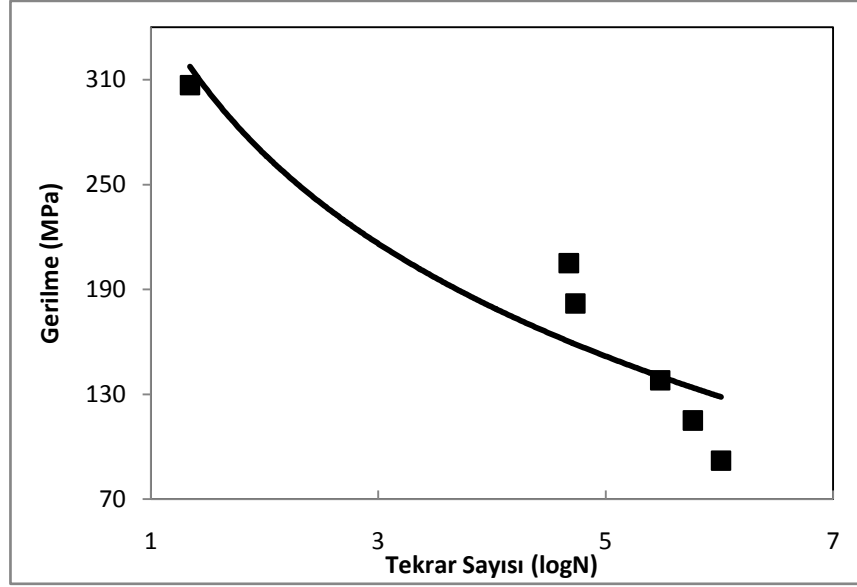
Şekil 7.51. Yorulma deneylerine tabi tutulan taper geçişe sahip L=20mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



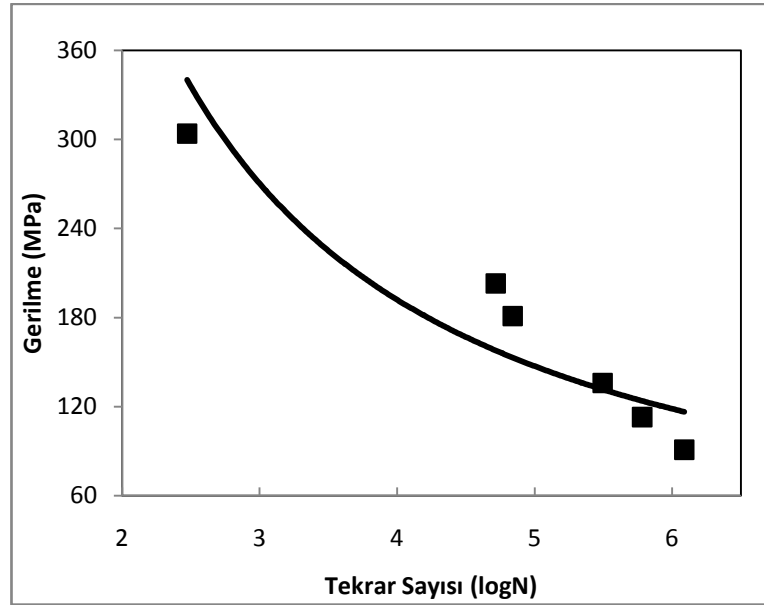
Şekil 7.52. Yorulma deneylerine tabi tutulan taper geçişe sahip L=25mm uzunluğundaki matrislerle üretilen 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı

4 dişli ileri ekstrüzyon yöntemiyle cosinus ve taper geçişli matrisler ile üretilen parçalar için elde edilen yorulma dayanım grafikleri incelendiğinde 6 dişli parçaların ileri ekstrüzyonundakine benzer bir görünüm ortaya çıkmaktadır. Yorulma dayanım değerlerinin cosinus ve taper geçişler için de birbirine yakın olduğu görülmekte bunun yanında matris boyunun artışıyla yorulma dayanım değerlerinin ufak da olsa düşüş yaşadığı görülmüştür.

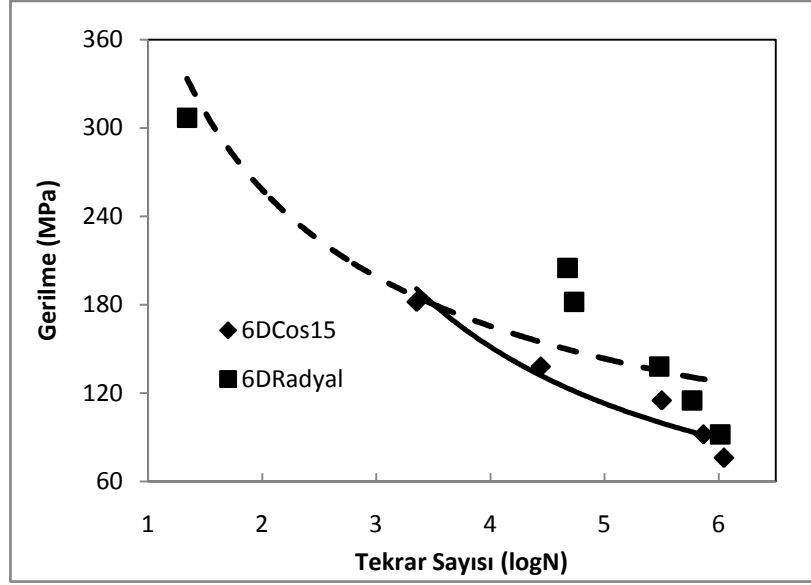
Radyal ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş 4 dişli ve 6 dişli parçaların yorulma dayanımlarını gösteren Wöhler Diyagramları Şekil7.53-54'de verilmektedir.



Şekil 7.53. Yorulma deneylerine tabi tutulan radyal ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş 6 dişli parçaların Wöhler Diyagramı

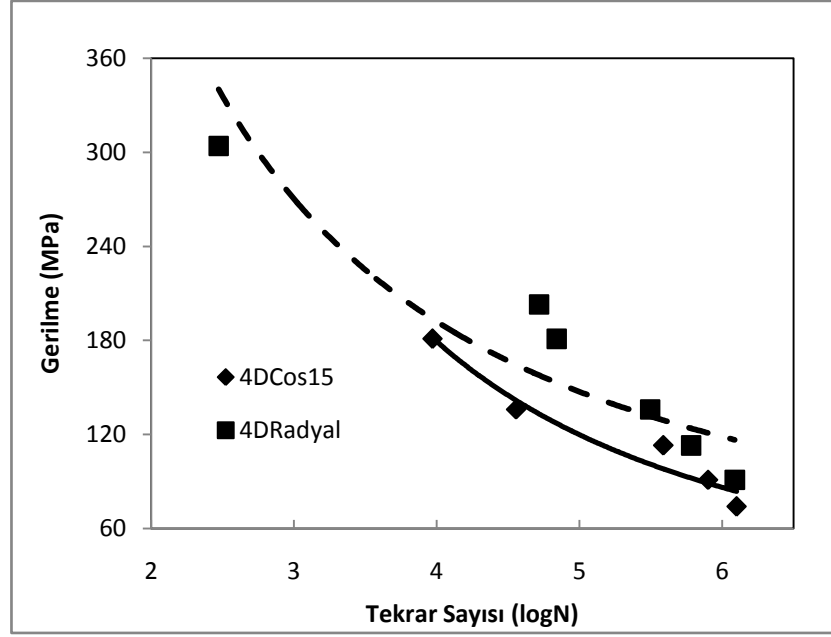


Şekil 7.54. Yorulma deneylerine tabi tutulan radyal ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş 4 dişli parçaların Wöhler Diyagramı



Şekil 7.55. 6 Dişli parçaların yorulma dayanımı karşılaştırması

6 dişli parçaların üretim yöntemi açısından radyal ekstrüzyon ve ileri ekstrüzyon ürünlerinin yorulma dayanımları bakımından karşılaştırması Şekil 7.55'da verilmektedir. Radyal ekstrüzyon ürünlerinin daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu anlaşılmaktadır. 6 dişli parçalar için sonsuz ömür bölgesi ileri ekstrüzyon ürünleri için 76 MPa değerinde görülürken, radyal ekstrüzyon yöntemiyle elde edilen numunelerde bu bölge 92 MPa da başlamakta ve dayanım olarak %23 oranında bir artışa karşılık gelmektedir.



Şekil 7.56. 4 Dişli ürünler için yorulma dayanımı karşılaştırması

4 dişli parçaların da üretim yöntemi baz alınarak radyal ekstrüzyon ve ileri ekstrüzyon ürünlerinin yorulma dayanım değerleri üzerinden yapılan karşılaştırma Şekil 7.56 de görülmektedir. Radyal ekstrüzyon ürünlerinin ileri ekstrüzyon ürünlerine kıyasla daha yorulma dayanımının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Sonsuz ömür bölgesi ileri ekstrüzyon ürünleri için 74MPa değerinde başlarken, radyal ekstrüzyon yöntemiyle elde edilen numunelerde bu bölge 91MPa da başlamakta ve dayanım olarak %23 oranında bir artışa karşılık gelmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde radyal ekstrüzyon ürünlerinin daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu ve görülmektedir. İleri ekstrüzyon ürünleri ile radyal ekstrüzyon yöntemi ürünleri arasında yapılan karşılaştırma sonucunda sonsuz ömür bölgesi başlangıç gerilme değeri olarak %23 bir fark ortaya çıkmaktadır.

7.5. SERTLİK DAĞILIMI DENEYLERİ VE SONUÇLARI

7.5.1. Giriş

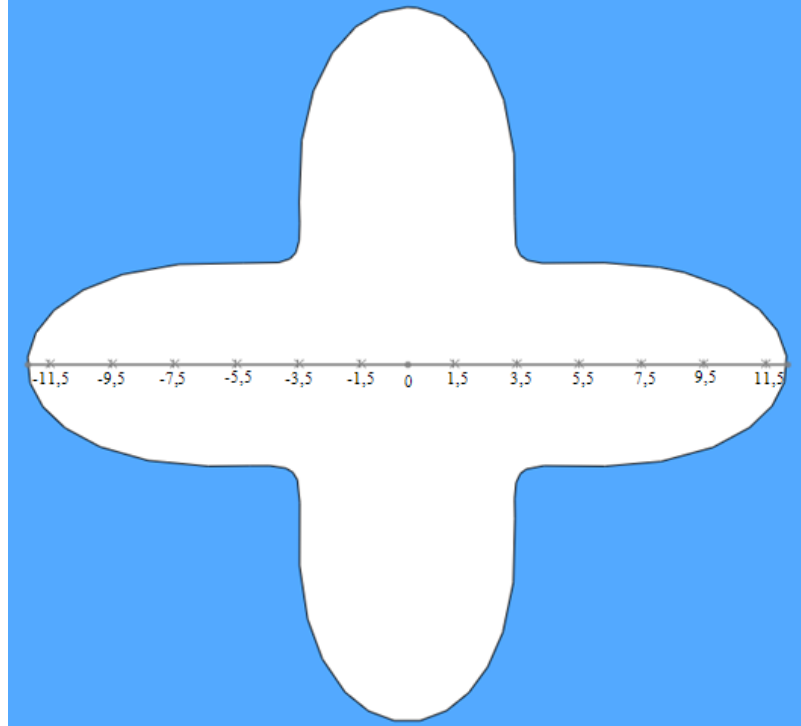
Güç aktarım organlarında kullanılan dişliler yüksek güçleri aktarmak amacıyla kullanılan makine elemanlarıdır. Modern iletim organlarının giderek daha yüksek torklar, yüksek hızlar aktaran elemanlar olmaları istenmektedir. Dişliler güç ve tork aktarımı esnasında fiziksel olarak birbirleriyle temas eden parçalar olduklarından dolayı yüzey aşınmalarının azaltılması hem gücün düzenli bir şekilde aktarılması için hem de çalışma ömrünün uzaması açısından önemlidir. Dolayısıyla dişlilerin yüzeylerinin belirli sertlik değerlerinde olması istenmektedir. Bu sebeple dişlilerin yüzeyleri belirli bir derinliğe kadar çeşitli yöntemlerle sertleştirilmek zorundadır.

Yapılan çalışmada üretim yöntemi olarak iki farklı yöntemle elde edilen alüminyum dişli ürünlerine Brinell sertlik testi uygulanarak üretim yönteminin etkisi araştırılmak istenmiştir. Sertlik ölçümü deneyleri, 4 diş ve 6 dişli sahip dişlilerin cosinus ve taper geçişli profil ürünleri ile yine 4 ve 6 dişli sahip radyal ekstrüzyon ürünlerinin Şekil 7.57. ve Şekil.7.61.'de 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. Sertlik Dağılımı Deneyleri HEMA fabrikasında, **Zwick** marka test cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

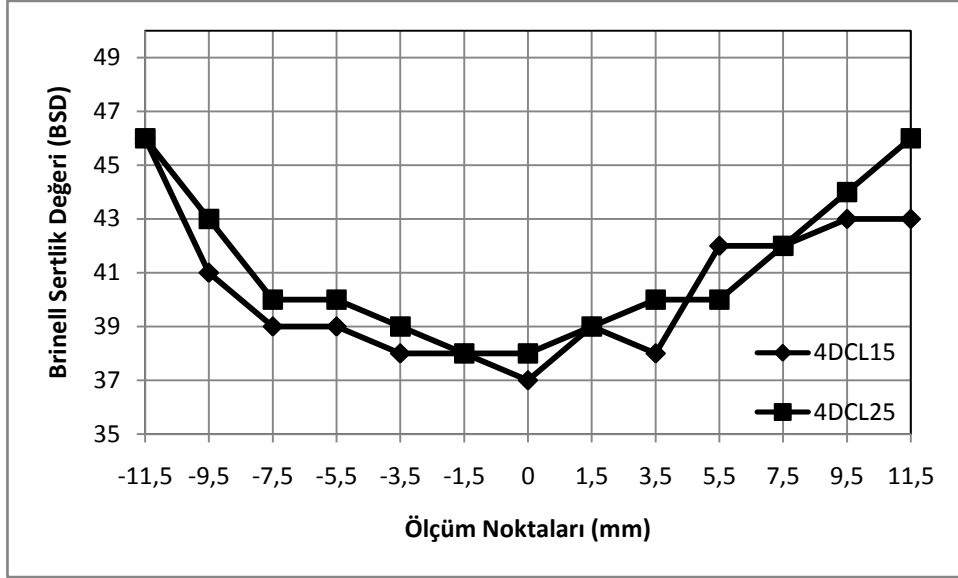
Ölçülen sertlik değerleri birbirine çok yakın olduğundan dolayı ileri ekstrüzyon kalıpları için, her bir profil için en düşük matris boyu ile en uzun matris boyu arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen grafiklerden, radyal ekstrüzyon ürünlerinden en yüksek sertlik değerlerini veren kalıp ile ileri ekstrüzyon ürünlerinden en yüksek sertlik değerini veren kalıp arasında genel bir karşılaştırma yapılmıştır.

7.5.2. Sertlik Dağılımı Deneyleri Ve Sonuçları

4 dişe sahip ürünler için sertlik değeri ölçüm noktaları Şekil 7.57'de verilmektedir. Ölçüm sonuçları öncelikle ileri ekstrüzyon yöntemi için taper ve cosinus geçişe sahip kalıplar için ayrı ayrı verilmiş olup sonrasında sertlik değeri en yüksek olana kalıplar radyal ekstrüzyon ürünlerinden elde edilen sonuçlar ile Şekil 7.60.'da görüldüğü gibi karşılaştırılmışlardır.

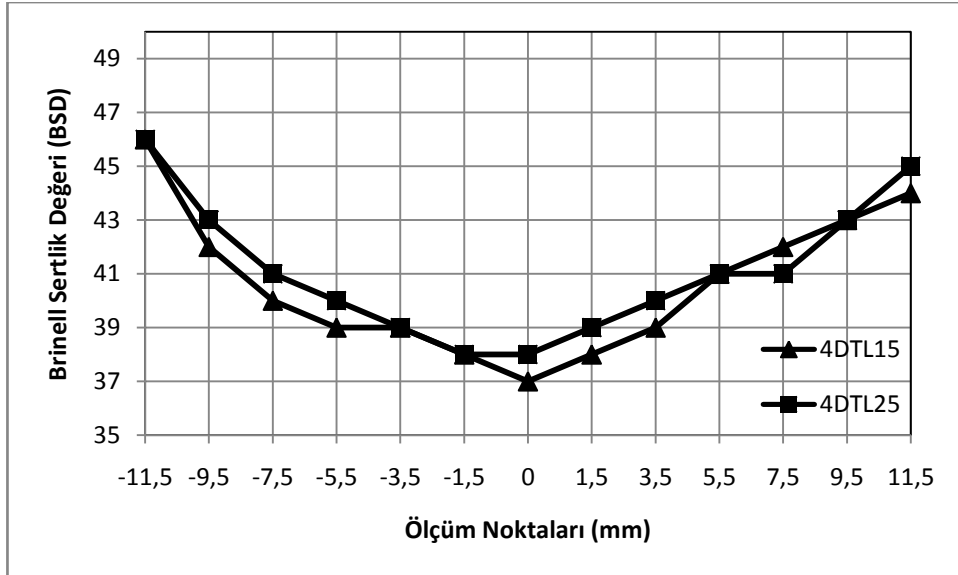


Şekil 7.57. 4 Dişli ürünün sertlik ölçüm noktaları



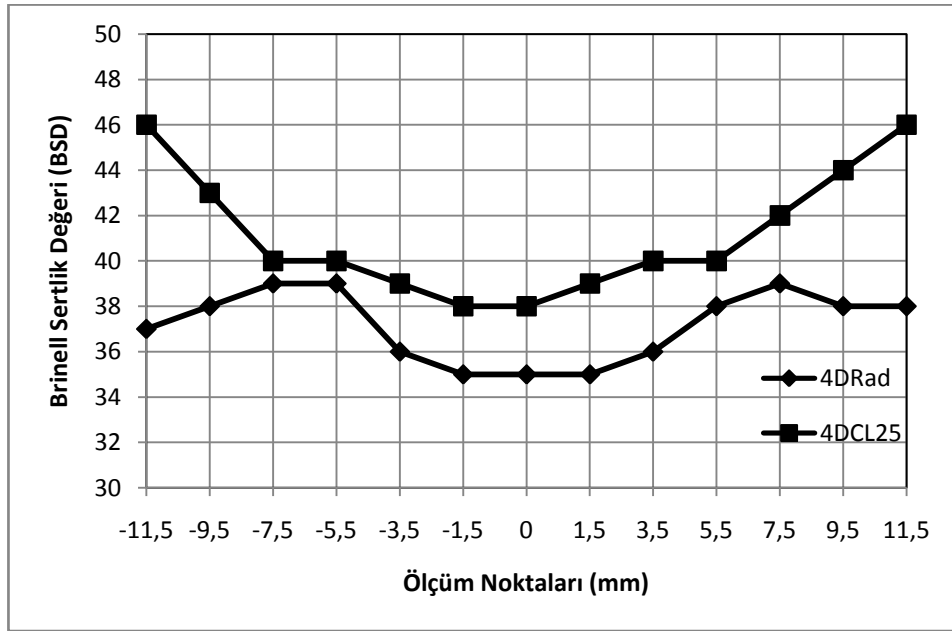
Şekil 7.58. 4 dişli cosinus geçişe sahip ileri ekstrüzyon ürünlerinin sertlik değerleri karşılaştırması

4 dişli parçaların ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişe sahip matrislerinden elde edilen ürünlerin sertlik dağılımı incelendiğinde genel olarak yakın sertlik değerlerine sahip oldukları görülmekte ve bunun yanında da matris uzunluğu arttıkça bir miktar daha sertlik değerinde artış görülmektedir.



Şekil 7.59. 4 dişli taper geçişe sahip ileri ekstrüzyon ürünlerinin sertlik değerleri karşılaştırması

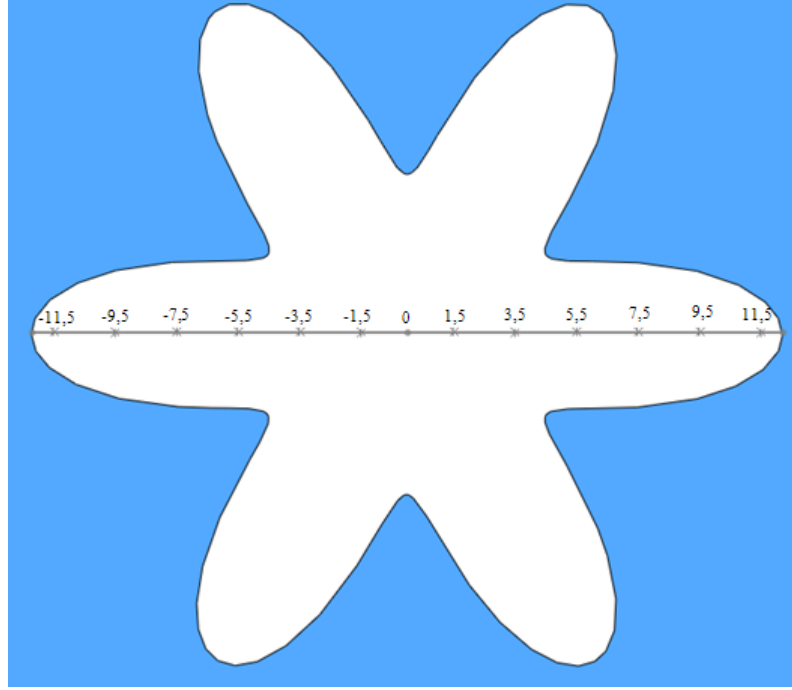
Taper geçişe sahip ileri ekstrüzyon ürünlerinde ise yine cosinus geçişe sahip kalıplardakine benzer bir değişim görülmekte ve matris uzunluğunun artışıyla sertlik artmaktadır. Sertlikteki değişim incelenirken ileri ekstrüzyon ile radyal ekstrüzyon ürünlerinin sertlik değerleri karşılaştırması da yapılmıştır. Elde edilen grafik Şekil 7.60.'de verilmektedir. 4 dişli parçalar arasında en yüksek sertlik değerini veren 25mm matris uzunluğunda cosinus geçişe sahip ileri ekstrüzyon ürünü ile radyal ekstrüzyon ürünü karşılaştırılmış olup ileri ekstrüzyonun cosinus geçişe sahip kalıplarından elde edilen ürünlerinin radyal ekstrüzyona göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları görülmektedir.



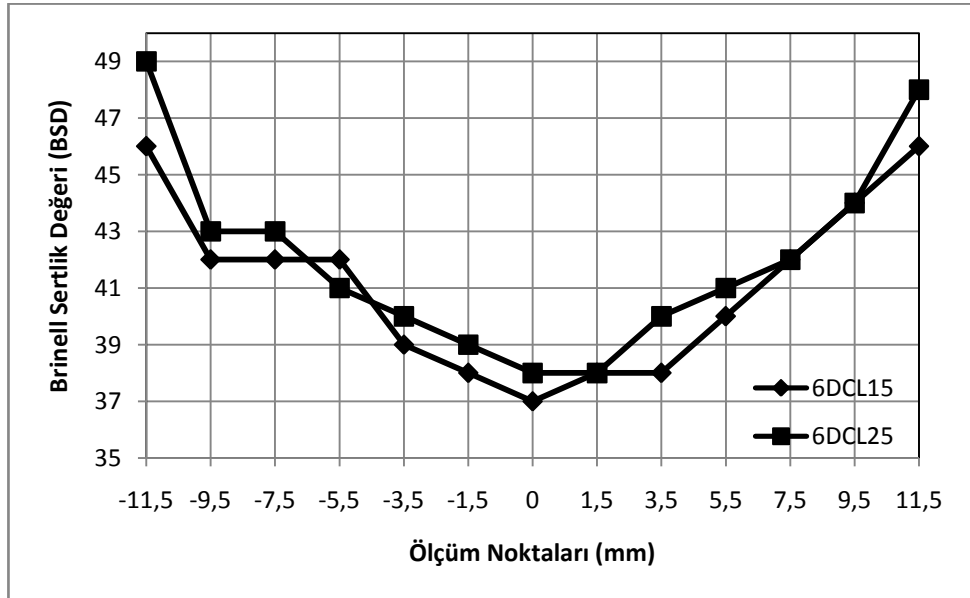
Şekil 7.60. 4 dişli ürünün üretim yöntemine göre sertlik değerleri karşılaştırması

Sertlik bakımından bir karşılaştırma yapılması gerektiğinde 4 dişe sahip ürünler için ileri ekstrüzyon yönteminin radyal ekstrüzyona kıyasla az da olsa bir üstünlüğü olduğu görülmektedir.

6 dişli parçalara ait sertlik ölçüm noktaları ve sertlik dağılımı grafikleri Şekil 7.61-63 arasında verilmektedir.

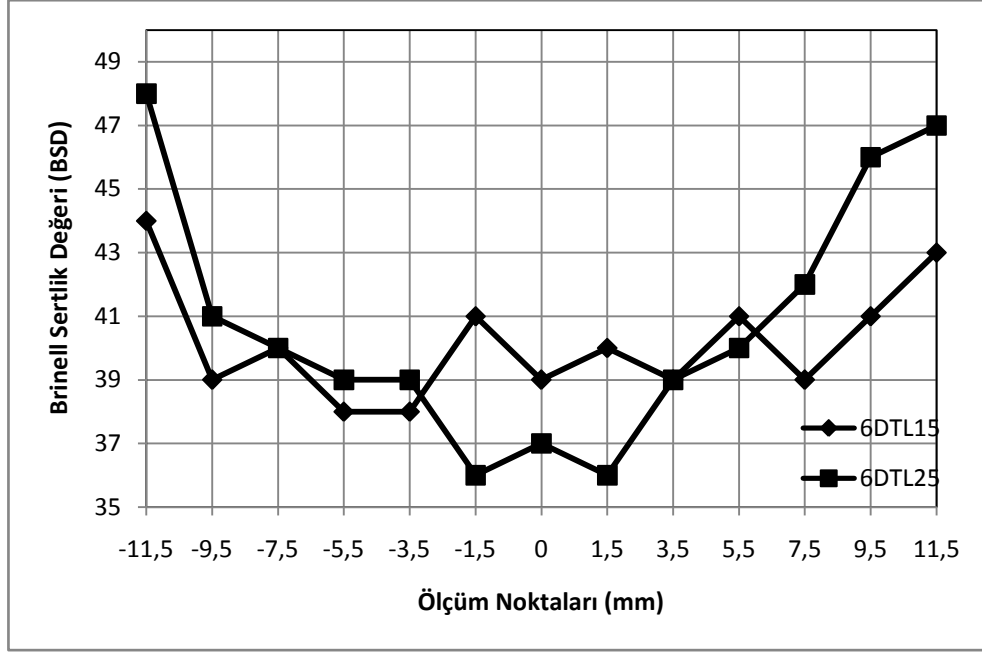


Şekil 7.61. 6Diş Radyal Ekstrüzyon Sertlik Ölçüm Noktaları



Şekil 7.62. 6 dişli cosinus geçişi sahip ileri ekstrüzyon ürünlerinin sertlik değerleri karşılaştırması

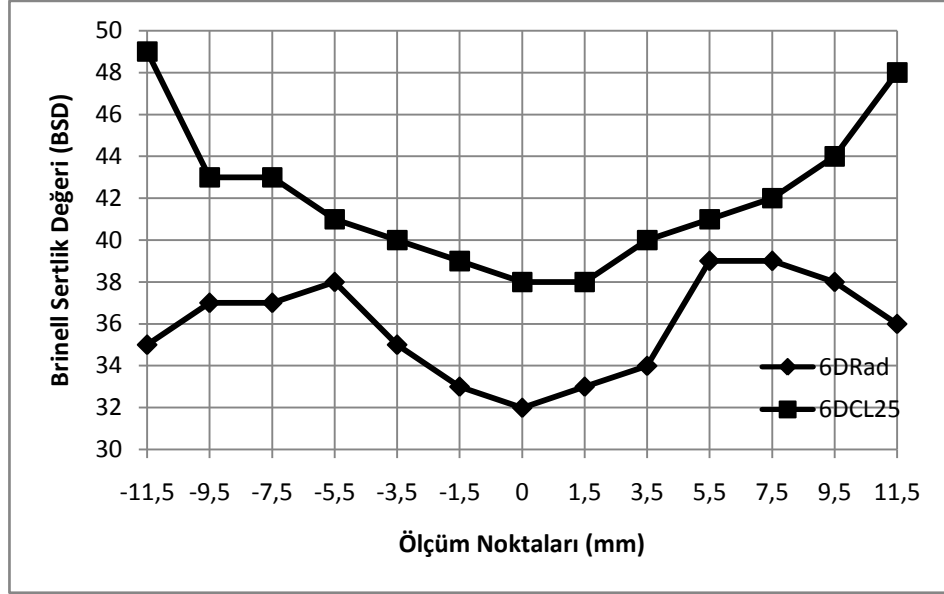
6 dişli parçaların cosinus geçişe sahip matrisler için sertlik dağılımı karşılaştırması sonucunda matris uzunluğunun artmasıyla sertlik değerlerinde 1 Brinell Sertlik Değeri kadar artış görülmektedir.



Şekil 7.63. 6 dişli taper geçişe sahip ileri ekstrüzyon ürünlerinin sertlik değerleri karşılaştırması

Taper geçişe sahip kalıp ürünlerinde de cosinus geçişe benzer şekilde matris uzunluğunun artmasıyla sertlik değeri bir miktar artış göstermektedir. İleri ekstrüzyon ürünlerinin 6 dişli parçalar için radyal ekstrüzyon ile karşılaştırması Şekil 7.64'de verilmiştir. En yüksek sertlik değerini veren ileri ekstrüzyon ürünü olan 25mm. matris uzunluğundaki cosinus geçişe sahip kalıplardan elde edilen ürünlerin sertlik değerleri seçilerek, radyal ekstrüzyon ürünlerinin sertlik değerleri ile karşılaştırılmışlardır. İleri ekstrüzyonun cosinus geçişli profilinden üretilen parçaların radyal ekstrüzyona göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

Genel anlamda; 6 dişli parçalar için de sertlik değeri bakımından 4 dişli parçalarda olduğu gibi ileri ekstrüzyon yöntemi radyal ekstrüzyon yöntemine göre üstündür.



Şekil 7.64. 6 dişli ürünün üretim yöntemine göre sertlik değerleri karşılaştırması

Sertlik deneyi sonuçları her iki diş sayısında (4-6 diş) ileri ekstrüzyon yönteminin Cosinus ve Taper geçişe sahip matrislerin en kısa ve en uzun matris boyuna sahip kalıplarından elde edilen ürünler kendi aralarında karşılaştırılmış olup daha yüksek sertlik değerlerine sahip parçalar radyal ekstrüzyon ürünleri ile genel bir kıyaslamaya gidilmiştir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında 4 ve 6 dişe sahip numunelerden ekstrüzyon ürünlerinin cosinus matris geçişine sahip ve 25 mm. uzunluktaki matris ile elde edilen ürünlerin, radyal ekstrüzyon ürünlerine kıyasla mikro-sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

7.6.DENEYSEL HATALAR VE HATA HESABI

7.6.1.Deneysel Hatalar

Hatalar genel olarak sistematik ve rastgele hatalar olmak üzere iki gruba ayrılır. Sistematik hatalar, ölçme yönteminin ve ölçme aletinin değişmeyen eksikliğinden kaynaklanır. Ölçme olayı tekrarlanırsa da aynı büyüklüktedir ve bir (+) veya (-) ön işaretine sahiptir. Bu tür hatalar ölçme aletlerinin kalibrasyonu ile ortadan kaldırılabilir. Rastgele hatalar ölçme anında belirlenemeyen hatalardır. Bunlar ölçme aletlerinden, ölçmenin yapıldığı ortamdaki değişikliklerden veya deney yapan kişiden kaynaklanabilir. Bu hatalar işaret ve büyüklük olarak her ölçüm için farklı değerler alabilir. Bu nedenle kalibrasyon ile yok edilemez. Bu tür hataların ölçülen büyüklüğe olan etkisini azaltmak için deneyin birçok defa tekrarlanması ve elde edilen sonuçların ortalamasının alınması gerekir.

7.6.2. Ortalama Değerlerdeki Belirsizlik

Bir deneysel veri kümesindeki değerlerin ortalaması;

$$\bar{X} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i) \quad 7.1.$$

deneysel veri kümesindeki değerlerin ortalamadan sapmaları(varyans);

$$\sigma^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad 7.2.$$

ya da standart sapma değerleri;

$$\sigma = \left(\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2} \quad 7.3.$$

Tanımları ile belirlenebilir.(Kirkup, 1994) burada N, ölçüm sayısını, x_i ,i. ölçüm değerini ve \bar{x} de değerlerin ortalamasını gösteriri. Deney sonucunda elde edilen veri kümesi için ortalama değerde yapılan hata;

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

7.4.

ile verilir.

Gerçek değer, ortalama değeri $\bar{X} \mp \sigma_{\bar{x}}$ civarında bulunma olasılığı yaklaşık %70 olarak belirtilebilir ve yapılan deneylerde elde edilen standart sapma hesabı bu değerler üzerinden hesaplanmıştır ve deneysel verilerde büyük farklar olmamasından ötürü gerçek değer güvenilir limitlerini $\bar{X} \mp \sigma_{\bar{x}}$ olarak almak istatistiksel olarak yeterlidir. Ancak $\bar{X} \mp 2\sigma_{\bar{x}}$ civarında bulunma olasılığı ise yaklaşık %95tir. Bu nedenle gerçek değer güvenilir limitlerini $\bar{X} \mp \sigma_{\bar{x}}$ olarak almak istatistiksel olarak yeterlidir. (Kirkup, 1994)

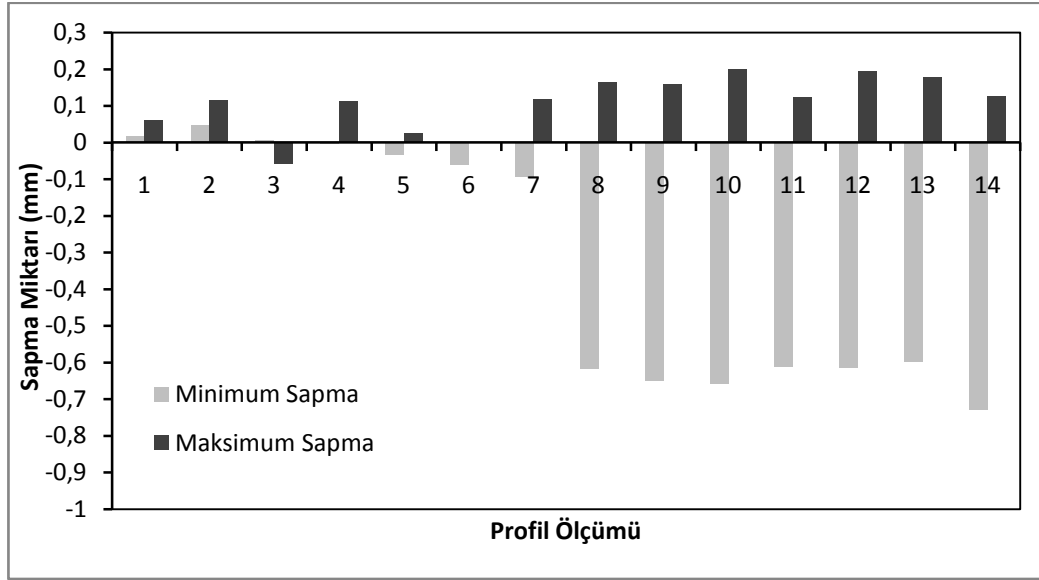
Doktora çalışmasında yapılan deneylerde her bir kalıp için deneyler 8 tekrar olarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel olarak deneysel sonuçlar ulaşılan en yüksek kuvvet değerlerine göre Tablo7.4.'de verilmektedir.

Tablo 7.4. Deneylerin İstatistik Değerleri

4DİŞ		
Kalıp boyu	COS (kN)	TAP (kN)
15	375,28±4,13	377,07±3,10
20	439,50±2,11	449,21±3,55
25	536,14±6,13	528±3,94
6DİŞ		
Kalıp boyu	COS (kN)	TAP (kN)
15	409,21±1,89	405,14±1,56
20	475,50±2,42	474,07±3,09
25	543,14±2,44	546,71±2,62
4DİŞ		6DİŞ
RADYAL	95,06±1,79	112,25±1,50

7.7. PROFİL DOĞRULUK ÖLÇÜM SONUÇLARI

HEMA Endüstri Çerkezköy Fabrikası'nda MITUTOYO XC 20 marka 3 boyutlu profil ölçüm cihazı ile 4 diş ve 6 diş ürünler üzerinde yapılan profil ölçüm değerleri bilgisayar ortamında hazırlanan katı model (CAD) datalarındaki boyutlar ile karşılaştırıldı ve verilen ölçüler ile ölçülen profil değerleri arasında meydana gelen sapma değerleri Şekil 7.65'de gösterildi.



<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
4DCL15	4DCL20	4DCL25	4DTL15	4DTL20	4DTL25	4DRad
<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>
6DCL15	6DCL20	6DCL25	6DTL15	6DTL20	6DTL25	6DRad

Şekil 7.65. 4 ve 6 dişli ürünlerin boyutsal doğruluk oranları

Şekil 7.65.'de verilen 4 dişli ve 6 dişli parçaların profil ölçüm sonuçları incelendiğinde verilen CAD dataları ile ölçüm sonuçları arasında en büyük farkın 0.7 mm. olduğu görülmektedir. 6 dişli parçaların 4 dişli parçalara göre daha fazla sapma göstermektedir. 4 dişli parçalar için verilen ölçülere en yakın sonuçları taper geçişe sahip 20 mm. matris uzunluğundaki kalıplardan elde edilen ürünlerin verdiği görülmüştür. 6 dişli parçalar için en yakın sonuçları ise taper geçişe sahip 15mm. matris uzunluğuna sahip kalıplar vermektedir.

BÖLÜM 8.

8.YORUMLAR VE TARTIŞMA

Bilindiği gibi makine parçalarının üretiminde birçok üretim yöntemi geliştirilmiştir. Çoğunlukla aynı makine parçası farklı üretim yöntemiyle elde edilebilmektedir. Bu durumda hangi üretim yönteminin en uygun olduğuna karar verilmesi, başka bir deyişle de üretim yöntemi optimizasyonu yapma gereği ortaya çıkmaktadır.

Üretim yöntemi optimizasyonunda kullanılan iş parçası malzemesi, yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk, mekanik özellikler, üretim için gereken yatırım maliyeti ve tezgah formasyonu gibi konular büyük önem taşımaktadır ve bu kriterler baz alınarak hangi üretim yönteminin kullanılacağı belirlenir. Herhangi bir üretim yapan bir firmanın seçtiği ve uzun bir süre kullandığı üretim yöntemini kısa sürede değiştirmesi ekonomik ve işletme ile ilgili sebeplerden dolayı çok mümkün değildir ve bu gibi hayati seçimlerin üretime geçmeden önce kararının verilmesi zorunluluğu vardır. Yapılan bu doktora çalışmasında, konvansiyonel talaşlı üretim yöntemlerinin aksine düz dişli benzeri parçaların ileri ekstrüzyon ve radyal ekstrüzyon gibi iki farklı plastik şekil verme yöntemi seçilerek yapılan üretim; kuvvet, yorulma, sertlik ve boyutsal doğruluk üzerinden değerlendirilip en uygun üretim yönteminin belirlenmesine çalışılmıştır.

Doktora çalışmasında ticari saflıkta (%99,7) 1070 alüminyum kullanılmıştır. İleri ekstrüzyon deneyleri 4 diş ve 6 dişe sahip iki farklı çıkış profili seçilerek, matris geçiş formları ise taper ve cosinus olacak şekilde belirlenmiştir. Buna ek olarak matris uzunlukları 15, 20, 25 mm olarak seçilmiştir. Radyal ekstrüzyon deneyleri de 4 diş ve 6 diş olmak üzere iki farklı kalıp seçilerek gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 7.2. de deneysel olarak ölçülen kuvvet sonuçları her bir kalıp için üst sınır analizi sonuçları ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kalıpların üst sınır analizi sonuçları toplam kuvveti meydana getiren bileşenleri verilerek sunulmuştur.

4 dişe sahip ürünlerin ileri ekstrüzyonunda cosinus geçişe sahip kalıpların 15mm, 20mm. uzunluktaki matrisler için taper geçişlerden daha düşük sonuçlar verdiği görülmektedir. Matris uzunluğu 25 mm. seçildiğinde ise cosinus geçişler taper geçişlerden daha yüksek kuvvet değerleri vermektedir. Sonlu elemanlar ve üst sınır analizi yöntemlerinde cosinus geçişe sahip matrisler her bir kalıp geçiş uzunluğu için taper geçişlerden düşük kuvvet değerleri vermektedirler. Kuvvet verilerinde karşılaşılan bu sonuç matris içerisinde malzemenin akışıyla ilgilidir. Dairesel bir girişe sahip kalıpta 4 diş formunu elde etmek için malzeme taper geçişte daha sert bir geçiş yüzeyi üzerinden akışa zorlanmaktadır ve kayma için harcanan kuvvet cosinus geçişte sürtünme için harcanan kuvvetten daha fazla olmakta ve ortaya bu sonuç çıkmaktadır. Kalıp geometrisi ve boyutları sebebiyle sürtünme yüzeyi taper ile cosinus arasında fark yaratacak kadar büyük değildir ancak kayma için harcanan enerji değeri malzemenin akışının zorlaşması nedeniyle daha yüksek olarak ortaya çıkmaktadır.

Üst sınır analizi sonuçları maksimum kuvvet değeri bakımından bütün matris uzunlukları için deneysel kuvvet değerlerine oldukça yakın olarak seyretmektedir. Üst sınır analizi kuvvet sonuçları her kalıp formasyonu için deneysel sonuçlardan %10 daha yüksektir. Sonlu elemanlar analizi kuvvet değeri bakımından deneysel değerlerden ortalama %14 daha düşük kuvvet değerlerine sahiptir. Kuvvet-strok grafiklerinde genel kuvvet eğrisi bakımından sonlu elemanlar sonuçlarından elde edilen kuvvet-strok eğrisi deneysel eğriye benzer bir değişime sahiptir. Ancak bunun yanında üst sınır analizi değerleri ise kalıp seçiminde önemli biri parametre olan kuvvet tahmini yapabilmek için deneysel değerlerden daha yüksek olduğundan dolayı sonlu elemanlar sonuçlarına göre daha kullanışlıdır.

Radyal ekstrüzyon sonuçları maksimum kuvvetler bakımından incelendiğinde; üst sınır analizi ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar, deneysel olarak ölçülen kuvvet değerlerinden daha yüksek değerleri verdikleri görülmektedir. Ancak kuvvet-strok eğrisi bakımından genel olarak üst sınır analizi eğrisi deneysel eğriden yüksek, sonlu elemanlar eğrisi ise prosesin genelinde düşük olarak seyretmektedir.

Genel anlamda aynı profili üretmek için ise radyal ekstrüzyon kuvvetlerinin ileri ekstrüzyon kuvvet sonuçlarına göre ortalama 3 ile 5 kat daha düşük kuvvet değerlerine ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Şekillendirme esnasında; radyal ekstrüzyon prosesinde

malzeme akışının ileri ekstrüzyona göre daha kolay olması nedeniyle böyle yüksek bir kuvvet değeri farkı oluşmaktadır. En düşük kuvveti veren ileri ekstrüzyon sonuçları ile radyal ekstrüzyon sonuçları üst sınır analizi bileşenleri bakımından incelendiğinde; ileri ekstrüzyonun deformasyon bileşenlerinin 7, kayma bileşenlerinin 2, 1,2 kat büyük olduğu görülmektedir. Şekillendirme kuvveti göz önüne alınarak yapılacak bir karşılaştırmada radyal ekstrüzyon yönteminin ileri ekstrüzyon yöntemine göre avantajlı olduğu görülmekte ve bu sebeple radyal ekstrüzyon yöntemi kuvvet bakımından tercih edilmesi gereken uygun üretim yöntemi olduğu görülmektedir.

Yorulma dayanımı açısından durum incelendiğinde ileri ekstrüzyon yönteminde cosinus geçiş ile taper geçiş arasında çevrim sayılarında çok düşük farklar olduğu görülmektedir. Radyal ekstrüzyon ile elde edilen parçaların ileri ekstrüzyon yöntemiyle elde edilen ürünlere kıyasla sonsuz ömür bölgesinin başladığı gerilme değerleri arasında %23 fark olduğunu bununda şekillendirmedeki malzeme akışı ve buna ek olarak ortaya çıkan pekleşmenin etkisi ile malzemenin yorulma dayanımının artması şeklinde yorumlanabilir. Bu nedenle daha yüksek yorulma dayanımına ulaşabilmek adına radyal ekstrüzyon yöntemi tercih edilebilir.

Elde edilen ürünler bölüm 7.5. de sertlik değerleri açısından da bir karşılaştırmaya tabi tutulmuşlardır. Sertlik değerleri taper ve cosinus geçişli matrislerle üretilen ileri ekstrüzyon ürünleri arasında yüksek bir fark ortaya koymasa da matris uzunluğu arttıkça sertlik değerinin arttığı görülmüş ve taper geçişe nazaran cosinus geçiş profile sahip matrislerin daha yüksek sertlik değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Sertlik değeri bakımından yapılacak genel bir karşılaştırmada ise ileri ekstrüzyon ürünleri radyal ekstrüzyon yöntemine göre daha yüksek değerler vermektedirler. Sertlik değerindeki bu artışın ileri ekstrüzyon yönteminde ürün yüzeyinde ortaya çıkan sürtünme olduğu söylenebilir. İleri ekstrüzyon yöntemi ile radyal ekstrüzyon için üst sınır analizi kuvvet bileşenleri incelendiğinde sürtünme kuvvet bileşenleri arasında 1,6 kat fark olması da sürtünmenin sertliğe olan etkisini açıklamaktadır.

6 diş ürünlerle yapılan ileri ekstrüzyon deneylerinde 15mm. kalıp uzunluğunda taper geçiş 4-5 kN.luk bir farkla cosinus geçişe göre düşük kuvvet vermektedir. 20mm. matris uzunluğunda yine taper geçiş cosinus geçişe göre düşük kuvvet değeri vermekte

ancak fark 1kN civarına düşmektedir ve bu noktadan sonra 25 mm. kalıp uzunluklarında cosinus geçişli matrisler kuvvet bakımından düşük sonuçları sunmaktadır ve kalıp uzunluğu arttıkça da cosinus geçiş ile taper geçiş arasındaki kuvvet farkının arttığı görülmektedir. Üst sınır analizi sonuçlarında ise deneysel sonuçlardan farklı olarak cosinus geçişli matrisler bütün kalıp uzunluklarında daha düşük kuvvet değerlerini vermektedirler. Düşük kalıp uzunluklarında cosinus geçişin taper geçişe olan kuvvet farkı 15 ve 20 mm. için 15 kN civarındayken kalıp uzunluğunun artmasıyla bu fark 5 kN'a düşmektedir. Üst sınır analizinin toplam kuvvet bileşenleri incelendiğinde, matris geçiş geometrisinin ve geçiş yüzeyinin taper ve cosinus kalıplarda kayma bileşeninin düşük kalıp uzunluklarında toplam kuvvet üzerinde etkili olduğu, kalıp boyunun uzamasıyla ise bu etkisinin azalarak birbirine eşit kuvvet değerlerini ortaya çıkardığı görülmektedir. Bunun sebebi önerilen hız alanının matris geçişini matematiksel olarak tanımlayan geçiş fonksiyonu olduğu söylenebilir. Üst sınır analizi sonuçlarının deneysel sonuçlardan bütün kalıp uzunluklarında ortalama %9 daha yüksek çıkması önerilen hız alanlarının doğru ve kalıp seçimi bakımından kullanılabilir olduğunun kanıtıdır. Deformasyon bileşeni, bütün kalıp formasyonları için etkin bileşen olmaktadır. Sürtünme bileşeninin kalıp uzunluğunun artmasıyla doğal olarak artış göstermesinin yanında toplam kuvvet içindeki yüzdesinin kalıp uzunluğunun değişmesiyle ancak %2 kadar değiştiği göze çarpmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kuvvetlerde toplam kuvvet değerinin ulaştığı maksimum noktalar üzerinden bir karşılaştırma yapıldığında elde edilen kuvvet değerinin matris uzunluğu 15mm. olduğunda deneylerle uyumlu olarak taper geçişte düşük kuvveti verdiği, sonrasında bütün matris uzunluklarında daha düşük kuvvet değerlerine cosinus geçişli matrislerde ulaşıldığı görülmektedir. Sonlu elemanlar çözümlerinde böyle bir değişimin görülmesi, gerçekleşen deneylerde tam anlamıyla modellenemeyen, matematiksel olarak sonlu elemanlar çözümüne entegre edilemeyen sınır şartlarının etkisiyle açıklanabilmektedir. Grafiklerin geneli incelendiğinde ise sonlu elemanlar çözümlerinin deneysel kuvvet-strok eğrisi ile genel anlamda uyumlu bir değişim gösterdiği görülebilmektedir.

Aynı profile sahip üretimi yapabilmek amacıyla kuvvet değerleri üzerinden yapılacak bir karşılaştırmada ileri ekstrüzyon yöntemi ile üretim yapmanın aynı ürünü radyal ekstrüzyon ile yapmaya kıyasla 3 kat daha fazla kuvvete gerek duyulacağını

ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle şekillendirme kuvveti açısından radyal ekstrüzyon yöntemi optimizasyon açısından tercih edilen yöntem olacağı görülmektedir.

Yorulma dayanımı açısından üretim yöntemleri karşılaştırıldığında daha yüksek sonsuz ömür bölgesini radyal ekstrüzyon ürünlerinin verdiği görülmektedir. Düşük gerilme değerleri için üretim yönteminin yorulma dayanımına etki etmediği ancak yüksek gerilme değerleri için radyal ekstrüzyon ürünlerinin daha yüksek yorulma dayanımına ve sonsuz ömre sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bunun nedeni 4 dişe sahip ürünlerde olduğu gibi pekleşmenin malzemenin yorulma dayanımına yapmış olduğu pozitif etkidir.

Ancak sertlik dağılımı bakımından ise ileri ekstrüzyon ile 25mm. uzunluğa sahip cosinus geçişli matris formasyonunun radyal ekstrüzyon ürünlerine kıyasla belirgin bir fark yarattığı göze çarpmaktadır. 4 dişli ürünlere nazaran 6 dişli ürünlerde sürtünmeye maruz kalan yüzey daha fazladır. Dolayısıyla ileri ekstrüzyon yönteminde radyal ekstrüzyon yöntemine göre olan sürtünme yüzeyi artışına paralel olarak sürtünme etkisi artmakta ve bu artış sertlik değerlerine de yansımaktadır.

Bölüm 7.6. da deneysel çalışmalarda karşılaşılabilecek deneysel hatalar ile ilgili bilgi verildikten sonra doktora çalışmasında yapılan kuvvet deneylerinin istatistiki değerleri ulaşılan en yüksek kuvvetler üzerinden hesaplanarak tablo halinde ifade edilmiştir. Deney sırasında bazı ölçüm hatalarının ortaya çıkmasının olağan olduğu ancak genel anlamda istatistikî kuvvet değerleri incelendiğinde ortalama kuvvetten sapmanın çok yüksek olmadığı ve deneysel çalışmadan elde edilen ölçüm sonuçlarının sağlıklı olduğu söylenebilir.

Yapılan doktora çalışmasında bölüm 7.7. de elde edilen ürünlerin boyutsal doğrulukları CAD dataları ile ürünler üzerinde Mitutoyo XC20 marka cihazla ölçülen değerleri karşılaştırılmış ve boyutsal ölçü farkları elde edilmiştir. 4 dişe sahip ürünlerdeki boyutsal ölçü farklılıklarının 6 dişe sahip ürünlerden oldukça düşük olduğu ortaya konmuştur.

İki üretim yöntemi arasında kuvvet, yorulma dayanımı, sertlik dağılımı gibi kriterler üzerinden deneysel veriler yanında, üst sınır analizi ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre bir karşılaştırma yapılmıştır. Yukarıda anlatılanlar ışığında radyal

ekstrüzyon ile üretilen dişli benzeri parçaların ileri ekstrüzyon yöntemi ile üretilenlere göre kuvvet ve yorulma dayanımı açısından önemsenebilir bir avantajının olduğu ancak sertlik değerleri bakımından daha düşük değerler ortaya koysa da ciddi bir fark olmadığı görülmüştür. Bunun yanında üretilecek parça sayısına göre kalıp formasyonları bakımından ileri ekstrüzyon yöntemi yüksek sayıda üretimlerde operasyon zamanı bakımından avantajlıdır.

Her iki üretim yöntemi de kullanılan kalıplar ve pres kapasitesi bakımından yüksek ilk yatırım maliyetlerine sahiptirler. Bu yüzden üretilen parça sayılarının az olduğu durumlarda verimli değillerse de yüksek parça sayılarında ortaya koyduğu düşük parça maliyeti bakımından avantajlıdır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda standart boyutlarda dişlilerin ileri ve radyal ekstrüzyon yöntemleriyle üretilebilmesi ve kuvvet analizleri yapılması amaçlanmaktadır. Bu anlamda, üst sınır analizi yöntemi ve bunun yanında ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan DEFORM 3D faydalı bir araç olacaktır.

KAYNAKLAR

AYER, Ö., “ Dişli Benzeri Parçaların İleri Ekstrüzyonunda Teorik Kuvvet Analizi”, 2006, Yüksek Lisans Tezi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

ALTINBALIK, T., AYER, Ö., 2006, “A theoretical and experimental study for forward extrusion of clover sections”, *Materials and Design*, 29, 1182–1189

AY, İ., “İmal Usulleri II Ders Notları”, Balıkesir Üniversitesi

HU, C., WANG, K., LIU, Q., 2007, “Study on a New Technological Scheme For Cold Forging of Spur Gears”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.187-188, pp.600-603.

ONUH, S.O., EKOJA, M., ADEYEMI, M.B., 2003, “ Effects of Die Geometry and Extrusion Speed on The Cold Extrusion of Aluminium and Lead Alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.133, pp.274-285.

AZAD-NOORANI, M., BAKHSHI-JOOYBARI, M., HOSSEINIPOUR, S.J., GORJI, A., 2005, “ Experimental and Numerical Study of Optimal Die Profile in Cold Forward Rod Extrusion of Aluminum”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.164-165, pp.1572-1577.

SI, J., GAO, F., Han, P., ZHANG, J., 2011, “Simulation on extrusion process of TiAl alloy”, *Intermetallics*, vol.19, pp.169-174.

JUNG, S.-Y., KANG, M.-C., KIM, C., KIM, C.-H., CHANG, Y.-J., HAN, S.-M., 2009, “A Study on The Extrusion by a Two-Step Process for Manufacturing Helical Gear”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.41, pp.684-693.

CHOI, J., CHO, H.-Y., JO, C.-Y., 1999, “ Upper Bound Analysis for Forging of Trochoidal Gears”, *KSME International Journal*, vol.13, pp.332-338.

BAKHSHI-JOOYBARI, M., SABOORI, M., NOORANI-AZAD, M., HOSSEINIPOUR, S.J., 2007, “Combined Upper Bound and Slab Method, Finite Element and Experimental Study Of Optimal Die Profile in Extrusion”, *Materials and Design*, vol.28, pp.1812-1818.

CHOI, J.C., CHOI, Y., 1998, “ A study on the forging of external spur gears: upper-bound analyses and experiments”, vol.38, pp.1193-1208 .

NARAYANASAMY, R., PONALAGUSAMY, R., VENKATASAN, R., SRINIVASAN, P., 2006, “An Upper Bound Bound Solution to Extrusion of Circular Billet to Circular Shape Through Cosine Dies ”, *Materials and Design*, vol.27, pp.411-415.

PONALAGUSAMY, R., NARAYANASAMY, R., SRINIVASAN, P., 2005, “Design and Development of Streamlined Extrusion Dies a Bezier Curve Approach”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.161, pp.375-380.

YANG, D.Y., HAN, C.H., KIM, M.U., 1986, “ A Generalized Method For Analysis Of Three-Dimensional Extrusion Of Arbitrarily-Shaped Sections”, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.28, pp.517-534.

ALVES, M.L., RODRIGUES, J.M.C., MARTINS, P.A.F., 2001, “ Cold Forging Of Gears: Experimental and Theoretical Investigation”, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol.37, pp.549-558.

CHOI, J., CHO, H.Y., JO, C.-Y., 2000, “ An Upper Bound Analysis for the Forging of Spur Gears ”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.104, pp.67-73.

SONG, J.H., IM, Y.T., 2004, “ Development of a Computer Aided-Design System of Cold Forward Extrusion of a Spur Gear”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.153-154, pp.821-828,

GUNASEKERA, J.S., HOSHINO, S., 1985, “Analysis of Extrusion of Polygonal Sections Through Streamlined Dies ”, *Journal of Engineering Technology*, vol.107, pp.229-233.

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

ÇAN, Y., ALTINBALIK, T., AKATA, H.E., 2004, “ A Study of Lateral Extrusion of Gear Like Elements and Splines ”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.166, pp.128-134.

EBRAHIMI, R., REIHANIAN, M., KANAANI, M., MOSHKAR, M.M., 2008, “An Upper-Bound Analysis of the Tube Extrusion Process”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.199, pp.214-220.

EBRAHIMI,R., REIHANIAN, M., MOSHKSAR, M.M., 2008, “Analytical Approach for Radial-Forward Extrusion Process”, *Materials & Design*, vol.29, pp.1694-1700.

SKUNCA, M., SKAKUN, P., KERAN, Z., SIDJANIN, L., MATH, M.O., 2006, “Relations Between Numerical and Experiment in Closed Die Forging Of A Gear”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.177, pp.256-260.

SONG, J.H., IM, Y.T., 2007, “ The Applicability of Process Design System for Forward Extrusion of Spur Gears ”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.184, pp.411-419.

ABRINIA, K., MAKAREMI, M., 2009, “An Analytical Solution for the Spread Extrusion of Shaped Sections”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, vol.41, pp.670-676.

CHOI, J., CHO, H., CHOI, J., JO, C., 1998, “A Study on the Forging of Gear-Like Components”, *KSME International Journal*, vol.12, pp.615-623.

SADEGHI, M.H., 2003, “ Gear Forging: Mathematical Modeling and Experimental Validation”, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.125, pp.753-762.

KUMAR, S., VIJAY, P., 2007, “Die Design and Experimentes for Shaped Extrusion Under Cold and Hot Condition”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.190, pp.375-381.

HAN, C.H., YANG, D.Y., 1986, “ A New Formulation for Three-Dimensional Extrusion and Its Application to Extrusion of Clover Sections”, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.28-4, pp.201-218,

AIROD, A., VANDEKINDEREN, H., BARROS, J., COLAS, R., HOUBAERT, Y., 2003, “Constitutive Equations for the Room Temperature Deformation of Commercial Purity Aluminum”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.134, pp.398-404,

SONG, J.H., IM, Y.T., 2004, “ Determination of a Major Design Parameter for Forward Extrusion of Spur Gears”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.126, pp.255-263.

HAN, C.H., YANG, D.Y., 1988, “ Further Investigation into Extrusion of Trochoidal Gear Sections Considering Three-Dimensional Plastic Flow”, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.30, pp.13-30.

BENEDETTI, M., FONTANARI, V., HÖHN, B.-R., OSTER, P., TOBIÉ, T., 2002, “Influence of Shot Peening on Bending Tooth Fatigue Limit of Case Hardened Gears”, *International Journal of Fatigue*, vol.24, pp.1127-1136.

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

MISIRLI, C., “ Yanal Ekstrüzyon İle Dişli Benzeri Parçaların İmalatı: Analiz ve Deneyleler”, Doktora Tezi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

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

GOETSCH, L. D., 1991, “ Modern Manufacturing Processes”, Thomson Inf./Publishing Group, Çağlayan Kitabevi.

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

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.

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

ALTINBALIK, T., 2000, “ Dişli Taslaklarının Kapalı Kalıpla Yığılmasında Kuvvet ve Malzeme Akışının Belirlenmesi ”, Doktora Tezi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

MISIRLI, C., 2006, “ Yanal Ekstrüzyon ile Dişli Benzeri Parçaların İmalatı: Analiz ve Deneyleler ”, Doktora Tezi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

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

ABDUL-RAHMAN, R. O., DEAN, T. A., 1981, “The Quality of Hot Forged Spur Gear Forms”, Part I. Mechanical and Metallurgical Properties, Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol.21, pp.109-127.

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

SAMANTA, S.K., 1976, “Helical gear: A Noble Method of Manufacturing it”, Int. Proc. 4th. North American Metalworking Research Conf., Battele’s Columbus Labs, OH, USA, Society of Manufacturing Engineers, pp.199–205.

CHOI, J.C., CHO, H., KWON, H.K., 1994, “A New Extrusion Process for Helical-Gears: Experimental Study”, Journal of Materials Processing Technology, vol.43, pp.35–53.

GUNASEKERA, J.S., HOSHINO, S., 1982, “Analysis of Extrusion or Drawing of Polygonal Sections Through Straightly Converging Dies”, Trans .ASME J. Eng. Ind., vol.104, pp.38–44.

MAITY, K.P., KAR, P.K., DAS, N.S., 1996, “A Class of Upper-Bound Solutions for the Extrusions of Square Shapes From Square Billets Through Curved Dies”, Journal of Materials Processing Technology, vol.62, pp.185–90.

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

ALTINBALIK, M.T., ÇAN, Y., 2004, “Enjeksiyon Yığıma Yönteminde Kuvvet ve Malzeme Akışına Deformasyon Bölgesi Boyut Oranının Etkileri”, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 9, Sayı 2, 59-67.

FERESHTEH-SAMIEE, F., KARIMI, M., SABZALIPOR, M., 2009, “ An Investigation on the Effect of Process Variables on the Required Load in Axisymmetric Forward Rod Extrusion”, 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto-Portugal, 2009, paper ref: S2411_P0348

SAHA, P.,K., 2000, “Aluminum Extrusion Technology”, ASM International, Ohio

KIZILASLAN, K., İŞEL, B., YAVUZ, İ., 2010, “Dişli Çarklarda Meydana Gelen Hasar Türleri”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 119-129

GHALI, A. , NEVILLE, A.M., 1986., “Structural Analysis, A Unified Classical and Matrix Approach”, Chapman and Hall, 435- 471,

TAKEZONA, S. , TAO, K., 1982, “ Elasto/Visco-Plastic Dynamic Response of General Thin Shells to Blast Loads”, Bulletin of the JSME, Cilt 25, Sayı 203, 728-735,

ŞENALP, A.Z., 1998, “Computer Aided Wrinkling Analysis Of Nonsymmetric Parts In Sheet Metal Forming”, Ph. D. Thesis, Middle East Technical University

JOHNSON, W., 1958, “Upper Bound Loads for Extrusion Through Circular Shaped Dies” , Appl. Sci. Res. Series A, Vol. 7, p. 437,

LIU, J.Y., 1971,”Upper Bound Solutions of Some Axisymmetric Cold Forging Problems”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1134-1144.

NAGPAL, V., LAHOTI, G.D. ALTAN, T., 1978, “A Numerical Method for Simultaneous Prediction of Metal Flow and Temperatures in Upset Forging of Rings”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 100, pp. 413-420,

CHEN, D-C., SYU, S-K., WU, C-H., LIN, S-K, 2007, “Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimensional finite element method”, Journal of Materials Processing Technology 192–193, 188–193.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1999 yılında girdiği Trakya Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2003 yılında fakülte ve bölüm birincisi olarak bitirdikten sonra aynı yıl Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans öğrenimine başladı. 2006 yılında tamamladığı yüksek lisans eğitiminin hemen sonrasında Doktora eğitimine başladı. 2009-2010 öğretim yılı Güz Yarıyılında LLP/Erasmus öğrenci değişimi programı kapsamında Çek Cumhuriyeti'nde Liberec Teknik Üniversitesi'nde doktora çalışmalarını sürdürdü. 2004 yılının Ocak ayında Araştırma Görevlisi Kadrosuna atanan Önder AYER, sonrasında 2009 yılının Temmuz ayında Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat AnaBilim Dalı'nda Uzman kadrosuna atanmış olup halen bu görevine devam etmektedir.