

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

AISI 304 ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERDE İŞLENEBİLİRLİĞE
BAĞLI OLARAK KALICI GERİLME PROBLEMLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Özgür TEKASLAN

Balıkesir, Şubat - 2007

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

AISI 304 ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERDE İŞLENEBİLİRLİĞE
BAĞLI OLARAK KALICI GERİLME PROBLEMLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

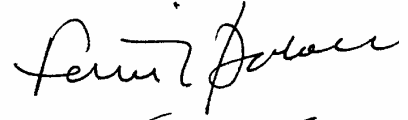
Özgür TEKASLAN

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Nedim GERGER

Sınav Tarihi : 16.02.2007

Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Fatih C. BABALIK

(UÜ)



Prof.Dr. M. Cemal ÇAKIR

(UÜ)



Prof.Dr. Ulvi ŞEKER

(GÜ)



Doç. Dr. İrfan AY

(BAÜ)



Yrd. Doç. Dr. Nedim GERGER



ÖZET

AISI 304 ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERDE İŞLENEBİLİRLİĞE BAĞLI OLARAK KALICI GERİLME PROBLEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Özgür TEKASLAN

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

(Doktora Tezi / Tez Danışmanı: Yrd. Doç Dr. Nedim GERGER)

Balıkesir, 2007

Bu araştırmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzeme değişik kesme parametreleri ile işlendikten sonra, üzerinde işlemeye bağlı olarak nasıl bir kalıcı gerilme oluştuğunu belirlemek hedeflenmiştir. AISI 304 çeliğinden Ø 61 mm, boy 250 mm olarak hazırlanan 31 adet deney numunesi değişik kesme parametrelerinde ve işleme şartlarında CNC torna tezgahında işlenmiştir. Daha sonra bu numuneler üzerindeki kalıcı gerilme, kurulan bir deney düzeneği ile katman kaldırma yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.

Çalışmanın birinci kısmında farklı kesme parametreleri ile işlenen deney numunelerindeki kesme kuvvetleri bir dinamometre yardımı ile tespit edilmiş, deney numunelerindeki yüzey pürüzlülükleri, kesici uçlardaki aşınma ve çıkan talaşlar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafiklerle yorumlanmıştır.

İkinci kısımda ise makine elemanlarının üretimi esnasında oluşan kalıcı gerilmelerin belirlenmesi için; CNC'li tel erozyon tezgahından elde edilen 248 adet deney parçası üzerinde katman kaldırma tekniği kullanılarak kalıcı gerilmeler tespit edilmiştir. Kalıcı gerilmelerin kesme parametreleri, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesici uçlardaki aşınma ile ilişkisi araştırılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER : AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik / Kesme Parametreleri / Kalıcı Gerilme / Katman Kaldırma Yöntemi

ABSTRACT

RESEARCH ON THE RESIDUAL STRESS PROBLEM DUE TO AISI 304 AUSTENITIC STAINLESS STEELS' MACHINABILITY

Özgür TEKASLAN

**Balıkesir University, Institute of Science,
Department of Mechanical Engineering**

(Ph.D. Thesis / Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nedim GERGER)

Balıkesir- Turkey, 2007

In this study, it is aimed to determine the state of residual stresses due to manufacturing processes occurring on AISI 304 austenitic stainless steel material, which is formed with different cutting parameters. Thirty-one test specimens of AISI 304 material of diameter 61 mm and length 250 mm are machined with different cutting parameters and in CNC lathes. After that, a test apparatus, using the method of “layer removal”, measures residual stresses on the specimens.

In the first part of the study cutting forces in test specimens machined with different cutting parameters are measured by a dynamometer, surface roughness in test specimens and wear in cutting tools with chip formation are observed. Out coming results are evaluated with tables and graphics.

In the second part of the study for the purpose of determining the residual stresses induced on machine elements during manufacturing, residual stresses on 248 test specimens machined in wire erosion mill with CNC are measured by using the method of “layer removal”. The relation of residual stresses with cutting parameters, cutting forces, surface roughness and wear in cutting tools is searched.

KEY WORDS: AISI 304 Austenitic Stainless Steel / Cutting Parameters / Residual Stress / Layer removal Method

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT, KEY WORDS	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER	3
2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler	3
2.1.1 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mikro yapıları	4
2.1.2 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	5
2.1.3 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri	6
2.2 Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliği	6
2.2.1 Talaş Oluşum Mekaniği	7
2.2.2 Metallerden Talaş Kaldırma Tekniği	8
2.2.3 Metal Deformasyon Mekanizması	9
2.2.4 İş Parçası Özelliği	11
2.2.5 İşlenebilirlik Problemleri	12
2.2.6 İşlenebilirliğin İyileştirilmesi İçin Yapılanlar	14
3. KALICI GERİLMELER	17
3.1 Kalıcı Gerilmeler ve Önemi	17
3.2 Kalıcı Gerilmelerin Oluşumu	20
3.3 Kalıcı Gerilmelerin Sınıflandırılması	22
3.3.1 I. Grup (Makro) Gerilmeler	22
3.3.2 II. Grup (Mikro) Gerilmeler	23
3.3.3 III. Grup (Submikroskobik) Gerilmeler	23
3.4 Kalıcı Gerilmeleri Oluşturan Nedenler	24
3.4.1 Termal Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler	24
3.4.2 Metalürjik Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler	27
3.4.3 Mekanik Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler	28
3.4.4 Kimyasal Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler	30
3.5 Değişik İmal Yöntemlerinin Kalıcı Gerilmeler Üzerine Etkisi	31
3.6 İşlenmiş Paslanmaz Çeliklerin Yüzeylerinde Oluşan Kalıcı Gerilmeler İle İlgili Literatür Araştırması	36
4. KALICI GERİLME ÖLÇÜM METOTLARI	69
4.1 Giriş	69
4.2 Mekaniksel Metotlar	70
4.2.1 Kalıcı Gerilmelerin Mekaniksel Metotlarla Belirlenmesinde Temel İlkeler	70
4.2.2 Delik Delme Metodu	71
4.2.3 Kesit Alma ve Katman Kaldırma Metotları	73
4.3 X-Ray ve Nötron Işınımı Metotları	74
4.3.1 X-Ray ile Gerilme Ölçümü	74
4.3.2 Synchrotrons	79
4.3.3 Nötron Kırınımı Metodu	79
4.4 Diğer Işın ve Dalga Metotları	80
4.4.1 Manyetik Metotlar	80

4.4.1.1 Manyetik Barkhausen Sesi Metodu	81
4.4.1.2 Manyetostriksiyon Metodu	82
4.4.2 Ultrasonik Metotlar	83
4.4.3 Raman Spektroskopisi	84
4.5 Kalıcı Gerilme Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Uygun Yöntemin Seçimi	84
4.6 Katman Kaldırma Tekniğine Dayalı Kalıcı Gerilme Ölçüm Yöntemi	89
4.6.1 Giriş	89
4.6.2 Katman Kaldırma Tekniğinin Temel Teorisi	89
4.6.3 Katman Kaldırma İşleminin Süreci	95
4.6.3.1 Numune Biçiminin Belirlenmesi	95
4.6.3.2 Direnç Tip Gerilim Ölçerler	98
4.6.3.2.1 Direnç Tip Gerilim Ölçerlerin Elektrik Devresi	102
4.6.3.3 Elektro Kimyasal İşleme	104
4.6.3.3.1 EKİ'nin Temel Teorisi	104
4.6.3.3.2 İşlenmiş Yüzeyin Niteliği	106
4.6.3.3.3 Elektrolit	106
4.6.4 Hesaplama Süresi	107
4.7 Literatür Taramasından Elde Edilen Sonuçlar	109
5. MALZEME VE METOT	112
5.1 Giriş	112
5.2 Deney Numunesi	113
5.3 Kesme Parametrelerinin Seçimi	115
5.4. İşleme Deneylerinde Kullanılan Tezgah	116
5.5. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi	118
5.6. Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçülmesi	119
5.7. Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesi İçin Deney Numunelerinin Hazırlanması	120
5.8. Kesici Takımdaki Aşınmanın İncelenmesi	120
5.9. Kalıcı Gerilmenin Ölçülmesi	121
5.10. Metot	123
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	127
6.1 Giriş	127
6.2 Kesme Hızı, Talaş Derinliği Ve İlerlemenin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkileri	127
6.3 Kesme Hızı, Talaş Derinliği Ve İlerlemenin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkileri	134
6.4 Kesici Takımda Aşınmanın İncelenmesi	138
6.5 Farklı Parametrelerde İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Değerlendirilmesi	141
6.6 Farklı Parametrelerde İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Parçalarda Oluşan Kalıcı Gerilmelerin Değerlendirilmesi	144
6.6.1 İşlenmemiş Deney Numunesi İle İşlenen Bütün Deney Numunelerinin Arasındaki Kalıcı Gerilmelerin Genel Değerlendirilmesi	145
6.6.2 Kesme Hızının Sabit Tutulup İlerleme Hızı İle Talaş Derinliğinin Artırılmasında Oluşan Kalıcı Gerilmelerin Değerlendirilmesi	148
6.6.3 İlerleme Hızı İle Talaş Derinliğinin Sabit Tutularak Kesme Hızının Artırılmasında Oluşan Kalıcı Gerilmelerin Değerlendirilmesi	151
6.6.4 Esas Kesme Kuvveti İle Kalıcı Gerilmeleri Arasındaki İlişki	157

6.6.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ve BUE Oluşumu İle Kalıcı Gerilmeler Arasındaki İlişki	158
6.6.6 Mevcut Olan Eşdeğer Kalıcı Gerilme Değerinin Teorik Olarak Hesaplanması	158
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	160
7.1 Sonuç	160
7.2 Öneriler	161
EKLER:	163
EK A Çizelge 6.1’de Listelenen Deney Sonuçları Baz Alınarak, Oluşturulan Kuvvetlerin Grafikleri	164
EK B Çizelge 6.2’de Listelenen Deney Sonuçları Baz Alınarak, Oluşturulan Yüzey Pürüzlülüğü Grafikleri	173
EK C Deney Numunelerinin İşlenmesi Esnasında Kullanılan Kesici Uçların, Elektron Tarama Mikroskobu (SEM)’ İle Elde Edilen Görüntüleri	177
EK D Deney Numunelerinin İşlenmesi Esnasında Oluşan Talaş Fotoğrafları	185
EK E Farklı Kesme Parametrelerinde İşlenen Deney Numunelerinden Katman Kaldırma Yöntemi İle Tespit edilen Kalıcı Gerilme Değerleri	189
EK F Farklı Kesme Parametrelerinde İşlenen Deney Numunelerindeki Kalıcı Gerilme Değerlerinin Grafikleri	207
KAYNAKLAR	223

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Adı	Tanımı/Değeri	Birimi
E	Elastikiyet Modülü		N/cm ²
σ	Gerilme		N/mm ²
μ	Poision oranı		
δ	Boşluk açısı		Derece
t ₁	Kesici takım derinliği		mm
t ₂	Talaş kalınlığı		mm
a	Talaş kaldırılan tabakanın kalınlığı		mm
Φ	Kesme açısı		Derece
β	Sürtünme açısı		Derece
r	Talaş kaldırma oranı		mm
V	Kesme hızı		m/dk
f	İlerleme hızı		mm/d
λ	Dalga uzunluğu		
ε	Deformasyon		
R	Bileşke kuvvet		N
F _u	Kesme direnci		N
F _c	Esas kesme kuvveti		N
F _f	İlerleme kuvveti		N
F _r	Radyal (Pasif) kuvvet		N
F _s	Metali kesmek için gerekli olan kuvvet		N
F _n	Normal kuvvet		N
F _R	Kesme direnci		N
Q _d	Temas alanında oluşan ısıyın sıcaklığı		⁰ C
$\sigma_{0.2}$	Malzemenin belirli bir sıcaklıktaki akma dayanımı		N/cm ²
E _d	Malzemenin belirli bir sıcaklıktaki elastikiyet modülü		N/cm ²
Hp	Horsepower Güç		W
MPa	Megapascal		
L	Uzunluk		mm
h	Kalınlık		mm
ξ	Sehim		mm
j	Akustik sabit		
f(a)	Deformasyon değeri		
ky	Deformasyon büyütme katsayısı		
ρ	Özdirenç		
Kısaltmalar	Açıklama		
AISI	Amerikan Çelik Normu		
YMK	Yüzey Merkezli Kübik		
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol		
BUE	Kesici Kenarda Malzeme Birikmesi (Built Up Edge)		
EPMA	Elektronik Prop Mikroskobu		
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu		
HRC	Sertlik değeri		
EKİ	Elektro Kimyasal İşleme		
ISO	Uluslar arası standart normu		

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil Numarası	Adı	Sayfa
2.1	Metallerden talaş kaldırma tekniğinin temel mekaniği	8
2.2	Metal kesme esnasında oluşan kuvvet sistemi	9
2.3	Ön kaymalı-tabakalı yapının oluşumu	10
3.1.a	Levhanın haddelenmesi sırasında homojen olmayan deformasyon	21
3.1.b	Levha kalınlığı boyunca oluşan kalıcı gerilme dağılımı	
3.2	Termal kalıcı gerilmeler	25
3.3	Termal kalıcı gerilmelerin neden olduğu deformasyon	27
3.4	Mekaniksel olarak dahil olmuş kalıcı gerilmelerin prensibinin gösterimi	30
3.5	AISI 4340 Malzemede yüzeyin taşlanması sonucu oluşan kalıcı gerilme yüzey gerilmeleri	32
3.6	Sertleştirilmiş ve temperlenmiş AISI 4340 çeliğin frezelenmesi sonucu yüzeyinde meydana gelen kalıcı gerilme dağılımı	33
3.7	Elektro erozyonla işleme sonucu 44 Rc sertliğindeki inkonel 718 malzemede oluşan kalıcı yüzey gerilmeleri	34
3.8	Elektro polisaj lama sonucu 50 Rc sertliğindeki inkonel 718 malzemede oluşan kalıcı yüzey gerilmeleri	34
3.9	AISI 5115 malzemeden imal edilen ve semantasyon işlemi uygulanmış bir dişli çarkın diş dibinde oluşan kalıcı gerilme dağılımı	35
3.10	57 HRC sertliğindeki iş parçasında ilerleme ve kenar hazırlayıcının eksenel gerilmeler üzerine etkisi	45
3.11	57 HRC sertliğindeki iş parçasında ilerleme ve kenar hazırlayıcının çevresel gerilmeler üzerine etkisi	45
3.12	41 HRC sertliğindeki iş parçasında ilerleme ve kenar hazırlayıcının çevresel gerilmeler üzerine etkisi	46
3.13	41 HRC sertliğindeki iş parçasında ilerleme ve kenar hazırlayıcının eksenel gerilmeler üzerine etkisi	46
3.14	22.9 µm radyüslü uçta iş parçası sertliğinin ve ilerleme oranının eksenel kalıcı gerilmeler üzerine etkisi	47
3.15	121.9 µm radyüslü uçta iş parçası sertliğinin ve ilerleme oranının eksenel kalıcı gerilmeler üzerine etkisi	47
3.16	22.9 µm radyüslü uçta iş parçası sertliğinin ve ilerleme oranının çevresel kalıcı gerilmeler üzerine etkisi	48
3.17	121.9 µm radyüslü uçta iş parçası sertliğinin ve ilerleme oranının çevresel kalıcı gerilmeler üzerine etkisi	48
3.18	Farklı kesme derinliklerinde kesme durağan duruma eriştikten sonra takım ucundan olan mesafe değişimleriyle iş parçası yüzeyindeki kalıcı gerilme değişimi	50
3.19	Farklı kesme derinliklerinde kesme durağan duruma eriştikten sonra takım ucunun arasındaki iş parçası yüzeyi altındaki derinliklerde kalıcı gerilme değişimi	50

3.20	Farklı kesme derinliklerinde kesme durağan duruma eriştikten sonra 0.005 mm ² lik kesme derinliğinde takım ucundan olan mesafelerdeki değişimlerle iş parçası yüzeyindeki aksel kalıcı gerilme değişimi	51
3.21	Düşük kesme hızları altında kesme doğrultusu boyunca ki kesit boyunca işlenmiş yüzeydeki kalıcı gerilmeler	52
3.22	5 ⁰ Talaş açısında kesitteki kalıcı gerilmeler	54
3.23	10 ⁰ Talaş açısında kesitteki kalıcı gerilmeler	54
3.24	15 ⁰ Talaş açısında kesitteki kalıcı gerilmeler	55
3.25	20 ⁰ Talaş açısında kesitteki kalıcı gerilmeler	55
3.26	İşlenmiş yüzeyden ölçülmüş kalıcı gerilme profilleri	57
3.27	1.459 mm ilerleme ve 274.8 mm/sn kesme hızında kesme durağan duruma eriştikten sonra kesici kenardan 1.125 mm mesafede iş parçası alt yüzeylerindeki kalıcı gerilme	58
3.28	Şekil 3.27 ile aynı fakat kesme hızı 400.8 mm/sn	58
3.29	Şekil 3.27 ile aynı fakat kesme hızı 137.4 mm/sn	59
3.30	Farklı yan yüzey aşınmalı takımlar ve keskin bir takım için takım ucundan olan mesafelerde işlenmiş iş parçası yüzeyindeki σ_x kalıcı gerilmeleri	60
3.31	Değişik sürtünme katsayıları değerleri ve 20 ⁰ 'lik talaş açısı altında iş parçasındaki σ_{11} kalıcı gerilmeleri	61
3.32	Değişik sürtünme katsayıları değerleri ve 20 ⁰ 'lik talaş açısı altında iş parçasındaki σ_{12} normal gerilmeleri	62
3.33	Değişik sürtünme katsayıları değerleri ve $\mu=0.4$ sürtünme katsayısı değeri altında iş parçasındaki σ_{11} normal gerilmeleri	63
3.34	Kesme doğrultusundaki normal gerilme dağılımı	64
3.35	Takım talaş ara yüzeyinin sürtünme durumuna hassas kalıcı gerilme dağılımı	64
3.36	Kalıcı gerilmelerin dağılımı	65
3.37	Kesme hızının fonksiyonu olarak çekme katman derinliği ve yüzey kalıcı gerilmeleri	66
3.38	İlerleme oranının bir fonksiyonu olarak teğet kalıcı gerilmeler	66
4.1	Temel gerilmelerin gösterildiği rozet gerinim ölçerler	72
4.2	Delik delme yöntemi ile kalıcı gerilme ölçebilen cihaz	73
4.3	Röntgen cihazının şematik biçimi	76
4.4	X-ışını kırınım cihazı	78
4.5	Ferro manyetik yapıların mıknatıslanma eğrisi	83
4.6	Çubuktaki gerilmelerin ölçüm şeması	90
4.7	Numunenin kesilmeden önceki ve kesildikten sonraki gerilme dağılımları	91
4.8	H kalınlığındaki bir düzlemden a tabakasının kaldırılması	91
4.9	İki destek üzerindeki kirişin deformasyonu	92
4.10	İç moment ve gerilme sistemi dengede olan ve deforme olan numune örneği	95
4.11	Tek tarafı mesnetlenmiş kirişin deformasyonu	96
4.12	Sehim miktarının Y ekseninden X eksenine taşınması ve sehim miktarının artırılması	96
4.13	Çift kollu numune	97
4.14	U biçimli numune	98

4.15	Yaprak ve tel gerinim ölçerler	101
4.16	Wheatstone köprü devreleri	102
4.17	Elektroliz işlemin temeli	105
4.18	Uygun bir elektrolit içerisindeki demirden iş parçasına uygulanan elektro kimyasal süreç	105
4.19	Koordinat başlangıcında, ortasında ve sonunda F(A) fonksiyonundan türev alma düzeni	108
5.1	Deneylerde kullanılan malzemenin teknik resmi	115
5.2	Kesme şartlarının sınırları	116
5.3	Deney parçasının CNC torna tezgahına bağlanması	118
5.4	Dinamometrenin CNC torna tezgahına bağlanması ve verileri değerlendiren bilgisayar sistemi	118
5.5	Kalıcı gerilmeleri ölçülecek parçaların CNC tel erozyon tezgahında kesilmesi	120
5.6	Katman kaldırarak kalıcı gerilme ölçme denet düzeneği	121
5.7	Katman kaldırma işlemini gerçekleştiren deney düzeneğinin şematik görünüşü	122
5.8	Kalıcı gerilmelerin belirlenmesinde kullanılan bilgisayar programının akış şeması	125
6.1	İşleme deneyleri esnasında oluşan kesme kuvvetleri diyagramı	129
6.2	Farklı kesme hızlarında ilerlemenin ve talaş derinliğinin kesme kuvvetine etkisi	132
6.3	Farklı kesme hızlarında ilerlemenin ve talaş derinliğinin ilerleme kuvvetine etkisi	132
6.4	Farklı kesme hızlarında ilerlemenin ve talaş derinliğinin radyal kuvvetine etkisi	133
6.5	Farklı kesme hızlarında ilerlemenin ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	136
6.6	Kesme hızı 50 m/dk ile işlenen deney numunesinde kullanılan kesici uç radyusu üzerinde oluşan BUE	139
6.7	Kesme hızı 75-100 m/dk ile işlenen deney numunesinde kullanılan kesici uç radyusu	139
6.8	Kesme hızı 125-150 m/dk ile işlenen deney numunesinde kullanılan kesici uç radyusu	139
6.9	Farklı kesme parametrelerinde işlenen deney numunelerinden elde edilen talaş görüntüleri	142
6.10	İşlenmemiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	146
6.11	Farklı parametrelerde işlenmiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	146
6.12	Kesme hızı 50 m/dk ile işlenmiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	148
6.13	Kesme hızı 75 m/dk ile işlenmiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	148
6.14	Kesme hızı 100 m/dk ile işlenmiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	149
6.15	Kesme hızı 125 m/dk ile işlenmiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	149
6.16	Kesme hızı 150 m/dk ile işlenmiş deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	150

6.17	Kesme hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığı ilerlemenin 0,15 mm/d ve talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu durumdaki deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	151
6.18	Kesme hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığı ilerlemenin 0,20 mm/d ve talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu durumdaki deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	152
6.19	Kesme hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığı ilerlemenin 0,25 mm/d ve talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu durumdaki deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	153
6.20	Kesme hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığı ilerlemenin 0,15 mm/d ve talaş derinliğinin 2 mm olduğu durumdaki deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	154
6.21	Kesme hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığı ilerlemenin 0,20 mm/d ve talaş derinliğinin 2 mm olduğu durumdaki deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	155
6.22	Kesme hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığı ilerlemenin 0,25 mm/d ve talaş derinliğinin 2 mm olduğu durumdaki deney numunesi üzerindeki kalıcı gerilmeler	156
6.23	Esas kesme kuvveti ile kalıcı gerilme arasındaki dağılım	157

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge Numarası	Adı	Sayfa
4.1	Farklı tekniklerin genel olarak karşılaştırılması	86
4.2	Analiz edilecek bölgenin malzeme ve geometrik problemlere göre farklı tekniklerin karşılaştırılması	87
4.3	Endüstride sıklıkla karşılaşılan malzemeler için her bir tekniğin uygulanabilirliği	88
4.4	Değişik malzemelere ait gerinim duyarlılığı	100
4.5	Elektrokimyasal işlemde sıklıkla kullanılan elektrolit çeşitleri	107
5.1	AISI 304 Östenitik paslanmaz malzemenin kimyasal bileşimi	113
5.2	AISI 304 Östenitik paslanmaz malzemenin fiziksel, mekanik ve işleme özellikleri	114
5.3	İşleme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri	117
5.4	Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri	119
6.1	Farklı kesme hızlarına bağlı olarak deneylerden elde edilen kesme kuvveti sonuçları	131
6.2	Farklı parametrelerde işlenen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri	135
6.3	Talaş derinliği 2 mm olduğunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	137
6.4	Talaş derinliği 1,5 mm olduğunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri	137
6.5	Deneyler esnasında kullanılan kesici uçlardaki aşınmalar	140
6.5	Deneyler esnasında kullanılan kesici uçlardaki aşınmalar (Devamı)	141
6.6	Deney numunelerinin geometrik bilgileri	145
6.7	Deneylerden elde edilen en büyük ve en küçük kalıcı gerilme değerleri	147
6.8	Mevcut olan eşdeğer kalıcı gerilmeler	159

ÖNSÖZ

Beni öğrenci olarak kabul eden ve bana her türlü konuda özellikle doktoramı tamamlamamda emeğini ve yardımlarını esirgemeyen, her sorunumla ilgilenip çözen tez danışmanın Yrd.Doç.Dr Nedim GERGER'e, bana akademik disiplini aşıl原因an, çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni sürekli yönlendiren ve sürekli desteğini gördüğüm, tecrübelerinden faydalandığım hocam Prof.Dr. Ulvi ŞEKER'e teşekkür gönül borcumdur.

Oluşturduğu alt yapı ve sağladığı laboratuvar olanakları için Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesine, CNC torna tezgahında deney numunelerinin işlenmesinde, yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesinde, kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde yardımlarını esirgemeyen Araştırma görevlisi Mustafa GÜNAY'a, SEM fotoğraflarının çekilmesinde bana yardımcı olan Dr.Ahmet GÜRAL'A, Kalıcı gerilmelerin ölçülmesinde emeğini, bilgisini esirgemeyen Araştırma görevlisi Fırat KAFKAS'a, Teknik desteğini esirgemeyen 3. Ana Bakım Fabrikası Teknik Müdürü Yb. İsmail KASAP'a sağladıkları imkanlar için minnettarım.

Sabırlı, dost, tartışmaya açık ve olumlu eleştirilerini benimle paylaşan, çalışmamı tamamlamamda imkan ve olanak sağlayan Komutanlarıma ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çalışma arkadaşlarıma, kedilerine ait olan zamanı bana bağışlayan eşim Funda'ya ve kızım Ceylin'e, benim bu günlere gelmemde çok büyük emekleri olan anne ve babama içtenlikle teşekkür ediyorum.

Balıkesir, 2007

Özgür TEKASLAN

1. GİRİŞ

Paslanmaz çeliklerin günümüzde kullanım alanı giderek artmaktadır. Özellikle tıp, havacılık, nükleer, gıda, savunma sanayi gibi birçok alanda gün geçtikçe kullanımı yaygın hale gelmektedir. Paslanmaz çeliklerde işlenebilirlik büyük sorunlar yaratmaktadır. Kullanım alanlarına göre istenen mekanik ve kimyasal özellikleri sağlamak için paslanmaz çeliklerin bileşimlerinde yapılan değişiklikler paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğini de etkilemektedir. Paslanmaz çeliklerin sahip olduğu yüksek çekme mukavemeti ve yüksek korozyon direnci, düşük ısı iletkenlik, sünek bir malzeme olması, yüksek miktarda krom-nikel ve bir miktar molibden gibi mukavemet artırıcı elementlerin içeriği ve işlerken pekleşme özelliği işlemeyi zorlaştıran başlıca etkenlerdir. İşlenebilirliğin zorlaşması imalatçılar için büyük sorun teşkil etmektedir [1-5].

Bütün üretim işlemleri, (ısı işlem, talaşlı ve talaşsız imalat, kimyasal işlemler gibi) makine parçaları üzerinde kalıcı gerilmeler oluşturur. Özellikle talaş kaldırma yöntemlerine bağlı olarak malzeme üzerinde gerilmeler oluşmaktadır. Kalıcı gerilmeler, dış yükler kaldırıldığında parçada kalan gerilmeler olarak tanımlanabilir. Kalıcı gerilmeler makine elamanlarının çalışma performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Kalıcı gerilme üretilen parçaların sertliğine, mukavemetine ve ölçü hassasiyetine belli bir etki yaptığı için genellikle istenen bir durum değildir. Kalıcı gerilmeler makine elamanlarının yorulma dayanımını etkiler ve boyutsal değişikliklere neden olabilir. Bu nedenle makine elamanlarındaki kalıcı gerilme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Kalıcı gerilmeleri zihinde canlandırmak, ölçmek veya mümkün olan yakınlıkta hesaplamak zordur [6-8].

Yapılan literatür araştırması sonucunda kalıcı gerilmelerin makine elemanları için ne kadar önemli olduğu ve bu kalıcı gerilmelerin mekaniksel, X-Ray, Nötron kırınımı, manyetik ve ultrasonik yöntemlerle ölçülebildiği görülmüştür. Bazı araştırmacılar da sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kalıcı gerilmeyi hesaplamaya

çalışmışlardır. Ancak bunlardan en sağlıklı sonucun deneysel yollarla elde edilebileceği görülmüştür [6-8].

Bu çalışmada, östenitik paslanmaz çelik malzeme değişik kesme parametreleri ile işlendikten sonra, üzerinde işlemeye bağlı olarak nasıl bir kalıcı gerilme oluştuğunu belirlemek hedeflenmiştir. AISI 304 paslanmaz çeliği, özellikleri itibariyle işlenebilirliği düşük ve çok yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu nedenle bu çalışmada, paslanmaz çelik çeşitlerinden, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik seçilmiştir. AISI 304 çeliğinden Ø 61 mm, boy 250 mm olarak hazırlanan 31 adet deney numunesi değişik kesme parametrelerinde ve işleme şartlarında CNC torna tezgahında işlenmiştir. Daha sonra bu numuneler üzerindeki kalıcı gerilme, kurulan bir deney düzeneği ile katman kaldırma yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Katmanların kaldırılması işleminde, art arda gelen katmanların hem seri bir şekilde kaldırılmasına hem de katman kaldırma esnasında numunede oluşan ilave gerilmelerin çok düşük seviyelerde gerçekleşmesine imkan tanıdığı için elektro kimyasal yöntem tercih edilmiştir. Bu amaçla hazırlanan bir deney cihazından faydalanılmıştır. Bu cihaz elektro kimyasal yöntemle talaş kaldırabilen makineden, güç kaynağından, analog dijital dönüştürücüden, bilgisayar ve yazıcıdan oluşmaktadır. Elektro kimyasal deney cihazında numuneden tabakalar kaldırıldıkça numunede oluşan deformasyon bilgileri bilgisayara gönderilmekte ve bu veriler daha sonra başka bir programla her katmandaki mevcut gerilme değerlerini hesaplayarak yazıcıya göndermektedir. Çalışmaya yön vermek için öncelikli olarak bir literatür taraması yapılmıştır.

Literatür taramasında, özellikle östenitik paslanmaz çelikler, bu çeliklerin işlenebilirliği, kalıcı gerilme, östenitik paslanmaz çeliklerde kalıcı gerilmenin nasıl oluştuğu ve oluşan kalıcı gerilmeyi tespit etme yöntemlerine ait konulara yer verilmiştir.

Literatür taramasına ek olarak değişik devir sayılarında, ilerlemeye ve kesme hızına bağlı olarak, CNC torna tezgahında her bir parametre için standart deney çubukları işlenerek, talaş kaldırmaya bağlı olarak oluşan kalıcı gerilmelerin tespit edilmesi ve literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler alaşımlı çeliklerin içinde kendi başına bir grubu oluşturur. Temel alaşım elementi kromdur (Cr). Paslanmaz çelikler korozyona karşı mükemmel dirençleri için tercih edilirler ve en az % 12 krom içerir. Krom oksijenle etkileştiğinde ince bir koruyucu krom oksit katmanı oluşturur ve çeliği korozyona karşı korur. Krom oranının artması ile Young modülü E 'nin arttığı ortaya konulmuştur. İçerisindeki karbon (C) oranı yeterince yüksek olduğu zaman paslanmaz-krom çelikleri karbon çelikleri gibi sertleştirilebilir. Paslanmaz çelikler kroma ek olarak molibden (Mo), bakır (Cu), titanyum (Ti), silisyum (Si), manganez (Mn), alüminyum (Al), azot (N) ve sülfür (S) gibi diğer alaşım elementlerini de içerir. Bu elementler malzemenin yapısını değiştirmek, korozyon direncini ve diğer özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Paslanmaz çelikler, kristal yapısına ve mukavemet özelliğine göre; östenitik, ferritik, martensitik, çökelti sertleştirilmiş (PH) olmak üzere dört gruba ayrılır [1-5].

2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler diğer paslanmaz çeliklere göre en çok kullanılan gruptur. Östenitik paslanmaz çelikler soğuk işleme tabi tutuldukları zaman kısa sürede yüksek dayanım kazanırlar. Korozyon direnci bakımından diğerlerine göre en iyisidir. Bu çelikler %6 ile 22 arasında nikel (Ni) ve %16 ile 25 Cr içeren üçlü demir-krom-nikel faz alaşımlarıdır. En yaygın östenitik paslanmaz çelik 18/8 (% 18 Cr - % 8 Ni) alaşımıdır. Bu çelik, östenitik grubunda temel düzeyde korozyon direncini temsil eder. Eğer daha iyi korozyon direnci gerekirse çeliğe molibden ilave edilir. Bu yolla aside karşı dirençli paslanmaz çelik elde edilir. Bunun yanı sıra korozyon direncini daha da artırmak için % 22 oranında Ni, % 26 Cr ve birazda Cu katılır. Östenitik paslanmaz çeliklerin ferritik paslanmaz çeliklerdeki gibi ısı ile sertleştirilmeleri mümkün değildir. Östenit dengeleyici element nikel, demir-krom-

karbon alaşımlarından ferriti hemen hemen yok ederken östenit alanını genişletir. 18/8 tipi östenitik paslanmaz çelikler düşük karbonlu (% 0.08), çok düşük karbonlu (% 0.003) ve stabilize edilmiş olmak üzere üç'e ayrılır. Karbon miktarı % 0.03'den az ise karbür oluşmaz ve çelik oda sıcaklığında tamamen östenitik olarak kalır. 18/8 paslanmaz çeliğin kolay işlenebilen alternatifleri de vardır. Yaygın olarak kullanılan bu çelikler tekrar sülfirize edilir. Bazen işlenebilirliğin artması için selenyum ilave edilir. Bu katkı maddeleri korozyon direncini zayıflatır. YMK östenitik paslanmaz çeliklerin süneklik, şekillendirilebilirlik ve korozyon dirençleri çok iyidir. Mukavemet, yoğun katı eriyik mukavemetleşmesi ile elde edilir ve östenitik paslanmaz çeliklerin soğuk deformasyon sonucu pekleşmesi ferritik paslanmaz çeliklerden daha fazla olabilir. Östenitik çelikler geçiş sıcaklıklarına sahip olmadıkları için, düşük sıcaklıktaki darbe özellikleri mükemmeldir. Bu çelikler ferromanyetik değildirler. Yüksek nikel ve krom miktarı bu çeliklerin maliyetinin artmasına neden olur. % 0.03 den daha fazla karbon içeren östenitik paslanmaz çelikler, taneler arası korozyona karşı hassas olabilirler. Çelik yaklaşık 870 ile 420 °C'ler arasında yavaş yavaş soğutulduğunda tane sınırlarında krom karbür çökelir. Daha sonra bu tane sınırları bölgesinde korozyon oluşur. Su verme, tavlama, ısıl işlem, korozyonu önlemek için kullanılabilir. Korozyona hassas çelik 870 °C'nin üzerinde ısıtıldığında krom karbürler çözüldükten sonra hızla soğutularak karbürlerin yeniden oluşması önlenir. Bu problemin bir başka çözümü ise çeliğe titanyum veya niobyum katmaktır. Karbon krom yerine titanyum ve niobyumu tercih ederek TiC ve NbC oluşturur. Bu işlem dengeleme olarak adlandırılır [4,5,9,10].

2.1.1 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapıları

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek miktarda Ni içerdiği için oda sıcaklığında östenitik YMK yapılarını korumaktadırlar. Bunun yanında Mn, C ve N'de östenitik yapının korunmasına ve dengelenmesine yardımcı olmaktadır. Demir-krom alaşımlarına nikelin ilavesi östenitin dengede olduğu bölgeyi genişletmekte ve martenzitik dönüşüm sıcaklığını düşürmektedir.

Yaygın olarak kullanılan östenitik paslanmaz çelikler etkili miktarda karbon içermektedir. 304 tip alaşımda genellikle % 0.06 C bulunur. Östenitik paslanmaz çeliklerde karbonun eriyebilme özelliği, sıcaklık düştükçe hızla düşüş yapar. Bu alaşımlar yavaş yavaş soğutulursa yapıda krom karbür çökeltileri ile karşılaşılır. 304 çeliği 1050 °C'den oda sıcaklığına yavaş soğutulursa, 850-400 °C arasında krom karbürler tane sınırlarında çökelmektedir. Yetersiz sayıdaki krom atomu, kritik sıcaklık aralığı olan, 850 °C'den, 400 °C'ye yavaş soğutma uygulamalarında, tane sınırındaki, matristeki taneden tane sınırları bölgesine doğru krom karbür çökmesi ile uzaklaştırılan krom atomlarının yerini alması için içine girerler. Bu nedenle tane sınırlarına yakın bölgeler korozyon direnci için gerekli olan % 12'den daha aşağı çekilmiş krom içeriğine sahiptir. Bu yüzden taneler arası korozyona karşı hassas hale gelmektedirler. Bu şartlardaki östenitik paslanmaz çelikler taneler arası korozyona karşı hassas oldukları için harici korozyona karşı da hassas olarak bilinmektedirler. Bu nedenle östenitik paslanmaz çelikler, krom-karbürü katı eriyik içine yerleştirmek için yeterince yüksek, ancak tane büyümesini önlemek için de, yeterince düşük uygun sıcaklıklarda tavlmalıdır [3,4,9,11].

Yüksek sıcaklıklardan sonra 304 paslanmaz çeliklerin her zaman hızlı soğutulmaları mümkün değildir ve bu korozyon problemlerine neden olabilir. Yavaş soğumanın neden olduğu taneler arası korozyonu önlemek için karbonla birleşen elementlerin katılmasıyla kimyasal kompozisyonunda değişimler sağlanabilmekte ve kararlı hale getirilmektedir [1,9,11].

2.1.2 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Östenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında östenitik (YMK) bir yapıya sahip oldukları için ısı ile işlemle önemli ölçüde sertleştirilememektedir. Buna karşın bu alaşımların soğuk deformasyonla dayanımı oldukça iyi hale getirilmektedir [3,5].

Östenitik paslanmaz çelikler mikro yapıdaki östenitin kararlı hale gelebilirliğine göre kararlı ve yarı kararlı östenitik çelikler olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Kararlı östenitik çeliklerin mikro yapıları soğuk deformasyondan

sonra östenitik olarak kalmaktadır. Yarı kararlı östenitik paslanmaz çelikler, soğuk deformasyonla belli bir düzeyde martenzite dönüşerek, östenit-martenzit karışımından oluşan yapıyı ortaya çıkarırlar. Östenitik paslanmaz çeliklerde karbon içeriğindeki küçük bir değişikliğin akma dayanımı üzerindeki etkisi büyüktür. Yaklaşık % 0.08 C içeren 304 östenitik paslanmaz çeliğin akma dayanımı 290 N/mm² iken % 0.03 C içeren 304 L östenitik paslanmaz çeliğinki ise 269 N/mm² civarındadır [9,11,12].

2.1.3 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri

Östenitik paslanmaz çelikler, endüstriyel, atmosfer ve asit maddelerine karşı bütün paslanmaz çeliklerden daha iyi korozif, dirence sahiptir. Parlatılmış yüzeyler, çoğu doğal şartlar altında toz ve kirden arınmış olarak yüzey özelliklerini korumaktadır. Korozyon şartları çok şiddetli olduğunda daha yüksek alaşım ihtiva eden 304 tip paslanmaz çelikleri gerekmektedir [2,9,11].

2.2 Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliği

Paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin düşük olduğu bilinmektedir. Paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğini etkileyen önemli özellikler ise aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilir.

1. Paslanmaz çelikler yüksek çekme mukavemetine sahip olup, akma ve kopma noktaları arasındaki mesafe düz karbonlu çeliklerinkinden daha fazladır. Bu nedenle paslanmaz çelikleri işlerken, sertleştirilmiş karbonlu çeliklere oranla daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulur.

2. Östenitik paslanmaz çelikler işlenirken pekleşme özelliğine ve düşük ısı iletkenliğine sahiptir. İşlerken pekleşme özelliği, sertleştirilmemiş düz karbon çeliklerine oranla, daha yüksek enerji tüketimine yol açar. Düşük ısı iletkenliği kesme bölgesinde sıcaklığın artmasına neden olur. Bu yüksek sıcaklık ikinci deformasyon bölgesinde difüzyon aşınması meydana getirir.

3. Aşındırıcı karbür tanecikleri ihtiva eden yüksek alaşımlı paslanmaz çelikler takım aşınmasının daha hızlı oluşmasına neden olur. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş haldeki martenzitik çeliklerin hassas işlenmesinde yüksek kesme hızlarından kaçınılmalıdır. Bu durum malzemenin ikinci defa temperlenmesine yol açar [2-11,13].

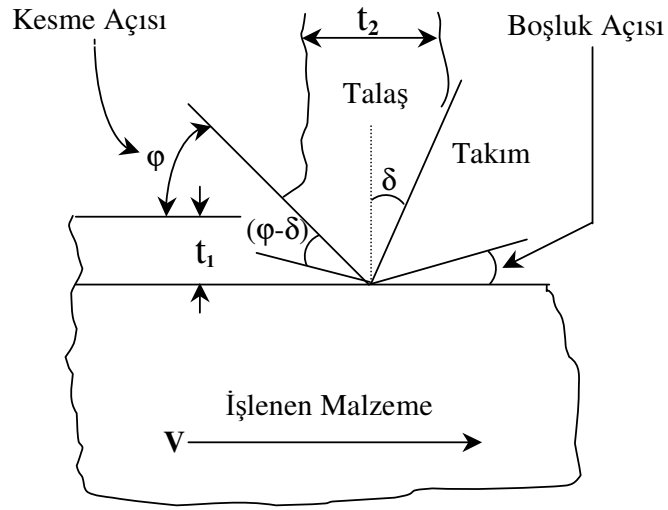
2.2.1 Talaş Oluşum Mekanizması

Talaş kaldırmada gerekli olan esas mekanizma, kesici takımın kesme kenarının hemen önünde iş malzemesi üzerinde bölgesel kayma deformasyonunun oluşmasıdır. Kesme sırasında, iş parçası ve takım arasındaki nispi hareket, takım yakınındaki iş parçasını bastırmak için ilk deformasyon olarak adlandırılan kayma deformasyonuna sebep olarak talaş oluşturur. Plastik akma, kayma bölgesi aracılığıyla meydana gelir. Plastik akma kapasitesi, bu kayma düzeninin sayısına bağlı olup, sırasıyla malzemenin kristal kafes yapısına ve davranışına bağlı olarak değişir. Malzemenin direnç gerilimi, elastik sınırını aştığı zaman, uygulanan kuvvet yönünde yönelmiş bitişik kayma düzlemleri arasında kalıcı nispi bir hareket oluşur. Bu hareket veya kayma bir defa olduğu zaman, bu özel düzlemler artarak daha fazla deformasyona veya zayıf düzleme karşı koyar. Bu çalışma sertleşmesi hemen hemen bütün çeliklerde görülmektedir, fakat en etkileyici olarak paslanmaz çeliklerde görülür [9,14,15].

Talaş, kesici takımın talaş yüzeyi üzerinden geçerek, kesici takıma karşı talaşın kayma sürtünmesi ve kesmesinden dolayı ikinci deformasyon olarak adlandırılan ek bir deformasyon işlemine maruz kalır. Bu iki deformasyon işlemi, karşılıklı etkileşime sahiptir. Takım/talaş yüzeyine sürtünen malzeme elemanı ısınarak ilk kayma bölgesinden geçmesi esnasında plastik olarak deforme olmaktadır. Bu nedenle, ikinci olay kayma düzlemindeki olaydan etkilenmektedir. Aynı zamanda kayma yönü, talaş yüzeyindeki deformasyon ve sürtünme işlemlerinden doğrudan etkilenir. Kayma doğrultusu, ilk deformasyon işleminde talaşın çalışma sertleşmesi ve ısınmasını etkiler [14,15].

2.2.2 Metallerden Talaş Kaldırma Tekniği

Metallerden talaş kaldırma işleminin mekanizması, Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Pozitif talaş açısı (δ) ve belli bir kesme kenarı açısına sahip kesici takım, t_1 derinliğinde numunenin yüzeyi boyunca hareket ettirilmektedir. Kesici takım malzeme yüzeyi ile φ kadar bir kayma düzlemi boyunca sürekli talaş kaldırılmaktadır. Talaş kalınlığı (t_2), φ ve δ açılara ve t_1 ’e bağlı olarak belirlenmektedir [9,14,15].



Şekil 2.1 Metallerden Talaş Kaldırma Tekniğinin Temel Mekanik [9,14,15]

Kesme açısı, talaş açısı ve talaş kaldırma oranı arasındaki ilişki Eşitlik 1.1’de verilmiştir.

$$\tan \varphi = \frac{r \cdot \cos \delta}{(1 - r \cdot \sin \delta)} \quad (1.1)$$

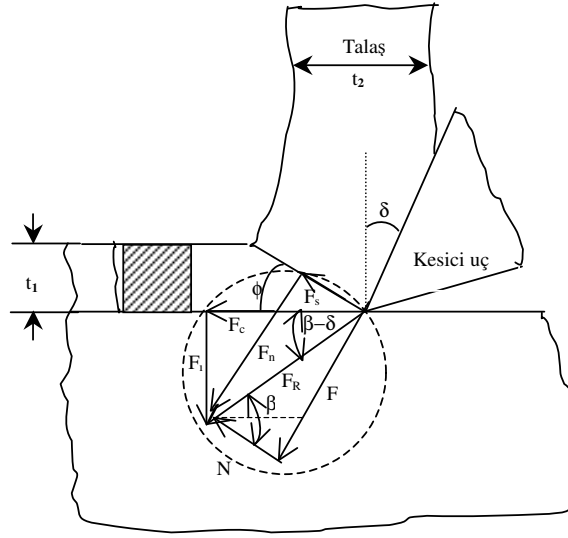
Burada;

- φ : Kesme açısı ($^{\circ}$),
 $r = t_1 / t_2$: Büzülme faktörü,
 δ : Talaş açısıdır ($^{\circ}$).

Metal kesme performansını büyük ölçüde etkilediğinden kayma düzlemi açısı talaş kalınlığının kontrolü için önemlidir. Malzemede meydana gelen kesme direnci (F_R) için Eşitlik 1.2 kullanılabilir [9,14,15].

$$F_R = Cot\varphi + tan(\varphi - \delta) \quad (1.2)$$

Şekil 2.2’de kesici takım üzerinde kuvvet bileşenlerinin etkisi gösterilmiştir. Bileşke kuvvet (F_R), esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve pasif kuvvet (F_p) olarak üç bileşen kuvvetten meydana gelmektedir. Kesici takımın kesme yönündeki esas kesme kuvveti (F_c), yapılan iş miktarını belirler. Esas kesme aynı zamanda kayma düzlemi üzerinde de iki bileşenlidir. Bu bileşenler, kayma düzlemi boyunca metali kesmek için gerekli kuvvet (F_s) ve bu düzlem üzerindeki kuvvet normali (F_n)’dir [9,14,15].



Şekil 2.2. Metal Kesme Esnasında Oluşan Kuvvet Sistemi [9,14,15]

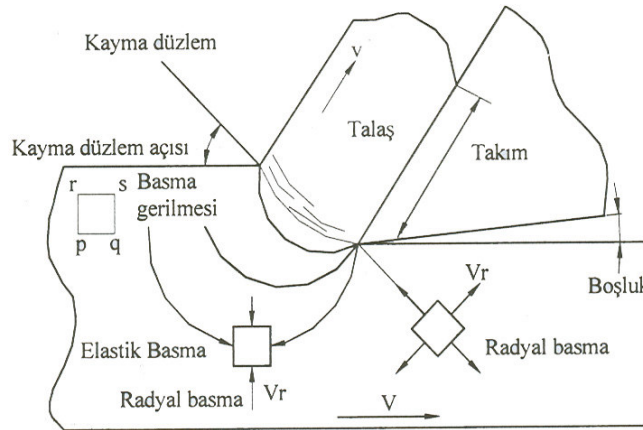
2.2.3 Metal Deformasyon Mekanizması

Talaşın oluşması için üç temel ihtiyaç vardır ve bunlar özetle;

1. Kesici olarak kullanılan bir takımın, iş parçasından daha sert ve aşınmaya karşı daha dirençli olması,

2. Talaş derinliği ve ilerlemeyle iş parçası ve takım arasında dalmayı sağlayan kesici uç geometrisine sahip olması,
3. İş parçası malzemesinin direncini yeterli kuvvetle yenmesi için iş parçası ve takım arasında bir kesme hızı veya nispi hareketin oluşmasıdır.

Bu şartlar varolduğu sürece işlenecek malzemeden takım talaş yüzeyi aracılığıyla talaş oluşturmak için malzemenin bir kısmı kaldırılacaktır. Böyle bir gereksinimi yerine getirebilmek için birçok faktör ve bunların bileşimleri mevcuttur. Talaş esas olarak çok dar bölgeler üzerinde oluşan bölgesel kayma işlemiyle meydana gelir. Klasik olarak, kayma bölgesi veya kayma düzlemi olarak adlandırılan bu deformasyon, radyal basma bölgesini ortaya çıkarır. Şekil 2.3'de takım, iş parçası içine nüfuz ettiğinde kayma düzlemine doğru hareket eder [9,14,15].



Şekil 2.3. Ön Kaymalı-Tabakalı Yapının Oluşumu [9,14,15]

Bütün plastik deformasyonlar gibi bu radyal basma bölgesi de elastik basma bölgesine sahiptir ve malzeme kesici uca yaklaştığı zaman, plastik basma bölgesine dönüşür. Bu plastik basma bölgesi temperlenmiş metallerde dengeleme ve yoğun dislokasyon karışıklıkları meydana getirir. Pekleşme takıma yaklaştığı zaman malzeme serbest yüzey yönünde kesilir. Kayma işlemi, kendisi homojen olmayan ön kaymalar serisi veya dar bir şeritler serisi oluşturur ki talaşlarda lamelli bir yapı ortaya çıkarır. Metaller işlendiğinde ve kesme işlemi davranışları dikkate alındığında, bu alan bütün metallerde mikro-ölçekte meydana gelmektedir. Şekil

2.3'de görüldüğü gibi bireysel ön kaymalar dar bir kayma şeridi içinde, bütün oluşturur. Bu şekil; dik kesme geometrisi ile gösterildiği gibi radyal basma bölgesinden dolayı oluşan kayma deformasyonunu gösterdiğinden önemlidir. Bu tür tabakalı yapıları normal talaş kaldırma işleminde gözlemek zordur. Fakat özel hazırlanmış iş parçalarıyla tarama elektron mikroskobu altında kolaylıkla gözlenebilir. Bu işlemde ön kayma, takım ucundan serbest yüzeye doğru dalga şeklinde hareket eden birçok dislokasyonların etkisiyle ortaya çıkar. Lameller şiddetli deforme olmuş malzemeyi gösterir ki bunlar ön kayma ile küçülerek ufalanmaktadır. Bu mekanizma ile bütün malzeme deformasyona uğramakta, ön kaymalar ise uygulanan gerilimlere yardımcı olmaktadır [14,15].

2.2.4 İş Parçası Özelliği

İşlenecek malzemenin özelliklerinin, talaş oluşumunda etkisi büyüktür. Akma dayanımı, basma yükü altında kayma dayanımı, deformasyon sertleşmesi (pekleşme), sürtünme davranışı, sertlik ve süneklik gibi malzeme özellikleri talaş oluşumuna etki etmektedir. Örneğin, yüksek dayanımlı malzemeler düşük dayanımlı malzemelere göre daha büyük kuvvet oluşturur. Daha büyük takım ve iş sehim yanında sürtünme ısısı işletme sıcaklıklarının artmasına yol açar ve daha büyük talaş kaldırma işi gerektirir. Malzeme yapısı ve bileşimi de talaş kaldırma işlemine etki eder. Örneğin, çelikteki karbür gibi sert ve aşındırıcı elemanlar takım aşınmasını hızlandırır. Yine talaş oluşumunda süneklik de önemli bir faktördür. Sünekliği fazla olan malzemeler sadece kesme esnasında talaşın aşırı plastik deformasyonuna müsaade etmez aynı zamanda sıcaklığı da arttırarak sürekli ve uzun talaş oluşturarak takım yüzeyi ile daha uzun süre temasta kaldığı için daha fazla sürtünme ısısına sebep olur. Bu tip talaşlar, aşırı deformasyona uğrayarak kıvrımlı bir şekil oluşturur. Diğer taraftan esmer dökme demir gibi bazı malzemeler, belli bir plastik deformasyon için gerekli sünekliğe sahip değildir. Bunun sonucu olarak da takım önünde sıkışmış malzemeler takım ucunun herhangi bir yerinde ufalanmış parçalar meydana getirerek gevrek bir tarzda kırılabilir ve böyle talaşlar kesikli veya kopuk talaş olarak adlandırılır. Sünek malzemelerin işlenmesinde kesici takım üzerinde

BUE (Built-up-Edge (Kesici kenarda malzeme sıvanması)) oluştuğunda sürekli talaşa değişmelerle karşılaşılır. Kesme bölgesinde aşırı basınç ve yerel yüksek sıcaklık işlenecek malzemenin kesici takım ucuna basınç kaynağı veya yapışmasına yol açarak BUE oluşturur. Bu yapışmış malzeme kesici ucu aşınmadan korumasına rağmen takım geometrisini değiştirir. BUE sabit ve kararlı olmayıp periyodik olarak kırılır ve talaşa yapışabilir veya takım altına geçerek işlenmiş yüzey üzerinde kalabilir [9,14,15].

2.2.5 İşlenebilirlik Problemleri

İşlenebilirlik genellikle iş parçasının ne kadar kolay işlenebileceği veya bir kesici takımla iş parçasının istenilen biçime getirilmesindeki ihtiyaçlar anlamında tanımlanmaktadır. İş parçası malzemesinin metalürjisi, kimyasal yapısı, mekanik özellikleri, ısıl işlemi, katkıları, kalıntıları (inklüzyonları), yüzey tabakası vb. özellikleri, kesici kenar, takım bağlama biçimi, takım tezgahı, işleme biçimi ve işleme şartları gibi faktörler işlenebilirlik üzerinde etkili olmaktadır. En genel anlamda işlenebilirlik, aşağıdaki kriterlerle tanımlanan “kesici takım-iş parçası” çiftinin işleme karakteristiği gibi görünür.

Bu kriterler;

- Takım ömrü,
- Talaş oluşumu ve talaşın uzaklaştırılması,
- Yüzey kalitesi,
- Kaldırılan talaş miktarı veya talaş kaldırma oranı,
- Kesme kuvveti,
- Kesme özgül direnci,
- Sıvanma (Built-up-edge) BUE eğilimidir [9,11,15,16].

Bu çalışmada östenitik paslanmaz çelik kullanılacağı için bu malzemelerin işlenebilirlik problemleri üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Paslanmaz çeliklerde yüksek çekme mukavemeti ve korozyon direncini sağlamak için gerekli olan malzeme kompozisyonunu paslanmaz çeliklerin işlenmesini zorlaştırmaktadır.

İşlerken pekleşen kalın bölgeler, tel şeklindeki talaşlar, şiddetli harmonikler ve yüksek işleme sıcaklıkları talaş kaldırma işlemi sırasında büyük rol oynamakta ve kesici takım ömrünü azaltmaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerdeki krom, nikel ve molibden muhtevası bu alaşımların yüksek gerilmeler altında plastik deformasyona uğramasına sebep olmaktadır. Ayrıca, paslanmaz çeliğin soğuk olarak çekilmesi esnasında karbon çeliklerinde oluşan pekleşme tabakasından daha kalın bir sertleştirilmiş tabaka oluşur. Ek olarak, kesici takım ile temasta olan yüzey katmanları, malzemenin özüne göre, iki kat daha sert olabilir. Paslanmaz çeliğin plastik deformasyonu için gerekli olan yüksek kesme kuvvetleri ısıyı ve takım aşınmasını artıran ek bir pekleşmeye neden olurlar [5,9-11].

Diğer bir problem ise, paslanmaz çeliğin sıvanması ve BUE'ye yol açmasıdır. BUE kesici uçlardaki aşınmayı artırarak işlenen parçaların yüzeylerinin bozuk çıkmasına sebep olur. Sıcak talaşlar işlenen iş parçasından uzaklaşırken kesiciyi aşındıran ve işlenen yüzeyi bozan uzun tel halinde oluşurlar. Bunun engellenmesi için operatörün her bir işlenen parçadan sonra talaşları temizlemesi gerekir ki bu durum verimliliği olumsuz yönde etkiler [9-11,17].

Paslanmaz çeliklerin işlenmesi sırasında, kayma düzlemleri kaynak olmuş dilimli talaşlar, uzun süreli tiz seslerin çıkmasına neden olur. Yüksek harmonik frekanslara sahip bu sesler kesici uçların çatlamasına ve kırılmasına neden olacaktır [10,11].

Yüksek krom ve nikel muhtevasından dolayı paslanmaz çelikler diğer karbonlu veya alaşımlı çeliklerden daha yüksek sünekliğe ve daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle talaş kaldırmak için gerekli olan yüksek enerji, talaşlarla birlikte iş parçasından uzaklaşmak yerine kesme bölgesine hapsolür. Kesme bölgesinde oluşan ısı arttıkça iş parçası ve kesici üzerindeki aşınma mekanizmaları da hız kazanır. Bu durum kesicilerde çatlaklara sebep olabilecek ısı genleşmeyi ve ısıl yorulma mekanizmasını hızlandırır. Artan ısı, krater aşınmasını artırarak, ucun kırılma riskini çoğaltır [10,11].

2.2.6 İşlenebilirliğin İyileştirilebilmesi İçin Yapılanlar

İşlenebilirliğin iyileştirilmesi ve yukarıda bahsedilen problemleri azaltmak için;

1. Paslanmaz çeliklerin kompozisyonuna küçük miktarda diğer katkı elementleri katılmıştır. Bununla birlikte, işlenebilirlik artırılırken korozyon direnci ve diğer faydalı özelliklerden ödün verilmemelidir. İşlenebilirliği artırmak için Sandvik Steel’de yapılan bir çalışmada oksit kalıntılarının yerini alüminyum ve sülfid bileşenleri almıştır.

Sonuç olarak korozyon direnci ve mukavemette hiçbir değişiklik olmayan SANMAC adı verilen ve kolay işlenebilen tip bir paslanmaz çelik yapılmıştır. Kolay işlenebilen SANMAC 304 ve 316 tip paslanmaz çelik kaliteleri, sıradan 304 ve 316 tiplerle özdeş özelliklere sahiptirler. Hatta yeni geliştirilen tiplerdeki sülfid ve oksit kalıntıları, talaşın kırılmasını sağlamakla birlikte yüksek hızlarda yağlama etkisi oluşturmakta ve işlerken sertleşen katmanın daha ince olmasına sebep olmaktadır.

Bu yeni geliştirilen alaşımların işlenebilirliği yapılan iki deneyle sıradan alaşımlarla karşılaştırılmıştır. Birinci deneyde SANMAC 316 L tipi ile yüksek sülfürlü 304 tipi alaşımın işlenebilirliği karşılaştırılmıştır. Normal 316 tip paslanmaz çelik genelde işlenebilirlik açısından tip 304’e göre daha kötüdür, fakat yeni geliştirilen alaşımın işleme zamanında % 20 lik bir düşüş görülmüştür. SANMAC 316 L’nin işlenmesinde kullanılan iş mili devir sayısı, tip 304’ün işlenmesinde kullanılan devir sayısından % 40 daha fazla seçilmiştir. Aynı zamanda kırılan talaşlar sayesinde her bir parçada % 5 - % 10 arasında zaman tasarrufu sağlanmıştır.

Takım aşınmasının karşılaştırılmasında 20 adet parça işlendikten sonra, kesici uçlar sıradan 304 tip paslanmaz çeliği işleyen uçlara göre daha az aşınma göstermiştir. Sıradan paslanmaz çeliği işlerken üç parçadan sonra kesicilerde aşınma görülmüştür ve 20 parça işlendikten sonra iç çap işleyen kesici uçların tamamen aşındığı görülmüştür. Fakat aynı dış çap ve iç çap kesici uçları SANMAC’ın işlenmesinde, 20 parçadan sonra, daha az bir aşınma göstermiştir. Bu az aşınma sayesinde, daha tutarlı ölçüler elde edilebilmiştir.

Diğer bir karşılaştırma deneyinde SANMAC 304 L ile sıradan 304 tip paslanmaz çeliklerin işlenmesi karşılaştırılmıştır. 304 L'nin işlenmesinde işleme zamanı % 22 düşmüştür ve kesici uçlar % 35 daha uzun ömürlü olmuştur.

2. Paslanmaz çeliklerin işlenebilirliklerinin artırılması için paslanmaz çeliğin kompozisyonlarında yapılan değişikliğe ek olarak kesici takımlarda da bir takım değişiklikler yapılmaktadır. Kesici takımın kaplanması, geometrisi ve kompozisyonları vb. özellikleri optimize edilmektedir. Kesici uçlardan paslanmaz çeliklerin işlenmesinde optimum verim almak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, Sandvik M-Kalite karbür uçlar özellikle paslanmaz çeliklerin işlenmesi için geliştirilmiştir. Yüksek kesici kenar mukavemeti için yüzeyler kobaltça zenginleştirilmiştir. Talaş kırıcı uzun talaşların oluşumunu engelleyecek biçimde dizayn edilmiştir. Pozitif talaş geometrisi daha yumuşak bir kesme sağlayarak, takım ömrünü uzatır ve yüzey kalitesini artırır. Buna rağmen, optimize edilmiş kesicilerle dahi paslanmaz çeliği işlemek sıcak ve yapışkan bir olaydır.

ISO M-kalite uçlar için, BUE oluşumunu engelleyen ısıya karşı koruyucu tabaka oluşturarak oluşan ısıyı takımda tutma yerine takıma ve kesme sıvısına verme özelliklerini kazandıran PVD/CVD kaplama tipleri geliştirilmiştir. Bu kaplamalar aynı zamanda talaşların kesici uca yapışmasını engelleyerek, kesici uç ile talaş yüzeyi arasında daha az sürtünmeye yol açmış ve talaşın daha kolay atılmasına imkan vermiştir.

Sandvik'te yapılan deneyler, M-serisi kesici uçların daha iyi talaş kontrolü, daha az boş zaman ve azaltılmış takım kırılması sayesinde verimliliği % 10 - % 20 artırdığını göstermiştir. Toplam verimliliğin iyileşmesine ilaveten çıkan talaşlar çabuk koptuğu için işlenen parça yüzeyi de kaliteli olmaktadır. Örneğin, çift dilimli bir pervanenin dökme 316 paslanmaz çeliğinden Okuma LB15 torna tezgahında tormalanmasında normal bir kesici uçla bu parçayı işlemek için 7.27 dakikalık bir süre gerekli iken M-serisi bir kesici uç kullanarak tormalama işlemi 2.64 dakikaya düşürülmüştür, kesme hızı 68 metre/dakikadan 138 (m/dk)'ya çıkarılmıştır. Verimlilik % 79 oranında artmıştır. Uç ömrü 4 katına çıkmıştır ve her bir parça için iki uç yerine, iki parça için bir uç kullanılmıştır [9,18].

Sonuç olarak işlenebilirliğin iyileştirilmesi için yapılanlar işlenebilirliği belirli oranda iyileşirmiştir. Ancak hala östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği bir sorun olarak devam etmektedir.

3. KALICI GERİLMELER

3.1 Kalıcı Gerilmeler Ve Önemi

Mühendislik alanındaki gelişme imalat teknolojisinin de gelişmesine yol açmakta, gelişim de yanında bir takım sorunlar getirmektedir. Buna bağlı olarak imal edilen makine elemanlarında bazı özelliklerin ve değerlerin bilinmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlardan birisi de, imalat teknolojisi sonunda parçaların yüzey tabakasında oluşan kalıcı gerilmelerin araştırılması olarak karşımıza çıkmaktadır [19-21]. Kalıcı gerilmeler ve yorulma ömrü arasındaki ilişki birçok güncel çalışmanın konusu olmaktadır [6].

Kalıcı gerilmeler, dış yükler kaldırıldığında parçada kalan gerilmeler olarak tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle kalıcı gerilmeler dış kuvvetlere bağlı olmayan ve bir parçada “hapsolmuş” gerilmeler şeklinde düşünülmektedir [16]. Mekanik veya termal uygulamalarda yeni kalıcı gerilmeler oluşturulabilir. Homojen olmayan plastik deformasyonlar, ısı işlemler ve çeşitli yüzey işlemleri kalıcı gerilme dengesinde ve dağılımında değişikliğe yol açabilirler [6]. Kalıcı gerilmelerin, üretilen parçanın sertliğine, mukavemetine ve ölçü hassasiyetine belli bir etki yaptığı bilinmektedir. Parçanın şekli karmaşık veya parçalarda çentik elemanları (dişliler, vidalar vs.) varsa, kalıcı gerilmeler bu parçalarda daha çok etkili olmaktadır. Karmaşık biçimli parçalar daha yoğun teknolojik koşullarda olduğundan, bu parçalarda kalıcı gerilmeler en üst seviyededir. Bu değerlerin hangi derinliğe nüfuz ettikleri, işaretlerinin ne oldukları teorik ve deneysel yöntemlerle hassas olarak belirlenmesi büyük zaman kaybına neden olmaktadır [6-8]. Son yıllarda elektro mekanik konularındaki bilgilerin gelişimi, deney değerlerinin elektrik sinyallerine ve bu sinyallerin bilgisayarın anlama mantığına dönüştürülüp sonuçların bilgisayarda özel programlardan yararlanarak elde edilebilmesi bu tür problemlerin çözümünü kolaylaştırmıştır.

Kalıcı gerilmeler, mühendislik malzemelerinin yorulmalarında önemli rol oynamaktadır. Çünkü yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar. Kalıcı gerilmelerin de yüzeyde oluşması genellikle bu durum için çok uygundur. Yüksek gerilme alanlarında basma gerilmeleri genellikle faydalıdır. Özellikle basma kalıcı gerilmelerinin parçaların yorulma ömrü, kırılma mukavemeti ve gerilme korozyonu üzerinde olumlu etki yaptığı bilinmektedir. Basma gerilmeleri, yorulma çatlaklarının oluşumuna ve gelişimine engel olur. Çekme gerilmeleri ise çatlak oluşumuna ve gelişimine yardımcı olduğundan zararlıdır. Ayrıca çekme kalıcı gerilmeleri, gerilmeli korozyon çatlaklarının oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Bu nedenle, parçanın kalıcı gerilme durumunun bilinmesi arıza nedenlerinin anlaşılması açısından önemlidir [6,22].

Tekrarlanan yükler altında çalışan makine parçalarının bir takım yorulma deneyleri yardımıyla yorulma ömürlerinin belirlenmesi üretim hazırlığında ilk aşamadır. Yorulma deneylerinde elde edilen sonuçlardan, parça tasarımında ve imalatında yararlanılacak spesifikasyonların hazırlanmasında faydalanılır.

Yukarıdaki yöntem genellikle hesaplamaların yapılmasında yorulma deneylerinde kullanılan numuneler ile özdeş makine parçalarına ait malzeme davranışlarının göz önünde bulundurulmasını gerektirir.

Yorulma çatlakları maksimum çekme gerilme bölgelerinde ve genellikle parça yüzeyinde meydana geldiği için ince yüzey katmanlarında kasten oluşturulmuş kalıcı basma gerilmeleri makine parçalarının yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırabilir ya da benzer yorulma ömrüne sahip daha hafif ve küçük parçaların kullanımına olanak tanıyabilir [16,23].

Kalıcı gerilmeleri tamamen zararlı görmek yanlıştır. Gerçekte kritik parçalarda istenen kalıcı gerilmeleri oluşturmak için birkaç yöntem kullanılır. Bu yöntemler; sertleştirme, bilyeli dövme ve yüzey ovalamadır [24]. Yorulma çatlaklarının başlamasına ve yayılmasına karşı direnci artıran, gelişmiş yorulma özelliklerini sağlayan mekanik yüzey işlemleri (derin haddeme, lazer şokları ile dövme, püskürtmeli dövme, fırçalama gibi), metalik yüzeyler için birçok faydalı etki

sağlamaktadır. I. Nikitin vd. AISI 304 östenitik çelik malzemenin 600 °C sıcaklıkta derin haddelenmesi ve lazer şokları ile dövülmesi sonucu malzemedeki yorulma davranışı ve kalıcı gerilme kararlılığını incelemişlerdir. Lazer şokları ile dövmenin de derin haddeleme (büyük kalınlıklarda yapılan haddeleme) ile hemen hemen aynı yorulma ömrünü gösterdiği görülmüştür. Lazer şokları ile dövme uygulaması sonucunda yüzeyde yaklaşık olarak –300 MPa basma kalıcı gerilmesi oluşmuştur. Derin haddeleme sonucunda ise yaklaşık olarak –670 MPa basma kalıcı gerilmesi tespit edilmiştir. Bütün kalıcı gerilmeler X-Ray kırılma tekniği ile ölçülmüştür [25].

Kalıcı gerilmelerin yararlı etkileri günümüzde genel olarak kabul edilmektedir. Otomotiv ve uçak endüstrisi de bu avantajı kendi yararları doğrultusunda kullanmaktadır. Bütün tasarımcılar ve mekanik donanım imalatçıları tarafından yararlanılan bu prensiplerin geniş bir uygulaması, malzeme kullanımında kapsamlı bir ekonomik gelişme ile sonuçlanmaktadır [16].

Genel anlamda makine elemanları, sanayiinin her alanında kullanılan ve yaptığı işe uygun olarak değişik zorlama tiplerinin etkisinde kalan sistemlerdir. Bu nedenle makine elemanlarının imalatı esnasında her türlü iç zorlamanın çok iyi hesaplanması, tasarımlarının ve imalat parametrelerinin buna göre belirlenmesi gerekmektedir. Teori ve pratiğin çeşitli etkenler nedeni ile birbiri ile uyuşmamasından, imal edilecek parçalarda meydana gelecek iç gerilmelerin deneysel yollarla ölçülmesi gerekmektedir. Ayrıca üretim esnasında deformasyon sonucu oluşan kalıcı gerilmelerin ölçümleri, tasarımda büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, mühendislik faaliyetlerinin devam ettiği tüm alanlarda imal edilecek sistemlerin uzun ömürlü, kaliteli, emniyetli ve ekonomik olabilmesi için imalatla ilgili tüm parametrelerin çok hassas olarak belirlenmesi istenmektedir. Karmaşık parçaların teorik olarak mukavemet hesaplarının yapılması, etkiyen kuvvetlerin ve gerilmelerin hesap yolu ile bulunmasını zorlaştırmaktadır. Hesaba katılmayan ve belirlenemeyen kuvvetler, ileride büyük problemlere neden olabilmektedir [16].

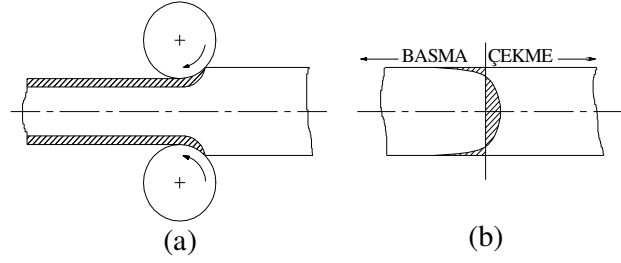
Malzemenin tabakalar halinde katmanların kaldırılması sonucu oluşan deformasyondan yararlanmak suretiyle, kalıcı gerilmelerin belirlenmesi yöntemi en yaygın metotlardan biridir. Hooke kanunu uyarınca bir malzemeye uygulanan

kuvvet sonucu malzemede boyut değişikliği olmaktadır. Çeşitli imalat yöntemi ile üretilen makine elemanlarında değişik işlemler nedeni ile malzemede oluşan ve makine elemanlarının yorulma ömrü üzerinde etkisi olan kalıcı gerilmelerin belirlenmesi gerekmektedir [16].

3.2 Kalıcı Gerilmelerin Oluşumu

Kalıcı gerilmeler olumlu, kontrol edilemediği durumda ise olumsuz etkilere sahiptir. Cıvata, pim, sıkı geçme gibi bağlantılarda kalıcı gerilmeler olumlu bir etki yapmaktadır. Ancak ısı işlemede, parçada şekil değişimine; soğuk çekmede, soğutmada ve taşlamada, çatlaklara; kalıplarda, kaynak işlemlerinde ve takımlarda çalışma süresinin azalmasına neden olurlar [26]. Düzenli olmayan plastik deformasyon işlemlerinin hepsinde kalıcı gerilmeler oluşur. Düzensiz plastik deformasyon veren işlemlerin hepsinde kalıcı gerilmeleri dikkate alınması gerekmektedir. Metallerin işlenmesi esnasında kalıcı gerilmelerin genel oluşumu Şekil 3.1.a'da gösterilmektedir. Haddeme işlemini gösteren bu örnekte levhanın sadece üst yüzeylerinde plastik akma meydana gelmektedir. Levhanın merkezindeki lifler sıkıştırmadan etkilenmezken, levhadaki yüzey taneleri deforme olur ve uzamaya çalışır. Levha sürekli denge durumunu korumak zorunda olduğundan, merkez ve yüzey bölgelerinde uzamalar oluşmaktadır. Yüzey lifleri levhanın merkez liflerini uzatmaya çalışırken, merkez lifleri yüzey liflerinin uzamasına engel olmaya çalışır. Bu durumda, levhanın merkezinde çekme ve yüzeyde basma kalıcı gerilmeleri oluşur (Şekil 3.1.b). Genelde, homojen olmayan deformasyonla meydana gelen kalıcı gerilmenin işareti, kalıcı gerilmeyi meydana getiren plastik uzamanın işareti ile terstir. Haddeme dış yük kaldırıldığı zaman haddeme ile yatay doğrultuda uzamış olan yüzey lifleri basma kalıcı gerilmelerini ortaya çıkarır.

Cisimlerde oluşan kalıcı gerilme sistemi statik olarak dengede olmalıdır. Şekil 3.1.b'deki yatay yöndeki kalıcı gerilme bölgeleri dengededir. Basma kalıcı gerilmelerine bağlı eğri altında kalan alan çekme kalıcı gerilmeleri altında kalan alanı dengelemelidir. Ancak, üç boyutlu kalıcı gerilme modellerinin bulunması, gerçek durumu daha da karmaşık hale getirdiği unutulmamalıdır.



Şekil 3.1. (a) Levhanın Haddelenmesi Sırasında Homojen Olmayan Deformasyon;
(b) Levha Kalınlığı Boyunca Oluşan Kalıcı Gerilme Dağılımı [16]

Kalıcı gerilmeler elastik gerilmelerdir. Kalıcı gerilmenin ulaşabileceği maksimum değer malzemenin akma gerilmesi ile sınırlıdır [5]. İmalat sonucu oluşan kalıcı gerilmeleri gidermek için malzeme belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak gerilme giderme işlemi uygulanmaktadır. Bu yöntemle malzeme deforme olabilir ve gerilmeler serbest kalabilirler. Bu nedenle malzeme gerilme giderme sıcaklığına eriştikten sonra yavaş soğutma önemli bir neden olmaktadır [5,27,28].

Yüzeyde uygun basma kalıcı gerilmelerinin oluşturulması, yorulma performansını artırmanın çok etkili bir yolu olarak bilinmektedir. Burada sadece geniş ölçüde tane boyutlarıyla karşılaştırılabilen bölgeler üzerinde etkili olan makro gerilmeler dikkate alınır. Bu gerilmeler X-Ray metodu ile veya malzeme yüzeyinden ince bir katman kaldırıldığı zaman boyutlarda oluşan değişikliklerin dikkate alınması suretiyle ölçülebilir. Plastik deformasyonun, deforme olan parçanın tam kesiti boyunca uniform olmadığı durumlarda, kalıcı gerilme değeri yükselmektedir. Dikkate alınan metal numune yüzeyi bükme nedeni ile çekme etkisi altında deforme olacaktır. Bu nedenle, bükülen parça plastik deformasyona uğrayacaktır. Dış kuvvetler kaldırıldığı zaman plastik deforme olan bölgeler, elastik bölgelerin, elastik geri esnemenin dolayısıyla gerilmeye dönüşümüne engellemektedir. Bunun içindir ki, elastik deforme olmuş bölgelerde çekme kalıcı gerilmeleri oluşacak ve plastik deforme olan bölgeler numunenin tam kesiti üzerindeki gerilmeleri dengelemek için basma kalıcı gerilmesi şeklinde olacaktır. Bölge, basmadan dolayı plastik deforme olurken, dış kuvvetler kaldırıldığında bir çekme kalıcı gerilmesine sahip olacaktır [5,27].

Birçok amaç için kalıcı gerilmelere, bir dış kuvvet yardımı ile ortaya çıkan kuvvet olarak bakılabilir. Bu nedenle, yüzey üzerine dıştan uygulanmış çekme gerilmesine, yüzeydeki bir noktada var olan bir kalıcı basma gerilmesinin ilavesi bu noktada yorulma bozulması olasılığını azaltmaktadır [5,27].

3.3 Kalıcı Gerilmelerin Sınıflandırılması

Kalıcı gerilmeler imalattan sonra parçaya hiçbir kuvvet, sıcaklık etkisi yapılmadan parçada kalmaktadırlar ve makinenin çalışması sırasında oluşan gerilmelerle cebirsel olarak toplanmaktadırlar [29]. Parçalarda oluşan kalıcı gerilmeler kuvvet alanı kapsamına göre sınıflandırılmakta ve I., II., III. grup gerilmeler olarak üç gruba ayrılmaktadır [22,23,30].

I. grup gerilmeler hem dalga yöntemleri (X-ışını, manyetik, ultrasonik, vb.) hem de çeşitli mekaniksel yöntemlerle (delik delme ve katman kaldırma teknikleri ile) belirlenebilir [30].

II. ve III grup gerilmeler X-ışını yöntemi ile belirlenebilir veya elektromanyetik dalgalar yardımıyla da ölçülebilir. Bu yöntemlerle deformasyonlar belirlendikten sonra, elastisite tabanında bilinen formüller kullanılarak kalıcı gerilmeler hesaplanabilir [22,23,29].

3.3.1 I. Grup (Makro) Gerilmeler

Bunlara makro gerilmeler de denilmektedir. Bu tür gerilmeler parçanın haddeleme, dövme, dökme, bükme, talaşlı imalat, bilyeli dövme, eşit olmayan ısıtma soğutma, ısıl işlem, kaplama ve benzeri işleme usullerinde oluşmaktadır. Bu tür gerilmeler parçada boyutsal değişikliklere neden olmaktadır. Bu olaylara katı cismin fiziği açısından bakıldığında makro gerilmelerin nedenleri; malzeme kristal

kafesindeki çarpılmalar, dislokasyon, ana malzemenin kristal kafesine katılmış dış atomlar, genellikle katı cisimlerin atom veya dislokasyon modelleridir.

Makine üretiminde teknolojik faktörlerin oluşturdukları gerilmeler çoğu zaman birinci grup gerilmeler, yani makro gerilmeler olarak kabul görür ve bu gerilmelere artık veya kalıcı gerilmeler olarak adlandırılır [22].

3.3.2 II. Grup (Mikro) Gerilmeler

İkinci grup gerilmeler, tanelerin doku kuruluşlarında, blok halinde olan tanelerde, bloklar arasında, mikro alanlarda veya her bir tanede, genellikle polikristalik malzemelerde bileşenlerin farklı mekanik özellikleri sonucunda oluşan gerilmelerdir. Bunlara mikro gerilmeler de denir. Bu gerilmelerin oluşma nedenleri; malzemenin ısı işleminde veya ısıtılıp soğutulması esnasındaki faz değişikliklerinin ve hacimde eşit olmayan plastik deformasyon alanlarının olmasıdır [29,31].

İkinci grup gerilmeler yalnız mono ve polikristalik bünyeli malzemelerde, yani anizotrop malzemelerde, oluşabilirler. İzotrop malzemelerde (cam, plastik, vb.) mikro gerilmeler oluşmazlar. Bu tür malzemelerde dış etkiler malzemenin tüm kısımlarını aynı derecede etkilediğinden bunlarda yalnız birinci grup gerilmeler söz konusu olabilir [29].

3.3.3 III. Grup (Submikroskopik) Gerilmeler

Bu gruptaki gerilmelere submikroskopik gerilmeler veya Heyn gerilmeleri de denilmektedir. Bu tür gerilmeler malzemenin kristalik kafesini kapsamakta bu nedenle, kristal kafesin çarpılması veya üçüncü grup gerilmeler olarak da adlandırılmaktadır. Bu gerilmeler, katı cisimlerin gerginlik halinin değerlendirilmesinde büyük önem kazanmaktadır. Submikroskopik gerilmelerin oluşma nedenleri kristal kafesteki dislokasyonların ve kenar atomlarının olması ve

bunların kristal kafesteki çarpılmaları etkilemesidir. Değişen işaretli kuvvetlerden etkilenen makine elemanlarında ilk yorulma çatlakları kristallerdeki bu üçüncü tip gerilmeler nedeniyle meydana gelmektedir [29,32].

3.4 Kalıcı Gerilmeleri Oluşturan Nedenler

Gerilmeler amaçlarına uygun olarak farklı bir biçimde sınıflandırılabilir. Kalıcı gerilmeleri oluşturan kaynaklar;

1. Termal kaynaklı kalıcı gerilmeler,
 2. Metalürjik kaynaklı kalıcı gerilmeler,
 3. Mekanik kaynaklı kalıcı gerilmeler,
 4. Kimyasal kaynaklı kalıcı gerilmeler,
- şeklinde sınıflandırılmaktadır [8,16,23,26,33].

Problem, kalıcı gerilmelerin kaynaklarının bilinmemesinden ve kontrol edilememesinden ibarettir; bunlar bilindiği takdirde kalıcı gerilmelerden istenilen yönde sonuç elde edilebilmektedir. Prensip olarak basma cinsinden olan kalıcı gerilmeler, malzemelerin sürekli mukavemet sınırlarını ve aşınma mukavemetlerini artırmakta, çekme cinsinden olan kalıcı gerilmeler ise tam ters sonuç vermektedir [26,32].

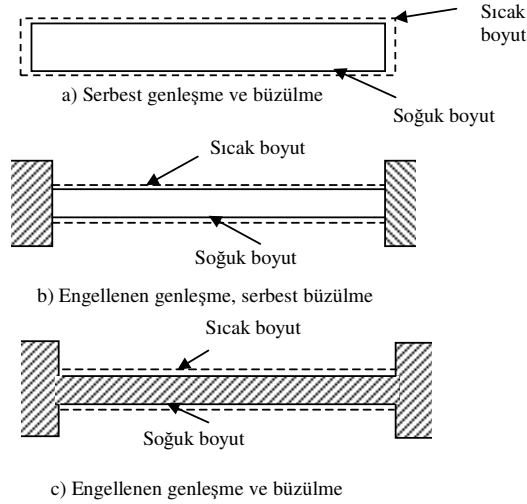
3.4.1 Termal Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler

Bir metalin ısıtılmasından ve tekrar soğutulmasından meydana gelen farklı genleşmeler, termal kaynaklı kalıcı gerilmelerin oluşmasına neden olur. Kalıcı gerilmelerin termal yollarla meydana gelmesi sebebiyle malzeme bünyesinde zararlı bazı değişiklikler meydana gelmektedir [33].

Termal kaynaklı kalıcı gerilmelerin oluşumu sıcaklık (ısının olması ya da soğuma dahil) ve zorlama olmak üzere iki faktörün sonucu olarak ortaya çıkar. Hem

termal hem de zorlayıcı faktörler kalıcı gerilmelerin oluşumuna veya kalıcı gerilme modelinin etkilenmesine yol açmaktadır [33].

Şekil 3.2.a’da gösterildiği gibi bir metal çubuk alt kritik bir sıcaklıkta düzenli olarak ısıtıldığı zaman bütün doğrultularda genişlemektedir. Şekilde noktalı çizgilerle gösterilen boyutta termal genişlemenin bir sonucu olarak hacim artmaktadır. Çubuk gerçek ortam sıcaklığına düzenli olarak soğutulduğunda eski orijinal boyut ve biçimine geri dönecektir. Çubuk sadece ısıtıldığı ve herhangi bir zorlamaya maruz kalmadığı için malzeme bünyesinde kalıcı gerilmeler oluşmayacaktır [33].



Şekil 3.2. Termal Kalıcı Gerilmeler [33]

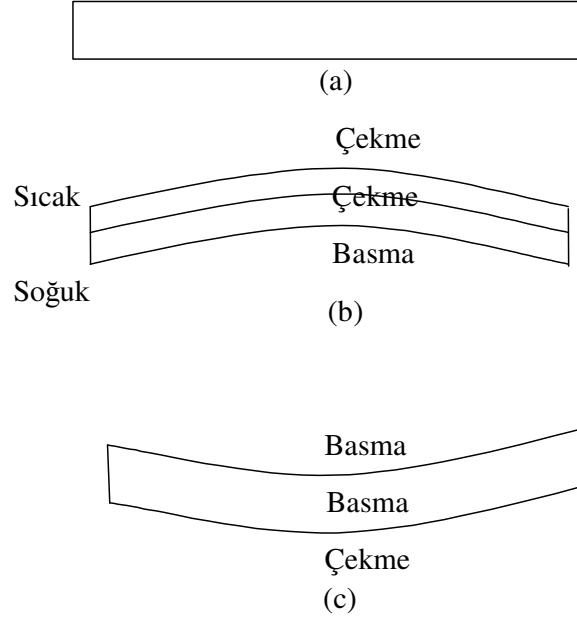
Eğer aynı metal çubuk fazla baskı yapılmadan iki dayanak arasına alınırsa ve dayanaklar yalıtıldıktan sonra Şekil 3.2.b’de kine benzer bir şekilde ısıtılırsa, metal çubuk ilk örnekteki gibi aynı hacime genişleyecektir. Buna rağmen boyuna zorlandığından uzunluk artmayacaktır. Bu nedenle ısı yükselmelerinde elastikiyet modülü ve akma direnci azaldığından, dayanakların baskısı nedeni ile malzeme eğilmekte veya formu bozulmaktadır. Çubuk eski orijinal sıcaklığına soğutulduğu zaman, orijinal boyundan daha kısa kalacak ve dayanaklar arasından düşecektir. İlk örnekteki gibi yine kalıcı gerilmeler oluşmayacaktır. Çünkü parça soğutma esnasında değil ısıtma esnasında zorlanmıştır. Şekil 3.2.c’de yukarıdaki örneğin bütünleştirdiği bir örnek incelenmiştir. Parça Şekil 3.2.b’nin aynısıdır. Tek fark

çubuk desteklerle bütünleştirilip tek parça haline sokulmuştur. Eğer çubuk aynı sıcaklığa yükseltilerek ısıtılırsa bir önceki örnekte olduğu gibi sıkışarak genişecek ve eğilecektir, fakat soğutma esnasında farklı tepki verecektir. Çubuk eski orijinal sıcaklığına kadar soğutulursa büzülerek desteklerin dışına düşmeye çalışacaktır. Parçanın sadece çubuk kısmı ısıtıldığından dolayı bu kısım en son soğuyacaktır. Bu durumda parça aksenal olarak zorlanır. Çubuk her iki yöndeki boyutsal değişiklikler nedeni ile zorlandığından, çubukta çekme kalıcı gerilmeleri oluşacaktır. Eğer çekme kalıcı gerilmeleri parçanın elastikiyet sınırını aşarsa ve bu bölge gevrek malzemeden yapılmışsa kırılma olabilir [33].

Termal kaynaklı kalıcı gerilmelerin ileri gelen çarpılma sonuçlarını anlayabilmek için, Şekil 3.3.a’da ki gibi gerilmemiş bir levha ele alınmıştır. Levhanın sadece üst tarafının ısıtıldığı ve alt tarafa ısı transferi olmadığı kabul edilmiştir. Isıtılmış kısım bütün doğrultularda genişir fakat soğumada yanal genişme engellendiğinden alt bölgeler zorlanır ve Şekil 3.3.b’deki gibi eğilerek bükülür. Üst yüzey genişlemenin zorlanmasından dolayı bu esnada çekme gerilmesi altındadır. Isının bu baskısı zayıflamış metalin çekme akma dayanımını aşmasına neden olur. Alt yüzey de bu esnada tamamen basma özellikli olarak gerilmiştir, çünkü konkav biçim şeklinde sıkıştırılmıştır. Dengeyi devam ettirmek için içte dengeleyen bir çekme gerilmesi olmalıdır [33].

Isıtılmış bölgenin orijinal sıcaklığına soğutulmaya çalışıldığında ve üst bölgelerdeki termal etki ortadan kalktığında parça deforme olur. Isıtıldığı zaman üst katmanın çekme plastik deformasyona uğramasının aksi bir sonucu olarak parça ortam sıcaklığında orijinalinden daha kısa olur. Soğutma esnasında büzüldüğü gibi, kısmi küresel formlar şeklinde alt bölgeler eğilir. İlk önce ısıtılan ve en son soğuyan kısımdaki büzülme parçanın üst kısmında basma kalıcı gerilmelerine neden olur. Dış bükey yüzeyin meydana getirdiği kuvvetten dolayı alttaki yüzey de çekme gerilmeleri altındadır. Dengeyi sağlamak için içeride basma gerilmeleri dengelenmelidir. Aşırı bir termal hacim değişimi teknik bakımdan önemli termal gerilme sınıfını meydana getirir. Bu tip gerilme oda sıcaklığında devam eder ve sürekli bir deformasyonun meydana geldiği soğutma çevrimi esnasında termal genişlemenin ya da büzülmenin sonucu olarak ortaya çıkar. Birçok durumda

gerilmelerin orada bulunması istenmez, fakat bazı durumlarda bu etki zararlı gerilmeleri bastırmak için kullanılır [24,33].



Şekil 3.3. Termal Kalıcı Gerilmelerin Neden Olduğu Deformasyon [33]

3.4.2 Metalürjik Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler

Malzemenin metalürjik yapısından kaynaklanan gerilmelerdir. Çeliklerde martenzit dokunun sertleştirme esnasında düzenli olmayan genişmesi hacim değişimine neden olmaktadır. İndüksiyon ve alevle sertleştirme gibi ısıtma işlemlerinde parçaların yüzeylerinde ısıtma ve faz değişimi meydana gelmektedir. Bu nedenle ısıtma genişleme çekme, faz değişimi ise basma gerilmelerini oluşturur. Bu gerilmeler, kalıcı gerilmeleri elde etmek üzere cebirsel olarak toplanır. Genellikle bu gerilmelerin bileşkesi basma kalıcı gerilmeleri şeklindedir [24,26,33,34].

Soğutma esnasında sertleşme dönüşümü meydana geldiğinden, termal ve metalürjik kalıcı gerilmeler için dikkate alınan temel prensipler bir birinin tersi gibi görünür. Her ikisi de en son soğuyan bölgelerin etkileşimini içerir. Aradaki fark biri termal çekme gerilmelerine neden olurken diğeri basma kalıcı gerilmelerine neden

olur. Termal etkileşimden dolayı çeliklerdeki büzülme ve metalürjik genişmeden dolayı da eş zamanlı genişmeyi tahayyül etmek zordur. Gerçekte bu değişiklikler martenzit dönüşümü esnasında her iki doğrultuda aynı zamanda gerçekleşir ve çeliğe uygulanan ısı işlem esnasında meydana gelen çarpılmanın çoğunun temel nedenidir [33].

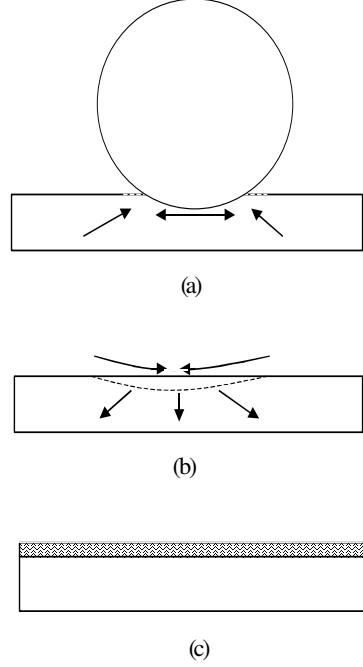
Genel prensiplere bakıldığında, yüksek alaşımlı ve takım çelikleri gibi çeliklerin derinlemesine sertleştirilme nedenini anlamak şimdi daha kolaydır. Isıl işlem esnasında hızlı soğutulurken veya su verilirken nispeten ince kesitli küçük parçalar kullanılırsa çatlaklar oluşulabilir. En son sertleşen kısım kesitin merkezi olacaktır. Bu durumda, merkez en son sertleşen bölge olduğu için basma kalıcı gerilmelerine sahip olacaktır. Yinede kalıcı gerilme sisteminin dengelenmesi gereksinimi çekme kalıcı gerilmelerine sahip yüzey alanlarını oluşturur. Eğer çekme kalıcı gerilmelerinin değeri çeliğin çekme gerilmesi değerini aşarsa yüzeyin çatlmasına sebep olarak tehlikeli bir durum ortaya çıkarır. Çeliğin bu şekilde sertleşebilmesi nedeniyle, ısı işlem esnasında parçanın boyutu ve su verme tipi dikkatle ayarlanmalıdır. Hem geniş hem de küçük kesitlerden (ya da ince bölgeler ihtiva eden) meydana gelen parçalar çok dikkatli ısı işleme tabi tutulmalıdır. Su verme çatlakları önemlidir, çünkü bu çatlaklar ciddi kırılmalara neden olur [33,34].

3.4.3 Mekanik Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler

Mekanik kalıcı gerilmeler hakkında unutulmaması gereken genel prensip; uygulanmış yük altında çekme, yük kaldırıldığı zaman basma kalıcı gerilmeleri ile sonuçlandırıldığıdır. Bunun tersi durumunda da yük altında basma, yük kaldırıldığında çekme kalıcı gerilmelerine neden olur. Bu prensip gerilmeli korozyondan ve aşınmadan meydana gelen çatlamalara karşı direnci, yorulma dayanımı ve direncini geliştirmeyi amaçlayan bütün mekaniksel ön gerilme oluşturma uygulamaları için bir temel teşkil eder [24,33].

Bu prensibi açıklamak için; Şekil 3.4.a'da bir metal yüzeyine bastırılmış çok sert bir bilye gösterilmiştir. Bilyenin çok derine etki ettiği anda, oluşan eğri yüzey kısmen küresel bir biçim şeklinde yayılır. Kuvvet uygulanırken yüzeye paralel bütün doğrultularda çekme meydana getirilmiştir. Aynı zamanda bilye altındaki metal radyal doğrultularda basma kalıcı gerilmeleri meydana getirir. Yani bilye çevresine dik doğrultuda bilyenin derine etki ettiği anda bu durum mevcuttur. Şekil 3.4.b'deki gibi bilye üzerindeki yük kaldırıldığı zaman, alanda elastik geri gelme olur ve çentik yavaşça dışa doğru zorlanarak derin etkiye sahip olduğu çöküntüden daha sığ bir çöküntü meydana getirir. Bu elastik geri gelmenin en büyük değeri, çentikli yüzey için çentiğin yüzeyine bütün doğrultularda paralel bir basma kalıcı gerilmesi biçiminde zorlar. Önemli niteliklerin birçoğu birbirini sıkıştırmaya çalışan çentikteki metal tanelerini zorlayan basma kalıcı gerilmeleridir [24,33].

Deformasyon ya tam olarak sınırlandırılabilir ya da geniş bir alan veya hacmi kaplayabilir, eğer bütün yüzey Şekil 3.4.c'de gösterildiği gibi birçok küçük çentikle mekaniksel olarak çukurlaştırılırsa o zaman basma kalıcı gerilmeleri meydana gelir. Bu yorulmadan, aşınmadan ve gerilmeli korozyondan kaynaklanan belli çatlak tiplerine karşı oldukça faydalıdır. Bilye ile dövme işlemi, birçok küçük çukurla yüzeyde basma özellikli ön gerilmelerin meydana getirilmesi olarak tanımlanır. Aynı prensipler radyüslerin, deliklerin yüzeylerinin ezilmesi ya da delikten ileri gelen yorulma çatlaklarını önlemek için delik çevresine dairesel yivler basmak gibi diğer mekaniksel ön gerilme metotları ile de uygulanabilir. Bütün durumlar altında prensip aynıdır; uygulanmış yük altında yumuşayan çekme, yük kaldırıldığı zaman basma kalıcı gerilmeleri ile sonuçlanır, bunun tersi bir durumda söz konusu olabilir [24,33].



Şekil 3.4. Mekaniksel Olarak Dahil Olmuş Kalıcı Gerilmelerin Prensibinin Gösterimi [33]

3.4.4 Kimyasal Kaynaklı Kalıcı Gerilmeler

Kontrollü korozyon metotları yardımıyla, özellikle dağlama ve kimyasal işleme, yüzeyden metallerin kaldırılması veya yüzey niteliklerinin değiştirilmesi kalıcı gerilme modelini değiştirme eğilimi ortaya çıkarmaktadır. Kalıcı gerilme dengesinin değişmesi, alttaki metal katmanlarının çarpılmasına yol açmakta veya yüksek kalıcı gerilmeleri mevcutsa, parçanın bazen çatlamasına neden olmaktadır [26,33].

Yüzey kaplamaları kalıcı gerilme modelini etkileyebilir. Genellikle kaplama malzemesinin yüzeyinde çekme kalıcı gerilmeleri meydana gelirken ana malzemede bunu dengeleyecek basma kalıcı gerilmeleri meydana gelir. Buna bağlı olarak kaplama tabakasında kolayca oluşan yorulma çatlakları ana malzemeye iletilir [16,26,33]. Semantasyon ve nitrasyon gibi yüzey sertleştirme işlemleri esnasında yüzeyler karbon veya azot verici ortamlarda ısıtılır. Bunun sonucunda yüzeylerin

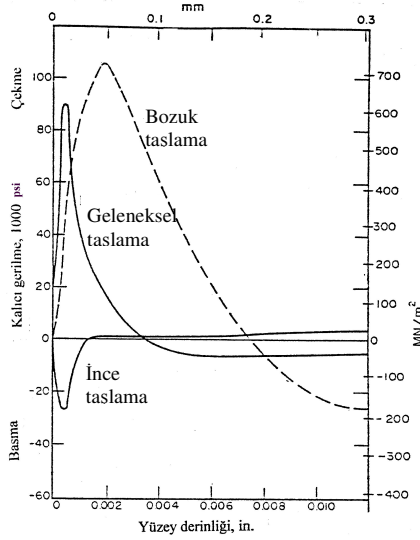
hacmi büyür ve basma kalıcı gerilmeleri meydana gelir. Buna bağlı olarak parçaların dayanım ve aşınma mukavemetleri de artmaktadır [14,26].

Semantasyona uğramış tabakanın kalınlığı artıkça yüzeyde basma gerilmeleri değeri yükselmekte ve basma gerilmesinin çekme gerilmesine dönüşme derinliği artmaktadır. Yüzeydeki belirli bir kalınlıktaki tabakanın semantasyona uğratılması parçanın yorulma sınırını artırmaktadır. Bunun nedeni semantasyona uğramış tabakadaki basma gerilmeleri değerinin 400 ila 500 MPa seviyesine erişebilmesidir [8].

3.5 Değişik İmal Yöntemlerinin Kalıcı Gerilmeler Üzerine Etkisi

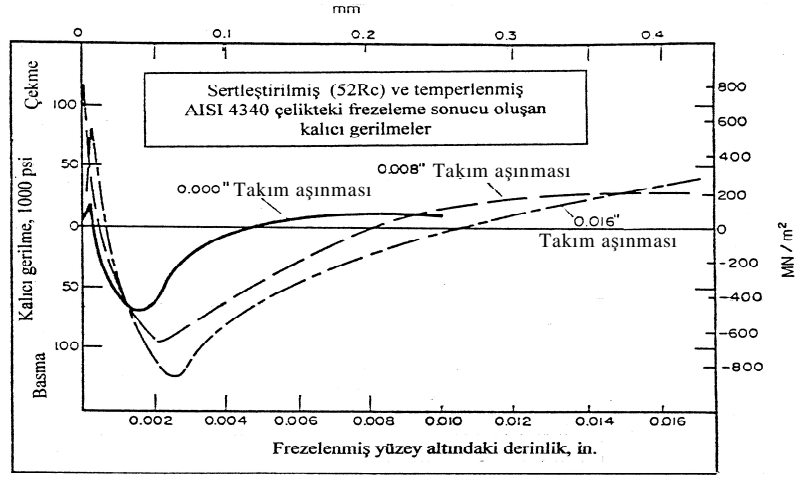
Parçalardaki kalıcı gerilmeler basılan (-) ve çekilen (+) olabilir. Bunların değeri, parçanın bütünündeki dağılım modelleri, imal usulleri ve imalat parametreleri ile doğrudan ilgilidir. Parçaların üretiminde kullanılan imal usullerinde kalıcı gerilmeler parça hacminin bir kısmını veya tamamını kaplamış olabilir ve parça içerisinde muhtelif alanlarda çeşitli değerler işaretler kazanmış olabilirler [29]. Bazı imal usullerinde, talaş kaldırmada, yüzey sertleştirmede, kaplamada vs. dahili kalıcı gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmelerin parçaya nüfuz etme derinliği 5~200 mikron bazı imal usullerinde ise 50~2000 mikron veya biraz daha fazla olabilmektedir. Yüzeyde oluşan gerilmeler ise parça içinde oluşan gerilmeler gibi pozitif ya da negatif işaretli ve azami değerlerini yüzeyden 2~30 mikron derinliklerde almış olabilirler. Yüzeyde oluşan kalıcı gerilmelerin oluşma nedenleri yüksek basınç, sıcaklık, faz dönüşümleri, ana malzeme ile yüzey tabakasının farklı mekanik özellikleri, kesit alanında eşit olmayan plastik deformasyon ve bu faktörlerin oluşturduğu özelliklerdir. Şekil 3.5’de AISI 4340 çeliğin değişik durumlar altında taşlanması sonucu meydana gelen gerilme dağılımı gösterilmektedir. Burada hem en büyük kalıcı gerilme üzerinde, hem de yüksek gerilmelerin bulunduğu derinliklerde taşlama durumlarının etkisine dikkat etmek gerekir. Taşlanmış yüzeyin alt kısmının metalografik muayenesinde, yaklaşık olarak 0.025 mm (0.001 in.) kalınlığında bozuk taşlama sonucu oluşan yeni bir martenzit tabakası bulunmuştur. Bu katman taşlama esnasında yüzey sıcaklığının yaklaşık 700 °C ulaşması neticesinde oluşmuştur.

Geleneksel taşlamada ara ara benekli yeni bir martenzit tabakası tespit edilmiştir. İnce taşlama neticesinde ise herhangi bir düzensiz metalografik yapı ile karşılaşılmamıştır [35].



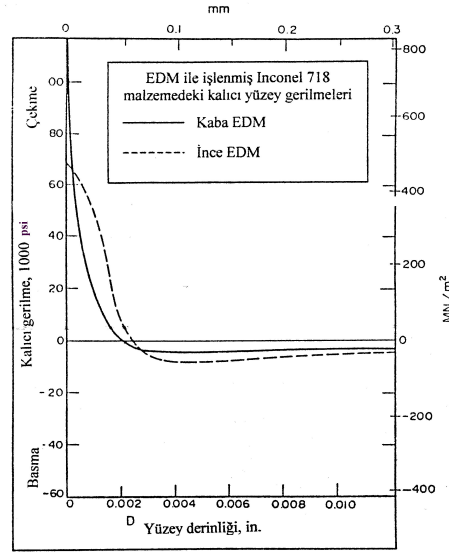
Şekil 3.5. AISI 4340 Malzemede Yüzeyin Taşlanması Sonucu Oluşan Kalıcı Yüzey Gerilmeleri (Malzemeye Su Verilmiş Ve Temperlenmiş, 50 Rc) [35]

Şekil 3.6'da AISI 4340 malzemenin alın freze ile işlenmesinden kaynaklanan kalıcı gerilme dağılımı gösterilmektedir. Burada ayrıca takımın değişik keskinlik derecelerinde oluşan gerilmelerle karşılaştırılmıştır. Hakim olan gerilmeler basma gerilmeleri olsa bile, takım körlendiği zaman nispeten yüzeye yakın ince bir katmanda yüksek çekme gerilmelerinin geliştiği dikkat çekicidir. Takım körlenmesi sonucu yüzeyde çekme gerilmelerinin artmasının nedeni, takımın uygun bir kesme yapamaması ve dolayısıyla takım iş parçası sürtünmesiyle oluşan sıcaklık artışıdır [35].

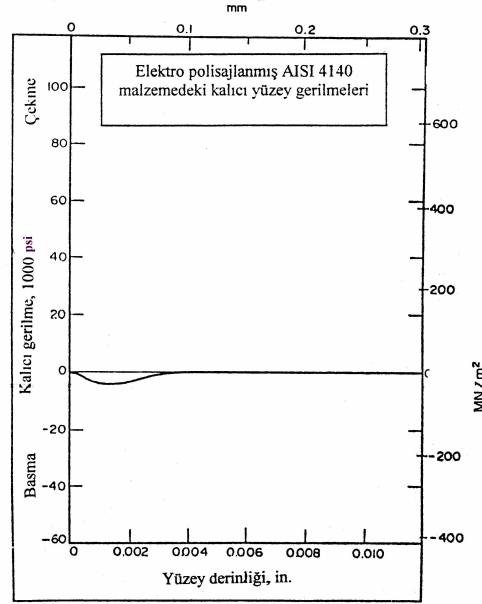


Şekil 3.6. Sertleştirilmiş (52Rc) Ve Temperlenmiş AISI 4340 Çeliğin Frezelenmesi Sonucu Yüzeyinde Meydana Gelen Kalıcı Gerilme Dağılımı [35]

Termal işlemler ısıl etkilenmiş yüzeyler oluşturur. Sonuç olarak, bu yüzeylerde sık sık çekme kalıcı gerilmeleri oluşur. Şekil 3.7, elektro erozyonla işlenmiş İnkonel 718 malzemedeki gerilme durumunu göstermektedir. Elektro erozyon ile kaba bir işleme yapıldığında yüksek akım yoğunluğundan dolayı oluşan ısı etkisinden yüzeyde yüksek çekme kalıcı gerilmeleri meydana gelmektedir. Buna karşın en uygun parametrelerde gerçekleştirilen ince işlemede yüzeyde oluşan bu yüksek çekme kalıcı gerilmeleri bir dereceye kadar düşse de dikkat çekici bir değerde varlığını korumaktadır. Kimyasal işlemler ise yüzeyde önemli kalıcı gerilmeler meydana getirmemektedir. Şekil 3.8 hemen hemen kalıcı gerilmelerin olmadığı elektro polisajlanmış AISI 4140 çelik numunedeki kalıcı gerilme dağılımını göstermektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi kimyasal işleme nedeniyle yüzey tabakasında çok küçük değerde basma kalıcı gerilmeleri meydana gelmiştir. Bu değer diğer yöntemlerle meydana gelen kalıcı gerilme değerler karşısında dikkate alınmaz [35].



Şekil 3.7. Elektro Erozyonla İşlenme Sonucu 44 Rc Sertliğindeki İnkone1 718 Malzemede Oluşan Kalıcı Yüzey Gerilmeleri [35]

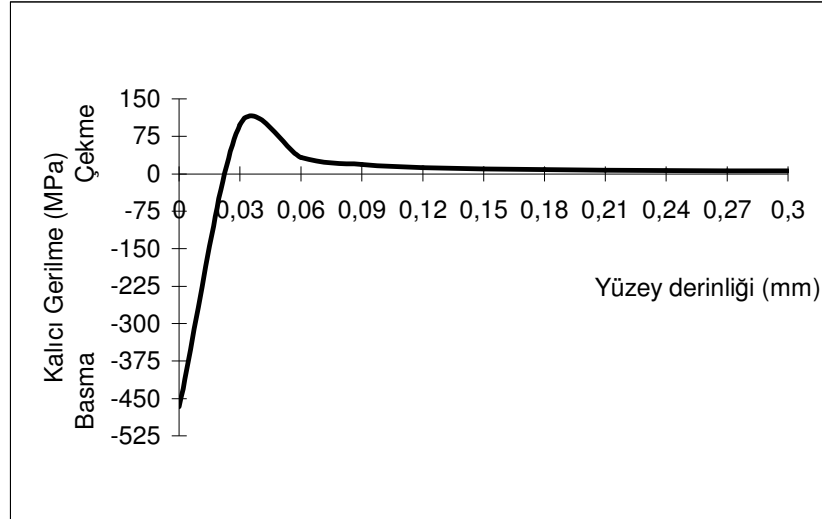


Şekil 3.8. Elektro Polisajlama Sonucu 50 Rc Sertliğindeki İnkone1 718 Malzemede Oluşan Kalıcı Yüzey Gerilmeleri [35]

Parça yüzeyinde oluşan kalıcı gerilmelerin parçanın kesit alanının küçük bir kısmını kapsamamasına karşın bu gerilmelerin parçanın dayanma dirençleri

göstergelerine (kopmasına, hassaslığına, korozyon ve sürtünme dayanıklılığına) etkisi yüksektir. Bu etkinin düzeyi parçanın biçiminden, malzemenin bünyesi, mekaniksel özellikleri, kimyasal bileşimi, yükleme tarzı (statik, dinamik, değişken), parçanın hangi sıcaklıkta kaç saat çalışacağı, aşınma koşulları (korozif ortam ve sıcaklık vs.) ile ilgilidir [8,26,35].

Şekil 3.9'da AISI 5115'den imal edilen ve semantasyon işlemine tabii tutulmuş dişli çarkın diş dibinde oluşan kalıcı yüzey gerilmelerinin katman kaldırma tekniğine dayalı olarak incelenmesi sonucunda diş dibinde kalıcı basma gerilmeleri olduğu görülmüştür [36]. Semantasyon işleminden kaynaklanan bu kalıcı basma gerilmeleri yüzeyden yaklaşık 50 mikron derinliğe kadar oluşan semantasyon katmanının kalınlığı boyunca azalarak devam etmekte ve bu derinlikten sonra kalıcı çekme gerilmelerine dönüştüğü grafikten görülmektedir. Bu durum semantasyon işleminin malzemenin yüzey sertliği, dayanım, aşınma gibi çalışma performansını iyi yönde geliştirme sebebinin oluşan bu kalıcı basma gerilmelerinden kaynaklandığını göstermektedir [37].



Şekil 3.9. AISI 5115 Malzemedan İmal Edilen Ve Semantasyon İşlemi Uygulanmış Bir Dişli Çarkın Diş Dibinde Oluşan Kalıcı Gerilme Dağılımı [37]

Çelikler için su verme, semantasyon, nitrasyon, indüksiyonla sertleştirme işlemleri yüzeyde kalıcı basma gerilmeleri meydana getirir. Semantasyon yapılmış çeliklerde sertleşmiş tabakanın kalınlığı arttıkça yüzeyde basma gerilmeleri değeri

yükselmekte ve basma gerilmesinin çekme gerilmesine dönüşme derinliği artmaktadır [34,37].

3.6 İşlenmiş Paslanmaz Çeliklerin Yüzeylerinde Oluşan Kalıcı Gerilmeler İle İlgili Literatür Araştırması

Yüzeyin bütünlüğü işlenen yüzeyin kalitesinin bir ölçüsüdür ve yüzey ile yüzey altının gerçek yapısını tanımlayan bir eleman olarak yorumlanır. Yüzey bütünlüğü genel olarak yüzey pürüzlülüğü, sertlik değişimi yapısal değişimler ve kalıcı gerilmeler gibi yüzey özelliklerinin mekanik, metalürjik, kimyasal ve topolojik durumları ile tanımlanır. Yüksek kalitede üretim ihtiyacı, dikkatleri üretilen parçaların yüzey durumları üzerinde odaklar. Özellikle de işlenen parçanın çalışma şartlarındaki performansı, uzun ömürlülüğü ve güvenilirliği üzerinde etkili olan kalıcı gerilmeler çok önemlidir [9,10].

İşlenmiş yüzeyde meydana gelen kalıcı gerilmeler yüzey kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Talaş kaldırma işlemi, genel olarak aşırı yüksek deformasyon ve deformasyon hızı ile birlikte çok miktarda plastik deformasyon içerir. Buna ilaveten kesme esnasında oluşan ısı oluşur. Bu durum, işleme sırasında istenmeyen fakat kaçınılmaz olan kalıcı gerilmeleri açığa çıkarır. İşlemede oluşan kalıcı gerilme mekanizması üzerinde çeşitli araştırmacılar tarafından analitik ve deneysel çalışma yapılmıştır.

Henriksen, işleme sırasında oluşan kalıcı gerilme dağılımı üzerinde deneysel verileri açıklamış ve az karbonlu çeliklerde düşük ve orta kesme hızlarında hafif talaşlar kaldırılırken, kalıcı gerilmelerin, işleme süresince oluşan termal etkilerden ziyade mekanik etkilerden kaynaklandığını ortaya çıkarmıştır [38].

Liu ve Barash, talaş oluşumundaki kayma düzleminin uzunluğunun yüzey altı deformasyonu ve kalıcı gerilme oluşumu ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle, karmaşık ve belirgin olmayan takım-talaş ara yüzeyi sınır şartları, sonlu eleman analizleri için elimine edilmiştir [39].

Leskovar ve Peklenik, tornalama işlemi parametrelerinin yüzey ve yüzey altı koşullarına etkisini incelemişler ve tornalamadan sonra çekme kalıcı gerilmelerinin etkin olduğunu ve yüksek hızın büyük kalıcı gerilmeler oluşturmaya meyilli olduğunu göstermiştir [40].

Matsumoto ve arkadaşları, iş parçası sertliğinin kalıcı gerilmeler üzerindeki etkisini dik işlemede, farklı sertlikteki iş parçalarının işlenmiş yüzeylerindeki kalıcı gerilmeleri ölçerek değerlendirmişlerdir [41]. Jang ve Seireg, takım ve iş parçası arasındaki kesme mekaniği ve termal etkileri dikkate alan bir model kullanarak işlenmiş yüzeydeki kalıcı gerilmeyi belirlemek için bilgisayar destekli bir simülasyon modeli ortaya koymuşlardır [42]. A. T. Dewald vd. yaptıkları çalışmada termal işlemler sonucu kristallerin merkezinde 50 MPa çekme kalıcı gerilmeleri olduğunu ölçmüşlerdir. Araştırmalarının sonunda kristali tek kenarından kesme, gerilmeyi belirgin olarak, % 40'a varan bir şekilde azaltırken, iki kenarından kesme ile kafes yapısı boyunca gerilmenin maksimum seviyede kaldığı belirlenmiştir [43]. I. Nikitin vd. lazer şokları ile dövülen, derin çekilen ve çalışma sertleşmesine uğramış AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde daha fazla basma kalıcı gerilmelerinin yüzeye yakın bir yerde olduğu tespit edilmiştir [25]. A. Giuliani ve arkadaşları da AA 6061+ % 22 Al₂O₃ malzemelerinde yükleme ve yükleme sonrası oluşan çekme kalıcı gerilmelerini birkaç durum için analiz etmişler ve bunu nötron difraksiyonu ile belirlemişlerdir. Bu çalışmada aynı zamanda en uygun şekil verme sıcaklığı da bulunmaya çalışılmıştır [44]. M. J. Balart.vd. BS EN9, BS EN31, AISI M2 ve C PM 10 V malzemelerini sertleştirdikten sonra taşlamışlar ve çeşitli durumlarda oluşan çekme kalıcı gerilmelerini nötron ve X-ray kırınım teknikleriyle ölçmüşlerdir. Yüzeyde önemli derecede çekme veya basma kalıcı gerilmelerinin delik delme metodu kullanılmasından dolayı oluştuğunu tespit etmişlerdir. Kullanılan bütün çeliklerde, delme durumları için çekme kalıcı gerilmeleri yumuşatma veya aşırı ısıtmada zararlı olmadığı, mekanik deformasyon, sıcaklık değişiminin ve plastik deformasyonun faz değişimlerinin önemli ölçüde çekme tipi kalıcı gerilmelere neden olduğu tespit edilmiştir [45]. Günümüze kadar yapılan çalışmalara göre, verilen bir parça için işlenen parçanın yüzey bölgesindeki kalıcı gerilmelerin doğasının kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği, takım geometrisi ve yağlamanın olup olmadığına bağlı olduğu kabul edilmektedir. Kalıcı gerilmelerin genellikle talaş

oluşum süreci ile ilgili mekanik ve termal olaylardan kaynaklanan homojen olmayan plastik deformasyon ile kesici uç burun bölgesi ve yeni işlenmiş iş parçası yüzeyi arasındaki etkileşimden kaynaklandığı da literatürde belirtilmiştir [46,47].

Paslanmaz çeliğin işlenmesi sırasında oluşan kalıcı gerilme oluşumu iyi anlaşılammaktadır. Şimdiye kadar işlenmiş paslanmaz çelik parçalarda kalıcı gerilmeleri hesaplamak ve ölçmek için sadece birkaç girişimde bulunulmuştur [48,49]. Jang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada tornalama işleminden dolayı AISI 304 paslanmaz çelikte oluşan kalıcı gerilmeler kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği, takım geometrisi ve takım kaplamasının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Kalıcı gerilmeler X-ışını kırınımı tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan iş parçası malzemesi AISI 304 tipi 4.9 cm çapında, 38 cm uzunluğunda ve östenitik paslanmaz çelik çubuklardır. Kimyasal kompozisyonu, ağırlık yüzdesi olarak, 69.493 Fe, 0.059 C, 1.26 Mn, 0.44 Si, 18.6 Cr, 9.5 Ni, 0.033 P, 0.015 S, 0.35 Mo ve 0.25 Cu'dır. Tornalama işlemi 7.5 HP'lik bir tornada kesme sıvısı kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları oluşan kalıcı gerilmelerin genelde çekme kalıcı gerilmeleri olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu kalıcı gerilmeler artan kesme hızı ile birlikte artarken, talaş derinliği arttıkça azalmıştır. İlerleme miktarının artması ile önce artmış belirli bir noktadan sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Elde edilen değerlerden keskin bir kesici uç, düşük ilerleme miktarı, büyük talaş derinliği ve düşük kesme hızının minimum miktarda kalıcı gerilme oluşturduğu görülmüştür [50]. Dahlman ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada talaş açısının, kesme hızının ve kesme derinliğinin kalıcı gerilme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sabit hızda yüzey tornalama işleminde AISI 52100 malzemesi kullanılmıştır. Kalıcı gerilme X-Ray kırınımı ile ölçülmüştür. X-Ray metodu kalıcı gerilmeyi ölçmede diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Talaş açısının kalıcı gerilme üzerinde büyük bir etki yaptığı görülmüştür. Basma kalıcı gerilmesi ilerleme oranının artmasıyla büyümüştür. Kalıcı gerilmenin kesici geometrisi ve kesme parametreleriyle kontrol edilebileceğini ortaya çıkarmışlardır [51]. H. Sasahara ve arkadaşları da yüzey tornalama işlemi uygulayarak, işlenmiş yüzeydeki kalıcı gerilme değişikliklerini çalışmışlardır. Kalıcı gerilmeye, kesici aletin takım uç yarıçapı ve ilerleme miktarının etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. İşlenmiş yüzeylerde uç yarıçapı ve ilerleme miktarının etkilerini, önerilen bir model olan

sonlu elemanlar metodunu kullanarak tartışmışlardır. Kesici takımında küçük uç yarıçapı kullanıldığı zaman kesme yönüne dik yüzey kalıcı gerilmeleri basma gerilmesine dönüşmüştür. İlerleme miktarı azaltılarak yüzeyde basma kalıcı gerilmeleri oluşturulabilmektedir [52].

Ortogonal dik kesme gibi işleme operasyonları, lineer olmayan ve termomekaniksel işlemlerdir. Bu karmaşık işlemler, talaş ve takım arasındaki sürtünme ve temastan dolayı meydana gelmektedir. Bunlara ilave olarak, takım ve talaş arasındaki sürtünmeden ve talaş oluşumu esnasında talaştaki plastik deformasyondan dolayı, yerel ısı oluşumu karmaşıklığa neden olmaktadır. Talaş kaldırma işleminin istenmeyen yan ürünü ise, yeni işlenmiş iş parçasında işleme bileşenlerinin daha kısa sürtünme ve yorulma ömürlerine neden olduğu, ayrıca işlenmiş yüzeyin bütünlüğünü etkilediği, bilinen kalıcı gerilmenin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle iş parçasındaki kalıcı gerilme ve gerinim alanlarının değerlendirilmesi, talaş kaldırma işlemlerinin optimizasyonu ile sürtünme ve yorulma yüklemesi durumları altındaki işlenmiş parçaların, beklenenden önce kırılmalarına karşı tedbir almak zorunludur. Araştırmacılar, kesme yüzeyinden ikincil bir kesme yapıldığında kalıcı gerilmelerin büyüklüğünün azaldığını gözlemlemişlerdir [53].

L. Lutteroti vd. [54] özellikle kalıcı gerilme ve doku analizi için X-Ray ışınları ile ince film tabakasının bileşiminden kaynaklanan yeni bir tekniği kullanmışlar ve önermişlerdir. M. Rogante vd. [55] ise nötron kırınımı ile AA6082 malzemesinde kalıcı gerilmeyi ölçmüşler ve yüzeye yakın yerlerde kalıcı gerilmelerin etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Kalıcı gerilmelerin yüzey bütünlüğüne kötü yönde etkilediği bilinmektedir. Henriksen [38] değişik kesme durumları altındaki dökme demir ve çeliklerin işlenmiş yüzeylerindeki kalıcı gerilmeleri belirlemek için bir takım deneyler yapmıştır ve kalıcı gerilmelerin 689.48 MPa olduğunu raporlamıştır. Kalıcı gerilmelerin karbonlu çelik gibi sünek malzemelerde genellikle çekme ve dökme demir gibi kırılğan malzemelerde ise basma gerilmesi şeklinde olduğunu belirtmiştir.

Kono vd. [56], Tonsoff vd. [57] kalıcı gerilmelerin kesme hızına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Matsumoto vd. [41], Wu ve Matsumoto [58], iş parçası sertliğinin kalıcı gerilme alanında önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Y. M. Xing vd. [59], yapmış oldukları deneysel çalışma ile; püskürtmeli sertleştirmede malzemenin yüzeylerinin yapısını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Yüzey iyileştirmesi yapılmış metalin de sertlik ve yorulma ömürlerinin artırılabilirliği düşünülmüştür. Ancak bu işlem büyük kalıcı gerilmelere sebep olmuştur. Püskürtmeli sertleştirme tarafından etkilenen kalınlık sadece 200-300 µm olduğundan, püskürtmeli sertleştirme tabakasının yakınlarındaki gerilme dağılımının ölçülmesi zordur. Moire interferometresi kalıcı gerilme ölçümünde yüksek çözüm sunan optik bir tekniktir. Bu teknik kalıcı gerilme dağılımlarını nispeten doğru gösterir. Bu metotla, ultrasonik püskürtme sertleşmesi ile elde edilen deney sonuçlarına göre yumuşak çeliklerde malzemenin yüzeyinde 309 MPa'ya kadar bir basma kalıcı gerilmesinin olabileceğini kanıtlamıştır. Hossain vd. [60], 316 L östenitik paslanmaz çeliklerde ısıtma işlemi ve sertleştirme işlemi uygulamışlardır. Soğutma işlemi su ile yapılmış ve sertleşmenin, ısıtma işleminin yüzeyde basma kalıcı gerilmelerine yol açtığını tespit etmişlerdir. Kalıcı gerilmelerin farklı eksenlerde olabileceğini ve bunun sonlu elemanlar metodunu kullanarak bir simülasyonla belirlenebileceğini aynı zamanda artırarak delik delme yöntemi ile belirlenebileceğini açıklamışlardır. Kalıcı gerilmeleri belirlemede nötron kırınımı tekniğinin kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Grum ve Sturm [61] yüzeyi lazerle eriterek sertleştirme işlemi süresince düz parçalarda kalıcı gerilme durumlarını araştırmış ve eriyen katmanın dibine yakın yerlerdeki kalıcı gerilmeleri tespit etmeye çalışmışlardır. Lazerle eritme işleminin optimum kalıcı gerilme oluşturduğu tespit edilmiştir. Yang ve Na [62] adlı araştırmacılar iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak düşük karbonlu çeliklerin lazerle yüzey sertleştirme işlemi sonucunda oluşan kalıcı gerilme ve geçici ısı gerilmesini analiz etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak lazerle sertleştirilmiş yüzeylerdeki kalıcı gerilme ve ısı transferi işlemi başarıyla hesaplanmıştır. Termal gerilme ana olarak sıcaklık ölçüsündeki değişim ve martenzitik safhadaki dönüşüm ile tetiklenmiştir. Safa dönüşümünde sıcaklık değişim ölçüsünün kalıcı gerilme üzerindeki etkileri bulunmuştur. Simülasyon sonuçları çalışma parçasının sertleştirme yüzeylerine yakın bölgelerde basma kalıcı gerilmelerini iç bölgelerde ise çekme kalıcı

bölgelerinin varlığını ortaya çıkarmıştır. Aynı zamanda maksimum çekme kalıcı gerilmeleri lazerle taranmış bölgelerin merkezleri boyunca olduğu tespit edilmiştir. Lee ve arkadaşları [63], alevle sertleştirme yöntemiyle düşük karbonlu çeliklerde (12Cr), sertliğin özelliklerini, sertlik derinliğini ve oluşan kalıcı gerilmeyi araştırmışlardır. Bunun için 12 Cr'lu çeliğin sıcaklık çevrimlerini, yüzey sıcaklığı, su yüzeyinden çıkan yükseklik ve soğuma hızının bir fonksiyonu olarak kontrol etmişlerdir. Hızlı soğutma oranı da yüzey sertliği gibi sertleştirme derinliğini artırmıştır. Alevle sertleştirme ile oluşan kalıcı gerilme özellikleri termal ve transformasyon gerilme bileşiklerinin katkıları tartışılmıştır. Malzemelerdeki istenilen kalıcı gerilme hali için gereken optimum işleme halleri 1200 °C (18 mm kalınlık için) ve 1150 °C bütün kalınlık için olduğu tespit edilmiştir.

Uzay gemisi gövdeleri birçok deliğe sahiptir. Dış kuvvetlerin etkisiyle yüzeyde çekme kalıcı gerilmelerine neden olan değişik durum altındaki bu delikler bir materyalin ömrünün sona ermesine neden olur. Bu nedenle, soğuk genleşme metodu, püskürtmeli genleşme metoduyla birlikte çok geniş kullanım alanına sahip metotlardan birisidir. Bu metotla uzay endüstrisinde kullanılan materyallerin yorulma davranışları, basma kalıcı gerilmelerinin geliştirilmesiyle artırılır. Uzay endüstrisindeki büyük önemine rağmen, soğuk genleşme işleminin doğru modellenmesine çok fazla önem verilmemiştir. Soğuk genleşme ile yapılan, kalıcı gerilme dağılımı, genleşme hızı, malzeme özellikleri vb. parametrelerle değişmektedir. Çalışmada iki bitişik deliğin soğuk genleşmesi sonuçlarının kalıcı gerilmesinin modellenmesi ve simülasyonuna bağlı kalınarak çalışılmıştır. Çalışılan iki durum; eş zamanlı soğuk genleşme ve sıralı soğuk genleşmedir. Bu iki durumun kıyaslanması ile bitişik iki delik de eş zamanlı soğuk genleşme sıralı soğuk genleşmeye göre, daha yüksek basma kalıcı gerilmelerine öncülük etmiştir [64].

Konig vd. [65] metallerdeki sürtünmenin kalıcı gerilmelerin oluşumuna yardımcı olduğunu göstermiştir. Field vd. [66] mikro sertlik değeri, X-Ray difraksiyonu ve katman kaldırma-eğilme teknikleri gibi yöntemlerle işlenmiş parçaların yüzeylerindeki kalıcı gerilmeleri belirlemek için değişik metotları gözden geçirmişlerdir.

Kalıcı gerilmelerin önceden tahminini sağlayan en yeni model Okushima ve Kakino [67] tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde işleme esnasındaki kesme kuvvetleri ve sıcaklık dağılımıyla ilişkili kalıcı gerilmeler tahmin edilebilmektedir. Diğer bir analitik modelde Wu ve Matsumoto [58], iş parçasının sertliği ve kalıcı gerilmeler arasında bir bağlantı yapmışlardır. Shih ve Yang [68] iş parçasındaki kalıcı gerilme dağılımı üzerine yaptıkları deneysel/hesapsal çalışmaları birleştirmişlerdir. Son zamanlarda, Liu ve Guo [69] iş parçasındaki kalıcı gerilmeleri belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Maciejewski ve Diuzewski, kafes sistemlerinde ve kristallerdeki kalıcı gerilmeyi sonlu elemanlar yöntemi ile belirlemeye çalışmışlardır [70].

Liu ve Barash [71], kalıcı gerilmelerin yüzeyde basma ve yüzeyin hemen altında çekme gerilmeleri şeklinde ya da tam tersi durumda olabileceğini göstermişlerdir. Basma kalıcı gerilmeleri bileşenin performansını ve ömrünü genellikle geliştirir, çünkü basma kalıcı gerilmeleri, çalışırkenki çekme gerilmelerini azaltır ve çatlak çekirdekleşmesini engeller. Diğer bir deyişle, çekme kalıcı gerilmeleri bileşenlerin erken yorulmalarına yol açan çalışma gerilmelerini önemli ölçüde arttırır. Sigwart ve Fessenmeyer [72], yüksek çekme kalıcı gerilmelerinin bulunduğu tornalanmış 42CrMo4 çelik numunelerin yorulma ömürlerinde % 30'a yakın bir azalma gösterdiğini bildirmişlerdir. Masumoto vd. [73], AISI 4140 (54 HRC) çelik numunelerin yorulma dayanımının alevle kesildikten sonra, (muhtemelen daha sonra taşlanmış) %2~5 daha yükseldiğini bildirmişlerdir. Benzer olarak, El-Axir [74], soğuk iş kalıp çeliği (AISI H13) frezelenirken, yüzeyde sıfıra yakın kalıcı gerilmeler elde edilmiştir, yüzeyin yaklaşık olarak 100 µm altında maksimum bir basma gerilmesindeyken ardından çekme tarafına tekrar yükselmiştir. İşlenmiş yüzey bölgesinin kalıcı gerilme profiline (büyüklüğü ve derinlik boyunca ki doğrultusu) ilişkin bilgilerinin parçanın tasarımında ve imalatında önemli olabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, işleme parametrelerinin kalıcı gerilme profili üzerindeki etkisini belirlemek, bu işleme parametrelerinin istenen kalıcı basma gerilmesi oluşturacak ve yorulma ömrünü arttıracak şekilde seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yüzeydeki kalıcı gerilme önemli olmasına rağmen, daha çok işleme proseslerinde, alt yüzeylerdeki kalıcı gerilmelerin de en az yüzeydeki kadar önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

A. Bahadur ve arkadaşları AISI 304 ve 316 östenitik paslanmaz çeliklerin soğuk haddelenmesi sonucu oluşan kalıcı gerilmeleri X-Ray ışını yöntemi ile tespit etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda 316 çeliğinin soğuk haddelenmesi esnasında deformasyon miktarı arttıkça daha da sertleştiği ve böylece bu çeliğin yüzey sertliğinin de arttığını görmüşlerdir. AISI 304 çeliğinde haddelenme yüzdesi arttıkça çekme gerilmeleri azalmış ve malzemenin % 40 oranında haddelenmesinden sonra basma kalıcı gerilmeleri oluşmaya başlamıştır. AISI 304 çeliğinin östenitik fazında düşük çekme kalıcı gerilmeleri oluşmuş ve Cr yüzdesi ile değişmemiş, martenzit fazda başlangıçta yüksek çekme kalıcı gerilmesi oluşmuş, Cr yüzdesi arttıkça düşmeye başlamıştır. Her iki çelik de ve 304 çeliğin her iki fazında ki Cr yüzdesinin artması Young's modülünün artmasına neden olmuştur [5].

İşleme parametrelerinin kalıcı gerilme profili üzerine etkisi konusunda yapılmış literatür araştırmalarının en önemlileri deneysel çalışmalarıdır. Liu ve Barash [71], yüzey katmanının kesici takım hareketinden dolayı görülen gerilme gerinim gelişimi ile kalıcı gerilme oluşumunu açıklamışlardır. Lin vd. [75], ortogonal işlemede kalıcı gerilme profillerini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Wu ve Matsumoto [58], sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde kalıcı gerilme oluşumun etkileyen faktörleri belirlemek için FEM kullanmışlardır. Deveraajan vd. [76], yüzey kalıcı gerilmelerinin önceden bilinmesini sağlamak için deneysel bir model kurmuşlardır.

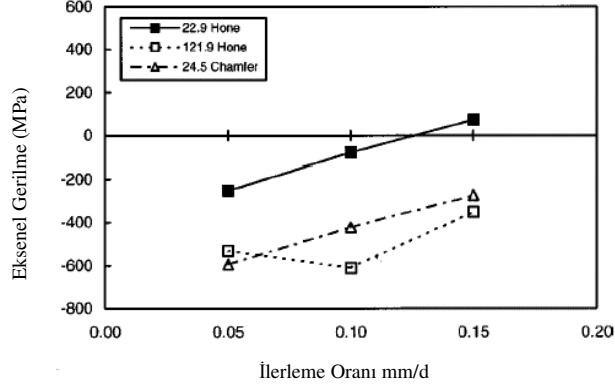
H. Hamdi vd., 52100 malzemesinin taşlanması sonrası oluşan kalıcı gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile tespit etmeye çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda taşlama işleminin kalıcı gerilmelere neden olduğunu ve kalıcı gerilmelerin parçaların aşınma direncinde ve yorulmasında önemli bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Bu çalışma ile geleneksel taşlamanın çekme kalıcı gerilmelerine neden olduğu, yüksek hızlı taşlamalarda ise basma kalıcı gerilmelerinin oluştuğu belirlenmiştir. Taşlama işlemindeki iş parçasının dönme hızı, kesici taşın dönme hızı ilerleme ve taşlama derinliği gibi parametrelerin kalıcı gerilmelerin oluşumunda etkili olduğu görülmüştür [78].

Thiele vd. [78], gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada tamamen sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğin zor olan ince tornalama işleminde takım kesici kenar geometrisi ve iş parçası sertliğinin yüzey kalıcı gerilmelerine etkisini belirlemek için çalışmışlardır. “Tamamen keskin” kenar, kenar radyüslü ve kenar pahlı kesici kenar geometrisine sahip polikristalin kübik bor nitrid (PCBN) uçlar bu çalışmada kesici takım olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada takım kenar geometrisinin X-ray yöntemiyle ölçülmüş olan yüzey kalıcı gerilmeleriyle ilgili olarak oldukça yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Genelde aksel ve çevresel yönleredeki yüzeydeki basma kalıcı gerilmeleri, boyuna tornalama işleminde geniş kenar radyüslü takımlarla oluşturulmuştur. Geniş kenar radyüslü takımlarla oluşturulmuş aksel ve çevresel yönleredeki gerilmeler, küçük kenar radyüslü takımlarla oluşturulmuş gerilmelerden tipik olarak daha fazla basma özelliğindedir.

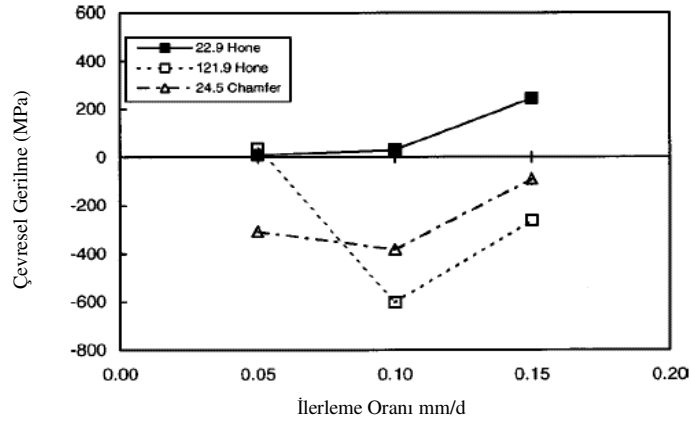
Yüzeydeki kalıcı gerilmelerinin işlenmiş yüzeyin yorulma ömrüne ve tribolojik özelliklere etkisi bilinmemektedir. Bu etkiler gerilmelerin büyüklüğüne ve doğasına bağlı olarak faydalı ya da zararlı olabilir. Sonuç olarak, çok sayıda çalışma işleme proses parametreleri ve kalıcı gerilmeler arasındaki ilişkileri belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar iş parçasının termoplastik deformasyona bağlı olarak kalıcı gerilmelerin oluştuğu sonucunu vermiştir. Yinede bu çalışmalarda ince tornalama işleminde yüzey oluşumu yeterli derecede izah edilememiştir [79]. Tornalama prosesi esnasında termoplastik deformasyona katkıda bulunan ilave faktörler kalıcı gerilmelerin oluşumunun anlaşılmasını geliştirmek için dikkatle incelenmelidir. Bu faktörler takım kesici kenar geometrisini ve iş parçası sertliğini içerir. Kesici kenar geometrisi ya da kenar hazırlayıcı ince işleme operasyonları için önemlidir, çünkü deforme olmamış talaş kalınlığı kenar radyüslü kadar önemlidir. Bu nedenle talaş ve takım arasındaki etkileşimin çoğu kesme kenarı boyunca meydana gelir. İş parçası sertliği önemlidir, çünkü termoplastik deformasyon karakteristiklerini iyileştirebilir [78].

Şekil 3.10 ve 3.11, 57 HRC sertlikteki iş parçası için sırasıyla çevresel ve aksel kalıcı gerilmeler üzerine kenar oluşturucunun ve ilerleme oranının etkisini göstermektedir. Şekil 3.12 ve 3.13'in incelenmesi 121.9 µm radyüslü ve 25.4 µm pahlı takımlarla oluşturulmuş aksel ve çevresel gerilmelerin orta ve yüksek

ilerleme oranlarında benzeştiğini gösterir. Genellikle kenar oluşturuçuların her iki tipi bu bileşenler için aynı büyüklükte basma kalıcı gerilmeleri üretir [78].



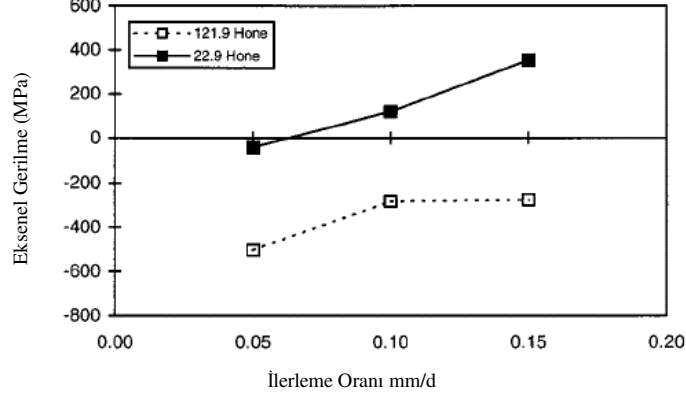
Şekil 3.10. 57 HRC Sertliğindeki İş Parçasında İlerleme Ve Kenar Oluşturucunun Eksenel Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]



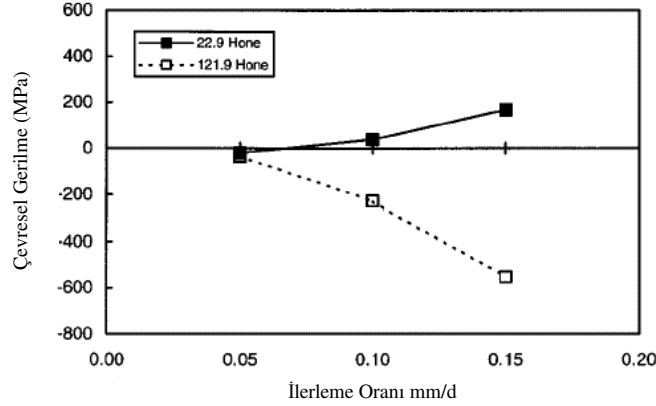
Şekil 3.11. 57 HRC Sertliğindeki İş Parçasında İlerleme Ve Kenar Oluşturucunun Çevresel Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]

Şekil 3.12 ve 3.13 ise 41 HRC sertliğindeki iş parçası için bu etkileri gösterir. Bu şekiller 22.9 µm radyüslü takımın oluşturduğu kalıcı gerilmelerin genellikle çekme gerilmeleri olduğunu ya da sıfır gerilme değerini aldığını, 121.9 µm radyüslü takımın ve 24.5 µm pahlı takımın oluşturduğu kalıcı gerilmelerin basma özelliğinde olduğunu gösterir. 57 HRC sertliğindeki iş parçasının deneylerinden elde edilen bu sonuç 22.9 µm radyüslü takım ile eksenel gerilme bileşenlerinin dışındaki bütün

gerilme bileşenleri için doğrudur. Bu durumlar için 22.9 μm radyüs , 0.05 mm/d ve 0.10 mm/d ilerleme oranlarında küçük basma yüzey kalıcı gerilmeleri oluşur [78].



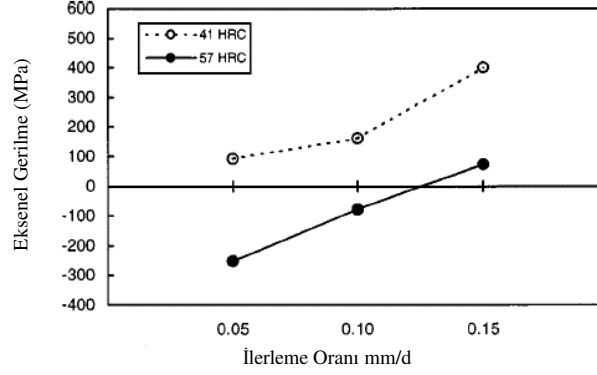
Şekil 3.12. 41 HRC Sertliğindeki İş Parçasında İlerleme Ve Kenar Hazırlayıcının Çevresel Gerilmeler Üzerine Etkisi [78].



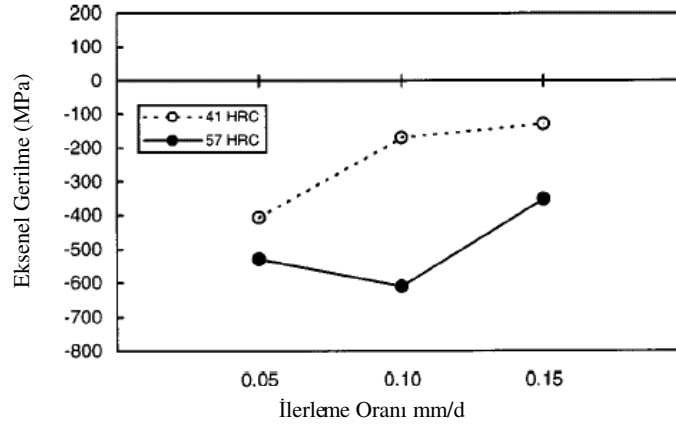
Şekil 3.13. 41 HRC Sertliğindeki İş Parçasında İlerleme Ve Kenar Hazırlayıcının Eksenel Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]

Sertlik ve ilerleme oranının bir fonksiyonu olarak yüzey kalıcı gerilmelerinin çevresel ve eksenel bileşenlerinin grafiği Şekil 3.14-3.17'de gösterilmektedir. Bu grafikler her kesici kenar geometrisi için sertlik ve kalıcı gerilme arasındaki ilişkiyi gösterir. Şekil 3.14 ve 3.15 sırasıyla 22.9 ve 121.9 μm radyüslü takımlar için kalıcı gerilmenin iş parçasının sertlik ve eksenel bileşenleri arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu şekiller 57 HRC sertliğindeki iş parçasının eksenel gerilme bileşenlerinin, 41 HRC

sertliğindeki iş parçasının aksenal gerilme bileşenlerinden daha çok basma özelliğinde olduğunu gösterir [78].

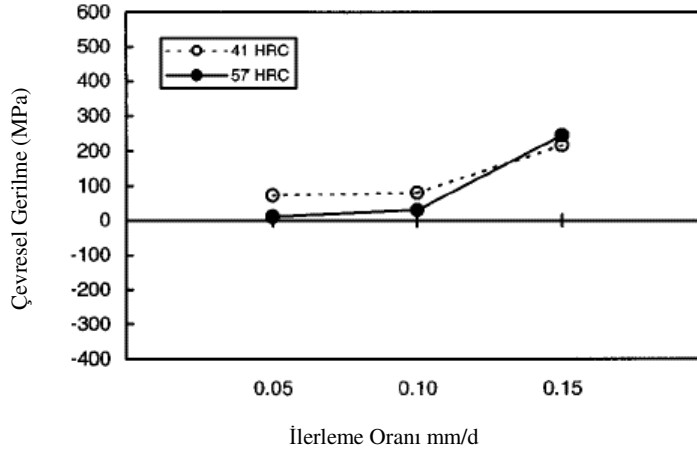


Şekil 3.14. 22.9 µm Radyüslü Uçta İş Parçası Sertliğinin Ve İlerleme Oranının Aksenal Kalıcı Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]

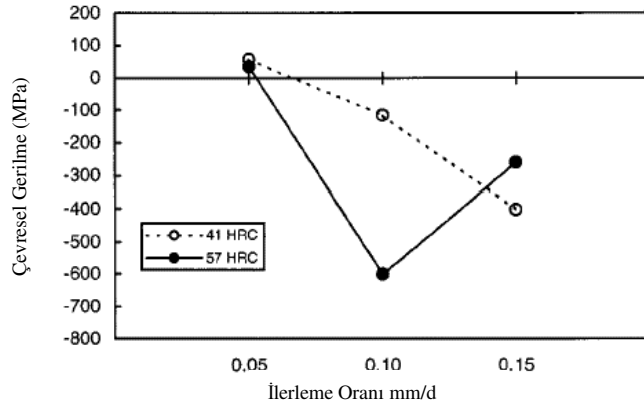


Şekil 3.15. 121.9 µm Radyüslü Uçta İş Parçası Sertliğinin Ve İlerleme Oranının Aksenal Kalıcı Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]

Şekil 3.16 ve 3.17 sırasıyla 22.9 µm ve 121.9 µm radyüslü takımlar için sertliğin çevresel gerilmeler üzerindeki etkisini gösterir. Bu şekiller 41 HRC sertliğindeki iş parçası malzemesinin çevresel gerilme bileşenlerinin 57 HRC sertliğe sahip iş parçasının çevresel kalıcı gerilme bileşenlerinden daha az basma özelliğinde olduğunu gösterir [78].



Şekil 3.16. 22.9 µm Radyüslü Uçta İş Parçası Sertliğinin Ve İlerleme Oranının Çevresel Kalıcı Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]



Şekil 3.17. 121.9 µm Radyüslü Uçta İş Parçası Sertliğinin Ve İlerleme Oranının Çevresel Kalıcı Gerilmeler Üzerine Etkisi [78]

Lin vd. yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar metoduyla elde edilmiş simülasyon prosesinin farklı ortogonal kesme durumları altındaki Ni-P alaşımlı iş parçasının kesme kuvveti, gerinim ve gerilmenin dağılım değişimini analiz etmek için kullanılmıştır.

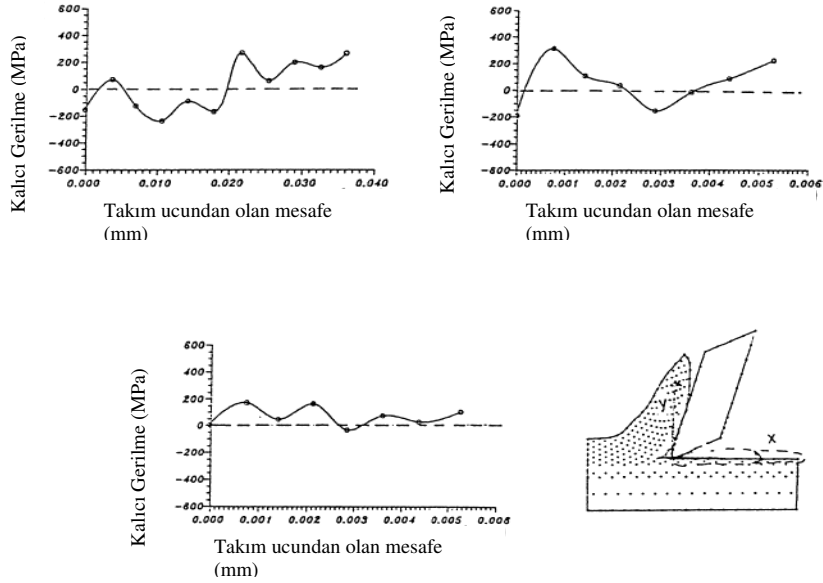
Şekil 3.18 (a)-(c) kesmede durağan durum elde edildikten sonra 0.005, 0.003 ve 0.001 mm'lik farklı kesme derinlikleri için takım ucundan yüzey altındaki mesafe değişiklikleri boyunca ki iş parçasının yeni oluşan yüzeyindeki kalıcı gerilme

değişikliklerini gösterir. Farklı kesme derinlikleri ve farklı takım yer değişim mesafeleri için iş parçası alt yüzeyindeki kalıcı gerilmeler hem çekme hem de basma gerilmelerini içerir. $X=0$ pozisyonu, takım ucunun basma alanını ifade eder, burada sadece basma gerilmeleri meydana gelir. X eksen koordinatının artmasıyla, şekilde görüldüğü gibi iş parçası alt yüzeyindeki kalıcı gerilmeler hem çekme hem de basma gerilmeleri içerir. Takım ucundan olan mesafe daha da arttığında takım ucunun arkasına yakın gerilmeler basma gerilmelerinden çekme gerilmelerine dönüşür. Takım ucu bu alanı tamamen geçtiğinde malzeme geri esner. Takım ucundan daha da uzaktaki nokta yükleme durumunda kalmıştır, fakat yük henüz tamamen serbest değildir [79].

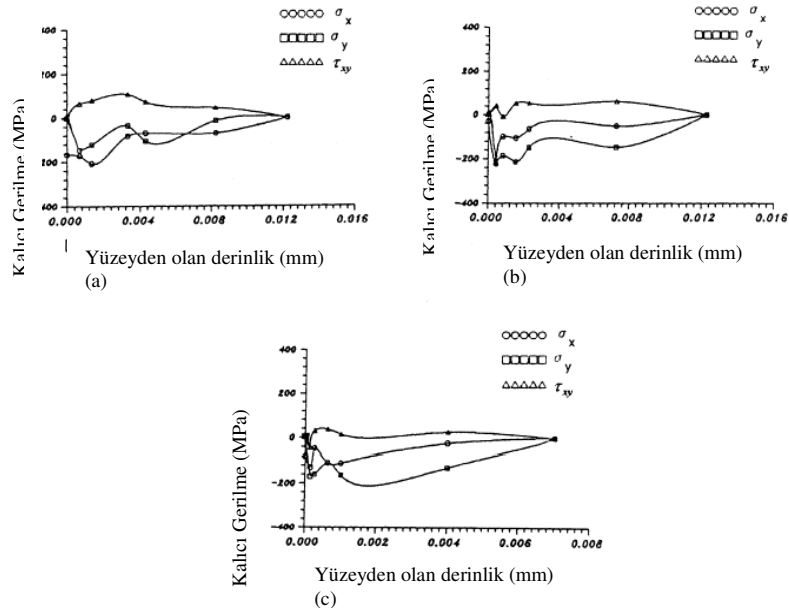
Burada, iş parçası alt yüzeyindeki gerilmeler basma gerilmesine dönüşür. Takım ucundan uzak mesafelerde, malzeme yük boşalmasını tamamlamıştır ve çekme gerilmesi durumundaki durağan duruma yaklaşıyordur. Farklı kesme derinlikleri arasındaki karşılaştırma en büyük kesme derinliğinde takım ucu altındaki en geniş basma gerilmelerinin olduğunu göstermektedir [79].

Şekil 3.19 kesme durağan duruma eriştikten sonra farklı kesme derinlikleri (0.005-0.003-0.001 mm) altındaki takım ucu arkasındaki iş parçası alt yüzeyi altındaki derinliklerin kalıcı gerilme değişimini göstermektedir [79,80].

Şekil 3.19 (a) ve (c)'de derinlik arttıkça σ_x artar, basma gerilmeleri de tam bir derinlik boyunca artarken, ardından kademeli olarak sıfıra doğru azalır. İş parçası alt yüzeyindeki σ_z 'nin değeri sıfırdır [79,80].

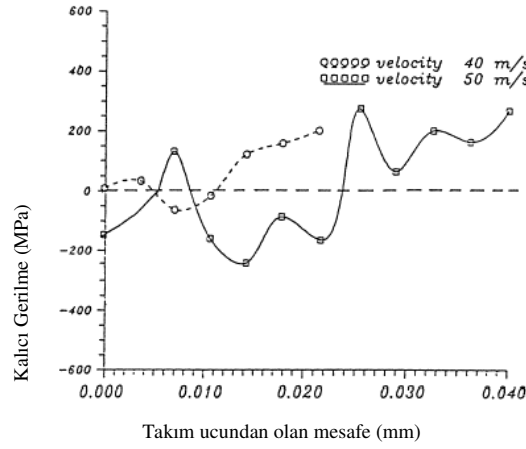


Şekil 3.18. Farklı Kesme Derinliklerinde Kesme Durağan Duruma Eriştikten Sonra Takım Ucundan Olan Mesafe Değişimleriyle İş Parçası Yüzeyindeki Kalıcı Gerilme Değişimi; (a) 0.005 mm, (b) 0.003 mm, (c) 0.001 mm [79]



Şekil 3.19. Farklı Kesme Derinliklerinde Kesme Durağan Duruma Eriştikten Sonra Takım Ucunun Arkasındaki İş Parçası Yüzeyi Altındaki Derinliklerde Kalıcı Gerilme Değişimi; (a) 0.005 mm, (b) 0.003 mm, (c) 0.001 mm [79]

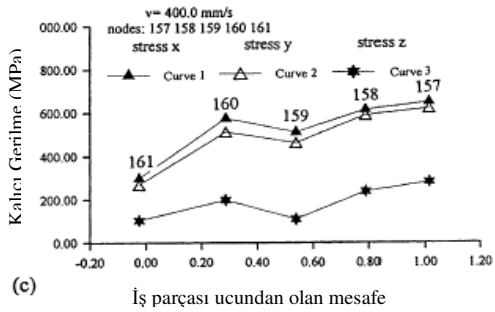
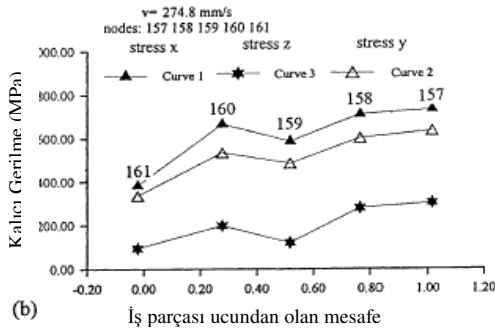
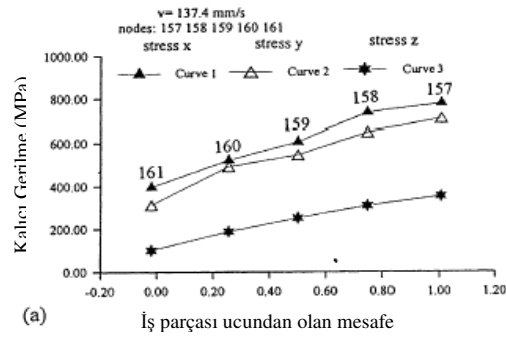
Şekil 3.20, 0.005 mm'lik kesme derinliğinde takım ucundan olan mesafedeki değişimlerle iş parçası yüzeyi üzerindeki kalıcı gerilme değişikliklerini ve kalıcı gerilmelerin hem çekme hem de basma gerilmeleri olduğunu göstermektedir. Çekme gerilmelerinin mevcut olduğu takım ucunun hemen arkasında bir alan vardır, takım ucunun hemen geçtiği bu alanda malzeme geri esner. Yeni oluşan serbest yüzey sabit bir sınır olmadığından malzeme eğilir ve bir çekme gerilmesi durumu şekillenir. Meydana gelen maksimum yüzey basma gerilmesi kesme hızı artarken artar, fakat malzemenin eğilmiş sınırlarında çekme gerilmesinin etkisi fazla önem arz etmez [79,80].



Şekil 3.20. Farklı Kesme Derinliklerinde Kesme Durağan Duruma Eriştikten Sonra 0.005 mm'lik Kesme Derinliğinde Takım Ucundan Olan Mesafelerdeki Değişimlerle İş Parçası Yüzeyindeki Eksenel Kalıcı Gerilme Değişimi [79,80]

Sonuç olarak kesme prosesi tamamlandıktan sonra kesme derinliği ve kesme hızı iş parçası alt yüzeyindeki kalıcı gerilmeleri etkiler. Basma gerilmesinin meydana geldiği takım ucunun arkasındaki alan en derin kesme derinliğinde meydana gelmiştir. Kesme hızı arttığında yüzeyde oluşan maksimum basma gerilmesi de artar, fakat malzemenin eğilmiş sınırlarından kaynaklanan çekme kalıcı gerilmesinin etkisi sınırlıdır. Bulgular iş parçası yüzeyinden olan derinlik arttıkça basma kalıcı gerilmelerinin arttığını gösterir, fakat iş parçası yüzeyi altındaki kesin bir değeri aşan derinlikten sonra azalmaya başlar ve maksimum basma gerilmesinin

meydana geldiği derinlik kesme derinliğinin artmasıyla artar [79,80]. Lin ve Lin [81], yaptığı çalışmada farklı kesme hızlarının işlenmiş yüzeydeki kalıcı gerilme, yer değiştirme ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini işlenmiş yüzeyin bütünlüğü ve kesme hızları arasındaki ilişkilerini anlamak için yapmışlardır. Şekil 3.21, işlenmiş yüzeyin kesme doğrultusu boyunca ki kalıcı gerilme dağılımını gösterir. En büyük kalıcı gerilme değeri takıma en yakın kısımda oluşurken, en düşük kalıcı gerilme değeri takımdan daha uzak kısımda oluşur, çünkü takıma yakın kısımdaki elastik gerilme gevşemesi takımdan uzaktaki kısımdan daha düşüktür



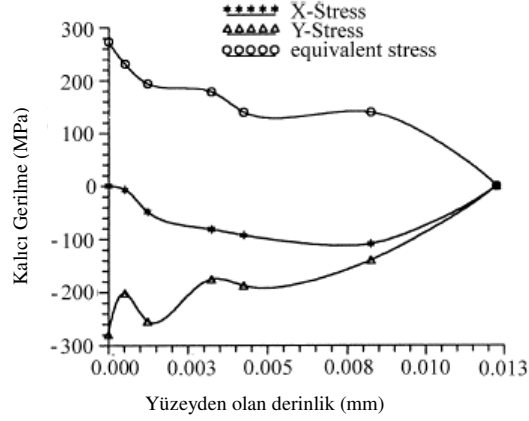
Şekil 3.21. Düşük Kesme Hızları Altında Kesme Doğrultusu Boyunca İşlenmiş Yüzeydeki Kalıcı Gerilmeler; (a)v= 137.4 mm/s; (b) v= 274.8 mm/s; (c) 400 mm/s [81]

İşlenmiş yüzeydeki en büyük kalıcı gerilmeler ve yüksek sıcaklık takım ucuna yakın bölgede görülmektedir. En düşük kalıcı gerilmeler ve sıcaklık takım ucundan uzak kısımlarda oluşur [81].

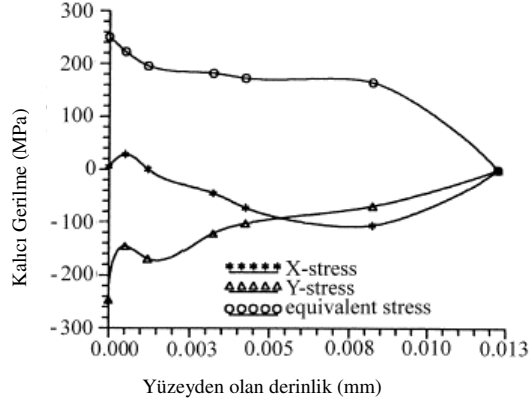
Lo [82], sonlu elemanlar metodunu hassas kesme prosesi üzerine takım boşluk açısının etkisini belirlemek için kullanmıştır. Kesme simülasyonu; kesme kuvveti, talaşın geometrik biçimi, eşdeğer gerilme dağılımı, kalıcı gerilme ve işlenmiş iş parçası yüzeyi üzerine takım boşluk açısının etkisini belirlemek için farklı takım boşluk açıları altında oluşturulmuştur. Bulgular, takım boşluk açısındaki bir artışın; işleme esnasında gerekli kesme kuvvetinde bir azalma; daha düzgün talaş konturu; talaş kalınlığı ve deforme olmamış talaş kalınlığı arasında daha küçük bir fark; eşdeğer gerilme dağılımında bir azalma ve işlenmiş iş parçasının kesilen ilk ucunda daha az belirgin eğilme olayına yol açtığını göstermiştir. Ayrıca sonuçlar takım boşluk açısının 5° den 15° ye artırıldığında yukarıda söz edilen fiziksel olayın daha da belirginleştiğini gösterir. Zıt olarak takım boşluk açısı 15° den 20° ye çıkarıldığında bu fiziksel olayının bir miktar değiştiği gözlemlenmiştir.

Şekil 3.22-25 dört farklı takım boşluk açısı durumu altında A-A kesitinde simüle edilmiş kalıcı gerilmeleri gösterir. Şekil 3.22’de 5° lik boşluk açısında, (σ_x , kesme doğrultusundaki gerilmesi) iş parçası yüzeyindeki çekme gerilmesi değeri 12 MPa civarındadır ve azar azar değişerek işlenmiş yüzey altında -120 MPa değerine sahip basma gerilmesine dönüşür. Kesme doğrultusuna dik σ_y kalıcı gerilmesinin iş parçası yüzeyindeki maksimum değeri -280 MPa’dır ve iş parçasına olan mesafe arttıkça azalır [82].

Şekil 3.23, 10° lik boşluk açısında işlenmiş iş parçasının A-A kesitindeki kalıcı gerilmeleri gösterir. Şekil 3.24’de aksenal yöndeki maksimum çekme gerilmesinin iş parçası yüzeyinde olmadığı görülür, fakat iş parçası yüzeyinin 0.00052 mm altında 15 MPa’lık değere sahiptir. Ayrıca iş parçası yüzeyindeki mesafe arttıkça σ_x değerinin azalarak basma gerilmesine dönüştüğü ve yaklaşık -110 MPa’lık maksimum değere ulaştığı görülebilir. Şekil 3.25’de σ_y ’nin maksimum basma gerilme değerinin -245 MPa civarında olduğunu ve iş parçası yüzeyinde meydana geldiğini gösterir [82].



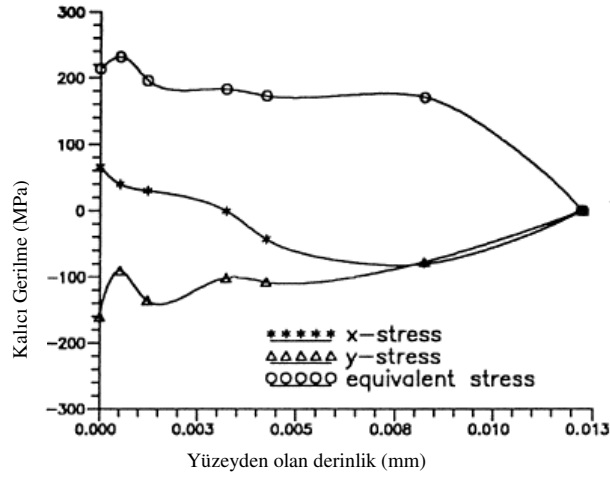
Şekil 3.22. 5° Talaş Açısında Kesitteki Kalıcı Gerilmeler [82]



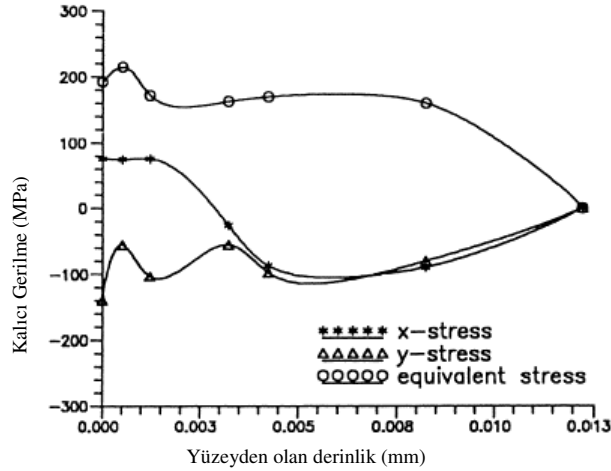
Şekil 3.23. 10° Talaş Açısında Kesitteki Kalıcı Gerilmeler [82]

Şekil 3.24, 15°'lik boşluk açısındaki sonuçları gösterir. Eksenel yöndeki maksimum çekme gerilmesi (σ_x), 60 MPa civarındadır ve iş parçası yüzeyinde meydana gelir. Ardından bu değer iş parçası yüzeyinden olan mesafe arttıkça azalır. İş parçasının yaklaşık 0.0032 mm altında basma gerilmesine dönüşür. Kesme eksenini ne dik maksimum basma gerilmesi (σ_y), yaklaşık -160 MPa'dır [82].

Şekil 3.25'de 20°'lik boşluk açısında σ_x 'in maksimum çekme gerilmesi yaklaşık 80 MPa'dır ve iş parçası yüzeyinde meydana gelir ardından iş parçası yüzeyinin 0.0032 mm altında basma gerilmesine dönüşür. σ_y 'nin maksimum basma gerilmesi -140 MPa'dır ve iş parçası yüzeyinde meydana gelir [82].



Şekil 3 .24. 15° Talaş Açısında Kesitteki Kalıcı Gerilmeler [82]



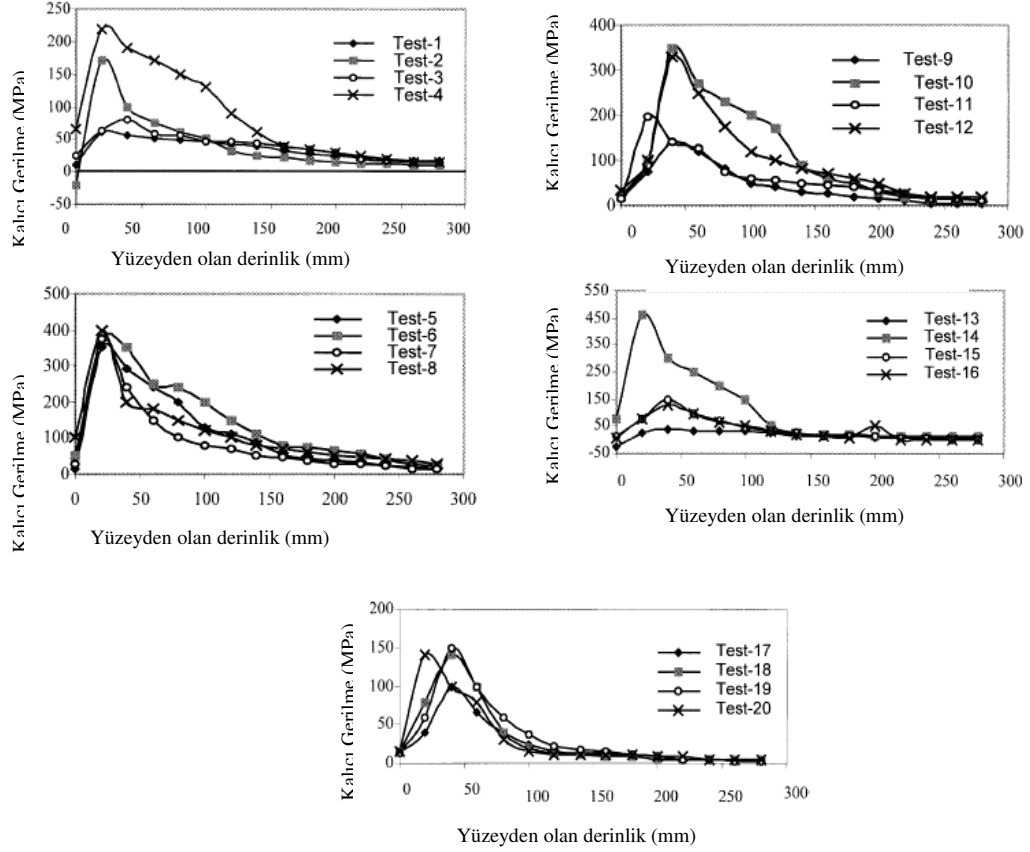
Şekil 3.25. 20° Talaş Açısında Kesitteki Kalıcı Gerilmeler [82]

Yukarıdaki sonuçlar takım boşluk açısının arttıkça, iş parçası yüzeyindeki kesme doğrultusundaki σ_x gerilmesinin çekme gerilmesi yönünde de arttığını göstermektedir. Zıt olarak, kesme doğrultusuna dik σ_y gerilmesi için, takım boşluk açısı arttıkça iş parçası yüzeyindeki maksimum basma gerilmesi azalır. Bu çalışmada, boşluk açısı 5°'den 20°'ye artırıldıkça σ_y değeri -200 MPa'dan -140 MPa'a düşer. Diğer bir deyişle takım boşluk açısı arttıkça işlenmiş iş parçası yüzeyinin yorulma dayanımı azalır [82].

El-Axir [74], yaptığı çalışmada, önceden bilinen kalıcı gerilme profiline sahip daha geniş deneysel bir modeli tanıtır. Mevcut olan modele göre, bu modelin temel avantajı maksimum kalıcı gerilmeyi etkileyen işleme parametrelerini önceden belirler ve maksimum kalıcı gerilmenin hem yerini hem de derinliğini belirler. SS-304, S-37, 7001 ve 2024 alüminyum alaşımı ve pirinç olmak üzere beş farklı malzeme cevap verici yüzey metodolojisine (response surface methodology) dayalı deneysel tasarım tekniklerinin biriyle tornalanarak işlenmiştir. Bu malzemelerin çekme dayanımları ile birlikte hem kesme hızları hem de ilerleme oranları kalıcı gerilme dağılımını belirleyen üç girdi parametresi olarak ele alınmıştır. İşlenmiş yüzey bölgesindeki kalıcı gerilme dağılımı deflection-etching tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Burada, kalıcı gerilme profilinin kullanılmış olan üç girdi parametresinin belirleyici bir fonksiyonu olduğu önerilmiştir.

Yorulma ömrü önemli bir dinamik özelliktir ve işleme esnasında oluşan yüzey durumuyla güçlü bir biçimde etkilenir. Yorulma çatlakları genellikle parçanın yüzeyinde çekirdekleşir ve ardından bir hacim içerisinde genişleyerek büyür. Çatlak uzadıkça direnç kesiti azalır ve kalıcı bölge uygulanmış yük bileşenine daha fazla karşı koyamadığından yorulma meydana gelir. Sonuç olarak, çatlakların çekirdekleştiği yüzeydeki gerilme durumu en önemli özelliktir. Bu durum işleme esnasında oluşan kalıcı gerilmenin ve uygulanmış yükten kaynaklanan gerilmenin toplamıdır. Kalıcı gerilme değişik mekaniksel ve termal olayların sonucudur. Kesme durumuna, iş malzemesine ve takım geometrisine bağlı olarak; kalıcı gerilmeler çekme ya da basma gerilmeleri olabilir [74].

Şekil 3.26'da genel olarak işlenmiş yüzeydeki kalıcı gerilmelerin düşük (çekme) olduğu ve işlenmiş yüzey altındaki derinlikteki bir artışla hızla maksimum (çekme) derinliğine arttığı görülebilir. O zaman çekme kalıcı gerilmeleri işlenmiş yüzeyin altındaki derinliklerde daha fazla bir artışla derece derece azalır. Bütün verilerin analizi kalıcı gerilmelerin geniş derinliklerde ya çekme ya da basma olduğu bölgeler boyunca azalmaya devam ettiğinin gösterir. Maksimum kalıcı gerilmeler daima işlenmiş yüzeye yakın katmanlardan ziyade işlenmiş yüzeyin altında oluşur [74].

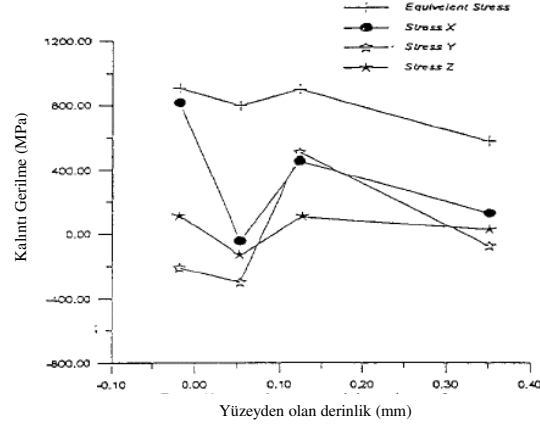


Şekil 3.26. İşlenmiş Yüzeyden Ölçülmüş Kalıcı Gerilme Profilleri [74]

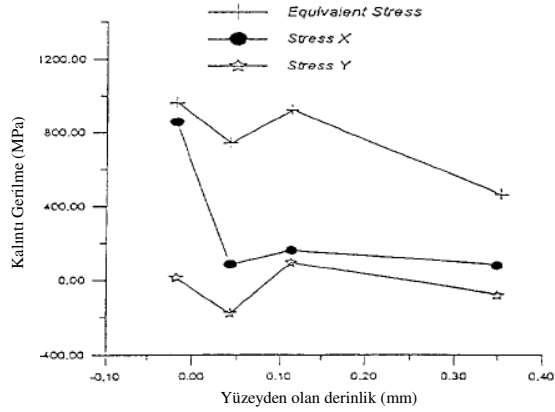
Lin ve Yarıg [83] yaptıkları çalışmada, yumuşak çeliklerin 3 boyutlu düşük hızla kesme durumlarını talaş ve iş parçasının davranışlarındaki değişiklikleri, gerilme ve gerinim dağılımlarını, kesme kuvvetlerindeki değişikliklerin gelişimini analiz etmişlerdir. Farklı kesme hızlarının tesiri ve kalıcı gerilmelerin ilk durumları işlenmiş iş parçasındaki farklı kesme durumlarının farkını anlamak için çalışmışlardır.

Şekil 3.27-29 farklı kesit alanlarında iş parçası alt yüzeyindeki kalıcı gerilme ile farklı kesme hızları için iş parçası yüzeyi altındaki derinliklerdeki kalıcı gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu çalışmadaki durumlar gerçek düzlem gerinim durumlarını kapsamadığından, durum iki boyutla ortogonal kesmedeki düzlem gerinim durumundan farklıdır. Y ve Z doğrultularında işlenmiş yüzeylerdeki

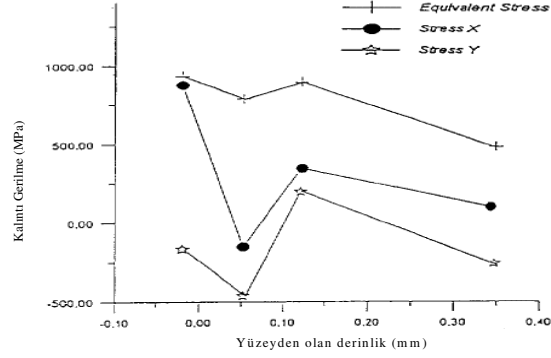
gerilmeler serbest bırakılır ve böylece değerler sifira yaklaşıır. Kalıcı gerilmeler temel olarak X doğrultularıyla etkilenir [83].



Şekil 3.27. 1.459 mm İlerleme Ve 274.8 mm/s Kesme Hızında Kesme Durağan Duruma Eriştikten Sonra Kesici Kenardan 1.125 mm Mesafede İş Parçası Alt Yüzeylerindeki Kalıcı Gerilme [83]



Şekil 3.28. Şekil 3.27 İle Aynı Fakat Kesme Hızı 400.8 mm/s [83]



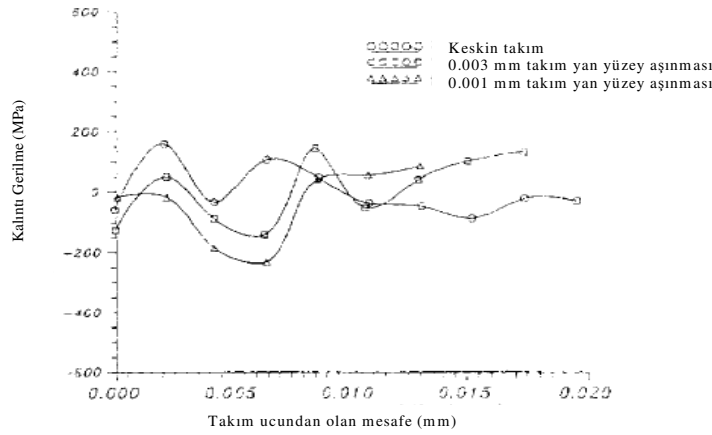
Şekil 3.29. Şekil 3.27 İle Aynı Fakat Kesme Hızı 137.4 mm/s [83]

Lin vd. [80], yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar metodu ile elmas takımın farklı yan yüzey aşınma uzunluğu altında elektrolitik olmayan Ni-P alaşımının özel hassas ortagonal kesme davranışını simüle etmek için kullanmışlardır. Takım yan yüzey aşınma uzunluğu arttığında işlenmiş iş parçasının alt yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değerinin arttığı bulunmuştur. Takım yan yüzey aşınma uzunluğunun en büyük değeri için (bu çalışmada 0.0015 mm) takım ucu civarında 200 °C'lik izotermal alan uzunluğu takım yan yüzey aşınma uzunluğuna hemen hemen eşittir. Takım yan yüzey uzunluğunun artmasıyla takım ucuna yakın işlenmiş iş parçasının alt yüzeyindeki maksimum basma gerilmeleri de artmıştır ve takım ucundan sınır mesafesindeki işlenmiş iş parçasının alt yüzeyindeki çekme kalıcı gerilmeleri de artmıştır.

C. L. Erikson vd. sonlu elemanlar metodu ile pekleşme ve kalıcı gerilmelerin plastik bölgeler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kalıcı gerilmeler ve birim değişimler malzemenin deformasyon davranışı hakkında bilgi verir. Young's modülü değeri düşük malzemelerde, sertlik değerlerinin metal ve alaşım malzemelerine nispeten yüksek oranda kalıcı gerilmelere bağlı olacağını göstermişlerdir [84].

Şekil 3.30, 0.003 mm'lik kesme derinliğinde, farklı takım yan yüzey uzunlukları için, takım ucundan olan mesafe değişiminin iş parçası alt yüzeyindeki kalıcı gerilmeleri (σ_x), gösterir. Sonuçlar hem çekme gerilmesi hem de basma gerilmesinin parça alt yüzeyindeki kalıcı gerilmeleri ifade ettiğini gösterir. Takım ucu noktası yatay ucun sıfır noktasıdır. Kalıcı gerilmeler takım ucu civarında basma gerilmesi şeklindedir. Yatay eksen koordinatı artarken, takım ucunda daha büyük mesafeyi gösterir. Basma gerilmeleri takım ucu arkasında bir çekme gerilmesine dönüşür. Bu takım yan yüzeyinin henüz geçtiği bölgede malzemenin geri esnemesinden kaynaklanan çekme gerilmesinden dolayıdır. Takım yan yüzey uzunluğunun artmasıyla işlenen kısımlarda iş parçasının geri esnemesi azalır ve takım yan yüzeyinin hemen geçtiği bölgede çekme gerilmeleri de azalır [80].

İş parçasının keskin bir kesici uç ile işlenmesinde, basma kalıcı gerilmeleri daha da küçülür. Takım yan yüzey genişlemesiyle, iş parçasının işlenen kısmının hemen alt yüzeyindeki basma gerilmeleri maksimum değere ulaşır. Takım ucundan belirli bir mesafedeki konumda, işlenmiş iş parçası alt yüzeyi tamamen yük altından çıkmıştır ve durağan duruma yaklaşmıştır. Bu durum çekme kalıcı gerilmelerinin oluşumuna neden olur [80].

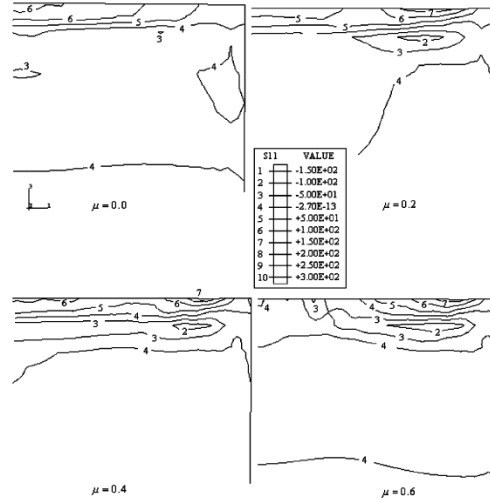


Şekil 3.30. Farklı Yan Yüzey Aşınmalı Takımlar Ve Keskin Bir Takım İçin Takım Ucundan Olan Mesafelerde İşlenmiş İş Parçası Yüzeyindeki σ_x Kalıcı Gerilmeleri [80]

Shet ve Deng [53] yaptıkları çalışmada, talaş kaldırma prosesinin sonunda kalıcı gerilme ve gerinimlerin dağılımı üzerine takım-talaş ara yüzey sürtünmesinin

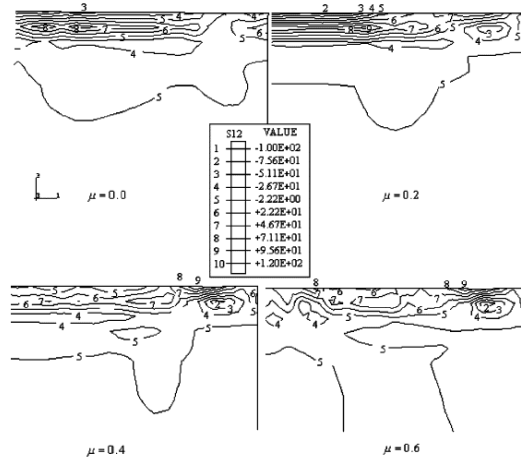
etkisini izah etmişlerdir. Takım talaş açısı 20° ve 0'dan 0.6'ya değişen sürtünme katsayıları kullanılmıştır. Şekil 3.31, baskın olan kalıcı gerilme bileşenlerinin σ_{11} (σ_x) değişimini gösterir. İş parçasının sağ kenarından uzaktaki σ_{11} seviyesi sürtünme katsayısı 0 ile 0.4 arasında olduğunda aynı oranda azalır ya da çoğalır ve bitmiş yüzey boyunca çekme özelliğindedir.

Sürtünme katsayısı 0.6 olduğunda, kalıcı gerilme seviyesi çok düşüktür ve iş parçasının sağ kenarından uzakta basma gerilmeleri vardır. Liu ve Guo [69], nümerik çalışmalarında basma kalıcı gerilmelerinin daha yüksek sürtünme katsayılarında oluşacağını söylemişlerdir. Bütün bu durumlarda kalıcı gerilmeler sadece bitmiş yüzeye çok yakın yerlerde bulunur ve bitmiş yüzeyin altındaki mesafelerde ihmal edilebilir [53].



Şekil 3.31. Değişik Sürtünme Katsayıları Değerleri Ve 20° 'lik Talaş Açısı Altında İş Parçasındaki σ_{11} Normal Gerilmeleri [53]

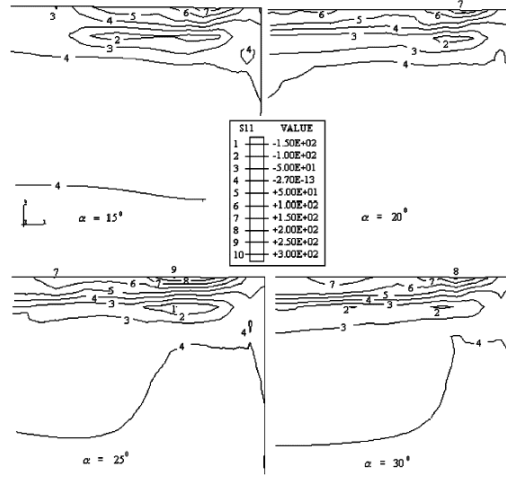
Şekil 3.32, σ_{12} (σ_y) kalıcı gerilme bileşenlerinin konturlarındaki değişimi göstermektedir. Sürtünme katsayısı 0'dan 0.2~0.4'e artırıldığında gerilme seviyesi düşer. Bununla birlikte, sürtünme katsayısı 0.6'ya artırıldığında, kesme gerilmesi doğrultusu bozulur ve büyüklüğü daha da yükselir [53].



Şekil 3.32. Değişik Sürtünme Katsayıları Değerleri Ve 20°'lik Talaş Açısı Altında İş Parçasındaki σ_{12} Normal Gerilmeleri [53]

Şekil 3.31-32'de gözlenenler iş parçasındaki en son kalıcı gerilme alanı ve takım-talaş ara yüzeyi boyunca ki sürtünme katsayısı arasında lineer olmayan bir ilişki olduğunu gösterir. Sürtünme katsayısı 0.6 değerini aldığı anda, baskın olan kalıcı gerilme bileşeni $\sigma_{11}(\sigma_x)$ en yararlı dağılıma (bitirilmiş yüzey boyunca negatif ya da ihmal edilebilir değerler) sahip olduğu belirginleşir [53].

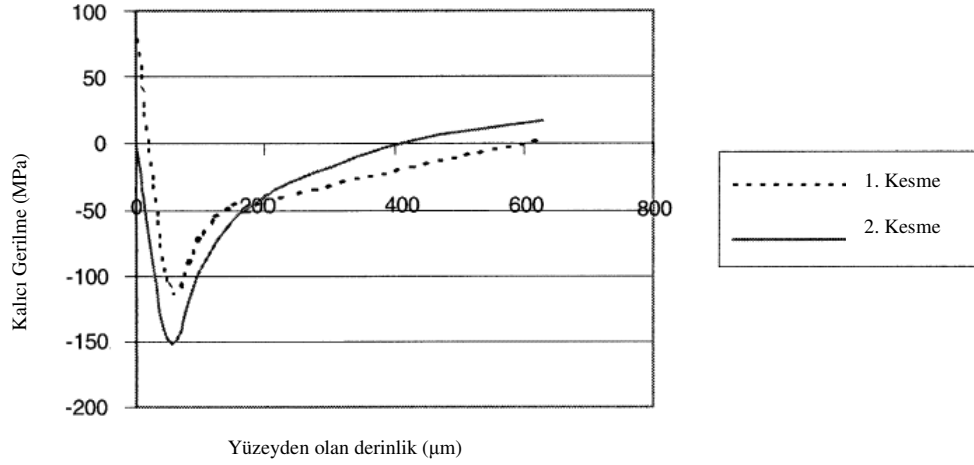
Talaş kaldırma sonunda kalıcı gerilmeler ve gerinimlerin dağılımında talaş açısının etkisi ele alınmıştır. Sürtünme katsayısı 0.4 ve talaş açısı $15^\circ \sim 30^\circ$ arasında değişen değerlerde simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.33'de baskın olan kalıcı gerilme bileşeni $\sigma_{11}(\sigma_x)$ için elde edilen eğriler görülmektedir. Talaş açısı 15° olduğunda, iş parçasının sol bölgesindeki kalıcı gerilme (sağ kenara yakın geçici bölgeden uzakta) biraz da olsa basma özelliğindedir. Talaş açısı 20° ya da yukarısında olduğunda kalıcı gerilme bitirilmiş yüzey boyunca ve yüzeyin hemen altında çekme özelliğindedir, daha sonra basmaya dönüşür ve ardından bitirilmiş yüzeyin altından daha uzakta sıfır olur. İş parçasının sol bölgesinde bitirilmiş yüzey boyunca maksimum çekme gerilmesi, talaş açısı arttıkça kademeli olarak artar [53].



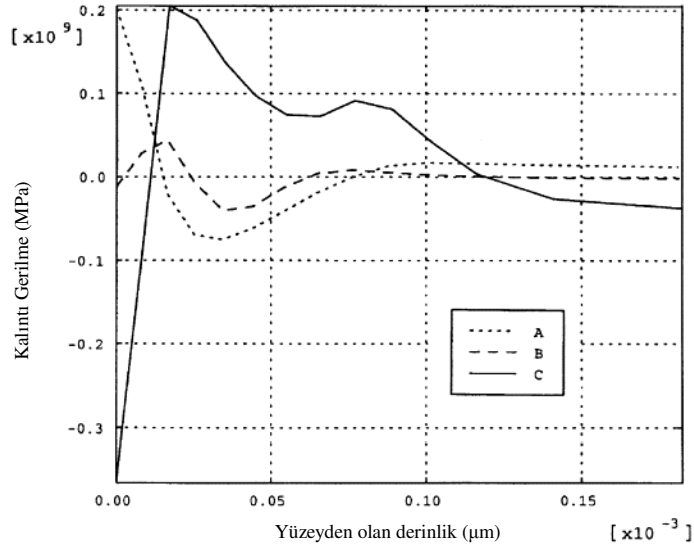
Şekil 3.33. Değişik Talaş Açısı Değerleri Ve $\mu=0.4$ Sürtünme Katsayısı Değeri Altında İş Parçasındaki σ_{11} Normal Gerilmeleri [53]

Liu ve Guo [69], art arda kesmede talaş oluşumu, kesme kuvvetleri ve sıcaklığı incelemişlerdir. Kalıcı gerilmelerin takım talaş ara yüzeyinin sürtünme durumuna bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Talaş kalınlığı, kesme kuvvetleri, kalıcı gerilme ve işlenmiş yüzeyin sıcaklığı ilk kesmeden etkilenen katmanı biraz etkilerken, ikinci kesme ile oluşmuş kalıcı gerilme dağılımını önemli ölçüde etkiler. Şekil 3.34, iki kesme arasındaki işlenmiş yüzeyin derinlik değişimine karşı kesme doğrultusundaki kalıcı gerilmeleri gösterir. Birinci kesmeden sonra soldaki yüksek çekme kalıcı gerilmesi özdeş ikinci kesme etkisiyle değişir. Çekme kalıcı gerilmeleri ikinci kesmeden sonra önemli ölçüde değişmesine rağmen, yüksek çekme gerilmeleri birinci kesmeden sonra işlenmiş yüzeye yakın biçimde oluşur, işlenmiş yüzeye yakın basma kalıcı gerilme bölgesi Şekil 3.34’de görülebilir. Kesme doğrultusundaki kalıcı gerilme seviyesi ikinci kesmeden sonra oldukça artar.

Şekil 3.35, takım talaş ara yüzeyindeki üç farklı sürtünme durumu altında kesme doğrultusu boyunca olan kalıcı gerilme dağılımını göstermektedir. Kesme doğrultusundaki kalıcı gerilmeler 0.3 gibi düşük sürtünme katsayısı altında işlenmiş yüzeyde çekme özelliğindedir. 0.3’den 0.5’e ardından 0.7’ye artan sürtünme katsayılarında, işlenmiş yüzeyde kesme doğrultusundaki kalıcı gerilmeler çekmeden basmaya değişir [69].



Şekil 3.34. Kesme Doğrultusundaki Normal Gerilme Dağılımı [69]

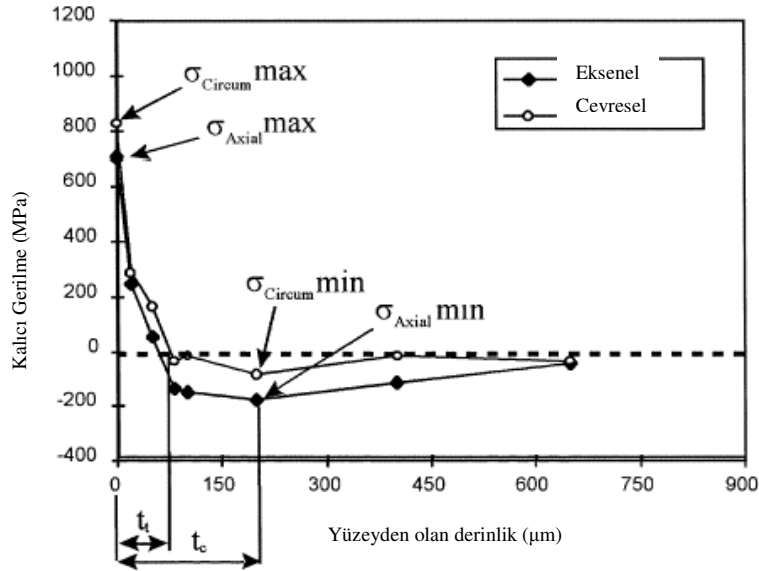


Şekil 3.35. Takım-Talaş Ara Yüzeyinin Sürtünme Durumuna Hassas Kalıcı Gerilme Dağılımı: A- 0.3, B- 0.5, C-0.7 [69]

Saoubi vd. [85] yaptıkları çalışmada, AISI 316 L çeliklerin ortogonal kesmeyle oluşan kalıcı gerilmeleri kesme hızı, ilerleme, takım geometrisi ve takım kaplaması gibi kesme parametrelerinin oynadığı rolü incelemiştir. Kalıcı gerilmelerin derinlik profili, X-ray difraksiyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir.

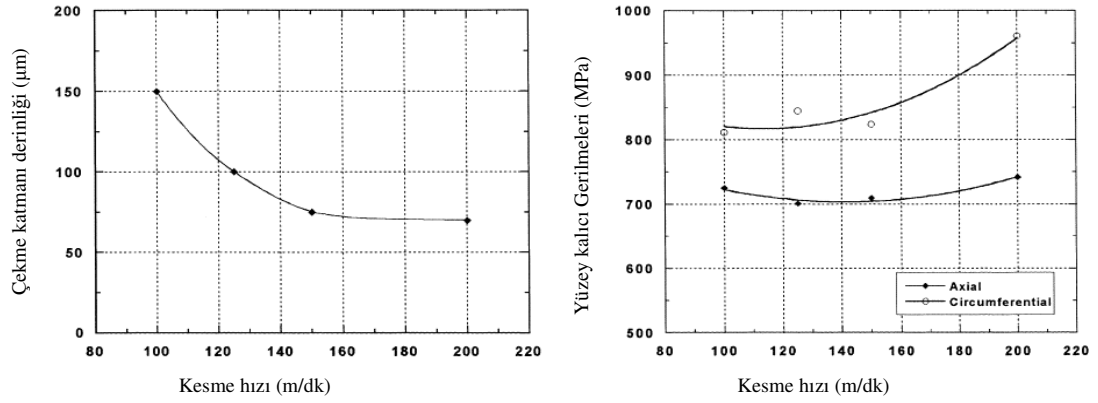
Kalıcı gerilmeler üzerine takım niteliği ve kesme durumunun etkisi kesme deneyleri esnasında kaydedilmiş termal ve mekanik olaylarla bütünleştirilerek analiz edilmiştir.

Kesme şartlarının geniş bir sınırında işlenmiş yüzeyde kalıcı çekme gerilmeleri bulunmuştur. Çevresel gerilmeler genellikle aksel gerilmelerden daha büyüktür. Gerilme seviyeleri derinlikle sürekli olarak azalarak minimum basma gerilmesine düşmüştür ve ardından malzemenin işlenmeden önceki durumuna uygun bir seviyeye yükselerek dengeli bir hale gelmiştir. Bu durum hem çevresel gerilmeler, hem de aksel gerilmeler için doğrudur. Şekil 3.36 0° talaş açısıyla, 100 m/dk kesme hızı ve 0.1 mm/d ile malzeme işlendiği zamanki kalıcı gerilme dağılımını göstermektedir. Bu çalışmada işlenmiş parçalarda yüksek seviyelerde çekme kalıcı gerilmelerin olduğu tespit etmiştir [85].



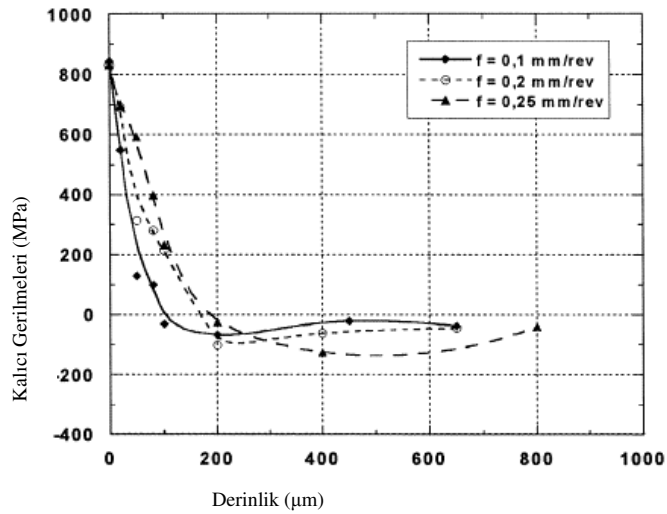
Şekil 3.36. Kalıcı Gerilmenin Dağılımı [85]

Şekil 3.37’de ise kalıcı gerilmelerin kesme hızıyla nasıl değiştiği gösterilmektedir.



Şekil 3.37. Kesme Hızının Fonksiyonu Olarak Çekme Katman Derinliği ve Yüzey Kalıcı Gerilmeleri [85]

Şekil 3.38’de ilerleme oranının kalıcı gerilmeler üzerine etkisini göstermektedir [85].



Şekil 3.38. İlerleme Oranının Bir Fonksiyonu Olarak Teğetsel Kalıcı Gerilmeler [85]

E. Dlek ve arkadaşları bilyeli dövülmüş 1020 malzemede kalıcı gerilmeyi katman kaldırma yöntemi ile incelemişlerdir. Bilyeli dövme ile çelikte oluşturulan maksimum kalıcı gerilmenin 276 ile 363 MPa basma arasında değiştiğini ne sürmüşlerdir [86].

Kaynak etkili bir birleştirme aracıdır. Bu esnada metal dfzyona uğrar. Kaynak sırasında kaynak bölgesinde ısı artar ve sonra hızla soğur. Hızlı ısı değişimi sırasında kalıcı gerilmeler oluşur. Oluşan bu kalıcı gerilmeyi belirlemek çok önemlidir. Chang vd. ise kaynak edilmiş parçalardaki kalıcı gerilmeleri tespit etmek için nümerik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Sonlu elemanlar tekniğini kullanarak parçalarda termo plastik analiz davranışlarını incelemişler ve kalıcı gerilmeyi X ışını kırınımı ile belirlemişlerdir [87]. Lin ve Chen ise, Argon, Tungsten ve gaz altı kaynakları kullanarak AISI 316 ve 310 östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kalıcı gerilmeyi delik delme metodu ile belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda metal kaynağında kalan δ ferrit içeriğindeki düşüş kalıcı gerilmelerin büyümesine neden olacağını, argon kaynağında azot muhtevasının artması ile kalıcı gerilmelerin artacağını belirlemişlerdir [88]. G.Engelhard vd. Östenitik elik boruların kaynaklarında kalıcı basma gerilmeleri yaratmak için değişik kaynak teknolojilerini araştırmışlardır. alışmalarının neticesinde; dar kaynak ağzı kullanarak doldurucu metal hacmi azaltılmış ve bunun sonucunda çekme kalıcı gerilmelerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ana malzeme % 0.03 den küçük bir C içeriğine sahip olması, yüzeylerin düşük seviyede iş sertleşmesine sahip olması, kontrollü düzgün ve düşük ısı kaynağı sağlanması gerektiğini tespit etmişlerdir. Bunun da ancak otomasyon kaynakla mümkün olacağını belirtmişlerdir. Kaynak sonucu oluşan kalıcı gerilmeleri radyografik yöntemlerin yanı sıra katman kaldırma yöntemi ile 0.1 mm derinliğe kadar tespit etmişlerdir [89]. L. Clapham, vd., kaynak yapılan bölgelerdeki kalıcı gerilmeleri incelemişler, bu bölgelerdeki kalıcı gerilmelerin çok karışık olduğunu ve bunun nötron kırınımı ile ölçülebileceğini belirlemişlerdir [90]. Staron vd. ise sürtünerek kaynak yapılan Al levhalarda fabrikasyon sonrası faydalı olan basma kalıcı gerilmelerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Kaynak bölgelerinde oluşan çekme kalıcı gerilmelerinin bu yöntemle azaltılabileceğini görmüşlerdir [91]. X. K. Zhu ve Y.J. Chao. ise; AISI 304 L stenitik paslanmaz çeliklerde sürtünme kaynağı sonucu oluşan kalıcı gerilmeleri ve geçici sıcaklığın nümerik simülasyonu üzerinde

çalışmışlardır. Sonlu elemanlar analiz kodu WELDSIM, kaynak simülasyonunu kullanarak geliştirmişlerdir. İki kaynak durumu ile alet hızı 300 ve 500 d/dk analiz edilmiştir. Basma kalıcı gerilme alanları nötron kırınımı yöntemi ile ölçülmüştür [92]. Y.C. Lin ve C.P. Chou ise AISI 304 östenitik paslanmaz çelikleri kaynak yaparak birleştirilmesi sonucu oluşan kalıcı gerilmeleri azaltmak için yeni bir teknik denemişlerdir. Bu yeni teknik paralel ısı kaynağı (PHW) diye adlandırılır. Bu yeni teknik kalıcı gerilme azaltılmasını kaynak boyunca hareket edebilen bir çift paralel ısı torchları, ısı kaynağının her iki tarafına tutturulmuş torchlarla yerine getirilebilir. 304 çeliklerde otomatik gaz altı ve tungsten kaynakları kullanılır. Deneysel sonuçlar, kalıcı gerilmelerin ve paralel kaynak yönündeki maksimum asal gerilmelerin % 21-32 arasında konvansiyon el kaynak işlemlerine göre paralel ısı kaynağı yöntemiyle azaltılabileceğini göstermiştir [93].

Vidaların talaş kaldırarak imal edilmesinde yüzeyde ve yüzey katmanlarında meydana gelen kalıcı gerilmeler daha kolay elde edilebilen teknolojik ve diğer faktörlere bağlı olarak analitik yolla belirlenebilir. Vidaların dış dibinde oluşan kalıcı gerilme dağılım niteliğinin araştırılması, imalat sırasında vidanın dış dibinde yüksek ısının meydana geldiğini ve dış dibinin termoplastik deformasyona uğrayarak tüm yönlerde genişlediğini göstermektedir. Isı kaynağı uzaklaştıktan sonra üst katmanın ölçüleri küçülmeye başladığından bu katmanla sıkı ilişkide bulunan alt katmanlarda üst katmandaki gerilmeleri dengeleyen gerilmeler oluşmaktadır. Alt katmanlarda meydana gelen dengeleyici gerilmeler, üst katmalarda basma gerilmelerinin değerini zamanla bazen sıfıra dek düşürebilmektedir. Isı kaynaklarının etkinliği arttıkça meydana gelen dengeleyici kalıcı gerilmelerin maksimum değeri ve etki ettiği derinlik de artmaktadır. Bu durumda, kalıcı gerilmelerin maksimum değeri,

$$\sigma_g = E \cdot \left(Q_d - \frac{\sigma_{0,2}}{E_d} \right) \quad (3.1)$$

bağıntısıyla belirlenebilir. Burada, E ; malzemenin elastikiyet modülü, Q_d ; temas alanında oluşan ısının sıcaklığı, $\sigma_{0,2}$; malzemenin belirli bir sıcaklıklardaki akma dayanımı, E_d ; malzemenin belirli bir sıcaklıktaki elastikiyet modülüdür [30].

4. KALICI GERİLME ÖLÇÜM METOTLARI

4.1 Giriş

Kalıcı gerilmeler parçaların dinamik deformasyonu sırasında davranışını değiştirebilir, çatlak oluşumunun gelişimini hızlandırabilir ya da yavaşlatabilir. Bu nedenle yorulma ömrü üzerinde etkilidir. Bu yüzden kalıcı gerilmelerin ölçülmesi son derece önemlidir [6,94]. Kalıcı gerilme ölçüm metotları incelendiğinde üç grupta ölçüm yapıldığı görülmüştür. Birinci grup; ya bileşenlerden kesit almayı ya da bileşenlerden malzeme kaldırmayı gerektiren mekaniksel, tahribatlı ya da yarı tahribatlı metotları içermektedir. Bu uygulamalarda parçanın gerilme dengesi mekanik yöntemlerle bozularak, kalıcı gerilmelerin yarattığı deformasyonlar ölçülerek, bunlara neden olan gerilmeler tespit edilmektedir. Bu metotlar önceden var olan gerilmelerin etkilediği gerilimin ortaya çıkarılması esasına dayanan ölçümlerden yararlanmaktadır. Bu metotlardan en sık kullanılanı delik delme metodudur. Bu yöntemle kalıcı gerilmeler birkaç milimetrelik derinliklerde ölçülebilir. İkinci grup; tahribatsız olan X-ışını kırınımı metodudur. X-ışını metodu sadece birkaç mikron derinlikteki kalıcı gerilmeleri ölçmektedir. X-ışınları yönteminde polikristal yapıdaki malzemelerin bir yük altında kafes genişmesi ile oluşan atomik düzlemler arasındaki mesafenin değişimi ölçülür ve bunun eş değer gerilimi tespit eden tahribatsız yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler yüzeyde tahribatsız bir şekilde kalıcı gerilme ölçümüne olanak vermektedir, ayrıca kimyasal bir malzeme kaldırma tekniği ile de gerilimin derinlik profilinin elde edilmesi mümkündür. Bu yöntemlerde uygun yansımaların tespit edilmesi büyük bir önem kazanmaktadır. B. Clausen ve arkadaşları bakır alüminyum ve östenitik çeliklerde kırınım yöntemlerinde sabit dalga boyu tekniğini kullanarak kalıcı gerilme ölçülmesindeki en uygun yansımaları yaptıkları çalışma ile belirlemişlerdir [94]. Üçüncü grup ise, gerilmeli ve gerilmesiz durumlarda farklı değerlere sahip fiziksel özellikleri gösteren bir malzemede ölçümlerin gerçekleştirildiği tahribatsız metotları içerir. Bu üçüncü grupta; ultrasonik ve manyetik özellikler esasına dayalı alt

bölümler yer almaktadır. Uygun metodun seçimi, araştırma için mi yoksa kalite kontrol için mi gerekli olduğuna ya da sadece yüzey katmanlarında kalıcı gerilme bilgilerine (alt yüzey bölgeleri dahil) ihtiyaç duyulup duyulmadığına bağlı olmaktadır [95-107].

4.2 Mekaniksel Metotlar

4.2.1 Kalıcı Gerilmelerin Mekaniksel Metotlarla Belirlenmesinde Temel İlkeler

Herhangi bir cisimdeki kalıcı gerilmelerin mekaniksel yöntemlerle belirlenmesinde aşağıda sıralanan temel ilkeler göz önüne alınmalıdır [8,36].

1. Gerilmeler, bir eksenli normal gerilme durumunu sağlayabilen numunelerde belirlenmelidir. Bu numunelerin kesit alanlarının boyutları bu durumu sağlayabilen ölçü ve biçimde olmalıdır.
2. Kalıcı gerilmelerin belirlenmesi metotlarında kullanılan Saint Venant ilkesi gerilmelerin mekaniksel metotlarla belirlenmesinde uygulanmaktadır.
3. İç gerilmelere sahip bir cisimi bizi ilgilendiren bir kesit alanından iki kısma ayırırsak, bu durumda yeni oluşmuş yüzeyi eşit şiddetli ve zıt yönlü dış gerilmelerin etkilediğini düşünebiliriz.
4. İç gerilmeleri belirlediğimiz cisimde bu gerilmelerin eşit yayıldığını bu cismin malzemesinin nazik bir tabakada izotop olduğunu yani tüm yöntemlerde mekaniksel niteliklerin aynı olduğunu, cisimden ince tabakalar kaldırıldığında oluşan deformasyonun malzemenin elastikiyet sınırını geçmediğini kabul ederiz.
5. Bizi ilgilendiren kesit alanından üstteki tabakanın bir veya birkaç işlemde ve hangi sıra ile kaldırıldığında gerilmelerin yüzeyde oluşturduğu deformasyonu etkilemediğini düşünmekteyiz.
6. Cisimden gerilmeleri belirlemek için numuneler keserken ve numunelerin yüzeyinden ince tabakalar kaldırılırken, bu işlemlerin numunede kalıcı gerilmeler oluşturmadığını kabul etmekteyiz. Bu nedenle kullandığımız imal usullerini ve imal

faktörlerini öyle seçmeliyiz ki, bunların oluşturduğu gerilmeler önemsiz bir değer almış olsun.

7. İç gerilmelerin oluştuğu bir cisim hayali olarak iki kısma ayırarak mekanikteki kuvvet kavramına dayanarak cisimde olan gerilmelerin aynı değer ve işaretle kesit alanını etkilediğini kabul ederiz.

4.2.2 Delik Delme Metodu

Kalıcı gerilmeyi ölçmek için kullanılan en yaygın tekniklerden bir tanesi delik delme metodudur. Yukarıda açıklandığı gibi kalıcı gerilme ölçmede kullanılan delik delme metodu bir bileşenin yüzeyine yapıştırılmış üç gerinim ölçer rozetin merkezinden bir deliğin delinmesi esasına dayanır [8,23,36,95,96,107,108]. Ayrıca yukarıdaki bölümlerde serbest yüzeylere dik gerilmelerin bu serbest yüzeylerde daima sıfır olacağına dikkat çekilmiştir. Sonuç olarak, eğer gerilmeli bileşenin yüzeyinde bir delik meydana getirilirse, bu deliğin kenarındaki radyal gerilmeler sıfıra indirgenir. Gerilmelerin yeni bir dağılımı genel olarak deliğin etrafında meydana gelir. Deliğin yüzeyindeki radyal gerinim tamamen gevşeyecektir, fakat gerinimdeki bu değişimleri doğrudan ölçmek için deliğe yeterince yakın gerinim ölçer elemanlarını yerleştirmek uygulanabilir değildir. Gerinim ölçerler rozetteki delikten sınıra belirli bir mesafede yerleştirilmiş ve gerçek kalıcı gerilme hesaplanacağı zaman bu ofset mesafesi uygun toleranslar içinde olmalıdır. Gerinim ölçerlerin dizaynları sınırlı sayıda. Bu nedenle parçaların uygun yerlerine monte edilmelidir. Şekil 4.1'deki gibi gerinim ölçerler delinecek deliğin merkezi etrafında çevresel olarak 0^0 , 90^0 ve 225^0 'lik açılarla değişmeyecek şekilde yerleştirilir ve rozetin merkezinden eşit aralıklarla çıkarılan bu açı uzantıları deliğin merkezi ile çalışacak şekildedir.



Şekil 4.2. Delik Delme Yöntemi İle Kalıcı Gerilme Ölçebilen Cihaz [108]

M. Honner vd. yaptıkları çalışmada delik delme yöntemiyle kalıcı gerilme ölçüm tekniği ile termogrofi analizi metotlarının aynı sonuçları verdiğini görmüşlerdir. Yüzey özelliklerini belirleyebilmek için yayıcı ve yansıtıcı ölçüm yöntemlerinin delinerek ve milimetrik boyutlardaki gerinim ölçerler kullanılarak tespit edilebileceğini, dinamik yüzeylerdeki ısı alanlarının delmeye eşlik eden gerinim ölçerler kullanılarak belirlenebileceğini bildirmişlerdir [107]. Artırımlı delik delme metodu kompozit levhalarda kalıcı gerilmeyi belirlemek için kullanılan yarı tahribatlı etkili bir metottur. Bu metot kalıcı gerilme profiline erişmemize imkan sağlamaktadır. Artırarak delinmiş her bir delik ile gerinim ölçerlerin doğru pozisyonu delinmiş deliklerin radyüsleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar açıkça gösteriyor ki bu parametrelerin kalıcı gerilmeler üzerindeki etkileri önemli ölçüdedir [110].

4.2.3 Kesit Alma Ve Katman Kaldırma Metotları

Kesit alma ve katman kaldırma yöntemi numune üzerinden malzemenin art arda katmanlarının kaldırılmasını ve kaldırılan her bir katman ardından numunede

arta kalan deformasyonun ölçülmesini içerir. Bu ölçümlerden numunedeki orijinal kalıcı gerilmeler hesaplanabilir.

Temel amaç, yorulma kırılmasının ve uygulanmış yükün doğrultusuyla tanımlanmış olan temel gerilmelerin meydana geldiği düzlemdeki kalıcı gerilmelerin mümkün olduğu kadar hassas ölçülmesidir. Kalıcı gerilme çoğu kez çok aşırı olduğu için, mümkün olduğu kadar küçük olarak kaldırılan art arda gelen katmanların kalınlığı önem arz etmektedir [17].

Kesit alma metotları tek, çift ve üç eksenli kalıcı gerilme durumlarını belirlemek için uygulanabilir. Bununla birlikte bu metotlar genel olarak tahribatlıdır. Gerçekleştirilmesi çok pahalıdır [95,111].

Yüzey gerilmelerini belirlemek için kullanılan diğer metotlar bileşenden malzeme parçalarının kesilerek çıkartılmasını içerir. Kesip çıkarılan parçadaki gerinim değişiklikleri, kesme işleminden önce parçanın kesip çıkarılacak kısmına yapıştırılmış gerinim ölçerler ya da ekstansometre yardımıyla ölçülebilir [95].

Metal kaldırma prosesinde, ölçülmüş olan orijinal gerilmelere rağmen benzer önemde olan yeni kalıcı gerilmelerin kolayca ortaya çıkması mümkündür. Katman kaldırmak için kullanılacak yöntem parçada ilave gerilmeler oluşturmayacak yöntemlerden dikkatle seçilmelidir [17,95].

Bu metoda ait daha detaylı bilgiler ve gerilmelerin hesaplanabilmesi için gerekli formüller bir sonraki bölümde daha detaylı olarak ele alınmıştır.

4.3 X-Ray ve Nötron Işını Metotları

4.3.1 X-Ray İle Gerilme Ölçümü

X-ışını kırınımı en uygun tahribatsız yöntemlerden bir tanesi olup, malzemenin yüzeyindeki kalıcı gerilmenin mikron seviyesinde belirlenmesinde

kullanılabilir [5,8,36,95,96]. Dalga boyunun doğru bilinmesi ve Bragg açısının değişmesiyle kalıcı gerilmeler doğru olarak hesaplanabilir. Röntgen usulü kristalik malzemelerde kristalografik düzlemler arasındaki mesafesinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Bazı sadeleştirmeler yaparak bu olayın temel ilkesini aşağıdaki gibi anlatabiliriz. Gerilmelerin araştırıldığı yüzeyde, röntgen ışınlarına maruz bırakılan malzemenin kristalik kafesindeki elektronlar oluşan röntgen ışınlarının etkisinden aynı frekanslarda dalgalanarak, düşen röntgen dalgalarına eşit dalgalar oluştururlar. İnterfrensiya sonucunda bu dalgalar bazı kristallerde zayıflayıp yok olurlar ve bazı kristallerden (aynı fazlı dalgalar) yansıyan dalgalar ise güçlenirler. Bregglar tarafından keşfedilmiş Bragg şartlarına göre, belirli ν açısı ile kristalografik düzleme düşen röntgen dalgaları bazı kristallerde güçlü interfrensiya oluşturarak dalga uzunluğu λ dalga adedinin tam kısmı n kadar büyüyerek düştükleri ν açısı ile yansır. Düşme ve yansıma açıları arasındaki α_x açısının değeri; düşme açısı ν 'ye, kristalografik düzlemler arasındaki d_k mesafesine, dalga uzunluğu λ 'ya, dalga uzunluğunun tam adeti kadar büyüme derecesi n 'e bağlı olarak değişmektedir. Bu şart aşağıdaki formül ile değerlendirilir.

$$2d_k \sin \nu = n\lambda \quad (4.2)$$

Bu formül kullanılarak kristalik düzlemler arasındaki d_k mesafesi belirlenebilir [8,36,95,96].

X-Ray metodu bir malzemenin yüzeyindeki gerginlikleri (uzamaları) ölçer. Bu gerginlikler değişik tahminler kullanılarak gerilmeler biçimine dönüştürülür. Gerginlikleri elde etmek için temel prensip basittir. Düzlemlerin spesifik formunun ara yüz boşlukları yüzey normaline farklı biçimde dizilmiş olan tanelerden belirlenir. Bu, gelen ışına uyacak şekilde deney parçasının döndürülmesi veya eğilmesi ile meydana getirilir. Bu boşluklar 4.3 eşitliği kullanılarak gerinimler biçimine dönüştürülür [112].

Kristalik malzemelerde kristalik kafes içerisindeki atomları arasındaki d_k mesafesi belli ve değişmezdir. Yalnız kuvvet ve sıcaklık etkisi d_k 'nın değişmesine

neden olabilir. Bu etkilerden önceki d_k ve sonraki d_σ mesafesi bulunursa nispi deformasyon ε_n , değerine dayalı olarak gerilmeler belirlenebilir [8].

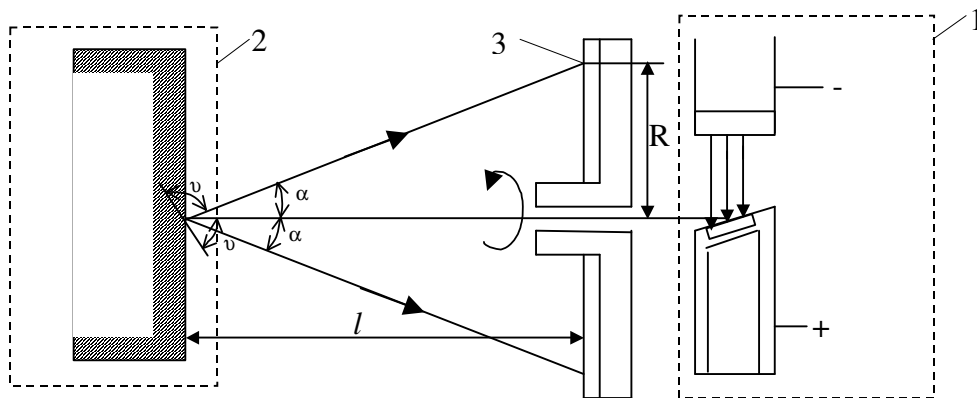
$$\varepsilon = \frac{d_k - d_\sigma}{d_k} \quad (4.3)$$

Parça yüzeyindeki kalıcı gerilmeleri oluşturan bir sıra teknolojik nedenler vardır. Bunlar malzemedeki faz değişiklikleri, plastik deformasyon, termoplastik deformasyon, sıcaklık etkisi vs. olabilir. İmalat sonucunda bu etkiler birkaç defa tekrarlanabilir. Tüm bunlar göz önüne alınırsa parça yüzeyindeki kalıcı gerilmeler araştırılırken mutlak değeri de önceden deneysel yöntemle bulunmalıdır. Çoğu zaman röntgen yönteminin avantajları sıralanırken d_k 'nın belli olduğu ve bulunmasına ihtiyaç olmadığı gösterilir [8].

Şekil 4.3'deki d_k mesafelerini ölçebilen röntgen cihazının şeması verilmiştir.

Burada;

1. Röntgen ışını oluşturan kaynak
2. Üzerine araştırılan malzemenin yerleştirildiği konstrüksiyon
3. Araştırılan malzemedan yansıtılan röntgen ışınlarını kaydeden üzerine film yapıştırılmış ve ekseninde dönebilen özel mekanizmadır [36].



Şekil 4.3. Röntgen Cihazının Şematik Biçimi [36]

Bu cihazda 2000 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış volfram teli olan katottan kopan elektronlar kenetronda güçlendirilip odaklandıktan sonra nikel, molibden vs. malzemelerden yapılabilen anottan yansıtılarak (3) mekanizmasının ortasındaki delikten geçerek araştırılan malzeme kristalleri (2) üzerine yansıtılır. Malzeme yüzeyine çarpıp geri yansıyan ışın (3) mekanizması üzerine yapıştırılmış film üzerine izler bırakmaktadır. Röntgen ışınının şemasından aşağıdaki bağıntı çıkarılabilir.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(180 - 2\nu) &= \operatorname{tg}\alpha = \frac{R^*}{l}; \\ \operatorname{tg} 2\nu &= \frac{R^*}{l} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Burada;

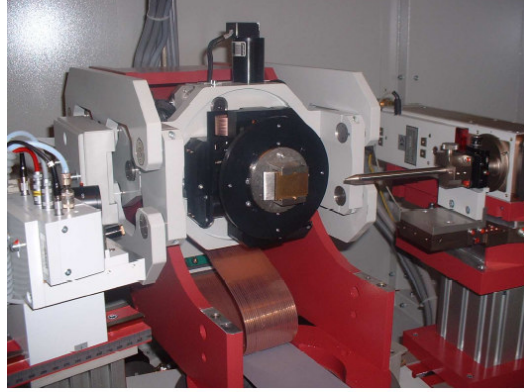
l : Malzeme ile film arasındaki mesafe,

R^* : Yansıyan röntgen ışınının düştüğü yerden dönme mekanizmasının merkezine kadar olan mesafedir. l ve R^* ölçme hassaslığının 4.2 ve 4.4 eşitliklerinden belirlenen değerine önemli etkisi vardır. R^* nin ölçme hassaslığını artırmak için (2) mekanizmasının oluşturduğu dönme hareketi röntgen ışınının film üzerinde $2R^*$ olan daire çizmesine neden olur. Buda ölçme hassasiyetinin yükselmesine yardım eder. Bazen ölçme hassasiyetini artırmak amacı ile araştırmaların yapıldığı malzeme, ν açısı belli olan bir malzeme ile (örneğin Ag, Au vs) 3~5 μm kalınlığında kaplanır ve l mesafesi belirlendikten sonra deneyi yapılan malzeme için ν açısı hesaplanır. Bu deneylere harcanan zamanın artmasına neden olur. Röntgen ışınlarının film üzerinde gözüken bir iz bırakması da 2~6 saat kadar zaman alan bir süreçtir [8,36].

Yüzeyde oluşan gerilmelerin derinlik etkisi düşük olduğundan ve 50~200 μm kadar derinliğe etki yaptığından yüzeyde oluşan gerilme durumlarına düzlem gerilme hali olarak bakabiliriz. Elastisite teorisine dayanarak röntgen yöntemiyle gerilmelerin hesaplanması aşağıdaki formül kullanılarak gerçekleştirilebilir [36].

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \frac{d_k - d_\sigma}{d_k} \quad (4.5)$$

4.5 eşitliğinde elastisite modülü (E) ve poisson oranı (μ) değerleri elastisite teorisinde kullanılan ve makro deformasyonların oluşturduğu değerlerden farklıdır. Bu nedenle türlü teoriler kullanılarak (örneğin Foggel, Peyes hipotezleri) kristalografik düzlemler için yararlı olabilen E ve μ değerlerini bularak hesaplamalar yapılmalıdır. Bu da röntgen yöntemiyle gerilmelerin belirlenmesini daha karmaşık bir duruma getirmiş olabilir. 4.5 eşitliği kullanıldığında yalnız düzlemde oluşan ilk veya normal gerilmelerin toplam değeri bulunmaktadır. σ_1 ve σ_2 değerlerini ayrı ayrı bulmak istediğimizde ise, araştırılan düzlem dikey düzlemle belirgin bir açı oluşturacak şekilde üç düzlemde de deneylerin yapılmasını gerektirmektedir [36]. Şekil 4.4’de X-ışını kırınım cihazı görülmektedir.



Şekil 4.4. X-ışını Kırınım Cihazı [6]

X-ışını kırınım cihazı ile ölçüm yapıldığında

1. Ölçümlerin tekrarlanması ve kopyalanması mümkündür.
2. Ölçümler iki adımda hassas olarak ölçülebilir.
3. Zaman sayacı vardır.
4. Verileri biriktirebilir.
5. Düzenli olarak hareket etme ve ölçüm doğruluğuna sahiptir.
6. Ölçüm yapılan parçalara işaret veya numara verebilir [96].

4.3.2 Synchrotrons

Yüksek enerjili X-ışınlarının çok şiddetli ışın demetini veya çok fazla X-ışınlarını sağlar. Bu X-ışınları geleneksel X-ışınlarından çok daha fazla derine, çoğu parçalarda 1-2 mm derinliğe kadar etki edebilme özelliğine sahiptir. Ölçümler geleneksel X-ışını yönteminden daha hızlı yapılabilmektedir. Synchrotronslar sayesinde üç boyutlu uzaysal çözümlere imkan sağlanmaktadır [96].

4.3.3 Nötron Kırınımı Metodu

Nötronların en büyük avantajı X-ışınları üzerinde çok geniş penetrasyon derinliğine sahip olmasıdır. Nötronlar yüzeye çok yakın 0.2 mm derinliğe kadar ölçüm yapabilme imkanına sahiptirler. Nötron kırınımı parçaların üç boyutlu kalıcı gerilme değerlerinin tanımlanmasına olanak verirler. Bu metot verileri geniş miktarda toplama kapasitesi ile teorik modellerin doğrulanması için kullanışlı bir metot olan nötron kırınımı, örnek malzemenin kalınlığına bağlı olarak tüm yüzeyde ve derinlikte hassas detektörlerin pozisyonu ile gerilim değerlerinin bulunmasını sağlar [23,96]. Halk kalıcı gerilme ölçümü için Nötron Kırınımı metodunu kısaca tanımlamıştır. Prensipleri X-Ray'de kullanılan tekniklerle temelde aynıdır. Fakat diğer kırınım metotları ile karşılaştırıldığında maliyeti çok daha yüksektir. Nötronun dalga boyları konvansiyonel X-Ray tüpleriyle oluşturulmuş dalga boylarındaki gibi aynı büyüklük düzenindedir. İki tip nötron kaynağı vardır; titreşimsiz durum kaynağı ve pulse kaynağı [20,95].

Titreşimsiz durum kaynağından elde edilen nötron ışını monokromatör kristallerde Bragg yansımalarıyla ilk önce mono kromatik (tek renkli) yapılır ve ondan sonra X-Ray kırınımındaki gibi kırınmış nötronların farklı açılarda analiz edileceği yerden numune üzerine çarpması sağlanır [20,95].

Puls (titreşim) nötronları kullanılacağı zaman, mono kromatik bir ışın numuneye yayılır ve kırınmış nötronlar nötronların uçuş zamanına göre sabit kırınım açılarında analiz edilir. Dalga boyları, güzergah uzunluğu ve uçuş zamanlarından

çıkarılabilir. Bir puls kaynağınca oluşturulmuş nötron ışınlarının yoğunluğu kalıcı gerilmelerin ölçümü için oldukça düşüktür. Hauk'un yorumu uçuş zamanı teknikleriyle sadece ikinci tip kalıcı gerilmelerin ölçülebileceği yönündedir [20,95].

Metodun hassasiyeti nötron difraktometresinin açısal çözünürlüğüne ve örneklenmiş malzemenin hacmine bağlıdır. Örneklenmiş hacim gelen ve yansıyan nötron ışınlarının tam kesiti ile tanımlanmıştır [27].

4.4 Diğer Işın ve Dalga Metotları

Bu teknikler, kalıcı gerilmelerin bileşen malzemesinde sebep olduğu fiziksel parametre değerindeki değişimlerin ölçülmesi esasına dayanan tahribatsız metotları içerir. Birçok tahribatsız metodun dezavantajı ölçülmüş olan fiziksel parametre değerlerinin sadece kalıcı gerilme değerlerinin bir fonksiyonu olmamasından kaynaklanır. Değerler sık sık çeliğin bileşimindeki değişikliklerden, metalik fazların durumundan ve çeliğin tane boyutundan etkilenir. Engellenmeye çalışılan bu etkileri hesaba katmamak için deney araçlarının tekrarlanan kalibrasyonları sıkıntıya sebep olduğundan sadece birkaç teknik başarıya ulaşmıştır.

Asıl ilgi odağı tekrarlanan bu kalibrasyona olan ihtiyacı ortadan kaldıracak tahribatsız ölçüm metotlarının geliştirilmesini sağlamaktadır. Bu metotlar manyetik metot ve ultrasonik metot olmak üzere iki ana kategori içerisinde incelenir [95,113].

4.4.1 Manyetik Metotlar

Ferromanyetik malzemelerde elastik gerinim ve mıknatıslanma arasında bir etkileşim olduğu bilinen bir gerçektir. Yıllar önce yapılan deneylerde, bir tel parçasının mıknatıslandığı zaman mıknatıslanma doğrultusunda uzayacağını, gerildiği zaman da gerilme doğrultusunda mıknatıslanacağını doğrulamıştır.

Bu fenomen manyetostriksiyonun (değişmez manyetikleşme) belirli durağan kristalografik doğrultularda manyetik momentlerin atomik hizalanmasından meydana

gelen doğal kafes gerini mi sonucudur. Doğal magnetostriksiyon negatif ya da pozitif olabilir. Domain olarak adlandırılan manyetik olarak sıralanmış bölgeler mıknatıslanmaya paraleldir. Mıknatıslanma bir domain içerisinde uniformdur. Büyüklük olarak doyma noktasına denktir. Domainler uygulanan manyetik alanlar altında yeniden sıralandığı zaman, magnetostriktiv gerinim malzemede boyutsal değişikliklere sebep olur. Depolanmış elastik enerjiyi en aza indirmek için, pozitif manyetostriksiyona (21×10^{-6}) sahip demirde domain mıknatıslanma vektörlerinin çekme gerilmesi eksenine paralel, basma gerilmesi eksenine dik olacak şekilde hizaya girmeleri tercih edilir. Negatif magnetostriksiyona (-24×10^{-6}) sahip nikelde bu doğrultular tam tersi şekildedir. Gerilme uygulandığı zaman, sırasıyla hizaya girme etkisi malzemenin net mıknatıslanmasında değişikliklere neden olur. Ferromanyetik bir yapıdaki gerinim ve manyetikleşme arasındaki ilişki bu etkileşime bağlıdır. Gerçekten bu metotlar tahribatsızdır, taşınabilir ve alan amaçlı uygulamalarda metodu çekici yapan kalıcı gerilme deneyleri içerisinde hızlı bir alternatiftir. Burada iki değişik metot ele alınmıştır. Barkhausen sesi ve magnetostriksiyon metodudur. İlk manyetik domain duvarları hareketinin analizi esasına dayanır. Diğer yöntem ise manyetik indüksiyon ve geçirgenlik ölçümleri esasına dayanmaktadır [23,96,112,113].

4.4.1.1 Manyetik Barkhausen Sesi Metodu

Ferromanyetik malzemeler domain olarak adlandırılan manyetik olarak sıralanmış mikroskobik bölgelerden oluşur. Her bir domain çubuk bir mıknatısa benzetilebilir. Bu bölgelerin mıknatıslanması belirli bir kristalografik yön boyunca gerçekleşir. Domainler genellikle 180° ya da 90° dönen mıknatıslanma doğrultuları içerisindeki duvarlarla birbirinden ayrılır. Malzemenin net mıknatıslanması, bütün domain içerisindeki mıknatıslanmanın ortalamasıdır. Manyetik alan ya da mekaniksel gerilmeler ferromanyetik bir yapıya uygulandığı zaman, domain duvarlarının beklenmedik bir hareketiyle domainin mıknatıslanma vektörlerinin dönüşüyle malzemenin domain yapısında değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler sıra ile bütün numunenin mıknatıslanmasında, numune boyutlarında vs. değişiklikler üretir [95,113].

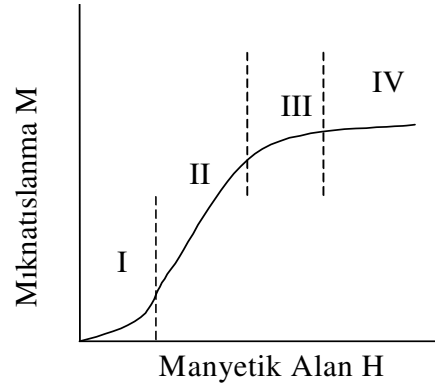
Eğer telden yapılmış bir bobin numuneye yakın olacak şekilde yerleştirilirse, bir domain duvarı hareket ederken mıknatıslanmadan meydana gelen değişiklikler bobinde bir elektriksel pulsa neden olacaktır. Elektro manyetik indüksiyon esasına dayanan domain duvarları hareketinin ilk gözlemleri Barkhausen tarafından yapılmıştır. O mıknatıslanma sürecini bulmuştur. Domainler uygulanan bir manyetik alan altındaki bir pozisyondan diğerine beklenmedik bir şekilde sıçradıkları zaman histeri eğrileri sürekli değildir, fakat meydana getirdikleri değişiklikler küçük adımlarda oluşur. Elektriksel pulslar bütün domain hareketlerinin bobin alanı altında beraberce toplanmasıyla üretildiği zaman, Barkhausen Sesi denilen sese benzeyen bir sinyal meydana gelir. Barkhausen sesi manyetikleşme frekansında başlayan ve 2~3 MHz'nin üzerine ulaşan güçlü bir spektruma sahiptir. Ses malzeme içerisinde ilerleme mesafesinin üstel bir fonksiyonu olarak sönümlenir. Bu öncelikle hareket eden domain duvarları etrafında meydana getirilen elektromanyetik sönümlenme yeteneğine sahip girdap akımlarından dolayıdır. Bu alanlar sadece yüzeyde ölçülebildiği sönümlenme mertebesi bilgilerinin elde edileceği derinlikleri belirler. Bu derinlikleri etkileyen temel faktörler; deney numunesinin geçirgenliği ve iletkenliği ile analiz sinyalinin frekans sınırıdır. Pratik uygulamalarda çelikler için ölçüm derinliği 0.01~3 mm arasında değişir [95,113].

Domain duvarlarının hareket büyüklüğü, örneğin Barkhausen Sesinin yoğunluğu, malzemenin mikro yapısına ve gerilmelere bağlıdır. Uygun biçimde kalibre edilmiş Barkhausen Sesi tek eksenli ve çift eksenli yüzey gerilmelerin tahribatsız olarak belirlenmesinde hızlı bir şekilde uygulanabilir. Metodun temel hassasiyeti gerçek deney parçasıyla kalibrasyon numunesinin mikro yapısal parametreleri ve yüzey özellikleriyle ne kadar benzeştğine bağlıdır [95,113].

4.4.1.2 Manyetostriksiyon Metodu

Şekil 4.5, ferromanyetik bir malzemenin mıknatıslanma eğrilerini göstermektedir. Eğri, mıknatıslanma aşamaları için dört parçaya bölünebilir. 1. aşamada (ilk mıknatıslanma bölgesi), sadece oynak manyetik alan duvarları hareket eder ve mıknatıslanmaya katkıda bulunur. 2. aşamada (mıknatıslanmaya ara verilen

bölge), duvar hareketi biter ve manyetik alan yapısı değişikliklere uğrar. 3. aşamada (mıknatıslanmanın değiştiği bölge), duvar hareketi biter ve manyetik momentler doğal mıknatıslanma doğrultusunda uygulanmış olan manyetik alan doğrultusuna doğru yönelir. 4. aşamada (doymuş mıknatıslanma bölgesi) bütün manyetik momentler uygulanmış manyetik alan doğrultusundadır ve manyetik alanlar tamamen gözden kaybolur [36].



Şekil 4.5. Ferromanyetik Yapıların Mıknatıslanma Eğrisi [36]

Manyetik metodun en önemli avantajı 6 ila 10 mm derinliğindeki çift eksenli gerilmeleri çok hızlı bir şekilde birkaç saniye içerisinde yapabilmesidir. Tüm ekipmanı taşınabilir [96,113].

4.4.2 Ultrasonik Metotlar

Hassas ve hızlı ultrasonik dalgalar gerilme seviyesinin belirlenmesinde kullanılır. Malzemenin içindeki ultrasonik dalgaların hızındaki değişiklikler gerilmeyi direkt gösterir. Gerilme ölçümü için kullanılan ultrasonik teknikler,

$$V = V_0 + J\sigma \quad (4.6)$$

ilişkisi ile tanımlanabilen dalga hızındaki değişim esasına dayanmaktadır. Burada V_0 gerilmemiş bir atomdaki dalganın hızı, σ gerilme ve J ise akustoelastik sabit olarak bilinen bir parametredir [36].

Ultrasonik tekniğin kullanılma amacı öncelikle malzemenin içerisindeki gerilmeler hakkında bilgiler elde etme çabasıdır. Hız değişimi dalgaların yayıldığı bölgeler boyunca var olan gerilmelerin ortalaması ile orantılıdır [36].

Ultrasonik tekniğin avantajları; araç gereç kullanımı için elverişliliği, çabuk ayarlama, taşınabilir, ucuz ve radyasyon tehlikesinin olmamasıdır. Karşılaşılan problemler ise düşük uzaysal çözünürlük, sıcaklık değişimi ve mikro yapısal etkilerden dolayı hız değişimlerinin rakip kaynaklara hassasiyeti, çok keskin zaman ölçümleri için duyulan zorunlulukları içerir [96,111,113].

4.4.3 Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi ışığın cisim ile etkileşimini içerir. Gelen lazer ışınları atomlar arası bağların titreşimine neden olur. Raman Spektrumu bir numunenin fiziksel durumu ve kimyasal yapısı hakkında çok önemli bilgileri ortaya çıkarmadaki dağınık ışığın analizi olarak bilinir. Bu teknik tahribatsız muayene yöntemi, non-invasive ve yüksek yüzeysel çözüme sahiptir. Bu metot ile optik mikroskop kullanmak şartıyla uzaysal çözümler yapılabilir. Genellikle yüzeydeki ve yüzeye çok yakın gerilmeleri ölçebilme yeteneğine sahiptir. Fakat bazı ilavelerle yüzey altı bilgileri de tespit edebilmektedir [96].

4.5. Kalıcı Gerilme Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Uygun Yöntemin Seçimi

Her problemi çözecek olan evrensel bir teknik yoktur, fakat elimizdeki araçların birleştirilmesiyle birçok endüstriyel ihtiyaç karşılanabilir. Aşağıdaki açıklamalarda, değişik açılardan bakılmış karşılaştırmalı çizelgeler hem uygulama

seviyelerine hem de teknik ve ekonomik önemlilik açısından kapsadığı uygulama alanlarına uygun olarak geliştirilmiştir. Kullanılması düşünülen teknik, yerine getirilecek olan ölçüm tipine ve analiz edilecek olan parçanın niteliğine uygun olarak seçilmelidir. Tekniğin seçiminde dikkate alınacak parametreler aşağıda sıralanmıştır.

1. Malzemenin niteliği (kristalografik yapı, doku, kimyasal bileşim).
2. Kalıcı gerilme tipi (makro ve mikro gerilmeler).
3. Parçadaki kalıcı gerilmelerin eğilimi (yüzeydeki ya da parçanın kalınlığı boyunca ki eğilim).
4. Seçilmiş olan teknik kullanılarak analiz edilecek bölge ve parçanın geometrisi (analiz edilecek olan yüzeyin biçimi, boyutları ve derinliği).
5. Ölçümlerin nerede yapılacağı (yerinde ya da laboratuarda).
6. Müdahale tipi (tahribatlı ya da tahribatsız).
7. Ölçüm hızı.
8. Metodun kesinliği ve tekrarlanabilirliği.
9. Gerekli ekipmanın fiyatı ve ölçüm maliyeti.

Göz önünde bulundurulacak yukarıdaki bütün parametreler dikkate alınarak en son karar verilmelidir. Çizelge 4.1 ve 4.2 teknik karşılaştırmaların bir sentezini verir.

Buraya kadar değişik tekniklerin ölçme olasılıkları karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'de ise üzerinde çalışılacak olan malzemelere göre tekniklerin ölçüm kabiliyetlerini göstermektedir [31,95,113].

Çizelge 4.1. Farklı Tekniklerin Genel Olarak Karşılaştırılması

Metot	Delik Delme	Sapma/Deformasyon	Kesit Alma	X-Ray	Nötron Kırınımı	Ultrasonik	Manyetik
Temel hipotez	Delğin yüzeyindeki çift eksenli üniform gerilmeler	Yüzey ölçüleri kalınlığına göre yeterince geniş olan bir dikdörtgen üzerindeki çift eksenli ve üniform gerilmeler	Üç boyutlu gerime alanları	Standart olarak; izotropik, homojen, ince taneli polikristalin malzemelerde	İzotropik, homojen, polikristalin malzemelerde	İzotropik, homojen, malzemeler, alıcı verici arasındaki akustik yol üzerindeki homojen gerilmeler	Ferro manyetik malzemeler
Analiz edilecek kalıcı gerilme tipi	1.tür	1.tür	1.tür	1.tür ve 2. tür ya da 3. tür	1.tür ve 2. tür	1.tür + 2. tür + 3. tür	1.tür + 2. tür + 3. tür
Ölçülecek parametreler	Yüzey gerinimi ya da yer değişimi	Gerinim ya da sapma	Yüzey gerinimi ya da yer değişimi	Polikristalin malzemenin ara boşluklarında ki değişim	Polikristalin malzemenin ara boşluklarında ki değişim	Ultrasonik dalga hızındaki değişim	Barkhausen sesinin genliği ya da manyetik geçirgenlik
Standart kullanım durumun da analiz edilecek minimum bölge	0.5 mm ²	Sapma metodu için 1000mm ² , eğer gerinim ölçer kullanılırsa 100 mm ²	100 mm ²	0.5 mm ²	4 mm ²	Çok yüksek frekans metodu için 0.1 mm ² den konvansiyonel metotlar için 30 mm ² ye kadar	Barkhausen sesi metodu için 1 mm ² , manyetik geçirgenlik metodu için 100 mm ²
Analiz edilebilecek minimum derinlik	20µm	20µm	1-2	Birkaç mikrondan birkaç yüz mikron	1 mm	15-300 µm	100µm
Donanım maliyeti \$	10000~50000	1000	15000	100000~200000	Birkaç yüz mikron	40000~200000	10000~60000
Portatif ölçüm sistemi	Evet	Hayır	Evet	Evet	Hayır	Evet	Evet
Normal taban üzerindeki olağan doğruluk	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 MPa	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10-20 MPa	± 10-20 MPa
Ölçüm zamanı ya da yüzeyden alınan ilk verilerin zamanı/ bir kalıcı gerilme (birkaç mm'de) profilinin elde edilmesi süresi	40 dakika, iki saat	30 dakika, sekiz saat	40 dakika, 5-200 saat	20 dakika, sekiz saat	İki saat, bir hafta	Birkaç dakika, 20 dakika	Anında, 10 dakika
Muayene derinliği	0.02~15 mm	0.1~3 mm	1mm'nin üzerindeki bütün derinlikler	Tahribatsız ölçümler için 1~50µm ve bölgesel tahribathlı ölçümlerde 10 mm	2~50 mm	Yüzey dalgalarında 0.15~3 mm ve hacimli dalgalarda parça kalınlığı kadar	0.1~1 mm

Çizelge 4.2. Analiz Edilecek Bölgenin Malzeme ve Geometrik Problemlere Göre Farklı Tekniklerin Karşılaştırılması

Metot	Delik Delme	Sapma Deformasyon	Kesit Alma	X-Ray	Nötron Kırınımı	Ultrasonik	Manyetik
Geniş taneler ve yapılar karşısındaki problemler	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Evet
Gerinim sertleşmesine duyarlık	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Çok fazlı malzemelerdeki analizler	Bütün fazlardaki temel gerilmeler	Bütün fazlardaki temel gerilmeler	Bütün fazlardaki temel gerilmeler	Eğer minör faz tam bir hacim kısmı kadar aşması durumunda her bir fazdaki gerilmeler	Eğer minör faz tam bir hacim kısmı kadar aşması durumunda her bir fazdaki gerilmeler	Bütün fazlardaki temel gerilmeler	Bütün ferromanyetik fazlardaki temel gerilmeler
Amorf yapı malzemelerde gerilme ölçüm kabiliyeti	Mümkün	Mümkün	Mümkün	Mümkün değil	Mümkün değil	Mümkün	Ferromanyetik fazlarda mümkün
Düşük eğrilik yarı çapın sahip parçalar üzerinde ölçüm kabiliyeti	Eğer $r > 5$ mm ise mümkün	Sachs metodunda mümkün	Zor	Eğer $r > 5$ mm ise mümkün	Eğer ölçümler alt yüzeyi kapsıyorsa mümkün	Zor	Eğer $r > 5$ mm ise mümkün
Kaplamaları ölçme kabiliyeti (kaplama kalınlığı)	50 μm 'den büyük	2 μm ile 3 mm arasında	2mm'den büyük	Bütün kalınlıklarda	2 mm'den büyük	0.1~3 mm Gözeneklilik problemi vardır	0.1~1 mm

Çizelge 4.3 Endüstride Sıklıkla Karşılaşılan Malzemeler İçin Her Bir Tekniğin Uygulanabilirliği

Metot/ Malzeme	Delik Delme	Sapma Deformasyon	Kesit Alma	X-Ray	Nötron Kırınımı	Ultrasonik	Manyetik
Karbon çeliği	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
Düşük alaşımlı çelik	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
Paslanmaz çelik	Evet	Evet	Evet	Evet, eğer tane çok büyük değilse	Evet	Düşük duyarlılık	Evet
Alüminyum alaşımları	Evet	Evet	Evet	Tane boyut problemi	Evet	Evet	Hayır
Titanyum alaşımları	Evet	Evet	Evet	Her bir fazda ölçülecek gerilmeler, β fazında problem	Evet	Evet	Hayır
Nikel alaşımları	Evet	Evet	Evet	Evet, tane boyu problemi	Evet	Evet	Evet
Tek kristal	Evet, sadece geniş boyutlar için	Hayır	Hayır	Evet, sadece bazı favori malzemeler için	Evet, sadece küçük boyutlar için	Zor	Hayır
Polimer	Evet	Evet	Evet	Evet, eğer matris kristalin ise	Evet, eğer matris kristalin ise	Hayır	Hayır
Kompozit	Evet	Hayır	Hayır	Evet, eğer matris kristalin ise	Evet, eğer matris kristalin ise	Zor	Evet, eğer matris kristalin ise
Kaplamalar	Evet, eğer kaplama kalınlığı 50 μm 'den büyükse	Evet	Kaplama kalınlığına bağlı olarak, $p > 2$ mm için Evet	Evet, eğer doku varsa	Kaplama kalınlığına, th, bağlı olarak, th > 2 mm için Evet	Evet, yapı veya gözeneklilik problemi var ise	Evet, eğer kaplam ya da altta kalan yüzey ferromanyetik ise
Kaynaklı yapılar	Evet	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
İşlenmiş parçalar	Evet	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Evet
Mekaniksel yüzey sertleştirme	Evet	Evet	Zor	Evet	Evet, derinlik 2 mm'den büyük ise	Evet	Evet
Termokimyasal ısıtma işlemi	Evet	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Yüzey gerilmeleri için zor	Evet

4.6 Katman Kaldırma Tekniğine Dayalı Kalıcı Gerilme Ölçüm Yöntemi

4.6.1 Giriş

Gerilmelerin belirlenme yöntemleri, metotları ve araçları bu gerilmelerin hangi sınıfa dahil olduğu ile ilgilidir. Makine üretiminde çoğu zaman imal sonucunda parçaların yüzey tabakalarında oluşan gerilmeler, parçaların boyutları ile karşılaştırılabilen I. sınıf gerilmeler, delik delme, halka şeklinde delme, yüzeyden türlü yöntemlerle tabakalar kaldırmakla ve diğer başka usullerle belirlenebilir [36,114]. Bu yöntemlerden kesit alma ve katman kaldırma tekniği daha geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntemle gerilmelerin belirlenmesi aşağıda gösterilen düzenle kademeli olarak yapılabilir.

1. Numunenin yüzeyinden h kalınlığında tabakanın kaldırılması ve kaldırılmış tabakaya karşılık gelen f deformasyonunun ölçülmesi.
2. Gerilmelerin etki yaptığı tam derinlik için $f \rightarrow a$ eğrisinin kurulması.
3. Yüzeyden kaldırılan her bir tabaka için df/da olarak türevinin analitik veya grafik yöntemle hesaplanması.
4. Yüzeyden kaldırılan her bir tabaka için σ değerinin df/da olarak hesaplanması.
5. Gerilmelerin etki yaptığı tam derinlik için $\sigma \rightarrow a$ ilişkisinin kurulması [36].

Yukarıdaki sıralama dikkate alındığında, gerilmelerin bu düzenle belirlenmesi uzun bir zaman kaybına ve bir takım hesaplama hatalarına neden olmaktadır. Gerilmelerin hesaplanması akışına dikkat edilecek olursa, gösterilen kademelerin aynı zamanda yapılabilmesi (yani numuneden tabakaların kaldırılması, hesaplamaların yapılması, $\sigma \rightarrow h$ grafiğinin bilgisayarda kurulması), deneylere harcanan zaman numuneden gerektiği kadar tabaka kaldırmak için harcanan zamana eşit olabilir [8,29,114].

4.6.2 Katman Kaldırma Tekniğinin Temel Teorisi

Karmaşık parçaların yüzey tabakalarındaki gerilmeleri (σ_1, σ_2) belirlemek için, katman kaldırma metodunun kullanılacağı yüzey üzerindeki gerilmelerin

paylaşımı simetrik ise veya eşit olduğu biliniyorsa aşağıda önerilen metot kullanılabilir [36].

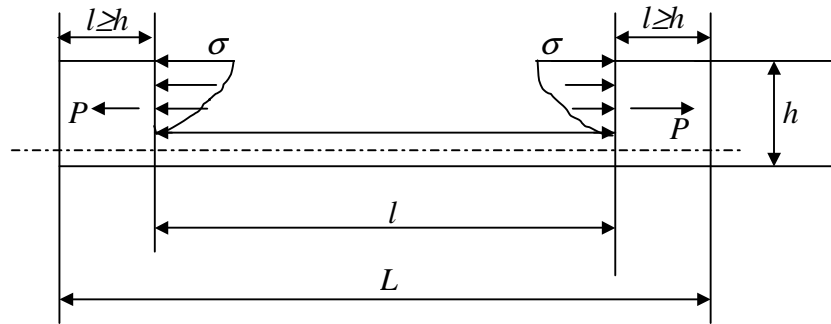
Bunun için yüzeye birbirine dik gerinim ölçerler yapıştırılır ve numune yüzeyinden katmanlar kaldırılmadan önce bu gerinim ölçerlerin ayarlanması yapılır. Bundan sonra yüzeyden h kalınlığında numuneler kesilir. ε_1 ve ε_2 gerinim değerleri bulunduğundan sonra,

$$\sigma_1 = -\frac{E}{1-\mu}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \quad (4.7)$$

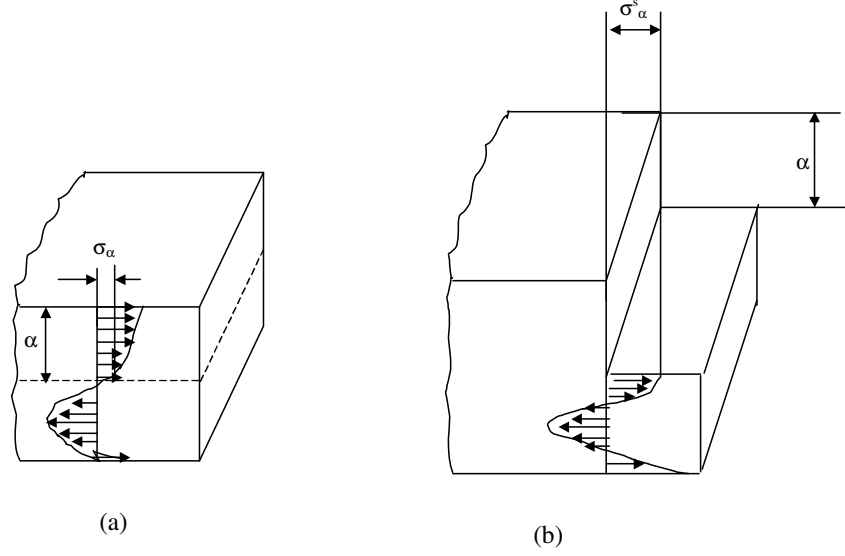
$$\sigma_2 = -\frac{E}{1-\mu}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \quad (4.8)$$

eşitliklerinden gerilmeler belirlenir. Numune kesildikten sonra kesilen numune yüzeyinin gerilmelerden kurtulduğu varsayılmaktadır. Yüzeyden kesilen tabakanın (h) kalınlığı 0.2~0.3 mm'den fazla olmamalıdır [36,111].

Çoğu zaman çubuk biçimli numunelerde bir eksenli gerilme halinde gerilmelerin değeri ve işareti belirlenebilmektedir. Numunede belirlenen gerilme parçadaki gerçek gerilme değildir, fakat kesin gerilmeleri belirlemek için gerekli bir değerdir. Çalışmalarda işareti belli olan gerilmeler (+) işaretli (çekilen) gerilmeler gibi kabul edilir. Tüm bunlar göz önüne alındığında çubuk şekilli malzemelerde gerilmelerin ölçüm şemasını Şekil 4.6'daki gibi oluşturabiliriz [36].

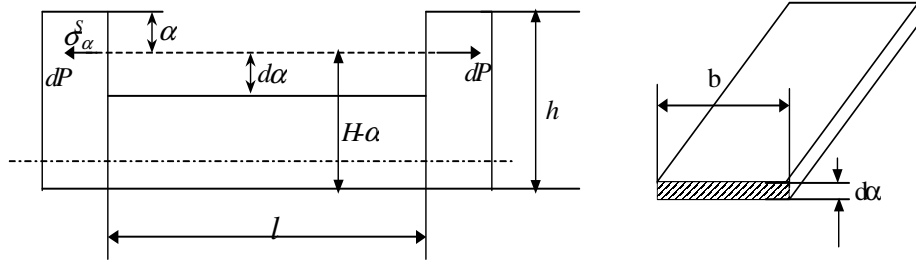


Şekil 4.6. Çubuktaki Gerilmelerin Ölçüm Şeması [36]



Şekil 4.7. Numunenin Kesilmeden Önceki Ve Kesildikten Sonraki Gerilme Dağılımları [36]

Çubuğun eksenine normal kesitteki gerilmelerin herhangi bir şekilde paylaşıldığını düşünürsek (Şekil 4.7 a) ve bu çubuktan a kalınlığında bir tabaka kaldırılırsa kesit alanının gerginlik durumu değişerek Şekil 4.7 b’de gösterildiği gibi bir hal alacaktır. Yani a mesafesinde olan düzlemdeki $\sigma_{(a)}$ gerilmeleri bu tabaka kaldırıldıktan sonra numunenin denge durumu değiştiğinden $\sigma_{(a)}^s$ dönüşmüş olur. Yani tabaka kaldırıldıktan sonra $\sigma_{(a)}$ gerilmesine bir $\sigma_{(a)}^{ek}$ ilave gerilmesi eklenir [36].



Şekil 4.8. H Kalınlığındaki Bir Düzlemde a Tabakasının Kaldırılması [36]

Şekil 4.8'deki gibi a derinliğinden d_a tabakası kaldırıldıktan sonra elde edilen yüzeydeki gerilmeler aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\sigma_{(a)}^s = \sigma_{(a)} + \sigma_{(a)}^{ek} \quad (4.9)$$

$\sigma_{(a)}^s$ değerini bulmak için a yüzeyinden elemanter da tabakası kaldırıldığında numune bir dM momenti etkisi altında kalır. Bu moment değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$dM = dp \frac{h-a}{2} \quad (4.10)$$

$$dp = dM \frac{2}{h-a} \quad (4.11)$$

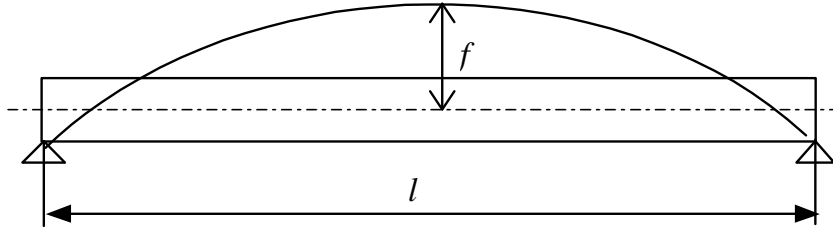
olur. Diğer taraftan,

$$\sigma_{(a)}^s = \frac{dp}{b.da} \quad (4.12)$$

$$dp = \sigma_{(a)}^s . b . da \quad (4.13)$$

elde edilir ve (4.13) eşitliğinde yerine konur ve düzeltmeler yapılırsa dM aşağıdaki eşitlikle hesaplanır,

$$dM = \frac{1}{2} \sigma_{(a)}^s . b . (h-a) . da \quad (4.14)$$



Şekil 4.9. İki Destek Üzerindeki Kirişin Deformasyonu [36]

dM değerinden, iki destek üzerindeki (Şekil 4.9) kirişin deformasyonu,

$$f = \frac{M.l^2}{8.E.I_A} \quad (4.15)$$

ile hesaplanır. Numunenin kesit alanı dikdörtgen olduğundan (4.15) eşitliğindeki I_A değeri,

$$I_A = \frac{b.(h-a)^3}{12} \quad (4.16)$$

olarak; dM momentinin etkisindeki df deformasyonu,

$$df = \frac{dM.l^2}{8.E.I_A} \quad (4.17)$$

olarak alınır ve bu eşitlikte dM ve I_A eşitlikleri yerine konursa,

$$df = \frac{3.l^2}{4.E.(h-a)^2} \sigma_{(a)}^s . da \quad (4.18)$$

elde edilir. Bu eşitlikten a katmanının kaldırılmasından sonra numunede oluşan gerilme aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$\sigma_{(a)}^s = \frac{4.E.(h-a)^2}{3.l^2} \frac{df}{da} \quad (4.19)$$

Bu eşitlik; parça yüzeyinin belirli bir (a) derinliğinde oluşan gerilmelerin değerlerinin, kaldırılan birim, da tabakasının oluşturduğu df deformasyonunun da tabakasına olan oranı ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Parça yüzeyinden (a) derinliğindeki tabaka, kaldırılmadan önce gerçek gerilmelerin değerlerini bulmak, bu tabakalar kaldırıldıktan sonra oluşan ilave gerilmelerin ($\sigma_{(a)}^{ek}$) bulunmasını gerektirmektedir. Yukarıda anlatılan yöntemle yüzeyden (a) tabakalar kaldırıldıkça oluşan ek gerilme ($\sigma_{(a)}^{ek}$) değeri de bulunabilir. Ek gerilmenin sehimini ξ ile simgelenirse,

$$\sigma_{(a)}^{ek} = \frac{4.E}{3.l^2.k_y} \left[4(h-a).f(a) - 2 \int_0^a f(\zeta).d\zeta \right] \quad (4.20)$$

olur ve bu eşitlik (4.9) eşitliğinde yerine konursa, $\sigma_{(a)}$ 'nın gerçek değeri (parçadaki gerçek gerilme değeri) bulunabilir.

$$\sigma_{(a)} = \frac{4.E}{3.l^2.k_y} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 4(h-a).f(a) + 2 \int_0^a f(\zeta).d\zeta \right] \quad (4.21)$$

Burada;

E : elastikiyet modülü,

l : numune uzunluğu,

h : numune kalınlığı,

a : kaldırılan tabakanın kalınlığı,

$f(a)$: deformasyon değeridir.

k_y : deformasyon büyütme katsayısı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_y = 8 \frac{l_y}{l} \quad (4.22)$$

Burada; l_y , numuneden itibaren deformasyon değerinin ölçümünün yapıldığı noktaya olan mesafedir.

Bu formüllerde numunenin kenar uzunluklarının (uçlarının) eğildiği düşünülmektedir. Buna karşın uçların eğilmediği düşünülürse, küçük bir hata verdiğiinden hesaplamalarda dikkate alınmayabilir.

$\frac{h-a}{a} > 40$ olduğunda (4.21) eşitliğinin ikinci kısmının değeri birinci kısmının % 10'unu, üçüncü kısmı ise % 0.1'ini oluşturduğundan hesaplamalarda çoğu zaman göz önüne alınmaz ve eşitlik,

$$\sigma_{(a)} = \frac{4.E}{3.l^2.k_y} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 4(h-a).f(a) \right] \quad (4.23)$$

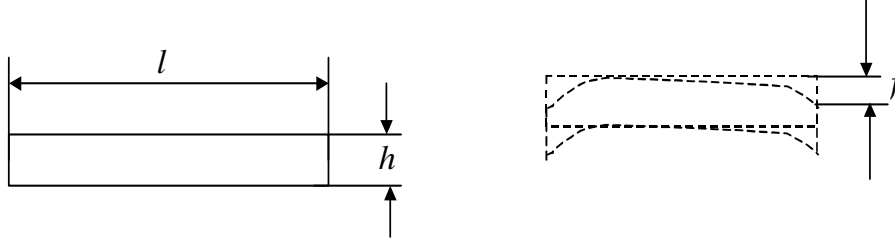
$$\sigma_{(a)} = \frac{4.E}{3.I^2.k_y} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) \right] \quad (4.24)$$

sadeleşmiş şeklini almaktadır [36,128]. Yukarıda verilen eşitlikler çalışmanın nümerik hesaplama kısmının esasını teşkil etmektedir.

4.6.3 Katman Kaldırma İşleminin Süreci

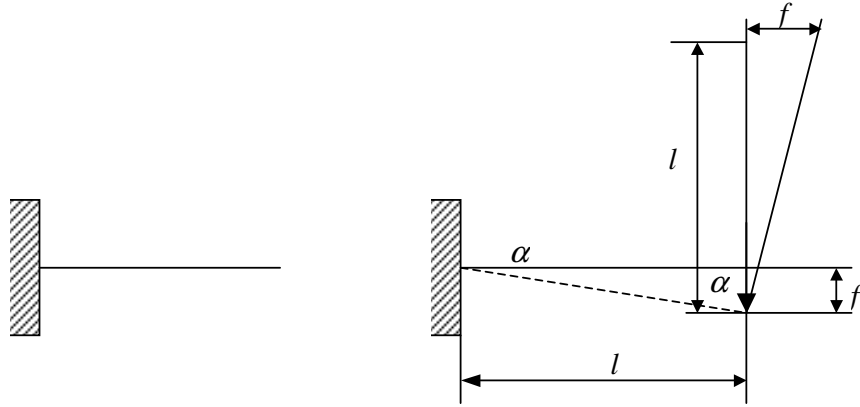
4.6.3.1 Numune Biçiminin Belirlenmesi

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi numuneden katmanlar kaldırıldığında bunun sonucu olarak numunede mevcut olan iç momentler ve gerilmelerin dengesi bozulacaktır. Bunun sonucunda iç dengesi bozulan numune yeniden dengesini sağlayacak şekilde deforme olacaktır.



Şekil 4.10. İç Moment ve Gerilme Sistemi Denge Olan ve Deforme Olan Numune Örneği [36]

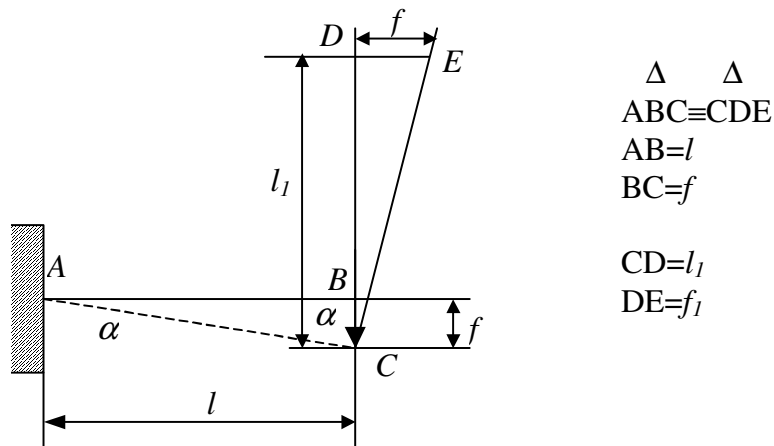
Eğer Şekil 4.11'de görüldüğü gibi tek tarafı mesnetlenmiş iç moment ve gerilmeleri dengede olan bir kiriş ele alınırsa, kirişin dengedeki sistemi bir F kuvveti tarafından bozulduğunda serbest olan ucunda deformasyondan ileri gelen bir sehim miktarı vereceği görülebilir.



Şekil 4.11. Tek Tarafı Mesnetlenmiş Kirişin Deformasyonu [36]

Bu deforme değeri, kolları birbirine dik kesişen iki üçgen kuralı dikkate alındığında, deformasyondan ileri gelen sehim miktarı Y ekseninden X eksenine taşınabilir. Böylece sehim miktarı numuneden uzak bir noktada ölçülebilir.

Numuneden tabakalar kaldırıldıkça oluşacak bu sehim miktarı çok küçük miktarlarda olabilir. Bu nedenle kolları dik kesişen bu iki üçgen birbirinin eşi olduğundan diğer üçgenin l boyu arttırıldığında f değeri de boy artışı kadar artacağı görülebilir. Bu Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



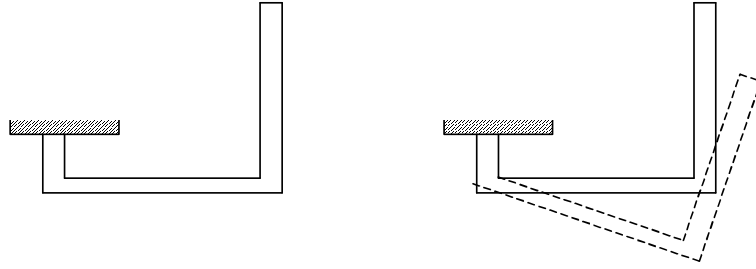
Şekil 4.12. Sehim Miktarının Y Ekseninden X Eksenine Taşınması ve Sehim Miktarının Artırılması [36]

Buradan;

$$\frac{AB}{CD} = \frac{BC}{DE} \Rightarrow \frac{l}{f} = \frac{l_1}{f_1} \text{ olur. Eğer } l_1=2l \text{ alınırsa,}$$

$$\frac{l}{f} = \frac{l_1}{f_1} \Rightarrow \frac{l}{f} = \frac{2l}{f_1} \Rightarrow f_1 = 2f$$

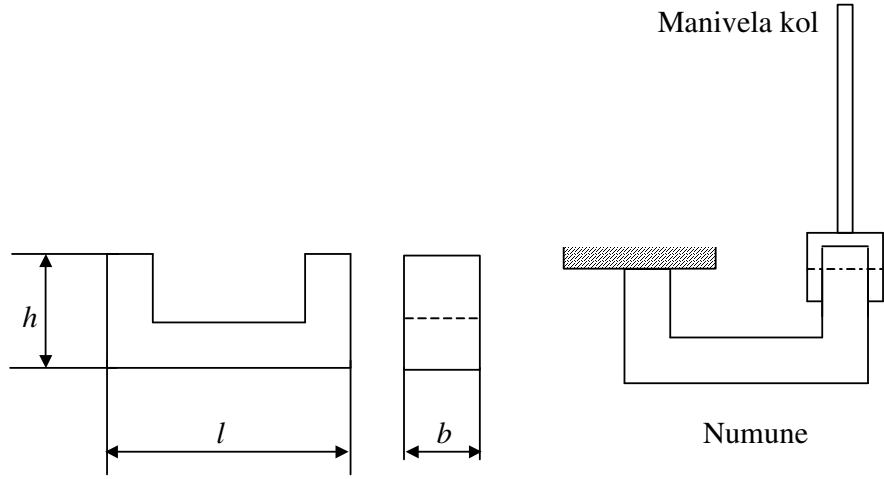
çıkacaktır. Bu, numunenin uç tarafında numune yüzeyine dik bir kirişle gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.13. Çift Kollu Numune [36]

Bu nedenle numune Şekil 4.13'de ki gibi hem bir tarafından mesnetlenmesi hem de diğer ucunda meydana gelen sehim değerini artıracak biçimde olması gerekmektedir.

Bu şekilde bir numune simetrik olmadığından hesaplamalarda zorluklarla karşılaşılabilir. Hesaplama açısından numunenin simetrik olması faydalıdır. Uzun kolun yerine ihmal edilebilecek bir ağırlığa sahip manivela kol düşünülebilir. Bu kol Şekil 4.14 deki gibi sadece numunenin bir ucuna monte edilecek olursa sehim değeri dışarıdaki bir noktaya Y ekseninden X eksenine doğrultusunda olacak şekilde büyütülerek iletilebilir.



Şekil 4.14. U Biçimli Numune [36]

Bütün bu söylenenler hazırlanacak numunenin de biçimine karar vermede yardımcı olacaktır. Hazırlanacak olan numune bir ucundan mesnetlenmesi ve diğer ucuna da serbest manivela kolunun bağlanmasını kolaylaştıracak U biçiminde olmalıdır [36].

4.6.3.2 Direnç Tip Gerilim Ölçerler

Gözle görülmeyecek kadar küçük değerlerde meydana gelen gerinimleri belirlemek için kullanılan elemanlara “gerinim ölçer” adı verilmektedir.

Gerinim, matematiksel olarak boyutsuzdur, fakat fiziksel olarak birim uzunluk değişiminin toplam uzunluğa oranı olarak tanımlanabilir [115].

Basma, çekme, kesme, burulma ve eğme gibi gerilmelere maruz kalan deney parçalarında deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon veya gerinim kayıpsız olarak gerinim ölçerler tarafından hissedilmesi gerekir. Yük uygulandığında gerinimden dolayı gerinim ölçerler tellerinde uzama oluşur, buda telin direncinin

değişmesine neden olur. Direncin, tel boyu ile olan ilişkisi eşitlik 4.25'den 4.26'daki gibi olur.

$$R = \frac{L}{A_k} \quad (4.25)$$

$$R = \rho \frac{L}{A_k} \quad (4.26)$$

Burada;

R : direnç,

ρ : öz direnç,

L : uzunluk,

A_k : dik kesit alanıdır.

Dirençteki değişim dR , boyuttaki değişim dL olmak üzere

$$\frac{dR/R}{dL/L} = K \quad (4.27)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeye “Gerinim Ölçme Faktörü” adı verilir ve gerinim ölçerlerin karakteristiğini gösterir [116].

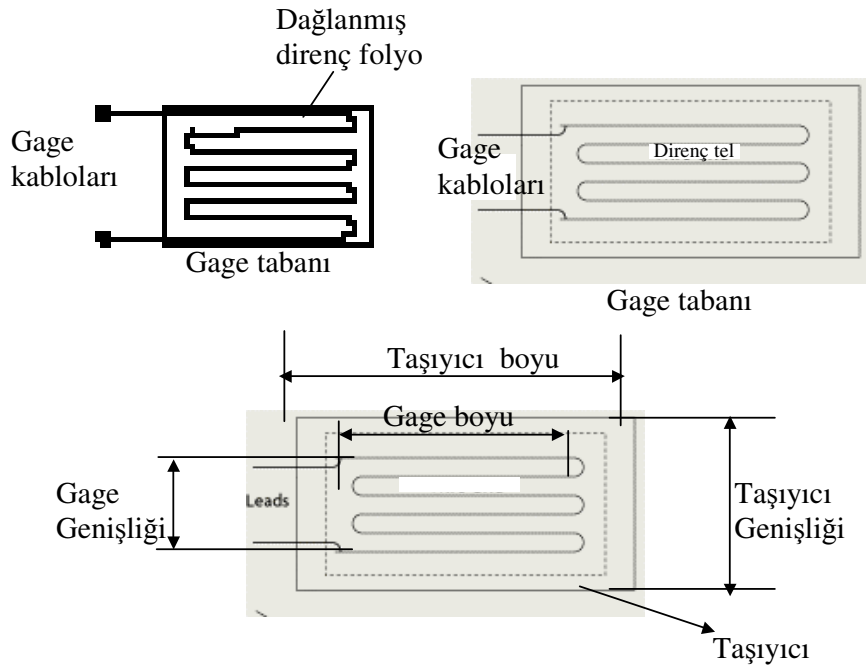
Bu iki formülden temel gerinim duyarlılığı boyutsal değişiklikler sayesinde kurulabilir. Burada öz direncin (ρ) değişmeyip sabit kaldığı varsayılır. Eğer iletken elastik olarak gerilirse Δl 'lik bir değişim verecek şekilde, Poisson etkisi sayesinde kesit alanında ve Δl arasında ortak bir azalma olacaktır. Gerçekte, değişik direnç malzemelerinin yüzeyine yapılmış deneyler gerinim duyarlılığının (ölçme faktörü) geniş ölçüde farklı değerler sergilediğini gösterir. Bazı gerinim ölçer malzemelerinin gerinim duyarlılığı Çizelge 4.4'de verilmiştir [116,117].

Çizelge 4.4 Değişik Malzemelere Ait Gerinim Duyarlılığı

Ticari İsmi	Bileşimi %	Gage Faktörü	Direncin Sıcaklık katsayısı x 10 ⁶	0.0025 mm'lik telin 1 mm'sinin direnci (0hm)	σ_t (*) (daN/cm ²)
Nikrom	Ni-80; Cr-20	+2.0	+300	2090	139
Mangan	Ni-4;Mn-12; Cu-84	+0.47	0	854	-28
Advans	Ni-45; Cu-55	+2.1	-	-	-5
Kopel	Ni-45; Cu-55	+2.4	+2	954	-14
Konstantan	Ni-45; Cu-55	+2.1	-	-	4
Kromel	Ni-64; Fe-25; Cr-11	+2.5	-	2095	68
Karma	Ni-75; Cr-20; Fe-2.5; Al-2.5	+2.1	-	-	-
İzoelastik	Fe-55.5; Mo-0.5; Ni-36; Cr-8	+3.5	+175	2230	347
Armour D	Fe-70; Cr-20; Al-10	+2.2	-	-	-
Nikel	Saf	-12.1	+6000	229	-935
Platin	Saf	+4.8	+3000	262	-
Demir	Saf	+4.2	+5000	223	-
Kömür	Saf	+20.0	-500	147000	-

Bu değişiklikler gerinimin malzemenin belli öz direncini (ρ) etkileyebildiğini ya da muhtemelen malzemelerdeki bütünleşmiş iç gerilmeler tarafından doğrudan etkilenebildiğini gösterir. Gerinim duyarlılığı değişen ilk gerilmelerden dolayı öz direnç değişimine ilaveten geometrik değişimin etkilerini bir bileşimidir [117]. Bir malzemenin direnci ile gerinim arasındaki bağıntı, gerinim ölçme faktörü (K) ile belirlendiğinden, kullanılacak gerinim ölçme faktörünün bilinmesi, ölçümün yapılması ve sonucun değerlendirilmesi açısından çok önemlidir. Gerinim ölçerlerin kullanılabilirliği ve performansına etki eden ana faktörlerden biride iletken tel malzemenin cinsidir. İdeal bir iletken malzeme en yüksek gerinim ölçüm faktörüne sahip olup, iletken malzemesinden çok küçük uzamalara bile cevap vermesi istenir. Gerinim ölçüm faktörü, yükün değişmesiyle ve zamanla değişmez. Aynı şekilde yükün tekrarlanması direncin değişmesine sebep olmaz, yani direnç sabit kalır. Çekme etkisindeki bir malzemede, boy artacağından direnç de artar, dolayısıyla pozitif değer alır. İletken malzeme sıcaklığın sebep olacağı uzamaya karşı hassas olmamalı veya mümkün olduğu kadar genleşme katsayıları küçük olmalıdır. Sıcaklıktan kaynaklanacak hataları yok etmek için sıcaklık dengelemesi yapılır [116].

Dirençler, eğer sayısal değerleri çok büyük değilse kesin olarak daha kolay ölçülebilir. Bu durum aktif ölçü tellerine seri bağlanan iletkenlerin direnç etkilerinden kaynaklanan karışıklıklarından kaçınmaya da yardımcı eder. Diğer taraftan gerinim ölçerler çok büyükte olmamalıdır ki herhangi bir noktada uzama oranı etkin olarak ölçülebilsin. Uzama oranlarının ölçülerek incelendiği yerel bölgeler bazen bir santimetre bazen de birkaç milimetre boyunda olabilir. Bu düşüncelerin her ikisi de çok ince tel kullanımını gerektirmektedir. Bu nedenle Şekil 4.15'deki gibi gerinim ölçerler imalatında 15-30 mikron çaplı teller kullanılır [108,115].



Şekil 4.15. Yaprak ve Tel Gerinim Ölçerler [36]

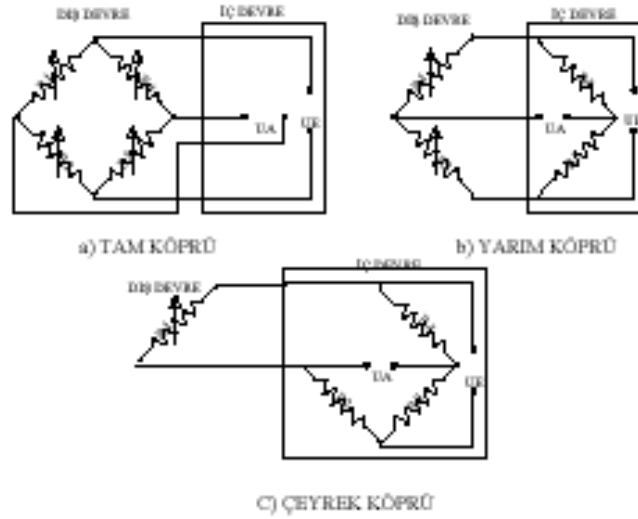
Tel kullanımına karşın diğer bir seçenek ince yapraklardan tipik olarak 4 mikron kalınlığında, kimyasal aşındırma yöntemi ile iletkenler üretmektir (Şekil 4.15). Yaprak gage'lerin şu avantajları vardır. Yassı oluşları yapıştırılmayı kolaylaştırmakta, ısının uzaklaştırılması daha hızlı olmaktadır. Ayrıca daha çok şekil seçme olanağı sağlamakta ve çıkış tellerinin bağlanacağı lehim uçları gerilmeye hassas iletkenlerle tek parça halinde imal edilmektedir. Bu nedenle de tel gage'lere oranla daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar [115,118].

4.6.3.2.1 Direnç Tip Gerinim Ölçerlerin Elektrik Devresi

Dirençli tip gerinim ölçerler uzama ile değişen elektrik direncini bir elektrik devresinde ölçerek değerlendirme prensibine göre çalışır. Uygulanan yüke uygun olarak, dirençte meydana gelen değişim ΔR , gerinim ölçerlerin normal direnci, R ve ölçme faktörü K verilerine dayanarak bulunabilir. Gerinim,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (4.28)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde, bilinmeyen ve uygulanan yüke göre değişen tek değer ΔR 'dir. ΔR 'nin ölçülmesiyle, oluşan gerinim kolayca bulunabilir. ΔR 'yi kolay ve hassas olarak ölçecek elektrik devresi geliştirilmiş ve bu devreye Wheatstone köprüsü adı verilmiştir. Bu köprü devresinin şematik gösterilişi Şekil 4.16'da verilmiştir [118].



Şekil 4.16. Wheatstone Köprü Devreleri [118]

Wheatstone köprüsünde bilinmeyen direnç veya dirençler çok iyi bilinen dirençler tarafından mukayese edilerek bulunur. Böyle bir köprü devresinde dirençte

meydana gelecek çok küçük değişimler ölçülebildiği için gerinim ölçerlerdeki direnç ölçümleri için uygundur [118].

Devrede olan olayların anlaşılabilmesi için devrenin çözümlenmesi gerekir. U_E köprü çıkış voltajı olmak üzere, Kirchof kanunlarından yararlanılarak devre çözümlenebilir. Ohm kanununa göre $U = I \cdot R$ formülü gereğince her bir koldan voltaj düşümleri bulunabilir. Başlangıçta U_A girdi gerilimi ve I_A akımı sıfır olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu durumda A ve C noktalarındaki gerilimlerin eşit olduğu söylenebilir. Bu duruma köprünün denge hali denir. Eğer köprü dengede ise;

$$\frac{U_A}{U_E} = 0 \quad (4.29)$$

bu durumda,

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (4.30)$$

olur. Bu gözlemlere dayanarak şu eşitlikler yazılabilir.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (4.31)$$

Böylece bilinmeyen bir direnç, bilinen dirençler yardımıyla kolayca bulunabilir.

U_A/U_E oranı için genel denklem olarak,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (4.32)$$

formülü geçerlidir. Bu denklemde ΔR 'nin katılımı ve bazı kabullerle,

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (4.33)$$

denklemini elde edilir. Buradan da,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (4.34)$$

Gerinim ölçerlerle yapılacak ölçümler için çeyrek köprü, yarım köprü ve tam köprü devreleri mevcuttur. Kullanılması düşünülen köprü konfigürasyonu gerinim ölçer sayısı ve ölçme yapılacak bölgeye bağlantı şekline göre değişmektedir [118].

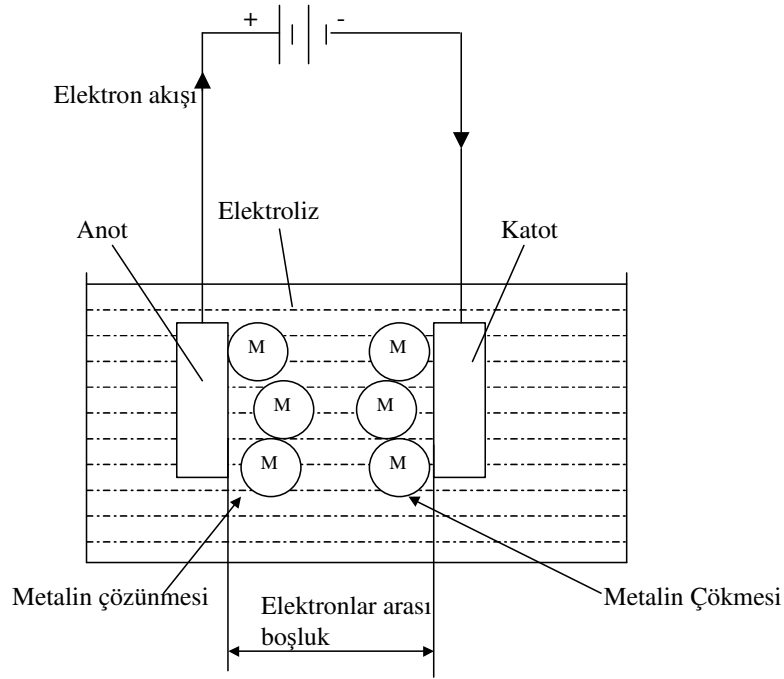
4.6.3.3 Elektro Kimyasal İşleme

4.6.3.3.1 EKİ'nin Temel Teorisi

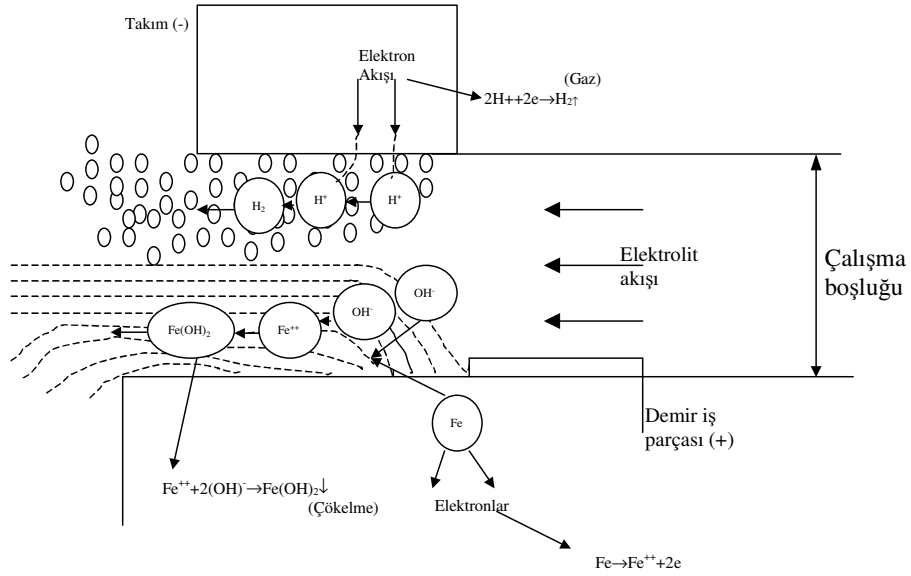
Elektrolit metalik bir iletkeninden farklıdır. Çünkü akım elektronlar yardımıyla değil de, ya alınan ya da verilen elektronlara sahip atomlar yardımıyla taşınmaktadır ve bundan dolayı negatif ya da pozitif yükler elde edilir. Böyle atomlar iyon olarak adlandırılır, negatif yükleri taşıyan bu atomlar elektrolitten anoda doğru geçer ve anyon olarak adlandırılır. Pozitif olarak yüklenmiş iyonlar katoda doğru hareket eder ve katyon olarak adlandırılır. Şekil 4.17'de gösterildiği gibi uygulanan potansiyel fark pil içerisinde bir iyon akışı ve zıt yönde iletkeninden (pil dışından) bir elektron akışı ile sonuçlanır [119].

Katottaki negatif elektronlar etkisiz (nötr) hale gelir ve bu negatif elektronlar katoda ulaşana kadar katyonları deşarj eder. Elektrolitte bulunanın bakır olduğu düşünülürse deşarj olmuş katyon bakır atomunu pozitif olarak şarj eder ve katotta çökeler. Reaksiyon katyon formuyla anot malzemenin çözünmesi ve katotta bu katyonların çökmesiyle (toplanmasıyla) devam ettirilir. Böylece pil boyunca bir akım geçişi anottan katoda bir bakır transferi ile sonuçlanır [119].

EKİ ile elektroliz prosesini daha net olarak ifade etmek için Şekil 4.18'de uygun bir elektrolit içerisindeki demir bir iş parçasına uygulanmış olan elektro kimyasal prosesi gösterilmektedir. Çalışma boşluğu arasından akan elektrot içerisindeki anoda (iş parçası) ve katoda (takım) bir DC güç kaynağı bağlandığında anot çözünmesi başlar [119-121].



Şekil 4.17. Elektroliz İşlemin Temeli [36]



Şekil 4.18. Uygun Bir Elektrolit İçerisindeki Demirden İş Parçasına Uygulanan Elektro Kimyasal Süreç [36]

4.6.3.3.2 İşlenmiş Yüzeyin Niteliği

Gerçekte EKİ ile talaş kaldırma mekaniksel kesmeyle (konvansiyon el işlemedeki gibi) ya da metalin ergitilmesi ve buharlaştırılmasıyla (elektro erozyonla işlemedeki gibi) gerçekleştirilmediğinden iş parçasına hiçbir termal hasar meydana gelmez ve iş parçası yüzeyinde hiçbir kalıcı gerilme oluşmaz. Sadece elektriksel dirençten dolayı sıcaklık oluşur ve bu oluşan sıcaklık elektrolitin kaynama noktasının üzerine çıkması için yeterli değildir [120].

EKİ'de elde edilecek yüzey pürüzlülüğü tipi malzemeye, elektrolite ve akım yoğunluğuna bağlıdır. Yüzey pürüzlülüğünde elde edilebilir iyileştirme genellikle malzemenin doğru ısıl işlem görmesiyle mümkündür. Bu tip işleme sürecinde elde edilecek yüzey pürüzlülüğü 0.30 ila 1.9 mikron seviyesindedir [122].

4.6.3.3.3 Elektrolit

Birçok EKİ uygulamaları çeşitli ve çok miktarda elektrolit kullanımı gerektirir. Kullanılacak elektrolit;

1. Ucuz olmalı,
2. İyi bir elektriksel iletkenliğe sahip olmalı,
3. Zehirsiz olmalı,
4. Mümkün olduğu kadar korozif etki yapmamalı,
5. Taşınması mümkün olduğu kadar güvenli olmalıdır.

Akım yoğunluğundan dolayı işleme hızları artacaktır, bununla birlikte etki belli bir seviyenin üzerinde azalır [119]. Bu çalışmada elektrolit olarak aşındırma hızı daha yüksek olan asidik bileşikler kullanılacaktır. Çizelge 4.5'EKİ'de kullanılması muhtemel asidik bileşikler, oranları ve hangi malzemelerde kullanılabileceği gösterilmektedir [36].

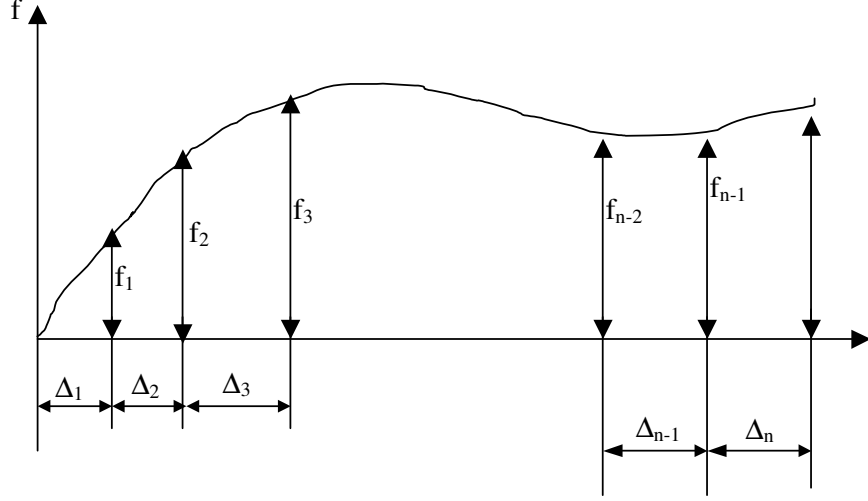
Çizelge 4.5. Elektro kimyasal İşlemden Sıklıkla Kullanılan Elektrolit Çeşitleri

Malzeme	Elektrolit Sıcaklığı	Elektrolit
Karbonlu düşük alaşımlı konstrüksiyon çelik	20 °C	1. Elektrolit: 850 cm ³ H ₃ PO ₄ yoğunluğu 1.56 gr/cm ³ , 150 cm ³ H ₂ SO ₄ yoğunluğu 1.89 gr/cm ³ 2. Elektrolit % 80 H ₃ PO ₄ , % 6 Kromanhidrit, % 14 Su 3. Elektrolit % 18~20 H ₂ SO ₄ , kalanı su 4. Elektrolit % 20'lik HNO ₃
Kromlu, krom nikelli, ısıya dayanıklı (nikel tabanlı) yüksek alaşımlı paslanmaz çelikler	20 °C	1. Elektrolit: %45 H ₃ PO ₄ , %45 H ₂ SO ₄ kalanı su 2. Elektrolit % 65~66 H ₃ PO ₄ , % 15~20 H ₂ SO ₄ , % 5 Kromanhidrit, % 7 gliserin, % 5 FeSO ₄ , kalanı su 3. Elektrolit % 67 H ₃ PO ₄ , % 33 H ₂ SO ₄ , 1 literye 50 gr Kromanhidrit. 4. Elektrolit % 15~20 HNO ₃ , % 20~25 natrumgalavisi, kalanı su
Dökme demir	20~40 °C	1. Elektrolit % 35~40 Sodyumbisülfid, kalanı su 2. Elektrolit % 8~10 HCL, kalanı su
Titanyum ve alaşımları	20~40 °C	1. Elektrolit % 30 HNO ₃ , kalanı su 2. Elektrolit: Su, HNO ₃ , Kromikasit
Alüminyum ve alaşımları	20~40 °C	1. Elektrolit % 10~15 NaOH, kalanı su 2. Elektrolit % 91 H ₃ PO ₄ , kalanı kromanhidrit
Alüminyum, silisyum ve silisyum alaşımları	15~25 °C	1. Elektrolit % 55 fosforik asit, %40 H ₂ SO ₄
Bakır, bronz, pirinç	15~30 °C	1. Elektrolit % 100 H ₃ PO ₄ 2. Elektrolit % 91 H ₃ PO ₄ , % 9 kromanhidrit
Kalay, kurşun ve kalay-kurşun alaşımları	15~25 °C	1. Elektrolit % 5 HCL, %94 su
Molibden ve alaşımları	50 °C	1. Elektrolit % 5 HCL, 20 cm ³ H ₂ SO ₄ , 150 cm ³ ispirto

4.6.4 Hesaplama Süresi

Katman kaldırma tekniğinde kalıcı gerilmelerin hesaplanabilmesi için kaldırılan her bir katmana karşılık gelen ($f \rightarrow a$) df/da değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle türlü tahmin hesaplama yöntemlerinden faydalanılabilir.

Bunların biri (Şekil 4.19) $f(a)$ fonksiyonuna parabolik bir fonksiyon gibi bakmaktadır.



Şekil 4.19. Koordinat Başlangıcında, Ortasında ve Sonunda $F(A)$ Fonksiyonundan Türev Alma Düzeni [36]

Bu kabul edilirse o zaman sürenin başlangıcında ($a=0$) df/da değeri;

$$\frac{df}{da(a=0)} = f_1 \left[\frac{(\Delta_1 + \Delta_2)}{(\Delta_1 \cdot \Delta_2)} \right] - f_2 \left[\frac{\Delta_1}{(\Delta_1 \cdot \Delta_2)} + \Delta_2^2 \right] \quad (4.35)$$

ile; sürenin ortasında;

$$\frac{df}{da(a)} = -f_1 \left[\frac{\Delta_3}{(\Delta_2(\Delta_2 + \Delta_3))} \right] + f_2 \left[\frac{(\Delta_3 - \Delta_2)}{(\Delta_2 \cdot \Delta_3)} \right] + f_3 \left[\frac{\Delta_2}{(\Delta_3(\Delta_2 + \Delta_3))} \right] \quad (4.36)$$

sürenin sonunda ise;

$$\frac{df}{da(a)} = -f_{n-2} \left[\frac{\Delta_n}{(\Delta_{n-1}(\Delta_{n-1} + \Delta_n))} \right] + f_{n-2} \left[\frac{(\Delta_{n-1} - \Delta_n)}{(\Delta_{n-1} \cdot \Delta_n)} \right] + f_n \left[\frac{(\Delta_n + (\Delta_{n-1} - \Delta_n))}{(\Delta_n(\Delta_{n-1} + \Delta_n))} \right] \quad (4.37)$$

formülleri ile tayin edilir [36,114].

Gerilmelerin etki yaptığı a derinliğinin her iki katın için df/da hesaplandıktan sonra gerilme değerleri, σ , kabul ettiğimiz hesaplama formüllerinin birisinin yardımıyla hesaplanabilir. Örneğin; karmaşık biçimli parçalardan kesilmiş numunedeki gerilmelerin tek eksenli olduğu kabul edilirse σ 4.21 formülü kullanılarak hesaplanabilir [36,114].

4.7 Literatür Taramasından Elde Edilen Sonuçlar

Literatür taraması üç kısımdan oluşmuştur. Birinci kısımda (Bölüm 2) paslanmaz çelikler hakkında genel bilgi verilmiştir. Yaygın bir kullanım alanı olması ve çalışmamızda kullanacağımız için östenitik paslanmaz çeliklere ağırlık verilmiştir. 2.2. kısımda paslanmaz çeliğin işlenişi, işleme sırasında karşılaşılan problemler ve bu problemlere ilişkin çözümler anlatılmıştır. İkinci kısımda (Bölüm 3) işlenen paslanmaz çelik malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen kalıcı gerilmelerden, sınıflandırılmasından, kalıcı gerilmeyi oluşturan nedenlerden ve değişik imal yöntemlerinin kalıcı gerilme üzerindeki etkilerinden, talaş kaldırmadaki gerilme dağılımından, kolay işlenebilen paslanmaz çeliklerin tornalanmasında oluşan yapışkan tabaka ve işlenebilirliğe etkilerinden, kalıntıların sıvanma süreci ve takım yüzeyinde yapışkan tabakanın dağılımından, östenit tane büyüklüğü ve dağılımının östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesi anında talaş deformasyonu ve takım ömrü üzerindeki etkilerinden, işlenmiş çeliklerin yüzeylerinde oluşan kalıcı gerilmelerden, söz edilmiştir. Üçüncü kısımda (Bölüm 4) ise kalıcı gerilme ölçüm yöntemi ve metotları tanıtılmıştır. Bunların içinden katman kaldırma tekniğine dayalı kalıcı gerilme ölçüm yöntemlerini araştırmamızda kullanacağımız için derinlemesine araştırılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda;

- Paslanmaz çeliklerin işlenebilirliklerini artırmak için kompozisyonlarında yapılan değişiklikler paslanmaz çeliğin faydalı özelliklerinden taviz vermeden işlenebilirliklerinde önemli ölçüde iyileşme sağlamaktadır.
- Paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kullanılan kesici takım talaş açısı yeterince pozitif ve boşluk açısı da büyük olmalıdır. Kesme bölgesinde oluşan ısıyı uzaklaştırmak için uygun kesme sıvısı kullanılmalıdır. Kaba ve yarı işlemeden sonra

kesici takımın, pekleşmeye maruz kalmış bölgenin ilerisine geçebilmesi için uygun talaş derinliği verilmelidir.

-AISI 304 paslanmaz çelikte oluşan kalıcı gerilmeler kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği, takım geometrisi ve kaplamasının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Bu kalıcı gerilmeler artan kesme hızları ile artmış ve talaş derinliği arttıkça azalmıştır. İlerleme miktarı arttıkça önce artıp belirli bir noktadan sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Kesici uç keskinliğinin kalıcı gerilme üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Keskin bir kesici uç, düşük ilerleme miktarı, büyük talaş derinliği ve düşük kesme hızının minimum miktarda kalıcı gerilme oluşturacağı görülmüştür.

-Yüzey kaplamalarının, imal usulleri ve imalat parametrelerinin kalıcı gerilmeyi etkilediği görülmüştür.

-Kaba işlemede hassas işlemeye göre daha fazla kalıcı gerilme olduğu tespit edilmiştir.

-Kimyasal işlemlerin ve ısı işlemlerinde kalıcı gerilmeye etki ettiği tespit edilmiştir.

-Kalıcı gerilmelerin yüzeyde basma hemen altında çekme şeklinde olabileceği ya da tam tersi olabileceği gözlemlenmiştir.

-En büyük kalıcı gerilmelerin kesici takımın en yakın olduğu yerlerde olduğu tespit edilmiştir.

-Kesici takımın boşluk açısı arttıkça kalıcı gerilmelerin arttığı tespit edilmiştir.

-Kalıcı gerilmenin en fazla yüzeyin hemen altında olduğu merkeze doğru azaldığı gözlemlenmiştir.

-Sürtünme arttıkça kalıcı gerilmenin de artacağı tespit edilmiştir.

-Kolay işlenebilen Ca-S paslanmaz çeliğin işlenebilirliği sıradan paslanmaz çeliğin işlenebilirliğinden çok daha iyidir. Bunun nedeni kolay işlenebilen paslanmaz çeliğin işlenmesi esnasında takım üzerinde oluşan yapışkan tabakadır. Bu tabaka kesici takım üzerinde koruyucu bir etkiye sahip olup takım ömrünü uzatır. Bunun yanında, kesme çizgisinde bulunan ve yapışkan tabaka oluşturan kalıcı gerilmelerin işlenen parça yüzeyinde oluşturduğu çatlak iş parçasının çalışma esnasında yorulma dayanımını azaltabilir.

-Tane büyüklüğü arttıkça işlenen parçada pekleşme belirginleşir ve kesici takım ömründe hafif düşmeler olur. Tane büyüklüğünün homojen olmayan bir şekilde

dağılımı dilim yüksekli oranı büyük olan talaşlara sebebiyet verir. Bu durumda kesme kuvvetlerinin genliği büyük olur ve haliyle kesici takım ömrü de azalır.

Araştırması yapılan literatür taramasında, yapılacak olan deneysel çalışmalar öncesi östenitik paslanmaz çeliklerle ve diğer malzemelerle ilgili yapılan çalışmalar ortaya konmuştur. Çalışmamızda AISI 304 paslanmaz çeliklerin değişik kesme parametrelerinde işlendikten sonra üzerlerinde oluşan kalıcı gerilmelerin ölçülmesi hedeflenmiştir.

5. MALZEME VE METOT

5.1 Giriş

Kalıcı gerilmeler, makine elemanlarının üretimindeki imalat parametrelerinin ve yorulma ömürlerinin belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Kalıcı gerilmeler özellikle karmaşık biçimli parçalarda (özellikle vidalar dişliler gibi çentik elemanları içeren parçalarda) çalışma performansı, güvenilirlik ve hassasiyet üzerinde oldukça önemlidir. Bu nedenle makine elemanlarındaki kalıcı gerilme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Kalıcı gerilmeleri zihinde canlandırmak, ölçmek veya mümkün olan yakınlıkta hesaplamak zordur. Yapılan literatür taraması sonucunda kalıcı gerilmelerin makine elemanları için ne kadar önemli olduğu ve bu kalıcı gerilmelerin mekaniksel, X-Ray, Nötron kırınımı, manyetik ve ultrasonik yöntemlerle ölçülebildiği görülmüştür. Bazı araştırmacılar da sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kalıcı gerilmeyi hesaplamaya çalışmışlardır. Ancak en sağlıklı sonuçların deneysel yollarla elde edilebileceği görülmüştür.

Bu çalışmada, endüstride makine imalatında vb. yerlerde yaygın olarak kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerin, değişik kesme parametreleri kullanılarak işlenmesi sonucu oluşan kalıcı gerilmelerin deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Östenitik paslanmaz çeliklerde işlenebilirlik büyük sorunlar yaratmaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerde işlenebilirliğe bağlı problemler arasında ilk sırada kalıcı gerilme problemleri yer almaktadır [29]. Herhangi bir makine elemanının talaşlı imalatından sonra üzerinde oluşan kalıcı gerilmeler, bu elemanın şekil ve ölçü değişimine de neden olmaktadır. Bu çalışma ile kalıcı gerilmelerin özellikleri, talaşlı imalat parametrelerinin kalıcı gerilmeler üzerindeki etkileri ve talaşlı imalat sonucu oluşan kalıcı gerilme özelliklerinin karakterizasyonu konusunda sistematik çalışma yapılmıştır. Böylece, makine elemanlarında kalıcı gerilmeleri olumlu ve olumsuz hale getiren işleme parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada, kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve pasif kuvvetin kalıcı gerilme

üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kalıcı gerilmenin, kesme parametrelerinden kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği ile ilişkisi araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda oluşacak bilgi ve alt yapı birikimi ülkemizdeki ileri teknoloji uygulayan sanayii firmalarına aktararak ülke ekonomisine destek olmak amaçlanmaktadır.

5.2 Deney Numunesi

Östenitik paslanmaz çelik malzeme değişik kesme parametreleri ile işlendikten sonra, üzerinde işlemeye bağlı olarak nasıl bir kalıcı gerilme oluştuğunu belirlemek çalışmaların temel hedefini oluşturmuştur. AISI 304 paslanmaz çeliği, özellikleri itibariyle işlenebilirliği düşük ve imalat sanayiinde çok yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu nedenle bu çalışmada, deney numunelerinin hazırlanması için paslanmaz çelik çeşitlerinden, AISI 304 östenitik dikişsiz paslanmaz çelik boru malzemeler piyasadan temin edilmiştir. Dikişli borularda ek yerlerinin kalıcı gerilmeyi etkileyebileceği düşünüldüğünden deneylerde özellikle dikişsiz boru kullanılmıştır. Kalıcı gerilme katman kaldırma metoduna göre tespit edileceğinden ve dolu malzeme için kısmı boşaltmak için ilave bir işlem yapılması gerekeceğinden, bu durumun da malzemenin iç kısmında işlemeye bağlı kalıcı gerilmelerin oluşmasına neden olacağı değerlendirildiğinden, deney malzemesinin boru olmasına da ayrıca dikkat edilmiştir. Deneylerde kullanılan AISI 304 östenitik paslanmaz malzemenin spektral analizi; ticari bir firmada Spektrocast 11814/00 optik emisyon spektrometresi ile tespit edilmiştir. Deney numunelerinin belirlenen kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de, fiziksel mekanik ve işleme özellikleri ise Çizelge 5.2’de verilmiştir.

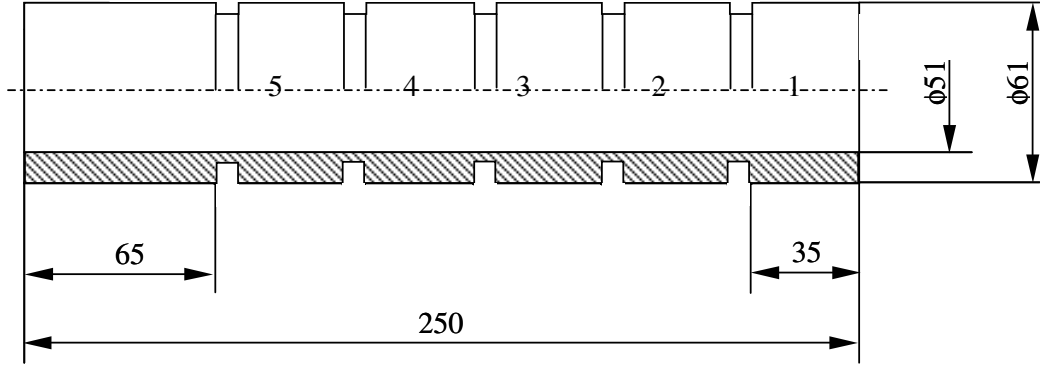
Çizelge 5.1 AISI 304 Östenitik Paslanmaz Malzemenin Kimyasal Bileşimi
(% Ağırlık)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
<0,0050	0,3885	2,173	>0,0960	0,0344	17,67	0,2983	14,71
Al	Cu	Nb	Ti	V	Bg	Fe	
0,0145	0,0806	<0,0050	<0,0010	0,0457	61,7	61,70	

Çizelge 5.2 AISI 304 Östenitik Paslanmaz Malzemenin Fiziksel, Mekanik Ve İşleme Özellikleri [123]

Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	8.03
Ergime noktası (°C)	1400-1455
Isı iletkenliği, (100 °C); (Joul/Sa Cm °C)	14.00
Genleşme katsayısı (0-100°C), (°C ⁻¹)x10 ⁻⁶	17.28
Isınma ısısı (0-100 °C); (Joul /kg °C)	0.12
Özdirenç (Oda sıcaklığı) (μΩ-cm)	72
Mekanik Özellikleri	
Gerilmeye elastikiyet modülü, (daN/cm ²)x10 ³	1970
Çekme dayanımı (daN/cm ²)	5965
Akma dayanımı (daN/cm ²)	2955
Uzama (5 cm de), (%)	60
Alan küçülmesi (%)	70
Sertlik	149 HR _B
Büzülme dayanımı (100 saatte %1 uzama) (daN/cm ²) 705 °C	280
İşleme Özellikleri	
Tavlama sıcaklığı, °C	1120
Dövme sıcaklığı (Başlangıç), °C	1160
Talaşlı işleme indeksi	50
Kaynak özellikleri	Çok iyi

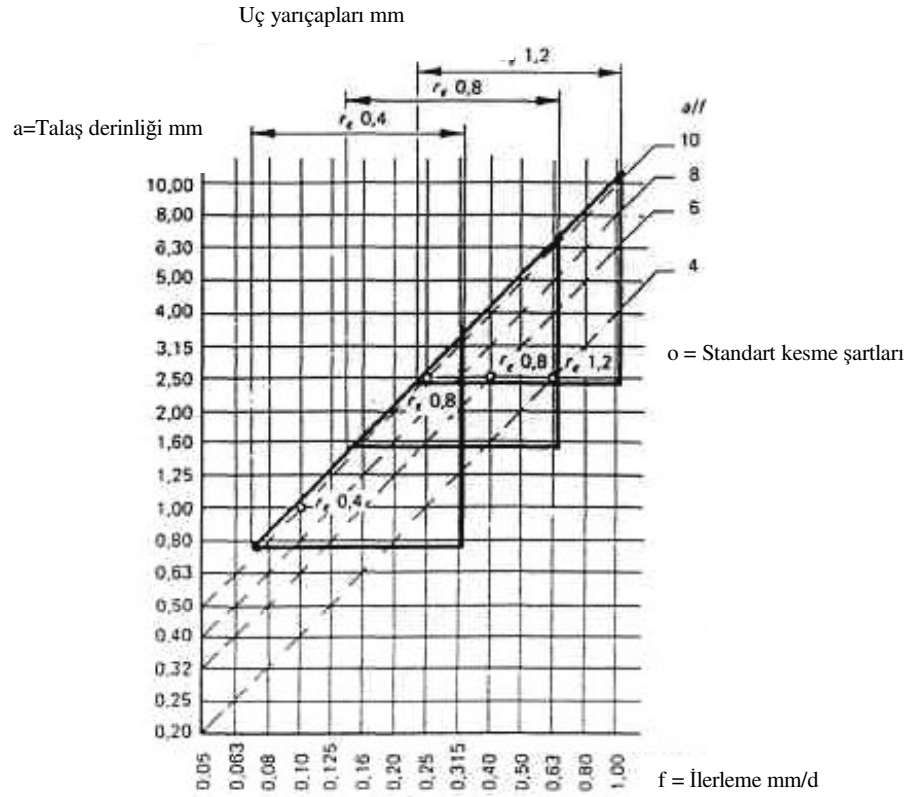
Tek bir deney numunesi üzerinde, Şekil 5.1’de gösterildiği gibi; Çizelge 5.3’de belirlenen beş farklı kesme parametresi uygulanmıştır. Böylelikle kalıcı gerilmelerin ölçülmesi için; bir deney numunesinden beş parça elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan numunenin teknik resmi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Deneylerde Kullanılan Malzemenin Teknik Resmi

5.3 Kesme Parametrelerinin Seçimi

Deney numunelerinin işlenmesinde takım üreticisi Mitsubishi firmasının katoloğunda östenitik paslanmaz çelikler için önerilen M30 kalitesinde, SNMG 120408-MS US 735 formunda ve ince titanyum kaplamalı, 89 HRA sertliğinde, 2,6 Gpa burulma dayanımına sahip kesici uç ve buna uygun SSBCR122525 takım tutucu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme parametrelerinin seçimi ISO 3685 (TS 10329)'a göre üretici firma verileri de dikkate alınarak belirlenmiş ve Çizelge 5.3'de verilmiştir. Belirlenen kesici uca göre en uygun kesme hızları 80-120 m/dk dır. Tavsiye edilen kesme hızının altındaki ve üstündeki değerlerde nasıl sonuçlar alabileceğimizi görmek için ilave olarak kesme hızı 50-150 m/dk'da deneylere dahil edilmiştir. Şekil 5.2'de gösterilen, ISO 3685'deki referans değerleri esas alınarak, 0,8 mm'lik kesici takım uç radiusune uygun ilerleme ve talaş derinlikleri belirlenmiştir [124]. İşleme deneylerinde her bir deney parçasında yeni bir kesici uç kullanılmıştır. Literatür taraması, kesici takımın da kalıcı gerilme üzerinde etkili olduğunu bize göstermiştir [9,18]. Kesici takımın keskin olması iyi yönde gerilme bırakır. Kör takımında sürtünme artacağından ısıda artacaktır. Buda kalıcı gerilmeyi olumsuz olarak etkileyerek çekme kalıcı gerilmelerinin oluşmasına neden olacaktır. Her deneyde yeni bir kesici uç kullanılarak kalıcı gerilmeler üzerinde kesicinin aşınmasından kaynaklanan etkiler elimine edilmiştir. Ayrıca takım açıları ve kaplama tipide kalıcı gerilme oluşumunda etkilidir. Talaş açısı büyüdükçe çekme kalıcı gerilmesi oluşur.



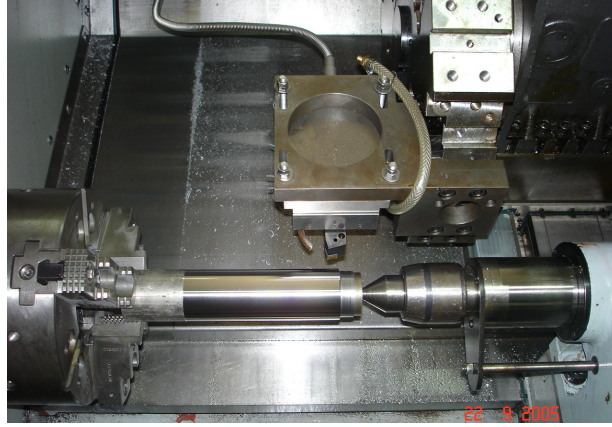
Şekil 5.2 Kesme Şartlarının Sınırları [124]

5.4 İşleme Deneylerinde Kullanılan Tezgah

Deneyler, Şekil 5.1’de görüldüğü gibi $\varnothing 61 \times 250$ mm ölçülerindeki parçalar üzerinde, Çizelge 5.3’deki parametrelere göre, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı Laboratuvarlarında bulunan Fanuc kontrol ünitesine sahip TC-35 Johnford CNC torna tezgahında yapılmıştır. CNC torna tezgahında $\varnothing 60$ mm ve 35 mm boyunda 30 adet, deney numunesi elde edilmiştir. Bir adet de işlenmemiş numune hazırlanmıştır. Numuneler CNC torna tezgahına Şekil 5.3’de görüldüğü gibi ayna punta arasında hassas bir şekilde bağlandıktan sonra, üzerinden en ideal kesme hızı olarak önerilen 80 m/dk ile 1 mm talaş kaldırılarak, deney numuneleri üzerindeki tabaka kaldırılmış ve böylece hem salgı engellenmiş hem de haddelemenin olumsuz etkileri giderilmiştir.

Çizelge 5.3: İşleme Deneylerinde Kullanılan Kesme Parametreleri

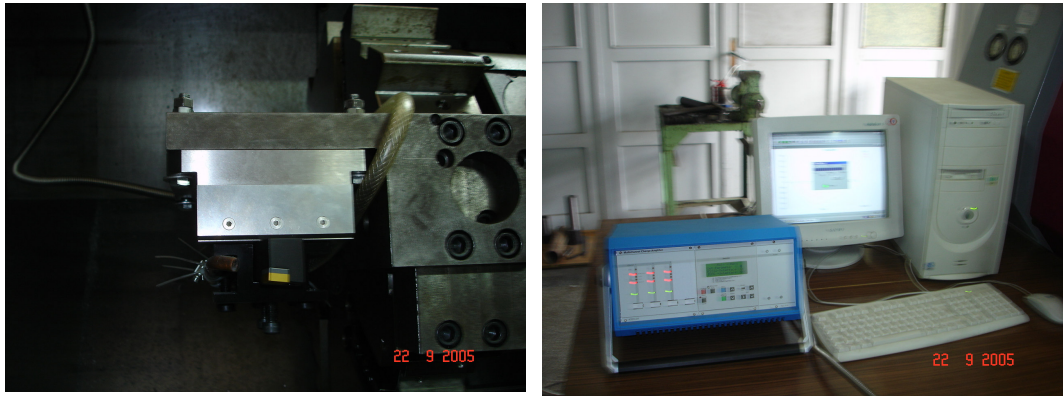
DENEY NO	V (m/dk)	f (mm/d)	a (mm)
1	50	0,15	1,5
2	75		
3	100		
4	125		
5	150		
6	50	0,20	1,5
7	75		
8	100		
9	125		
10	150		
11	50	0,25	1,5
12	75		
13	100		
14	125		
15	150		
16	50	0,15	2
17	75		
18	100		
19	125		
20	150		
21	50	0,20	2
22	75		
23	100		
24	125		
25	150		
26	50	0,25	2
27	75		
28	100		
29	125		
30	150		
31	İşlenmemiş Deney Numunesi		



Şekil 5.3 Deneş Parçasının CNC Torna Tezgahına Bağlanması

5.5 Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Araştırmada CNC torna tezgahı ile talaş kaldırmada talaş oluşumu esnasında ki kesme kuvvetlerini belirlemek için, KİSTLER 9257B Piezokristal esaslı dinamometreden faydalanılmıştır. Dinamometrenin kalibrasyonu için imalatçı firmanın dinamometre ile birlikte yolladığı kalibrasyon değerlerini bilgisayar programına girdikten sonra program otomatik olarak kalibrasyon ayarlarını gerçekleştirmektedir. Dinamometre Şekil 5.4’de görüldüğü gibi CNC torna tezgahının taretine bağlanmıştır. Veriler aynı şekilde görülen amplifikatör yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmakta ve bir bilgisayar programı yardımı ile de kesme kuvveti değerleri tespit edilebilmektedir.



Şekil 5.4 Dinamometrenin CNC Torna Tezgahına Bağlanması Ve Verileri Değerlendiren Bilgisayar Sistemi

5.6 YüzeY Pürüzlüklüklerinin Ölçülmesi

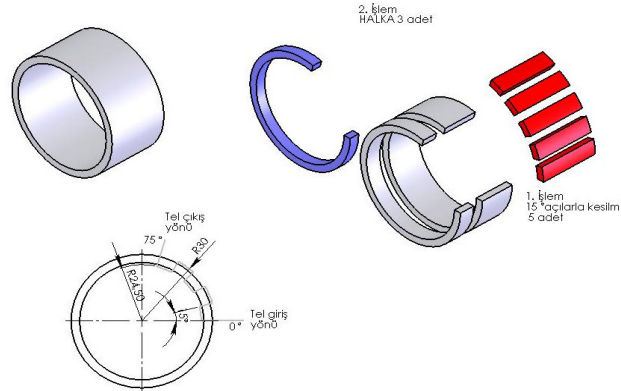
Deney numunelerin yüzeY pürüzlüklükleri, “Mahr” marka perthometer M1 tipi, masa üstü, yazılı çıktı verebilen pürüzlüklük ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüş ve pürüzlüklüğün, kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğine göre değişimi değerlendirilmiştir. Kullanılan cihazın teknik özellikleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4.YüzeY Pürüzlüklük Ölçüm Cihazının Teknik Özellikleri

MODEL	M1
Ölçme prensibi	Stylus metodu
Tarama hızı (mm/s)	0.5
Ölçüm aralıkları	100-150 µm
Profil çözünürlüğü (mm)	12
Filtre	Gaussian
Cut –off(Kesme uzunluğu)(mm)	0.08-0.25-0.8-2.5
Tarama uzunluları	1.75,5.6,17.5
Örnekleme uzunluğu sayısı	1-5 arası seçilebilir.
Dil	Seçilebilir 10 avrupa, 3 asya dili
Güç kaynağı	Entegre, NiCd şarj edilebilir pil
Boyutlar (boy x en x yük.)	190x170x75mm
Yaklaşık ağırlık	900 gr
Ölçülebilen parametreler	Ra,Rz,Rmax
Ra	$\frac{1}{\ln} \int_0^{\ln} f(x) dx$
Rz	$\frac{(Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5)}{5}$ (µm)
Rmax	Maksimum pürüzlüklük (µm)

5.7 Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesi İçin Deneysel Numunelerin Hazırlanması

İşleme deneylerini müteakip, numuneler üzerindeki kalıcı gerilmeleri ölçmek için, işlenmiş numuneler; ONAPRİMA S250 tel erozyon tezgahında Şekil 5.5’de görüldüğü gibi kesilmiştir. Tel erozyon tezgahında kesme işlemi ile diğer kesme yöntemlerine göre kalıcı gerilme oluşumu yok denecek kadar az olduğu için tercih edilmiştir. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi her bir deneysel numunesinden eksene paralel olarak beş adet ve eksene dik olarak da üç adet parça çıkarılmıştır. Eksene paralel olanlarda boyuna gerilmeler, eksene dik olanlarda ise çevresel gerilmeler ölçülecektir. Kalıcı gerilmelerin elde edilen bu parçalar üzerinde ölçülmesi planlanmıştır.



Şekil 5.5 Kalıcı Gerilmeleri Ölçülecek Parçaların CNC Tel Erozyon Tezgahında Kesilmesi

5.8 Kesici Takımdaki Aşınmanın İncelenmesi

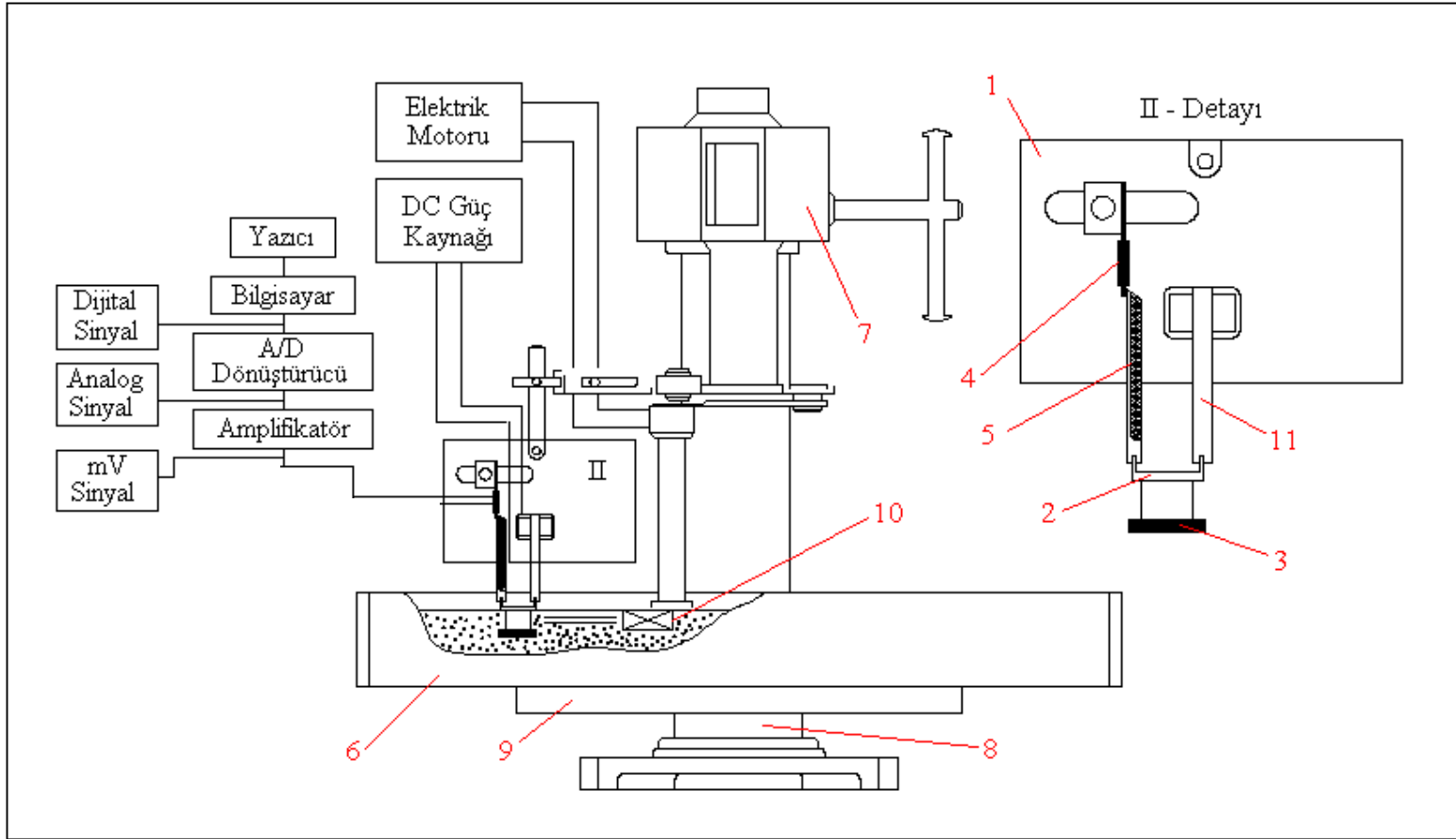
Farklı kesme parametreleri ile talaş kaldırmayla, kesicideki, aşınma eğilimini belirlemek amacı ile her deneyde ayrı bir kesici uç kullanılmıştır. Aşınma miktarının belirlenmesinde, “JEOL JSM 6060 LV” marka (Scanning Electron Microscopy) (SEM) tarama elektron mikroskobu kullanılarak kesici uçlardaki, aşınma ve sıvanma davranışları incelenmiştir.

5.9 Kalıcı Gerilmenin Ölçülmesi

Makine elemanlarının üretimi esnasında oluşan kalıcı gerilmelerin belirlenmesi için; CNC'li tel erozyon tezgahından elde edilen 248 adet deney parçası üzerinde katman kaldırma tekniği kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan deney düzeneğinin Şekil 5.6'da resmi ve Şekil 5.7'de teknik detayları şematik olarak görülmektedir. Numunedeki sehimin ölçümü 0,0001 hassasiyetindeki Linear Gage ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Kalıcı gerilme ölçüm cihazında numune yüzeyinden art arda gelen katmanların kaldırılması için elektro kimyasal aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Bu cihaz elektro kimyasal yöntemle talaş kaldıracak makineden, güç kaynağından, analog dijital dönüştürücüden, bilgisayar ve yazıcıdan oluşmaktadır. Katmanların kaldırılması işleminde, art arda gelen katmanların hem seri bir şekilde kaldırılmasına hem de katman kaldırma esnasında numunede oluşan ilave gerilmelerin çok düşük seviyelerde gerçekleşmesine imkan tanıdığı için elektro kimyasal yöntem tercih edilmiştir. Elektro kimyasal deney cihazında numuneden tabakalar kaldırıldıkça numunede oluşan deformasyon bilgileri A/D kartı kullanılarak bilgisayara gönderilmekte, bilgisayar da, verilmiş olan programla gerilme değerlerini hesaplayarak yazıcıya göndermektedir.



Şekil 5.6 Katman Kaldırarak Kalıcı Gerilme Ölçme Deney Düzeneği



1- Taşıma plakası, 2- Anot numune, 3- Bakır katot, 4- Linear Gage, 5- Numune ve yay ilişkisini sağlayan serbest manivela kolu, 6- Elektrolit havuzu, 7- Üzerinde anot ve katot olan plakayı, içerisinde elektrolit olan havuza daldıran mekanizma, 8- Makinenin gövdesi, 9- Tabla, 10- Elektrik motoru olan pompa (anot ve katot ile aynı anda elektrolite daldırılmaktadır), 11- Numuneyi sabit bir biçimde tutan manivela kol.

Şekil.5.7. Katman kaldırma işlemi gerçekleştirilen deney düzeneğinin şematik görünüşü

5.10 Metot

Deney numunelerinin her birinde farklı kesme hızlarının yanı sıra ilerleme hızı, talaş derinliği gibi işleme parametreleri de değiştirilmiştir. Bu sayede kesme hızının, ilerlemenin ve talaş derinliğinin kalıcı gerilmeyi nasıl etkileyeceği tespit edilmiştir. Deneylerin yapımında aşağıdaki işlem sırası takip edilmiştir.

- Dinamometre Şekil 5.4’de görüldüğü gibi CNC torna tezgahının taretine bağlanmış ve düzener test edilmiştir.

- Deney numuneleri CNC torna tezgahına Şekil 5.3’deki gibi bağlanmış ve malzeme üzerindeki 1mm tabaka kaldırılarak malzemenin kendi salgısı ve bağlamadan dolayı meydana gelebilecek salgı yok edilmeye çalışılmış, hem de haddelemenin olumsuz etkileri giderilmiştir. Malzemenin salgılı dönmesi ve haddeleme işlemleri kalıcı gerilme değerini etkileyecektir. Bu sayede salğıdan ötürü oluşacak kalıcı gerilme önlenmiştir. Bu işlemden sonra deney numunesi sökölmeden sırası ile Çizelge 5.3 deki parametrelere göre işlenmiştir. Her bir deney numunesinin işlenmesi esnasında oluşan esas kesme kuvvetleri, radyal kuvvetler ve pasif kuvvetler belirlenmiştir.

- Yapılan deneylerde farklı kesme hızlarının, ilerlemenin ve talaş derinliğinin yüzeyin kalitesi üzerindeki etkisini de belirlemek için, işlenen her yüzeyin üzerinden, ölçme aletinin örnek uzunluğu maksimum tutularak, yüzeyin değişik bölgelerinde dört farklı ölçme işlemi yapılmış ve elde edilen bu dört değer aritmetik ortalaması alınarak, o yüzeye ait “ortalama yüzey pürüzlülüğü” olarak değerlendirilmiştir.

- İşleme deneyleri esnasında ortaya çıkan talaşlar ayrı ayrı toplanarak fotoğrafları çekilmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

- Her bir deney numunesinin işlenmesinde kesici uç değiştirilmiştir. İşleme esnasında kullanılan kesici uçların Scan Elektron Mikroskopunda fotoğrafları çekilmiş ve uçlarda kesme parametrelerine göre meydana gelen aşınmalar tespit edilmiştir.

- Deney numunelerinin CNC’li tel erozyon tezgahında kesilmeden önce ve kesildikten sonraki çapları ölçölmüş ve toplamda mevcut olan çevresel eşdeğer gerilmeler hesaplanmıştır.

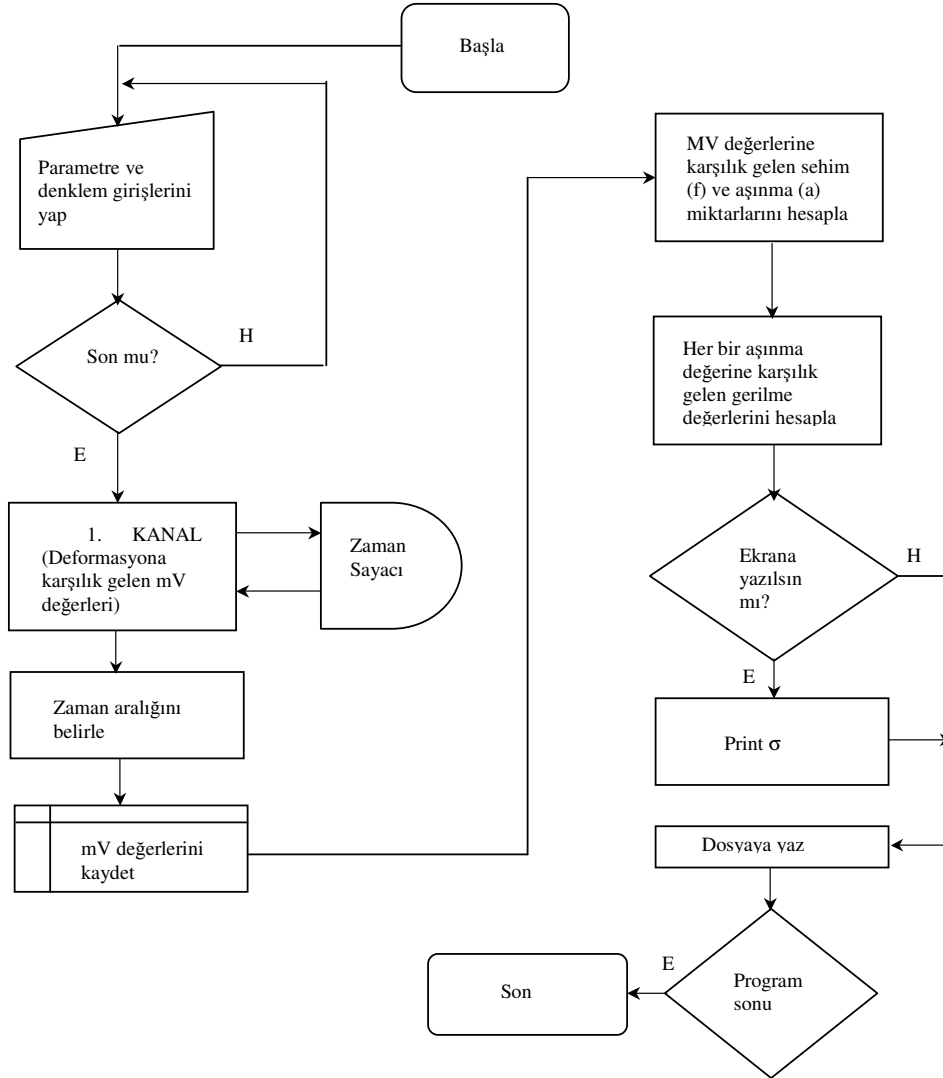
- CNC torna tezgahında işlenen deney numunelerinde oluşan kalıcı gerilmelerin belirlenmesi için Şekil 5.5'deki gibi eksene paralel beş ve eksene dik üç parça çıkarılmış ve katman kaldırma tekniği kullanılmıştır. Parçalar çıkarılırken CNC'li tel erozyon tezgahı kullanılarak oluşacak kalıcı gerilmeler en aza indirilmiş ve kalanlarda ihmal edilmiştir. Ayna ayaklarının sıkma kuvveti de kalıcı gerilmeyi etkileyeceğinden Şekil 5.1'de görülen 65 mm lik kısım işlenmemiş ve deneylere dahil edilmemiştir. Bu kısım CNC'li tel erozyon tezgahında kesilip atılmıştır. Deney numunelerinde düz olan parçalarda boyuna gerilme, dairesel olan parçalarda da çevresel gerilme ölçülmüştür. Gerilmeyi üç boyutlu olarak ölçmek mümkün olmadığı için deneylerde tek ekseninde gerilme ölçülmüş, diğer boyutlarda gerilme olmadığı kabul edilmiştir.

- Bu amaç için tasarlanıp imal edilen, Şekil 5.6'daki ölçüm cihazında numune yüzeyinden art arda gelen katmanların kaldırılması için elektro kimyasal aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Elektro kimyasal işlemede malzeme tipleri ve bunlara uygulanan elektrolitler incelenmiş ve AISI 304 paslanmaz çeliğine uygun olarak, elektrolit tipinin fosforik asit, sülfirik asit, gliserin ve su karışımı ile elde edilen elektrolit olduğu tespit edilmiştir. Katmanların kaldırılması sonucu meydana gelen deformasyonu ölçmek için cihaz üzerine linear gage monte edilmiştir. Linear gage yardımıyla, elektrik sinyallerine dönüştürülen mekanik yer değiştirme miktarı, uygun bir donanım ve yazılım kullanılarak sayısal sinyallere dönüştürülerek bilgisayar yardımı ile her katmana karşılık gelen kalıcı gerilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu verilerin, Microsoft Excel programı yardımıyla grafikleri oluşturulmuştur. Bu yaklaşımla problemin çözümüne esas teşkil eden sistemin dört temel kısmı aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

- i) Elektro kimyasal yöntemle numuneden sürekli tabakalar kaldırılan elektro kimyasal kısım,
- ii) Deney parçasının cihaza bağlanmasını, elektrolit içerisine daldırılmasını ve elektrolitin numune üzerine akışını sağlayan pompa sistemini içeren mekaniksel kısım,
- iii) Deney parçasından tabakalar kaldırırken oluşan deformasyonu elektrik sinyallerine dönüştüren elektrikselsel kısım,

iv) Sinyalleri bilgisayarın anlama ve aktarma mantığına dönüştürebilen donanım ve yazılımlar.

• Sistemin çalıştırılması ve verilerin toplanıp değerlendirilmesi için izlenen yöntemin akış diyagramı Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Kalıcı Gerilmelerin Belirlenmesinde Kullanılan Bilgisayar Programının Akış Şeması

Bu akışa uygun olarak hazırlanan bilgisayar programı, deney parçasından elektrolit ortamında tabakalar kaldırılması sonucu oluşan deformasyon bilgilerinin

bilgisayar ortamına kaydedilerek değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Kullanılan bilgisayar programı üç aşamada işlem yapmaktadır.

i) Parametre girişinde yapılan işlemler: Daha sonra hesaplama aşamasında kullanılacak olan formüllere ait önceden bilinen sabit değerlerin; (E , deney malzemesinin elastisite modülü; H , deney malzemesinin kalınlığı; l , deney malzemesinin uzunluğu; $a \rightarrow t$, kalibrasyon bağıntısı değerleri; $V \rightarrow f$, kalibrasyon bağıntısı değerleri; burada (f) tabakalar kaldırılırken oluşan deformasyon; (V), (f) deformasyona karşılık gelen ve linear gageden alınan mV değerleridir.) girişine ve deney öncesi kalibrasyon sonucu elde edilen ve yine hesaplama aşamasında kullanılacak olan kalibrasyon değerlerine ait denklemlerin girişine imkan tanımaktadır.

ii) Veri okuma aşamasında önceden tanımlanmış olan zaman aralıklarında linear gegerlerden gelen veriler okunarak her bir zaman aralığına karşılık gelen mili volt değerleri ($V \rightarrow t$) şeklinde çevrim zamanı tamamlanana kadar bir dosyaya sıralı olarak kaydedilmektedir.

iii) Hesaplama aşaması: Girilen parametreler ve okunan verilere göre aşındırılan katmanlara (aşınma derinliği) karşılık gelen gerilme değerleri hesaplanarak $\sigma \rightarrow a$ grafiğini oluşturulmasıdır.

- Deneylere başlamadan önce numunelerde aşındırma yapılmayacak kısımlar koruyucu malzeme ile kaplanmıştır.

- Elektro kimyasal işleme her bir numune için 45 dakika sürmüş olup, bu süre sonunda numunelerden 0,3489 mm tabaka kaldırılmıştır. 45 dakikalık deney süresince her 20 saniyede bir ölçü alınarak yaklaşık 0,0026 mm'lik katmanlardaki gerilme değerleri kaydedilmiştir. Deney numunelerinde inilen bu derinlik, literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde yeterli kabul edilmiştir. Her bir deney numunesinde toplam 136 ölçüm yapılmıştır.

- Microsoft Excel programı yardımıyla oluşturulan tüm grafikler incelenerek kesme parametrelerinin, kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülüğünü, kesici uçlardaki aşınmayı ve kalıcı gerilmeyi nasıl etkilediği ve bunlar arasındaki ilişkiler yorumlanmıştır.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1 Giriş

Talaşlı imalat esnasında kalıcı gerilmeleri etkileyecek pek çok faktör söz konusudur. Bu faktörlerin etkilerini belirleyebilmek için; deney parçası Şekil 5.1'deki gibi sırası ile Çizelge 5.3'deki değerlere göre işlenmiştir. Değişik işleme parametrelerinde kalıcı gerilmeleri tespit etmek için yapılan çalışmada ayrıca kesme hızı, talaş derinliği ve ilerlemenin kesme kuvvetlerine etkileri, işleme esnasında çıkan talaşların şekli, işlenen yüzeylerdeki yüzey pürüzlülükleri, kesici uçlardaki aşınmalar da incelenmiştir. Deneylerde, işlenen malzemenin her 35 mm'lik kısmına sıra ile numune numarası verilmiştir. Her bir deney numunesinde işleme esnasında esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve pasif kuvveti (F_r) ayrı ayrı tespit edilmiştir.

Numunenin işlenmesi esnasında çıkan talaşlardan örnekler alınmıştır. Numunenin bir tanesi üzerinde herhangi bir talaşlı işlem yapılmadan üzerindeki kalıcı gerilmeler katman kaldırma yöntemi ile tespit edilerek, diğer işlenen deney numunelerinde belirlenen kalıcı gerilmeler ile karşılaştırması yapılmıştır.

6.2 Kesme Hızı, Talaş Derinliği Ve İlerlemenin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkileri

Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi, bilimsel analizler için gerekli olduğu kadar, takım tasarımını optimize edilmesinde de gereklidir. Kesici takıma etki eden kuvvetlerin yeterli hassasiyette ölçülmesi için pek çok dinamometre geliştirilmiştir. Kullanılan bütün metotlar yük altında kesici takımın elastik şekil değiştirmenin ölçülmesi esasına dayanmaktadır.

Yardımoğlu ve Boyar genel olarak, kuvvet bileşenlerinin ilerleme hızı ile doğru orantılı olduğunu ve talaş derinliğinin artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını gözlemişlerdir [125]. Talaş kaldırma işlemlerinde kesme kuvvetlerinin, takım talaş arasındaki temas uzunluğu ile ilgili olduğu bilinmektedir. Kesme hızının artırılması, kayma açısını artırdığı, daha ince talaş oluşturduğu ve temas uzunluğunu azalttığı için kesme kuvvetleri de buna bağlı olarak düşmektedir. Ayrıca takım ve iş parçası sıcaklığı yükseldiği için kayma bölgesindeki kayma gerilmesindeki azalmanın da kesme kuvvetlerini düşüreceği belirtilmiştir. Kienzle'ye göre, asıl kesme kuvveti F_c 'nin değeri, talaş kesiti ile işlenen malzemenin özgül kesme direncinin çarpımıdır (Eş. 6. 1) [126].

$$F_c = A \times k_s \quad (6.1)$$

Burada;

A: Talaş kesitinin alanı (mm^2),

k_s : Malzemenin özgül kesme direnci dir. $\left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right)$

Kesme kenar açısı 90^0 ise talaş kesitinin alanı (Eş. 6. 2) deki gibi bulunur.

$$A = t_1 \times f \quad (6.2)$$

t_1 : Kaldırılan talaş derinliği (mm),

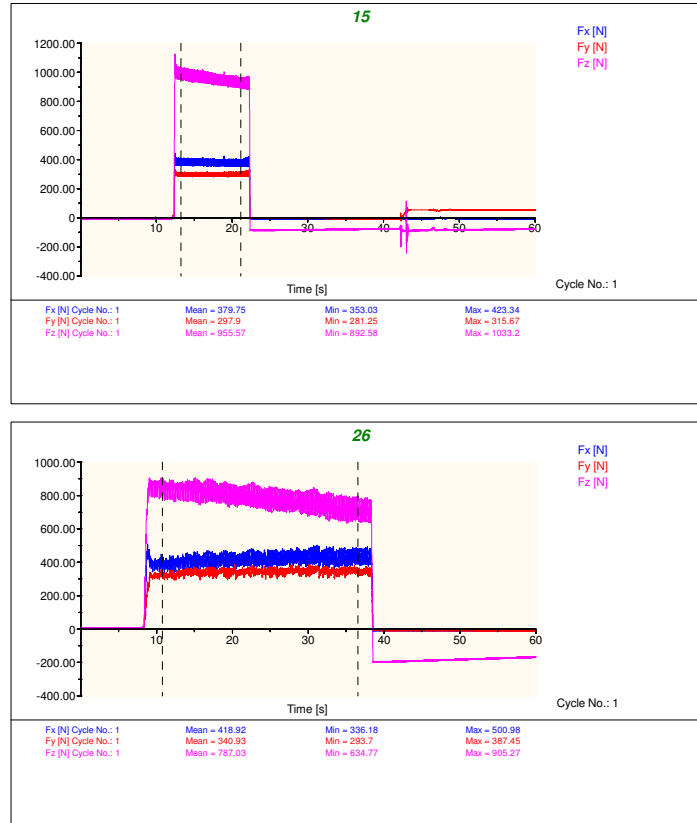
f: İlerleme (mm/d)dir.

Yapılan deneysel araştırmalara göre, talaş kaldırma sırasında asıl kesme kuvveti F_c 'yi; talaş açısı faktörü k_γ , kesme hızı faktörü k_v , takım aşınma faktörü k_a , takım malzemesi faktörü k_t 'de etkilemektedir. Bu durumda asıl kesme kuvveti F_c Eşitlik 6. 3'deki gibi bulunur.

$$F_c = A \times k_s \times k_v \times k_\gamma \times k_a \times k_t \quad (6.3)$$

Kesme hızı değerinin artmasına karşılık malzemenin özgül kesme direnci azalmaktadır. Bu durumda kesme kuvvetlerinin azalacağı, talaş derinliği ve ilerleme hızının artması ile de kesme kuvvetlerinin artacağı belirtilmiştir [126]. Genel kural olarak, talaş açısının artması ile kesme kuvvetleri azalır ve daha iyi bitirme yüzeyi elde edilir. Ancak talaş açısının optimum bir değeri bulunmaktadır. Bu değerini aşırı artması kesici ucun dayanımını azaltacağından aşınmayı artırmaktadır. Aşınmanın artması boşluk yüzeyi temas alanını artıracığından kesme kuvvetleri de buna bağlı olarak artacaktır [14]. Bu nedenle yapılan tüm deney şartlarında talaş açısı optimum değerinde sabit tutulmuş ve talaş açısı faktörü, takım aşınma faktörü, takım malzemesi faktörü teorik hesaplamalarda dikkate alınmamıştır.

- Şekil 6. 1’de deney numunelerinin işleme esnasında esas kesme kuvvetinin (F_c), ilerleme kuvvetinin (F_f) ve pasif kuvvetin (F_r) bilgisayarda oluşan kuvvet diyagramlarından iki tanesi görülmektedir.



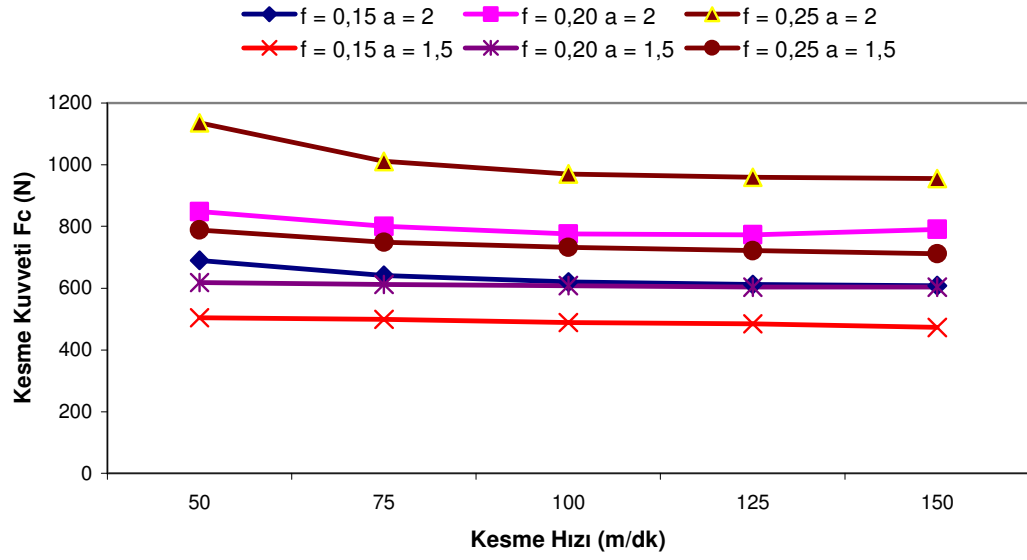
Şekil 6.1 İşleme Deneyleri Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetleri Diyagramı

- Deney numunelerinin işlenmesi esnasında elde edilen esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve pasif kuvveti (F_r) ve Eşitlik 6.3'e göre teorik olarak hesaplanan esas kesme kuvveti (F_c) ve asıl kesme kuvvetinin bir katsayı ile çarpılması sonucu hesaplanan ilerleme kuvveti (F_f) ve pasif kuvveti (F_r) Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Kesme kuvvetleri deneysel yöntemlerle belirlenebildiği gibi, teorik olarak da hesaplanabilmektedir. Ancak teorik formüller, işlenen malzemenin, kesicinin metalürjik yapısını ve kesme esnasında oluşabilecek birçok etkiyi dikkate almadığından, tamamen doğru sonuçlar vermemektedir. Deneysel sonuçlar ve teorik sonuçlar karşılaştırıldığında belli bir yakınlıkta kesme kuvvetlerinin hesaplanabilmesine imkan sağlamaktadır [125-127,128].

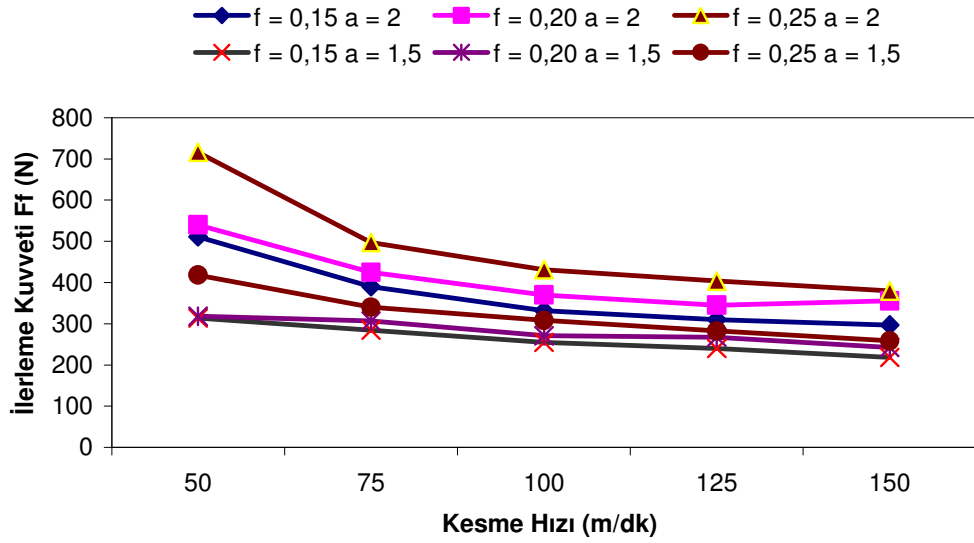
- Çizelge 6.1'de listelenen deney sonuçları baz alınarak, Şekil 6.2'de farklı kesme hızlarında ilerlemenin ve talaş derinliğinin kesme kuvvetine, Şekil 6.3'de ilerleme kuvvetine, Şekil 6.4'de pasif kuvvete etkisi toplu olarak görülmektedir. Deneylerden elde edilen diğer sonuçlar ise Ek A'da sunulmuştur. Çizelge 6.1 ve Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 deki grafiklerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde;

Çizelge 6. 1. Farklı Kesme Hızlarına Bağlı Olarak Deneylerden ve Teorik Hesaplamalardan Elde Edilen Kesme Kuvveti Sonuçları

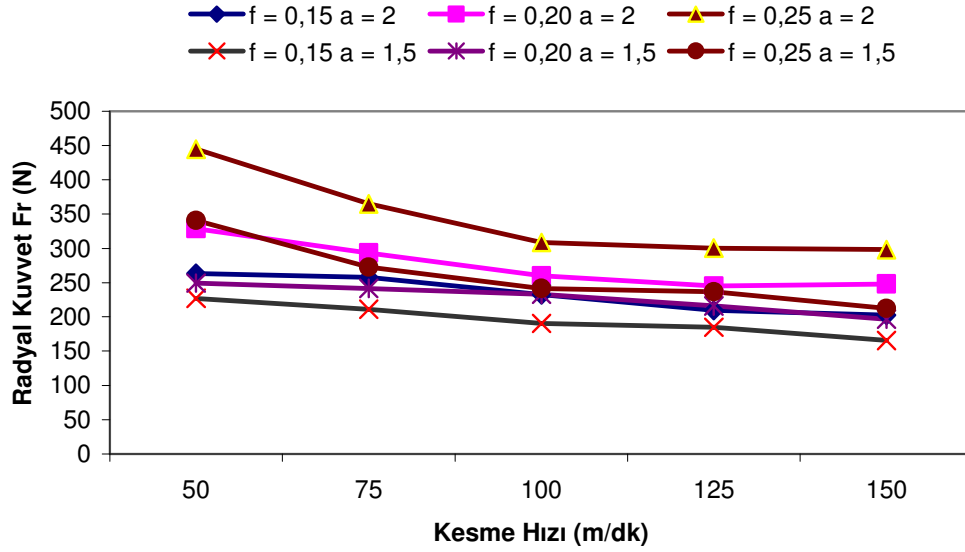
Deney No:	Deneysel Ölçülen F_c (N)	Teorik Hesaplanan F_c (N)	Deneysel Ölçülen F_r (N)	Teorik Hesaplanan F_r (N)	Deneysel Ölçülen F_r (N)	Teorik Hesaplanan F_r (N)
1	503,87	631,48	313,51	212,34	226,93	186,43
2	499,30	628,23	284,53	193,26	211,12	174,05
3	488,81	626,97	254,74	172,03	190,71	156,37
4	484,80	609,38	239,83	162,55	184,87	151,43
5	473,23	594,30	217,95	148,35	165,28	135,79
6	618,20	958,84	318,61	217,04	249,29	202,69
7	611,89	947,14	306,23	208,81	241,49	196,17
8	608,60	942,49	270,92	184,92	233,25	189,95
9	603,66	936,29	267,28	183,03	216,19	176,91
10	603,45	934,74	241,99	165,13	196,5	160,19
11	788,98	884,17	418,41	291,89	340,58	240,45
12	749,07	840,47	339,93	236,73	272,48	192,36
13	731,67	819,01	307,72	214,94	241,32	170,11
14	721,10	807,81	282,62	196,99	236,67	167,29
15	711,14	796,6	258,75	180,22	212,31	149,64
16	689,86	865,24	510,86	346,09	263,35	216,31
17	641,01	803,57	389,64	264,58	257,74	211,07
18	620,05	777,24	331,05	225,23	232,09	190,53
19	612,10	768,47	310,52	210,99	209,26	172,47
20	608,17	764,56	297,3	201,49	202,35	165,90
21	848,17	1069,29	540,06	427,71	328,97	267,32
22	800,06	1008,49	424,58	336,05	293,15	238,50
23	775,77	978,23	369,99	293,25	259,87	211,64
24	773,28	974,45	345,11	273,44	244,95	199,43
25	790,70	969,88	355,5	270,71	248,11	198,87
26	1135,22	1255,68	716,27	500,31	444,69	313,92
27	1010,57	1117,67	496,85	347,06	364,84	258,13
28	969,77	1073,40	431,67	301,67	308,76	218,52
29	959,20	1061,23	403,51	281,42	300,42	212,16
30	955,03	1056,81	379,68	265,36	297,91	210,07



Şekil 6.2 Farklı Kesme Hızlarında İlerlemenin Ve Talaş Derinliğinin Kesme Kuvvetine Etkisi



Şekil 6.3 Farklı Kesme Hızlarında İlerlemenin Ve Talaş Derinliğinin İlerleme Kuvvetine Etkisi



Şekil 6.4 Farklı Kesme Hızlarında İlerlemenin Ve Talaş Derinliğinin Radyal Kuvvete Etkisi

- Kesme hızının artmasıyla; kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r)'nin azaldığı,

- Talaş derinliği ($a=2$ mm ve $a=1,5$ mm) sabit tutularak, sırası ile ilerlemeler $f=0,15$, $f=0,20$ ve $f=0,25$ mm/d alınarak deneyler gerçekleştirilmiş ve ilerlemenin artmasıyla F_c , F_f ve F_r 'nin arttığı,

- Talaş derinliği 1,5 mm'den 2 mm ye artırıldığında da F_c , F_f , F_r 'nin arttığı bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlarla, literatürdeki [14, 15, 125, 126] sonuçlar paralellik göstermesine karşılık; Şekil 6.2'de Şekil 6.3'de ve Şekil 6.4'de $v=150$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm'de kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve radyal kuvvetin düşmesi beklenirken bir artışın olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni ise;

- Malzemenin mikro yapısındaki farklılık,
- Alaşım elementlerinin o bölgede yoğunlaşmasından ve o bölgede deformasyon pekleşmesinden kaynaklanabileceği,
- İşleme esnasında, deney numunesinin bağlanmasındaki değişim ve titreşim gibi olumsuz durumdan da kaynaklanabileceği,

- Söz konusu kesme hızı, kullanılan kesici takım için üretici firmanın önerdiği kesme hızının dışında kalan bir değerdir. Kesme hızının önerilen kesme hızının üzerine çıkması ile eğilimin değişmesi, hız sınırları dışına çıkılmasından da bu artışın olabileceği düşünülmektedir.

- Deneysel verilerle teorik verileri bütün kesme hızları için kıyasladığımızda deneysel sonuçlarla teorik sonuçların benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Deneyler sırasındaki gerçek işleme şartlarına bağlı olarak, deneysel sonuçların teorik sonuçlara göre esas kesme kuvveti için %18-22'lik bir azalma sergilediği Çizelge 6.1'de görülmektedir. Bunun nedeni ise kesme hızı faktörünün yeterince tutarlı olmamasından ve malzemenin özgül kesme direncinin tam olarak belirlenememesinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. İlerleme ve radyal kuvvetlerde ise deneysel sonuçlarının teorik sonuçlara göre daha fazla çıktığı görülmektedir. İlerleme kuvvetinin esas kesme kuvvetine oranı 0,36 ile 0,69 arasında değiştiği görülmektedir. Bu oran literatürle paralellik gösterirken teorik yaklaşımlarda yaygın olarak kullanılan 0,4 katsayısının düşük olduğu F_r 'nin en az 0,5 F_c olarak alınması gerektiği değerlendirilmektedir. Radyal kuvvetlerin ise esas kesme kuvvetine oranı 0,31 ile 0,45 arasında değiştiği görülmektedir. Bu oran literatürde teorik yaklaşımlar için belirtilen 0,25 katsayısının düşük kaldığını F_r 'nin en az 0,38 F_c olarak alınması gerektiği ortaya çıkarmaktadır.

6.3 Kesme Hızı, Talaş Derinliği Ve İlerlemenin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkileri

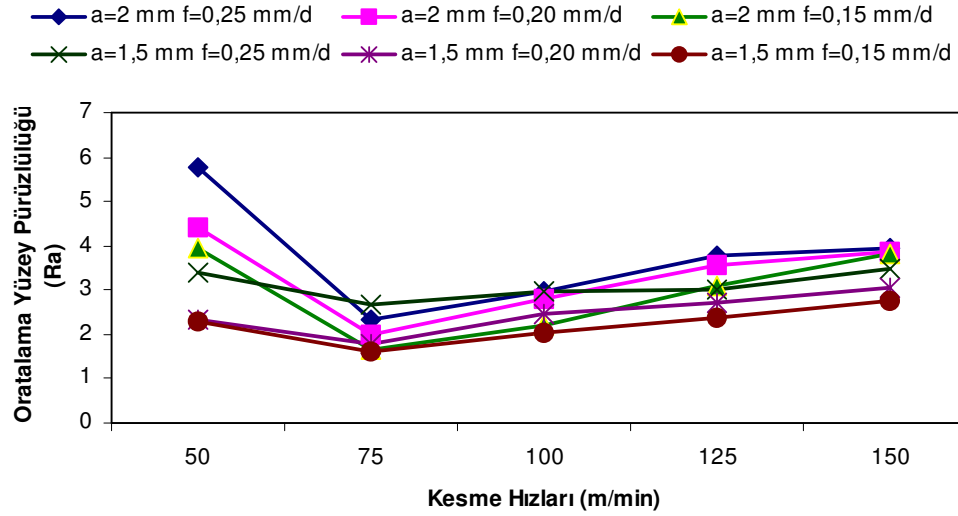
Talaşlı imalat uygulamalarında işlenebilirliğin diğer önemli bir ölçütü yüzey kalitesi ya da yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğü birbirinden bağımsız şartlar altında değerlendirilmektedir [122].

- Değişik parametrelerde işlenen deney numunelerinin dört farklı noktadan elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a), bu yüzeylere ait örnekleme uzunluklarının profildeki en yüksek 5 tepe ile en derin 5 vadinin genliklerinin aritmetik ortalaması (R_z) ve profildeki en yüksek pürüzlülük değerleri (R_{max}) ölçülmüş ve ortalaması alınarak Çizelge 6.2'de listelenmiştir. Çizelge 6.2'de listelenen bulgular, farklı kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğine bağlı olarak

ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişimi göstermek amacıyla, Şekil 6.5’de ki grafik de birleşik olarak gösterilmiştir. Deneylelerden elde edilen diğer sonuçlar ise Ek B’de sunulmuştur.

Çizelge 6. 2. Farklı Parametrelerde İşlenen Parçaların Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Deney No:	R _a µm					R _z µm					R _{max} µm				
	1	2	3	4	Ort.	1	2	3	4	Ort.	1	2	3	4	Ort.
1	2,5	3,2	1,5	1,9	2,275	11,5	13,8	7,7	9	10,5	13,5	16,1	8,3	10,8	12,175
2	1,6	1,7	1,7	1,5	1,625	8,1	8,4	9,3	8,4	8,55	8,9	9,1	9,8	9	9,2
3	2,4	1,7	2,4	1,7	2,05	11	8,8	12	8,3	10,025	11,8	9,4	12,4	8,8	10,6
4	2,1	1,8	2,3	3,3	2,375	9,3	8,4	10	14,4	10,525	10,8	8,5	17	16,9	13,3
5	2,7	2,7	2,8	2,8	2,75	14	13,8	14	14,3	14,025	15,4	15,3	15,3	15,1	15,275
6	2,3	2,4	2,8	1,8	2,325	12,7	11,9	13,8	9,3	11,925	22,8	22,2	26,8	13,4	21,3
7	1,9	1,8	1,7	1,7	1,775	9,3	9	8,4	8,3	8,75	9,6	9,2	9,1	8,8	9,175
8	2,9	2	2,8	2,1	2,45	14,6	9,9	13,6	10,1	12,05	15,5	14	14	11,7	13,8
9	2,7	2,7	2,8	2,7	2,725	11,5	10,9	11,2	11,3	11,225	12	11,5	11,7	12,9	12,025
10	3,3	2,9	3,1	2,9	3,05	14,9	13,5	14,2	13,2	13,95	15,4	13,8	14,9	14,3	14,6
11	3,1	3,6	3,2	3,7	3,4	15,9	16,5	15,8	17,4	16,4	17,4	20	19,9	18,6	18,975
12	2,5	3,1	2,6	2,5	2,675	11,3	11,9	11,5	11,8	11,625	11,7	12,3	11,9	11,7	11,9
13	2,9	2,8	3,1	3	2,95	13,2	12,3	14,5	14,4	13,6	13,8	12,8	15,4	15,2	14,3
14	3	3,2	3,1	2,8	3,025	15	15,7	15,1	14,2	15	16	17,1	16,3	15	16,1
15	3,6	3,3	3,7	3,4	3,5	16,8	14,2	16,8	15,2	15,75	18,2	14,9	17,5	16,8	16,85
16	3,6	3,7	4,2	4,3	3,95	20,3	18,9	19,5	19,6	19,575	21,3	20,1	20,8	21,5	20,925
17	1,8	1,6	1,4	1,9	1,675	9,4	10,3	7	9	8,925	10,8	13,6	9	10,7	11,025
18	1,8	1,7	2,6	2,8	2,225	9,3	9,1	12,1	12,2	10,675	10,9	9,9	12,9	16,3	12,5
19	3,7	2,2	3,5	3	3,1	16,7	10,6	16,3	13,9	14,375	19	13,8	18,2	16,9	16,975
20	3,5	3,6	3,6	4,5	3,8	17,9	17	17,6	20,6	18,275	22,4	22,5	21,7	22,9	22,375
21	4,1	4,6	4,2	4,8	4,425	18	21	20	20,6	19,9	19,2	24,6	21,4	22,2	21,85
22	2,3	2,1	1,9	1,6	1,975	11,7	11,1	9,9	9,8	10,625	13,6	12,9	12	11,6	12,525
23	2,8	3	2,5	2,9	2,8	14,7	14,5	12,7	13,3	13,8	16	17,1	14	15,9	15,75
24	3,6	3,9	3,5	3,3	3,575	18,3	16,1	18,2	14,6	16,8	23,3	18,4	22,9	18,7	20,825
25	4	3,9	3,8	3,7	3,85	19,8	19,4	19,4	19,6	19,55	21,3	22	20,5	21,7	21,375
26	7,1	5,6	4,7	5,6	5,75	26,1	24,3	24,5	25,8	25,175	30	27,5	27,9	29,1	28,625
27	2,4	2,3	2,3	2,3	2,325	10,4	9,9	10,5	10,9	10,425	12	10,5	11	11,8	11,325
28	3,2	2,7	3,3	2,7	2,975	15,3	14,4	16,8	13,4	14,975	18	16,9	19,3	16,9	17,775
29	3,8	3,7	3,9	3,7	3,775	18,7	18,5	19	18,7	18,725	19,7	20,5	20,5	21,2	20,475
30	4,6	4,1	4,3	2,7	3,925	23	17,2	21,6	13	18,7	29	20,9	25,4	17,7	23,25



Şekil 6.5 Farklı Kesme Hızlarında İlerlemenin Ve Talaş Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Yüzey pürüzlülüğünün; öncelikli olarak kesme hızına, ilerlemeye ve talaş derinliğine bağlı olarak değişebileceği bilinmektedir. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü iyileşmesinin, yüksek hızlarda artan sıcaklıktan kaynaklandığı söylenebilir. Kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisini görmek için yapılan etki testinde ilerleme hızı etkisinin kesme hızına göre daha fazla olduğu bildirilmiştir. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme, beklenen bir özellik olup yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için kesme hızının artırılması, literatürde önerilen en yaygın yöntemdir [2,15,129-132]. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen diğer bir faktör talaş kökünde BUE (talaş sıvanması) oluşma eğilimidir. BUE'nin talaş kökünde oluşması yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır [133]. Yüzey pürüzlülüğünün en iyi olduğu işleme şartları sırası ile aşağıdaki Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de verilmiştir. Kullanılan kesici takım için, imalatçı firma tarafından AISI 304 Östenitik paslanmaz çeliği için önerilen en ideal kesme hızı 80 m/dk'da Şekil 6.5'de de görüldüğü gibi, en düşük yüzey pürüzlülüğü çıkmıştır. Önerilen aralığın dışında bulunan (50-150 m/dk) kesme hızlarında ise çok kötü yüzey pürüzlülüğü elde edilmesi, önerilen kesme hızlarının dışında çalışmanın olumsuz etkisini yansıtmaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde;

- En ideal kesme hızının 75 m/dk, ilerlemenin 0,15 mm/d, talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu görülmüştür. Bu işleme şartlarında en yüksek yüzey kalitesi elde edilmiştir.
- En kötü yüzey kalitesi ise; kesme hızının 50 m/dk, ilerlemenin, 0,25 mm/d, talaş derinliğinin 2 mm olduğu durumda ortaya çıkmıştır.
- Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de de görüldüğü gibi uygun kesme hızının sırası ile 75, 100,125 m/dk olduğu, ilerleme ve talaş derinliği arttıkça yüzey kalitesinin azaldığı yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır.
- Takım üreticisi Mitsubishi firmasının önerdiği (80-120 m/dk) kesme hızlarının dışında 50 ve 150 m/dk'lık kesme hızlarında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünün çok kötü olduğu ortaya çıkmıştır.
- Uygun takım geometrisi, ilerleme hızı ve kesme hızı ile ideal yüzey pürüzlülüğü elde edilebilmektedir. Her zaman kesme hızının artırılması yüzey kalitesinin artırılması anlamında gelmemektedir. Kesme hızının 50 m/dk'dan 75 m/dk'ya çıktığında yüzey kalitesi artmasına rağmen, yapılan deneylerde de görüldüğü gibi optimum kesme hızının dışına çıkıldığından 75 m/dk'dan sonra giderek yüzey kalitesinin azaldığı ortaya çıkmıştır.

Çizelge 6.3 Talaş derinliği 2 mm olduğunda elde edilen (Ra) yüzey pürüzlülük değerleri

İlerleme mm/d	Kesme Hızları m/dk				
	50	75	100	125	150
f=0,25	5,75	2,325	2,975	3,775	3,925
f=0,20	4,425	1,975	2,8	3,575	3,85
f=0,15	3,95	1,675	2,225	3,1	3,8

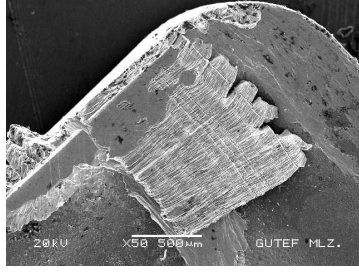
Çizelge 6.4 Talaş derinliği 1,5 mm olduğunda elde edilen (Ra) yüzey pürüzlülük değerleri

İlerleme mm/d	Kesme Hızları m/dk				
	50	75	100	125	150
f=0,25	3,4	2,675	2,95	3,025	3,5
f=0,20	2,325	1,775	2,45	2,725	3,05
f=0,15	2,275	1,625	2,05	2,375	2,75

- Kesme hızının 75 m/dk'dan 150 m/dk'ya artırıldığında yüzey kalitesinin düşmesinin bir başka nedeni ise sıvanmanın azalması ile akma bölgesinin oluşması olduğu değerlendirilmektedir. Akma bölgesinin olduğu durumlarda takım aşınması artacağı bilinmektedir.

6. 4 Kesici Takımda Aşınmanın İncelenmesi

Elektron tarama mikroskobu (SEM) ile kesici uçlar üzerinde yapılan incelemelerde, en fazla BUE eğiliminin düşük kesme hızlarında işlenen numunelerde olduğu gözlenmiştir. Kesme hızı arttıkça birinci deformasyon bölgesindeki sıcaklık da yükselmektedir [122]. Bu bölgedeki aşırı derece pekleşmiş BUE malzemesi sıcaklığın yükselmesine paralel olarak dinamik gerinme yaşanması, toparlanma ve yeniden kristalleşme safhalarından geçmektedir [16]. Sıcaklık yeniden kristalleşme sıcaklığına eriştiğinde aşırı derecede pekleşmiş BUE malzemesinin dayanımı aniden düşüş göstererek akma bölgesi (flow zone) oluşmakta ve BUE'nin yerini bu akma bölgesi almaktadır. BUE eğilimini engellemenin en kolay yolu, kesme hızını artırarak takım ile talaş arasında bir akma bölgesi oluşturmaktır [2,16]. Elektron tarama mikroskobu (SEM)'ile 50 m/dk lık kesme hızında işlenen deney numunelerinde kullanılan kesici uçlarda oluşan BUE'nin fotoğrafı Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Şekil 6.6 a'da düzgün olmayan BUE ve Şekil 6.6 b'de ise düzgün dağılmış BUE görülmektedir. Deney numunelerinin işlenmesi esnasında kullanılan diğer kesici uçların, elektron tarama mikroskobu (SEM)'ile elde edilen görüntüleri Ek C'de verilmiştir. Genel olarak Ek C'de deneylerin işlenmesi esnasında kullanılan kesici uçların SEM'ile elde edilen sonuçları incelendiğinde, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de de görüldüğü gibi kesme hızının artışı ile birlikte sıvanma eğiliminin ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Kesici uçlarda elde edilen BUE ve aşınma türleri Çizelge 6.5'de verilmiştir. Bu durum beklenen tarzda gerçekleşmiştir [2,16].

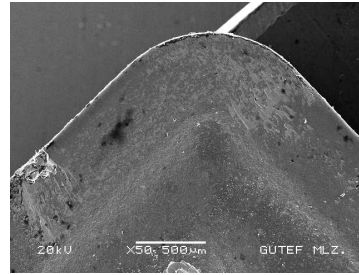
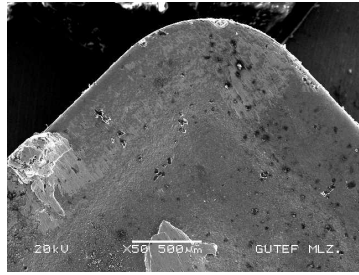


a

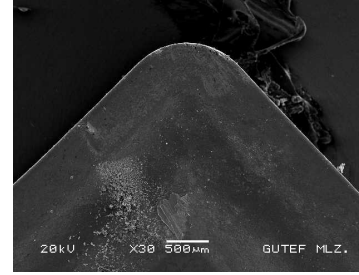
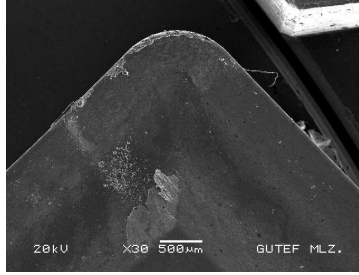


b

Şekil 6.6 Kesme Hızı 50 m/dk İle İşlenen Deney Numunesinde Kullanılan Kesici Uç Radyusu Üzerinde Oluşan BUE



Şekil 6.7 Kesme Hızı 75-100 m/dk İle İşlenen Deney Numunesinde Kullanılan Kesici Uç Radyusu



Şekil 6.8 Kesme Hızı 125-150 m/dk İle İşlenen Deney Numunesinde Kullanılan Kesici Uç Radyusu

Çizelge 6.5 Deneyler Esnasında Kullanılan Kesici Uçlardaki Aşınmalar

DENEY NO	V (Kesme Hızı m/dk)	f (ilerleme mm/dk)	a (talaş derinliği mm)	DEĞERLENDİRME
1	50	0,15	1,5	Uçta düzgün BUE var
2	75			Uçta çok az bir aşınma var
3	100			Uç temiz, en uçta çok az birikme var
4	125			Uç temiz
5	150			Uçta çok az çentiklenme var
6	50	0,20	1,5	BUE var
7	75			En uçta çentik var
8	100			Yan yüzeyde çok az BUE var
9	125			Uç temiz
10	150			Uç temiz
11	50	0,25	1,5	BUE bol miktarda en uçta çentik var
12	75			Yan yüzeyde az BUE var
13	100			Yan yüzeyde çok az BUE var
14	125			En uçta BUE çizgisi var
15	150			Uç temiz

Çizelge 6.5 Devamı

DENEY NO	V (Kesme Hızı m/dk)	f (ilerleme mm/dk)	a (talaş derinliği mm)	DEĞERLENDİRME
16	50	0,15	2	Kesici uçta BUE sonucu oluşan çentik var
17	75			Uç temiz
18	100			Uç temiz içerde ezilme var
19	125			Uç temiz içerde çok az birikme var
20	150			Uç temiz
21	50	0,20	2	Uçta krater aşınması, içerde ezilme var
22	75			Yan yüzeyde çentiklenme, içerde ezilme var
23	100			Uç temiz, kalıntılar var
24	125			Uç ve yan yüzeyde çentik var
25	150			Uç temiz
26	50	0,25	2	Yan yüzeyde yığılma var
27	75			Uç temiz içerde ezilme var
28	100			Uç temiz içerde ezilme var
29	125			Uç temiz içerde ezilme var
30	150			Uç temiz içerde ezilme var.

6.5 Farklı Parametrelerde İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Değerlendirilmesi

Talaş tipleri kesme hızı ve ilerleme miktarı, talaş derinliği ve işlenen çeliğin mikro yapısı ile kontrol edilebilir [122,133]. Talaş tiplerinin oluşumu, işlenebilirliğin değerlendirilmesinde faydalanan yardımcı bir kriterdir. İşlenen deney numunelerinden elde edilen talaşlar toplu olarak Şekil 6.9'da verilmiştir. Ek D'de ise talaş şekilleri daha ayrıntılı olarak verilmiştir.

				
Deney No:1 V=50, f=0,15, a=1,5	Deney No:2 V=75, f=0,15, a=1,5	Deney No:3 V=100, f=0,15, a=1,5	Deney No:4 V=125, f=0,15, a=1,5	Deney No:5 V=150, f=0,15, a=1,5
				
Deney No:6 V=50, f=0,20, a=1,5	Deney No:7 V=75, f=0,20, a=1,5	Deney No:8 V=100, f=0,20, a=1,5	Deney No:9 V=125, f=0,20, a=1,5	Deney No:10 V=150, f=0,20, a=1,5
				
Deney No:11 V=50, f=0,25, a=1,5	Deney No:12 V=75, f=0,25, a=1,5	Deney No:13 V=100, f=0,25, a=1,5	Deney No:14 V=125, f=0,25, a=1,5	Deney No:15 V=150, f=0,25, a=1,5
				
Deney No:16 V=50, f=0,15, a=2	Deney No:17 V=75, f=0,15, a=2	Deney No:18 V=100, f=0,15, a=2	Deney No:19 V=125, f=0,15, a=2	Deney No:20 V=150, f=0,15, a=2
				
Deney No:21 V=50, f=0,20, a=2	Deney No:22 V=75, f=0,20, a=2	Deney No:23 V=100, f=0,20, a=2	Deney No:24 V=125, f=0,20, a=2	Deney No:25 V=150, f=0,20, a=2
				
Deney No:26 V=50, f=0,25, a=2	Deney No:27 V=75, f=0,25, a=2	Deney No:28 V=100, f=0,25, a=2	Deney No:29 V=125, f=0,25, a=2	Deney No:30 V=150, f=0,25, a=2

Şekil 6.9 Farklı Kesme Parametrelerinde İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşları Görüntüleri

Kesme hızı 50 m/dk'da çıkan talaşlar incelendiğinde kesme yönünde kırılmayla oluşan talaşlardır. Bu tip talaşlara süreksiz talaş denilmektedir. Bu tür talaşlar gevrek malzemelerin işlenmesinde ya da sünek malzemelerin çok düşük kesme hızlarında işlenmesinde ortaya çıkmaktadır [132-134]. Aynı durum 150 m/dk'lık kesme hızında da oluşmuştur. Ancak yüksek basınç ve sıcaklık talaşın eğilmesine yol açmıştır. Diğer kesme hızlarına göre daha kıvrık talaş yapısı olduğu ve talaş kesitinin tırtıklı çıktığı gözlenmiştir. Kıvrılan talaşın deney numunesi yüzeyine zarar verdiği ve yüzey kalitesini etkilediği, değerlendirilmektedir. Talaşın tırtıklı çıkması aynı zamanda kesmenin de zorlaştığını ve kesme kuvvetinin arttığını göstermektedir. Belirtilen kesme hızında bazı durumlarda da BUE (talaş sıvanması) olduğu görülmüştür. BUE'nin oluşması da yüzey kalitesini olumsuz olarak etkilediği değerlendirilmektedir. Kesici takımın önünde talaş kaldırılan malzemenin sürekli deformasyonu ile sürekli talaş oluşur. Kesici takımın yüzeyi boyunca talaşın akışıyla devam eder. Bu tip talaşlar sünek malzemelerden genellikle yüksek hızlarda talaş kaldırılması sırasında oluşmaktadır [132-134]. Şekil 6.9'da incelendiğinde buna benzer olarak yüksek hızlarda sürekli talaş meydana geldiği görülebilir. İşlenen yüzey boyunca devamlı olarak çıkan talaşın kesici takım yüzeyine yapışmasıyla oluşan talaş tipine sıvanan talaş denilmektedir [132-134]. Bu tip talaş 1,3,6,8,11,12,13,16,26 numaralı deneylerde görülmektedir.

6.6 Farklı Parametrelerde İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Parçalarda Oluşan Kalıcı Gerilmelerin Değerlendirilmesi

Farklı kesme parametrelerinde işlenen deney numunelerinden katman kaldırma yöntemi ile elde edilen kalıcı gerilme değerleri tespit edilmiş ve tüm sonuçlar EK-E, bu sonuçlara ait grafikler EK-F de verilmiştir. Çizelge 6.6'da kalıcı gerilme numunelerinin geometrik bilgileri yer almaktadır. Literatürde; kalıcı gerilmelerin yoğun olarak yüzeyde bulunabileceği, yüzey altındaki tabakalardaki seyri de önemli olmakla beraber yüzeyden 0,3 mm derine inmenin yeterli olacağı belirtilmiştir [30,35,36,53,79]. Kalıcı gerilmelerin boyuna etkilendiği, aksel gerilmelerin çevresel gerilmelerden daha etkili olduğu ve derinlik arttıkça azaldığı da belirtilmektedir [75,78,79,80,81,83]. Yapılan çalışmada Çizelge 6.6'da belirtildiği gibi numunelerin ortalaması alınmış ve yüzeyden 0,34 mm derinliğe inmenin yeterli olacağı değerlendirilmiştir. Her bir deney numunesinde kalıcı gerilme değerlerini belirlemek 45 dakika sürmüştür. İlk olarak yüzeydeki gerilme ölçülmüş ve 20 sn aralıklar ile 0,0026 mm artırarak toplam 0,3489 mm derinliğe kadar 135 adet ölçüm sonucu alınmıştır. Elde edilen bu verilerin, Microsoft Excel programı yardımı ile grafikleri oluşturulmuştur. Yapılan tüm çalışmalarda olduğu gibi yüzeyde basma kalıcı gerilmeleri, yüzeyden içeri doğru ilerledikçe çekme kalıcı gerilmelerine doğru bir dönüşümün olduğu görülmüştür. Herhangi bir işlemeye tabi tutulmayan ham deney numunesinin üzerindeki gerilmeler Şekil 6.10' da gösterilmiştir. Deney numunesinin yüzeyinde -1017,97 MPa'lık bir basma kalıcı gerilmesi varken, yüzeyden 0,0258 mm derinlikte 19,74 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüşmüş ve derinlik arttıkça çekme kalıcı gerilmesinin değeri artarak 810,53 MPa'ya ulaşmıştır. Görüldüğü gibi AISI 304 östenitik paslanmaz çelikte büyük miktarlarda çekme kalıcı gerilmesi bulunmaktadır. Bu durumda makine elemanının ömrünü olumsuz etkileyeceği bilinmektedir. Farklı işleme parametreleri ile bu kalıcı gerilmelerin değerleri ve nasıl değiştikleri Çizelge 6.7'de verilmiştir. Yüzeydeki basma kalıcı gerilmesinin değerinin -136,717 MPa ile -1876,7 MPa arasında değiştiği, çekme kalıcı gerilmesinin ise 220,36 MPa ile 1,03 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir. İşlenen bütün numunelerde yüzeyde basma kalıcı gerilmeleri mevcutken, yüzeyden katmanlar kaldırıldıkça, yaklaşık yüzeyden 0,0465 mm derinlikte hızla çekme kalıcı gerilmelerine dönüştüğü görülmüştür. İşlenmemiş ve 30

farklı kesme parametresinde işlenen deney numunelerinde oluşan kalıcı gerilmeler Şekil 6.11’de birlikte gösterilmiştir.

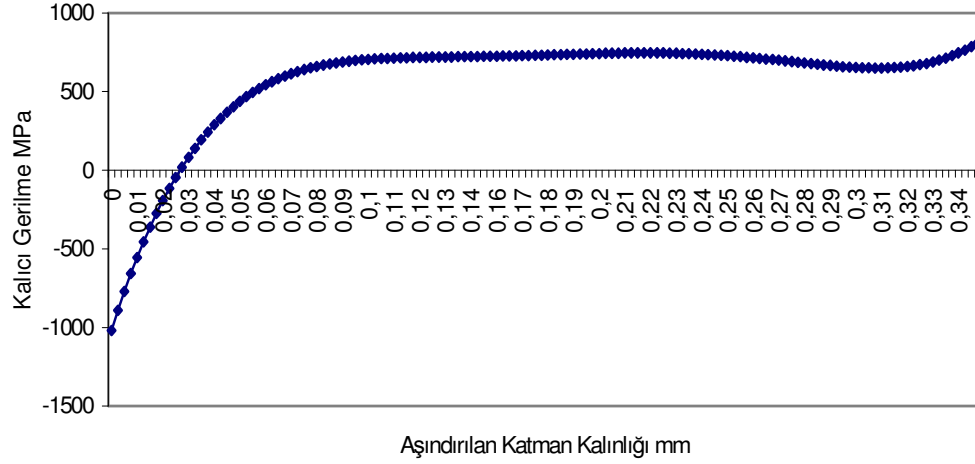
Çizelge 6.6 Deney Numunelerinin Geometrik Bilgileri

Deney No:	Aşınma A	Genişlik b	Boy l	Kalınlık h
1	0,32	7,23	27,82	2,90
2	0,37	7,26	27,77	3,01
3	0,333333	7,5	27,78	2,88
4	0,32	7,52	27,96	3,01
5	0,353333	7,28	27,69	2,19
6	0,403333	7,35	27,1	2,47
7	0,246667	7,28	27,17	2,59
8	0,296667	6,87	31,58	2,69
9	0,563333	7,4	24,04	3,37
10	0,33	7,2	28,07	2,25
11	0,396667	7,35	28,33	2,54
12	0,32	7,22	27,68	2,74
13	0,326667	7,28	27,22	2,73
14	0,296667	7,24	28,24	2,27
15	0,39	7,3	24,74	2,37
16	0,283333	7,2	25,93	2,67
17	0,27	7,58	27,95	3,82
18	0,256667	7,14	27,31	3,54
19	0,346667	7,43	28,34	2,99
20	0,353333	7,17	25,87	3,66
21	0,33	7,55	25,51	3,33
22	0,3	7,46	28,32	2,82
23	0,346667	7,07	27,89	2,75
24	0,32	7,81	27,59	3,35
25	0,25	7,15	28,16	2,79
26	0,323333	7,05	27,05	3,11
27	0,5	7,14	26,98	3,06
28	0,423333	7,53	27,42	2,92
29	0,443333	7,1	26,76	3,02
30	0,306667	7,12	27,7	2,78
31	0,496667	7,76	29,5	5,50
Ort	0,348925	7,307742	26,82161	
St.Sp	0,074582	0,209009	3,910553	

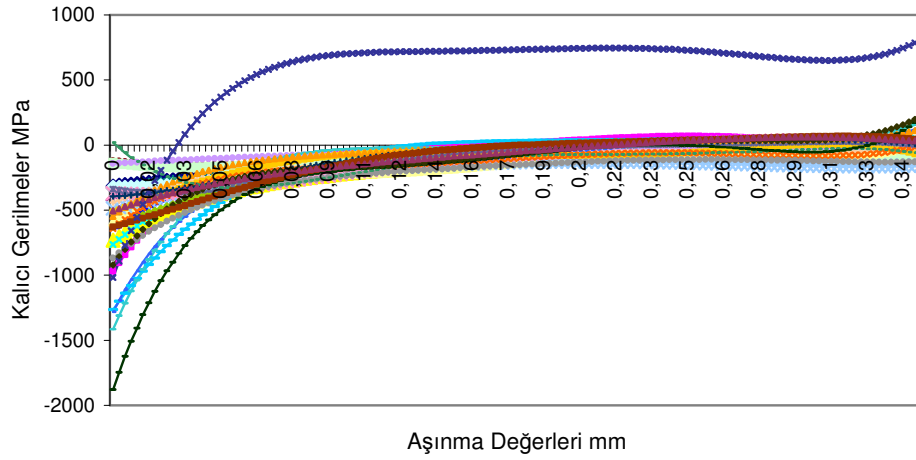
6.6.1 İşlenmemiş Deney Numunesi İle İşlenen Bütün Deney Numunelerinin Arasındaki Kalıcı Gerilmelerin Genel Değerlendirilmesi

İşlenmemiş numunede Şekil 6.10’da da görüldüğü gibi yüzeyde basma kalıcı gerilmesi varken yüzeyin altına inildikçe artan bir çekme kalıcı gerilmesi olduğu tespit edilmiştir. Talaş kaldırma durumunda iş malzemesine ve takım geometrisine

bağlı olarak kalıcı gerilmeler basma ya da çekme olabilmektedir. Kalıcı gerilmelerin işlenen yüzeylerde çekmeden basmaya doğru değişebileceği literatürde belirtilmektedir [35,38,39,40].



Şekil 6.10 İşlenmemiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler



Şekil 6.11 Farklı Parametrelerde İşlenmiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

Şekil 6.11’de işlenen deney numunelerinin hepsinde yüzeyde basma kalıcı gerilmeleri oluşmuş ve derinlere inildikçe kalıcı gerilme değerleri sıfıra doğru yaklaşmıştır. Daha sonra artarak çekme kalıcı gerilmelerine doğru yöneldiği

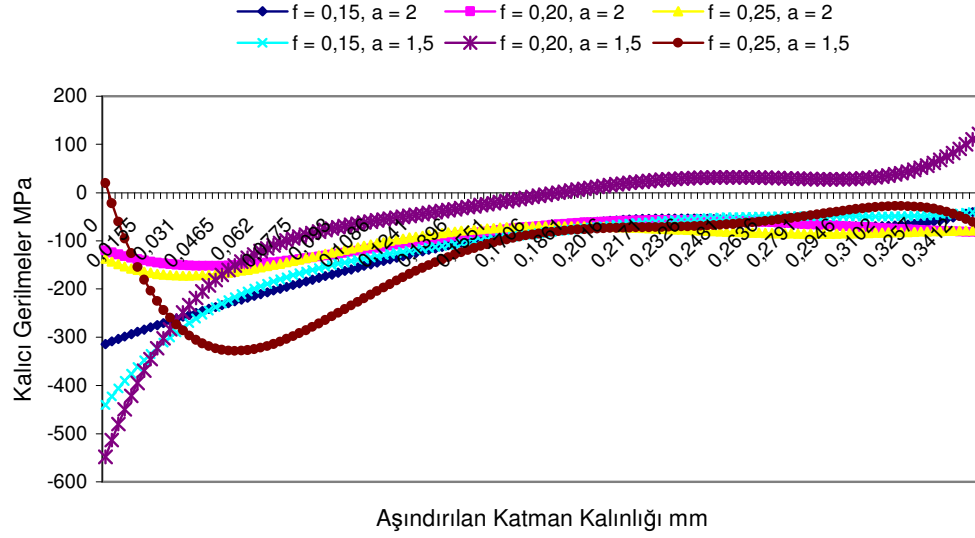
görülmektedir. Malzemelerden talaş kaldırmanın kalıcı gerilme yapısını olumlu yönde etkilediği Şekil 6.11’de görülmektedir.

Çizelge 6.7 Deneylerden Elde Edilen En Büyük ve En Küçük Kalıcı Gerilme Değerleri

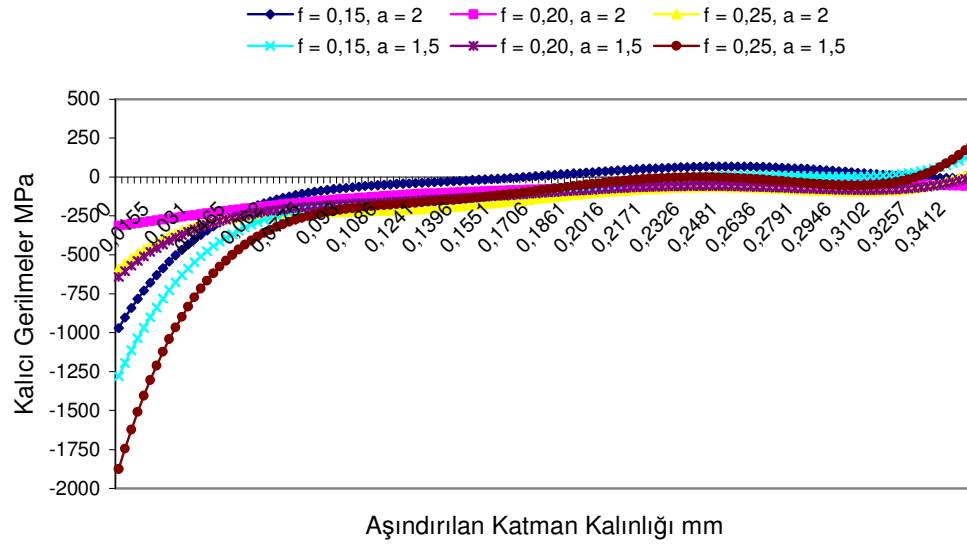
DENEY NO	V (m/dk)	f (mm/d)	a (mm)	Ölçülen Kalıcı Gerilme Değerleri MPa Max/Min
1	50	0,15	1,5	-440,3196 / -39,3471
2	75			-1281,588 / 140,3265
3	100			-1414,137 / 172,7888
4	125			-631,7323 / 42,5637
5	150			-513,8161 / -80,1670
6	50	0,20	1,5	-548,1347 / 121,0834
7	75			-641,4634 / -2, 4825
8	100			-338,4304 / 2,7785
9	125			-867,242 / -127,8523
10	150			-394,4667 / 5,5921
11	50	0,25	1,5	19,4733 / -68,4001
12	75			-1876,697 / 205,9169
13	100			-921,494 / 220,3629
14	125			-629,4194 / 41,3362
15	150			-504,0651 / 26,7794
16	50	0,15	2	-35,496/-314,287
17	75			-969,3485 / -2,9364
18	100			-731,9524 / -13,10
19	125			-764,4909 / 66,59
20	150			-375,2336 / 16,05
21	50	0,20	2	-119,8313 / -81,99
22	75			-314,3231 / -61,11
23	100			-631,5878 / 1,03
24	125			-1265,399 / 47,26
25	150			-324,3317 / -50,53
26	50	0,25	2	-136,7171 / -78,84
27	75			-588,0257 / 29,24
28	100			-487,0205 / -155,43
29	125			-370,5768 / -15,14
30	150			-142,4631 / -16,75
31	İşlenmemiş Deney Numunesi			-1017,973 / 810,5374

6.6.2 Kesme Hızının Sabit Tutulup İlerleme Hızı İle Talaş Derinliğinin Artırılmasında Oluşan Kalıcı Gerilmelerin Değerlendirilmesi

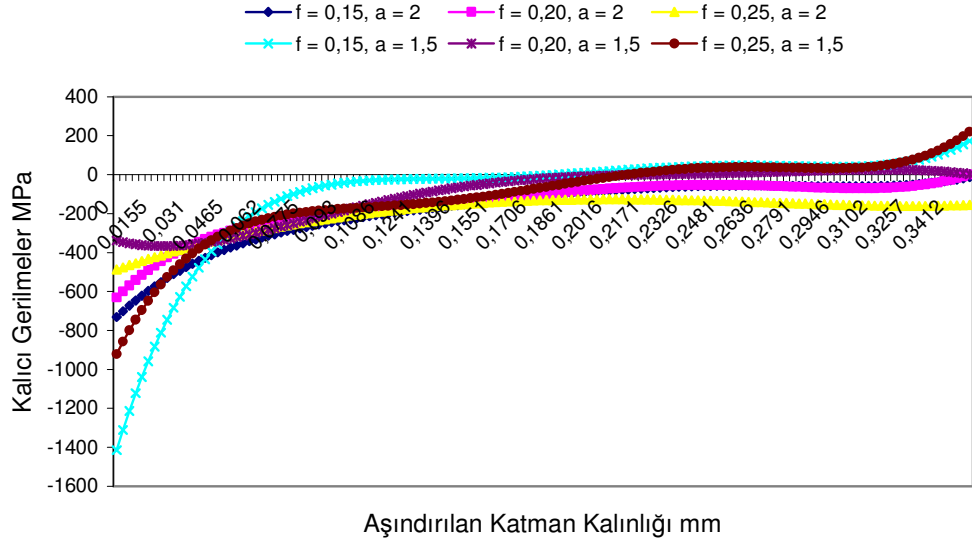
Şekil 6.12 50 m/dk, Şekil 6.13’de 75 m/dk, Şekil 6.14’de 100 m/dk, Şekil 6.15’de 125 m/dk, Şekil 6.16’da 150 m/dk kesme hızında elde edilen kalıcı gerilme grafikleri görülmektedir.



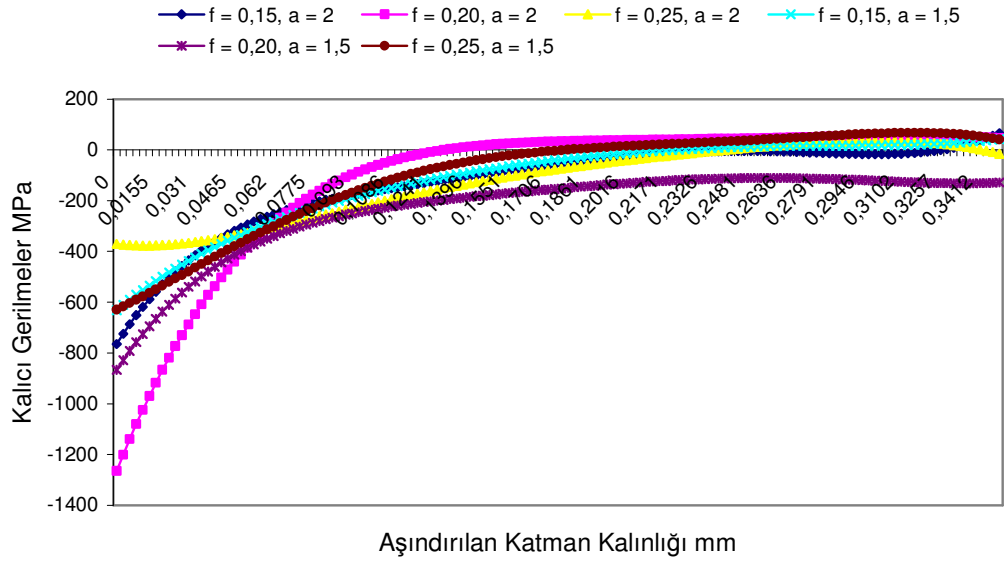
Şekil 6.12 Kesme Hızı 50 m/dk İle İşlenmiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler



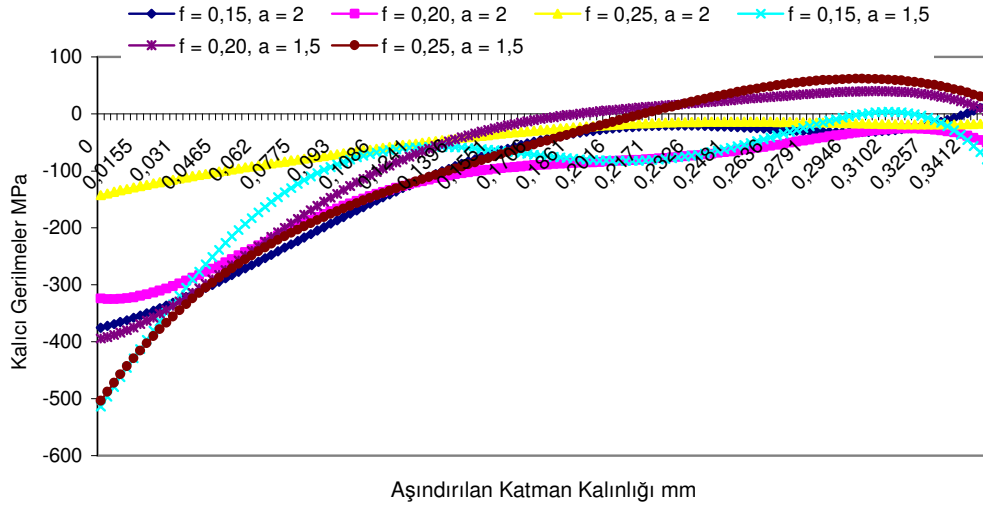
Şekil 6.13 Kesme Hızı 75 m/dk İle İşlenmiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler



Şekil 6.14 Kesme Hızı 100 m/dk İle İşlenmiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler



Şekil 6.15 Kesme Hızı 125 m/dk İle İşlenmiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

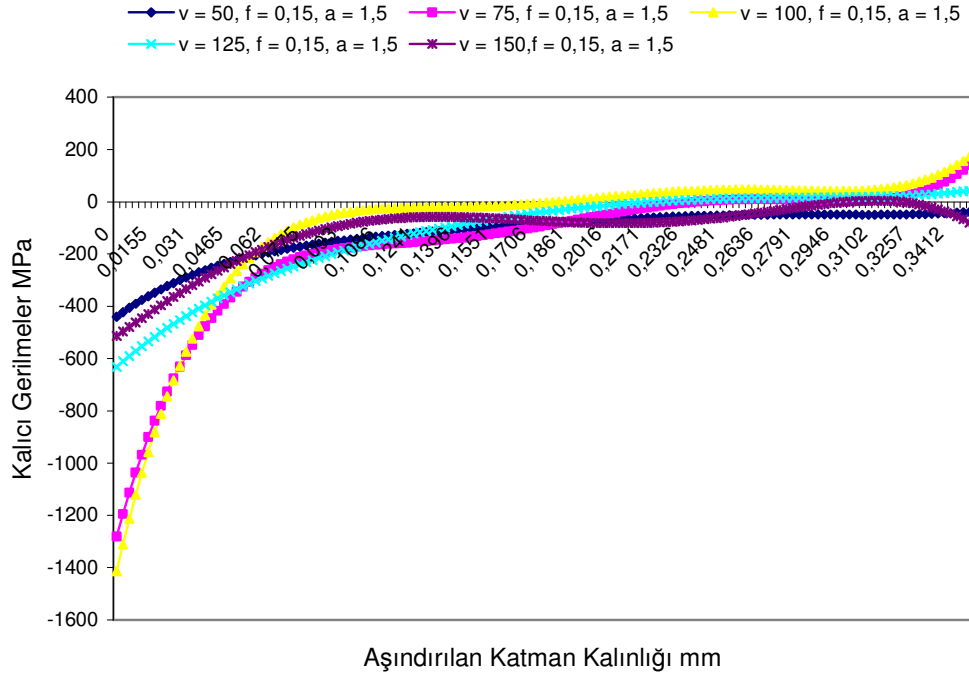


Şekil 6.16 Kesme Hızı 150 m/dk İle İşlenmiş Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16’da kesme hızları sabit tutulup ilerleme ve talaş derinlikleri artırılmıştır. Grafikler incelendiğinde beş grafiğinde benzer bir eğilim sergilediği, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin kalıcı gerilmeyi belirgin bir şekilde etkilediği, grafiklerin hepsinde yüzeyde basma kalıcı gerilmeleri varken, yüzey altına inildiğinde bu gerilmelerin sıfıra doğru yaklaştığı ve daha sonrada artarak çekme kalıcı gerilmelerine dönüştüğü görülmektedir. İlerleme hızının artması ile basma kalıcı gerilme değerlerinin azaldığı, çekme kalıcı gerilme değerlerinin arttığı, 0,15 mm/dk lık ilerleme hızında deney numunelerinde ortalama -743,68 MPa’lık 0,20 mm/dk’da -544,51 MPa’lık 0,25 mm/dk’da ise -546,12 MPa’lık basma kalıcı gerilmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin hepsinde azalma olurken içlerinde bazı deney numunelerinde ilerlemenin artması ile gerilmelerde de artma meydana gelmiştir. Bu durum deneylerin işlenmesi esnasında titreşim olması ya da işleme prosesi tamamlandıktan sonra deney numunesinin gerilmeyi değiştirebilecek etkilere maruz kalmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Talaş derinliğinin artmasının da basma kalıcı gerilmelerini azalttığı görülmektedir. Talaş derinliğinde 1,5 mm olduğu işleme şartlarında ortalama -723,23 MPa’lık bir basma kalıcı gerilmesi oluşurken, talaş derinliğinin 2 mm arttırıldığında deney numunelerinde ortalama -502,36 MPa’lık bir basma kalıcı gerilmeleri oluşmuştur. Bu durum literatürde bazı çalışmalarla paralellik göstermektedir [50,51,52,53,75,78,79,80,81,83].

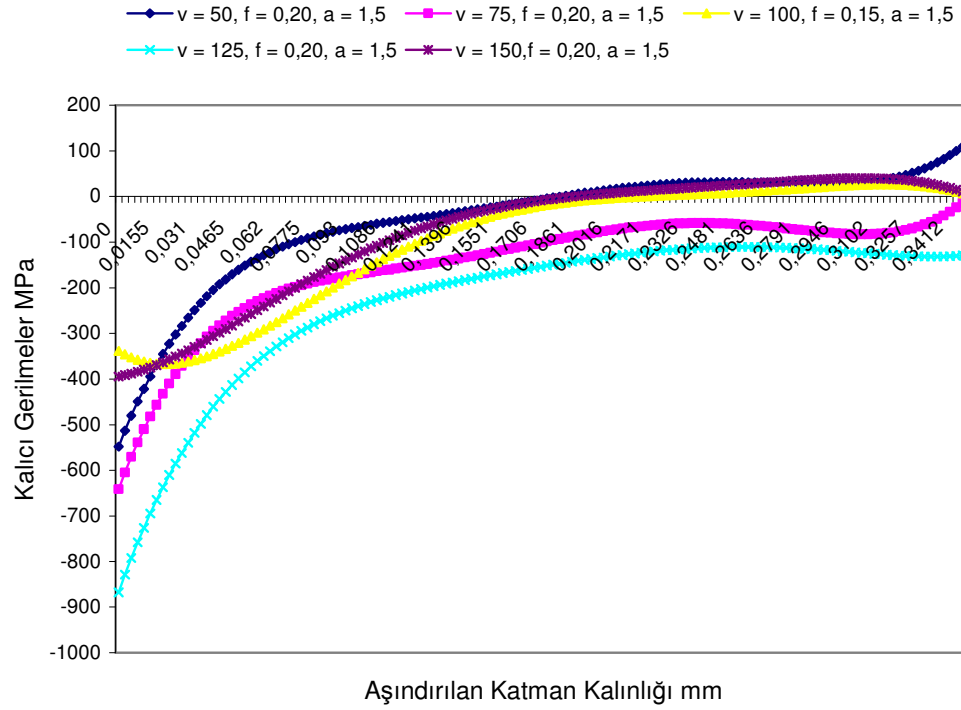
6.6.3 İlerleme Hızı İle Talaş Derinliğinin Sabit Tutularak Kesme Hızının Artırılmasında Oluşan Kalıcı Gerilmelerin Değerlendirilmesi

Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21’de ilerleme ve talaş derinlikleri sabit tutulup kesme hızları artırılmıştır.



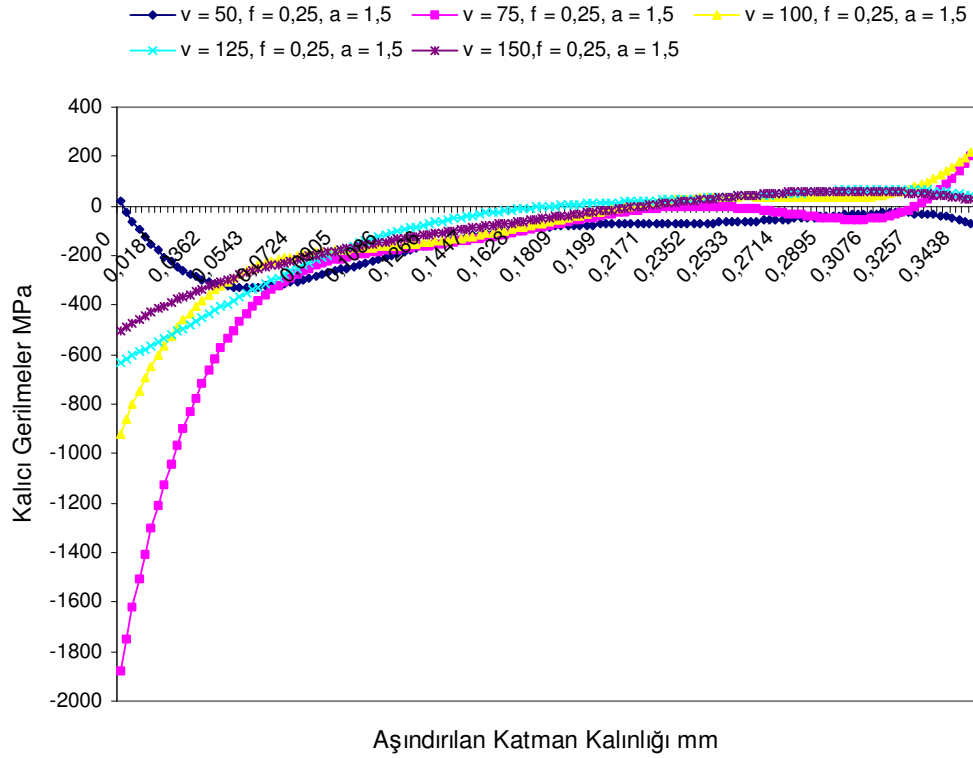
Şekil 6.17 Kesme Hızının 50 m/dk’dan 150 m/dk’ya Artırıldığı İlerlemenin 0,15 mm/d ve Talaş Derinliğinin 1,5 mm Olduğu Durumdaki Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

Şekil 6.17 incelendiğinde ise kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,15 mm/d, talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu işleme şartında numune yüzeylerinde -440,31 MPa ile -39,34 MPa lık bir basma kalıcı gerilmesinin olduğu, sırası ile 75 m/dk’da -1281,58 MPa’ lık basma kalıcı gerilmesinden 140,32 MPa’ lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 100 m/dk’da -1414,13 MPa’ lık basma kalıcı gerilmesinden 172,78 MPa’ lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 125 m/dk’da -631,73 MPa’ lık basma kalıcı gerilmesinden 42,56 MPa’ lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 150 m/dk’da -513,81 ile -80,16 MPa’lık bir basma kalıcı gerilmelerinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.18 Kesme Hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya Artırıldığı İlerlemenin 0,20 mm/d ve Talaş Derinliğinin 1,5 mm Olduğu Durumdaki Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

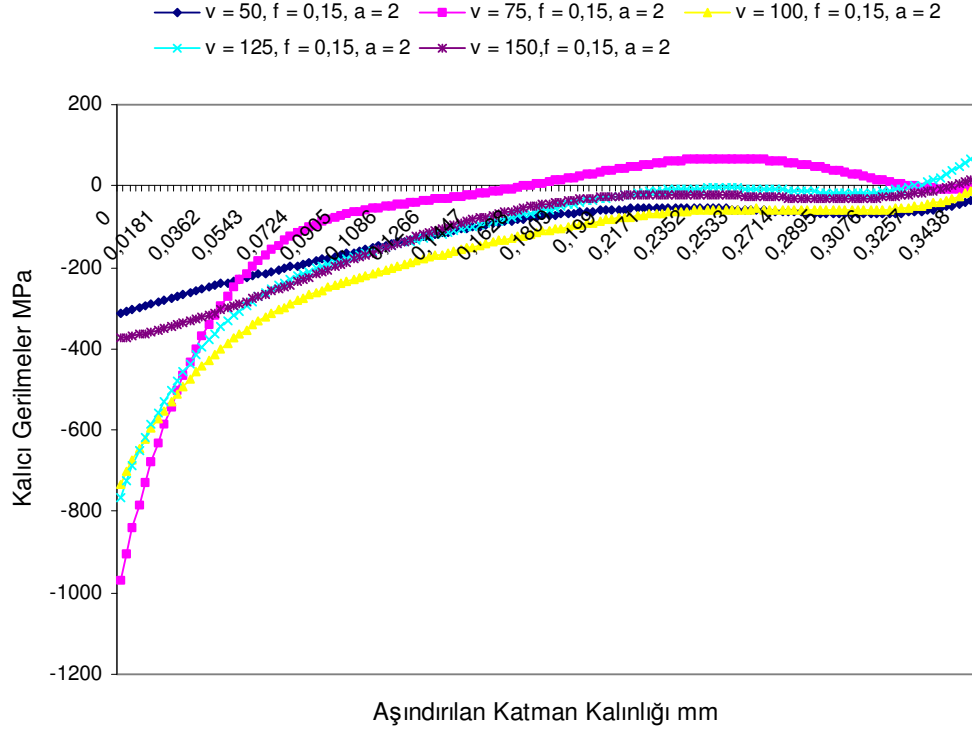
Kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,20 mm/d, talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu işleme şartında -548,13 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 121,08 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 75 m/dk'da -641,46 ile -2,48 MPa'lık basma kalıcı gerilmesin oluştuğu, 100m/dk'da -338,43 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 2,77 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 125 m/dk'da -867,24 MPa'ile -127,85 MPa'lık basma kalıcı gerilmesi oluştuğu, 150 m/dk'da -394,46 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 5,59 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6.19 Kesme Hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya Artırıldığı İlerlemenin 0,25 mm/d ve Talaş Derinliğinin 1,5 mm Olduğu Durumdaki Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

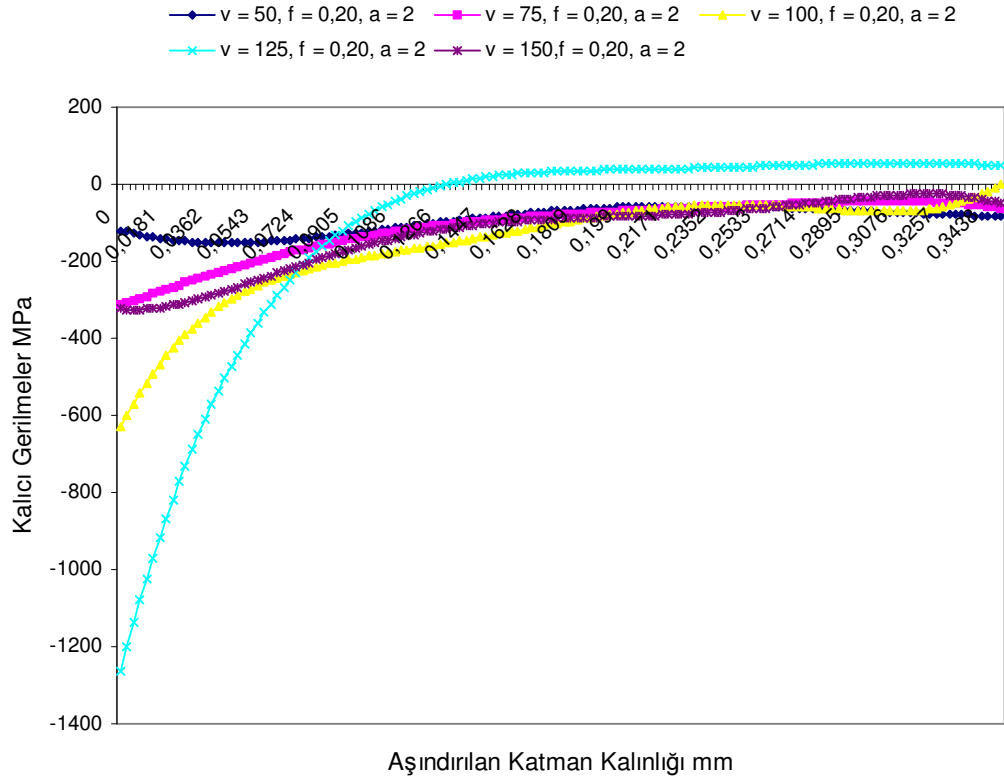
Kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,25 mm/d, talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu işleme şartında 19,47 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesinden -68,40 MPa'lık basma kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 75 m/dk'da -1876,69 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 205,91 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 100 m/dk'da -921,49 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 220,36 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 125 m/dk'da -629,41 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 41,33 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 150 m/dk'da -504,06 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 26,77 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü tespit edilmiştir. Ancak kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,25 mm/d, talaş derinliğinin 1,5 mm olduğu deneyde sonuç beklenenin aksine yüzeyde çekme kalıcı gerilmesi şeklinde çıkmıştır. Kesici ucun kalıcı gerilme üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle kesici uç elektron tarama mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. İnceleme sonucu kesici uçta çentik ve bol miktarda sıvanma tespit

edilmiştir. Bu durumda kesici takım uygun bir kesme yapamadığından kesici takım iş parçası sürtünmesiyle sıcaklık artışının olması ve bununda yüzeyde çekme kalıcı gerilmesi oluşturduğu düşünülmektedir.



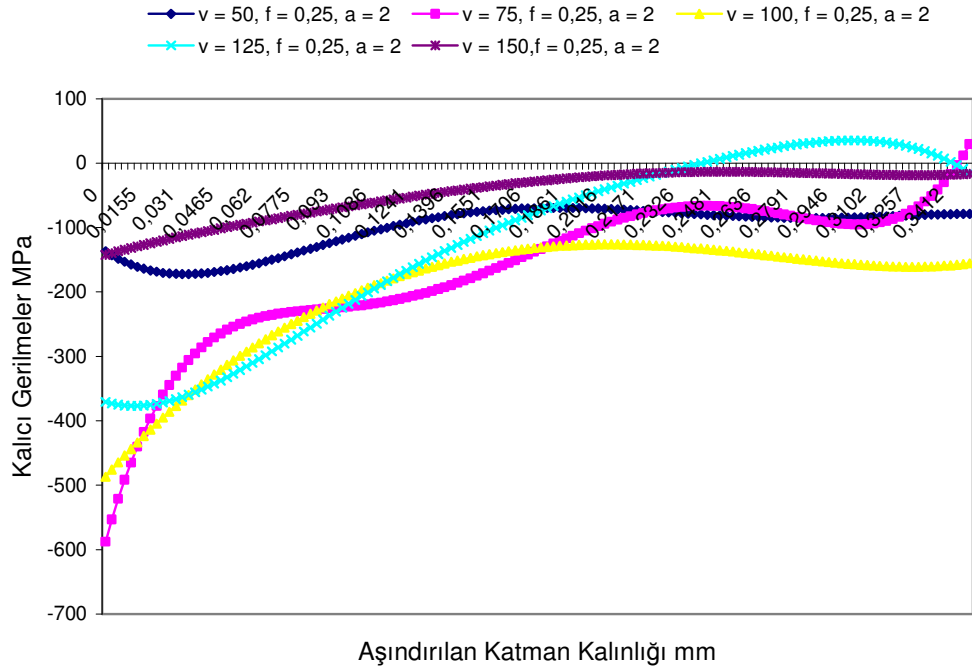
Şekil 6.20 Kesme Hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya Artırıldığı İlerlemenin 0,15 mm/d ve Talaş Derinliğinin 2 mm Olduğu Durumdaki Deneysel Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

Şekil 6.20 incelendiğinde ise kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,15 mm/d, talaş derinliğinin 2 mm olduğu işleme şartında -314,28 MPa ile -35,49 MPa lık bir basma kalıcı gerilmesinin oluştuğu, sırası ile 75 m/dk'da -969,34 MPa ile -2,93 MPa basma kalıcı gerilmesi oluştuğu, 100m/dk'da -731,95 MPa ile -13,10 MPa lık basma kalıcı gerilmesi oluştuğu, 125 m/dk'da -631,73 MPa lık basma kalıcı gerilmesinden 42,56 MPa lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 150 m/dk'da -513,81 ile -80,16 MPa lık bir basma kalıcı gerilmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.21 Kesme Hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya Artırıldığı İlerlemenin 0,20 mm/d ve Talaş Derinliğinin 2 mm Olduğu Durumdaki Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

Şekil 6.21'de ise kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,20 mm/d, talaş derinliğinin 2 mm olduğu işleme şartında numune yüzeylerinde -119,83 MPa ile -81,99 MPa basma kalıcı gerilmesinin oluştuğu, sırası ile 75 m/dk'da -314,32 MPa ile -61,11 MPa basma kalıcı gerilmesi oluştuğu, 100 m/dk'da -631,58 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 1,03 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 125 m/dk'da -1265,39 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 47,26 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 150 m/dk'da -324,33 ile -50,53 MPa'lık bir basma kalıcı gerilmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.22 Kesme Hızının 50 m/dk'dan 150 m/dk'ya Artırıldığı İlerlemenin 0,25 mm/d ve Talaş Derinliğinin 1,5 mm Olduğu Durumdaki Deney Numunesi Üzerindeki Kalıcı Gerilmeler

Şekil 6.22'de ise kesme hızı 50 m/dk, ilerleme hızı 0,25 mm/d, talaş derinliğinin 2 mm olduğu işleme şartında -136,71 MPa ile -78,84 MPa lık bir basma kalıcı gerilmesinin oluştuğu, sırası ile 75 m/dk'da -588,02 MPa'lık basma kalıcı gerilmesinden 29,24 MPa'lık çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü, 100m/dk'da -487,02 MPa ile -155,43 MPa'lık basma kalıcı gerilmesi oluştuğu, 125 m/dk'da -370,57 MPa ile -15,14 MPa'lık basma kalıcı gerilmesi oluştuğu, 150 m/dk'da -142,46 ile -16,75 MPa'lık bir basma kalıcı gerilmelerinin oluştuğu tespit edilmiştir.

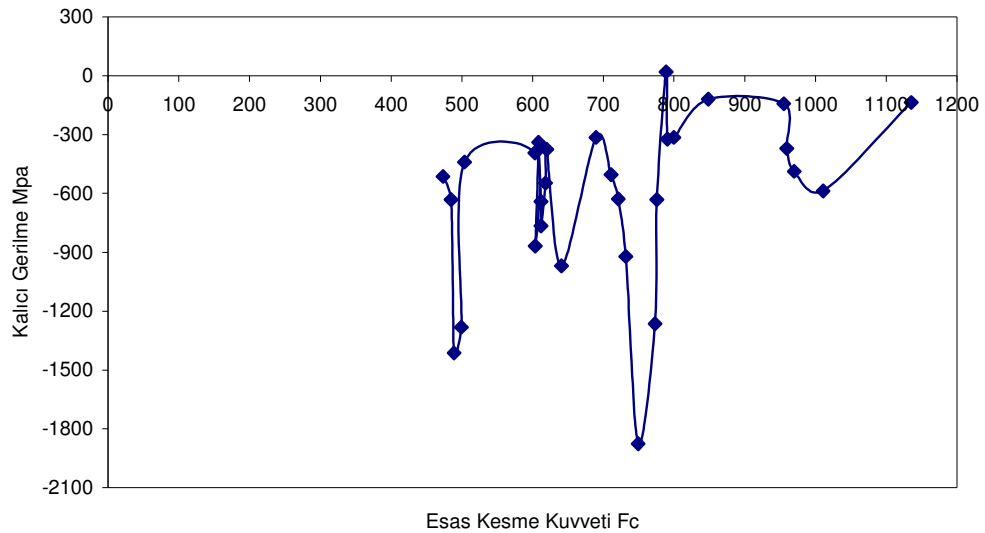
Kesme hızının artması ile çekme kalıcı gerilmelerinin arttığı literatürde ifade edilmektedir [56,57,75,79,80,81,83]. Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22 incelendiğinde kesme hızının artması ile çekme kalıcı gerilmelerinin belirli bir derinlikten sonra arttığı görülmüştür. Kesme hızının artması ile yüzeydeki basma kalıcı gerilmelerinin hızla çekme kalıcı gerilmelerine yöneldiği değerlendirilmektedir. Ayrıca kesme hızı 50 m/dk'da -256,13 MPa, 75 m/dk'da -944,5 MPa, 100 m/dk'da -754,1 MPa, 125 m/dk'da -754,5 MPa, 150 m/dk'da -375 MPa'lık ortalama bir basma kalıcı gerilmeleri oluşmuştur. Kesme hızının belirli bir

değere kadar artması ile basma kalıcı gerilmeleri artarken belirli bir kesme hızından sonra azalma eğilimi göstermiştir. Şekil 6.20 ile Şekil 6.22 arasındaki grafikler beklenen gerilme dağılım modelini verdiği görülmüştür.

Tüm değerlerin birbiri arasında gösterdiği ufak sapmaların nedeni olarak; deney numunesinin işlenmesi esnasında meydana gelen titreşimler, deney numunelerinde kalıcı gerilmeyi etkileyecek çarpma düşme vb. gibi olumsuz etkilerin olabileceği, katmanların kaldırılması esnasında kaplama maddesinin numune yüzeyinden ayrılması ile numunenin daha fazla akım çekmesi ve daha hızlı bir aşınma olmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

6.6.4 Esas Kesme Kuvveti İle Kalıcı Gerilmeleri Arasındaki İlişki

Yapılan deneylerde esas kesme kuvveti ile kalıcı gerilme arasındaki ilişki de araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre en büyük kesme kuvveti olan 1135,22 N da yüzeyde -136,717 MPa'lık basma kalıcı gerilmesi oluşurken, en küçük kesme kuvveti olan 473,23 N da -513,816 MPa'lık bir basma kalıcı gerilmesi oluşmuştur. Bununla ilgili kesme kuvveti ve kalıcı gerilme dağılımını gösteren grafik Şekil 6.23'de verilmiştir.



Şekil 6.23 Esas Kesme Kuvveti İle Kalıcı Gerilme Arasındaki Dağılım

Şekil 6.23 incelendiğinde esas kesme kuvveti ile kalıcı gerilme arasında bir ilişki kurmak mümkün olmamıştır. Kalıcı gerilmenin kesme kuvvetine göre değil kesme parametrelerine göre değişim sergilediği söylenebilmektedir.

6.6.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ve BUE Oluşumu İle Kalıcı Gerilmeler Arasındaki İlişki

Yüzey pürüzlülüğü ile kalıcı gerilme arasında ilişki araştırılmış ve çok anlamlı bir sonuç bulunmamasına karşın yüzey kalitesinin en iyi olduğu üç deney numunesinde yüzeyde ortalama -787,86 MPa'lık kalıcı gerilme tespit edilirken, yüzey kalitesi en kötü üç deney numunesinde ise ortalama -97,34 MPa'lık kalıcı gerilme tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirdiğimizde de basma kalıcı gerilme değerini azaltmasıyla yüzey kalitesinin kötü çıktığı görülmüştür. Bu konuda Henriksen [38] kalıcı gerilmenin yüzey kalitesini bozacağını belirtmiştir. Kesici uçta BUE'nin oluşması ile kalıcı gerilme arasındaki ilişkide ise genelde BUE oluşan deney numunelerinde diğerlerine göre daha büyük basma kalıcı gerilme değerleri tespit edilmiştir.

6.6.6 Mevcut Olan Eşdeğer Kalıcı Gerilme Değerinin Teorik Olarak Hesaplanması

Farklı parametrelerde işlenen deney numuneleri tel erozyon tezgahında kesilmeden önce çapları ölçülmüştür. Şekil 5.5'deki gibi tel erozyon tezgahında kalıcı gerilmelerin belirleneceği deney numuneleri çıkarıldıktan sonra çaplar tekrar ölçülmüştür. Çizelge 6.8'de görüldüğü gibi deney numunelerinin hepsinde kesildikten sonra çaplarında % 2-3'lük bir büyüme olmuştur. Bunun nedeni ise deney numunesinin üzerindeki çekme kalıcı gerilmelerin bir kısmının serbest kalmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Çaplarda küçülme söz konusu olsa idi basma kalıcı gerilmelerinin oluştuğu söylenebilirdi. Bu oluşan gerilmeye mevcut olan çevresel eşdeğer gerilme denilmektedir ve Eşitlik 6.4 ile hesaplanabilmektedir [135].

$$\sigma = E \cdot t \left(\frac{1}{D_0} \cdot \frac{1}{D_1} \right) \quad (6.4)$$

Bu eşitlikte;

σ : Toplam gerilme N/mm²

E: Elastikiyet modülü N/mm²

t: Et kalınlığı mm

D₀: Kesilmeden önceki çap mm

D₁: Kesildikten sonraki çap mm'dir.

Çizelge 6.8 Mevcut Olan Eşdeğer Kalıcı Gerilmeler

Deney No	V (Kesme Hızı m/dk)	f (İlerleme mm/dk)	a (Talaş Derinliği mm)	Kesilmeden Önceki Çap mm	Kesildikten Sonraki Çap mm	Mevcut Olan Eşdeğer Kalıcı Gerilme N/mm ²
1	50	0,15	1,5	57,60	57,90	88,604
2	75			57,58	57,64	17,807
3	100			57,58	57,60	5,939
4	125			57,56	57,69	38,561
5	150			57,51	57,67	47,518
6	50	0,20	1,5	57,48	57,59	32,731
7	75			57,53	57,90	109,412
8	100			57,55	57,70	44,494
9	125			57,55	57,94	115,207
10	150			57,59	57,89	88,635
11	50	0,25	1,5	57,04	57,64	179,756
12	75			57,20	57,40	60,001
13	100			57,29	57,52	68,749
14	125			57,36	57,61	74,519
15	150			57,50	57,70	59,377
16	50	0,15	2	56,57	56,74	52,168
17	75			56,51	56,81	92,046
18	100			56,55	56,88	101,055
19	125			56,61	56,91	91,722
20	150			56,70	56,90	61,062
21	50	0,20	2	56,95	57,00	15,171
22	75			56,80	57,06	79,018
23	100			56,86	57,07	63,744
24	125			56,83	57,10	81,957
25	150			56,57	56,62	15,376
26	50	0,25	2	56,55	56,79	73,611
27	75			56,51	56,95	134,67
28	100			56,57	56,76	58,285
29	125			56,53	56,83	91,981
30	150			56,56	56,76	61,364
31	İşlenmemiş deney numunesi			61,07	61,39	84,073

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuç

AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin farklı kesme parametreleri ile dış silindirik tornalanma işleminden sonra, deney numunelerinin yüzeyinde ve yüzeyin 0,34 mm derinliğine kadar yapılan ölçümlerin sonucu kalıcı gerilmeler ile ilgili aşağıda belirtilen sonuçlara varılmıştır.

a. Yüzey ve yüzey altındaki kalıcı gerilmeler katman kaldırma yöntemi ile tespit edilebilmektedir.

b. İşlenmemiş (ham) deney numunesinde çekme kalıcı gerilmelerinin hakim olduğu belirlenmiştir. Bu durumda makine elamanın yorulmaya bağlı ömründe olumsuz etki yaratacağı bilinmektedir.

c. İşleme yöntemlerinin kalıcı gerilmeyi olumlu ya da olumsuz olarak etkilediği tespit edilmiştir.

ç. Tornalama yöntemi ile makine parçalarının imalatında işlenmiş yüzeylerde yüzeyde -1876 Mpa ile -137 Mpa arasında değişen basma kalıcı gerilmelerinin olduğu tespit edilmiştir.

d. Farklı kesme parametreleri ile işlenen 30 adet deney numunesi üzerinde yapılan ölçümler neticesinde yüzeydeki basma kalıcı gerilmelerinin belirli bir derinlikten sonra sifıra doğru yaklaştığı ve daha derinlere inildikçe çekme kalıcı gerilmelerine dönüştüğü tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak da yapılan talaş kaldırma işleminin haddelenmeden kalan aşırı deforme olmuş katmanı tamamen kaldırmadığı ve talaş kaldırma işleminin parçada hafif temperleme etkisi yaptığı değerlendirilmektedir. Ayrıca malzemenin yüksek kesme hızlarında hızlı deformasyona uğramasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

e. Yüzeydeki basma kalıcı gerilmelerinin, katman kaldırılması ile ilk olarak 0,1318 mm derinlikte çekme kalıcı gerilmesine dönüştüğü görülmüştür.

f. Basma kalıcı gerilmelerinin yorulma ömrü üzerindeki etkisini maksimumda tutacak en uygun kesme hızının sırası ile 75 m/dk, 100 m/dk ve 125 m/dk olduğu

tespit edilmiştir. Bu kesme hızlarında en büyük basma kalıcı gerilmeleri tespit edilmiştir. Kesme hızının belirli bir değere kadar artması ile yüzeydeki basma kalıcı gerilme değerleri artarken belirli bir değerden sonra azalma sergilemektedir.

g. Farklı kesme hızı ve talaş derinliklerinde en uygun ilerleme hızının 0,20 mm/d olduğu, anılan ilerleme hızında daha büyük basma kalıcı gerilmelerin elde edildiği tespit edilmiştir.

ğ. Talaş derinliğinin küçük olmasının daha büyük basma kalıcı gerilmelerine yol açtığı, talaş derinliğinin artırılmasının basma kalıcı gerilmelerini azalttığı ve çekme kalıcı gerilmelerine yönelttiği tespit edilmiştir.

h. Kesme hızı 50 m/dk'da oluşan basma kalıcı gerilmeleri değerinin daha yüksek kesme hızlarında diğerlerine göre düşük olduğu, hatta bir deneyde çekme kalıcı gerilmesinin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 50 m/dk kesme hızında 0,25 mm/d ilerleme hızı ile 1,5 mm talaş derinliği kullanılarak işlenmesinin kalıcı gerilmeler açısından uygun olmadığı tespit edilmiştir.

ı. En uygun işleme şartının ise 75 m/dk kesme hızı, 0,20 mm/d ilerleme hızı ile 1,5 mm talaş derinliğinin bulunduğu şartlarda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

i. Esas kesme kuvveti ile kalıcı gerilme arasında bir ilişki kurulamamıştır.

j. Genel olarak basma kalıcı gerilmeleri değeri arttıkça yüzey kalitesi de o aranda artmıştır.

k. Kesici uçta BUE' nin oluşması basma kalıcı gerilmesinin değerini artırmıştır.

l. Eksen yönündeki boyuna kalıcı gerilmelerin çevresel gerilmelerden daha etkili olduğu, kalıcı gerilmelerin boyuna etkilendiği tespit edilmiştir.

7.2 Öneriler

Bu çalışmanın ileride daha farklı malzemelerde ve farklı işleme yöntemlerine göre de yapılabileceği düşünülerek, deney öncesi, deneylerin yapılması esnasında ve deney sonrası yapılabilecek iyileştirmeler hakkındaki öneriler aşağıda belirtilmiştir.

a. Deney numunelerinin işlenmesi esnasında işleme parametrelerinin çok fazla geniş tutulmaması, örneğin 50 m/dk kesme hızında, 0,15 mm/d ilerleme

hızında, sadece derinlikleri artırarak işlem yapılması derinlik hakkında daha detaylı bilgi verecektir. Aynı durum diğer işleme parametreleri içinde geçerlidir.

b. Deney numunelerinin işlenmesi esnasında titreşim vb gibi kalıcı gerilmeyi olumsuz etkileyen parametreler mutlaka kaydedilmeli ve o deney serisi tekrarlanarak sonuçlar kıyaslanmalıdır.

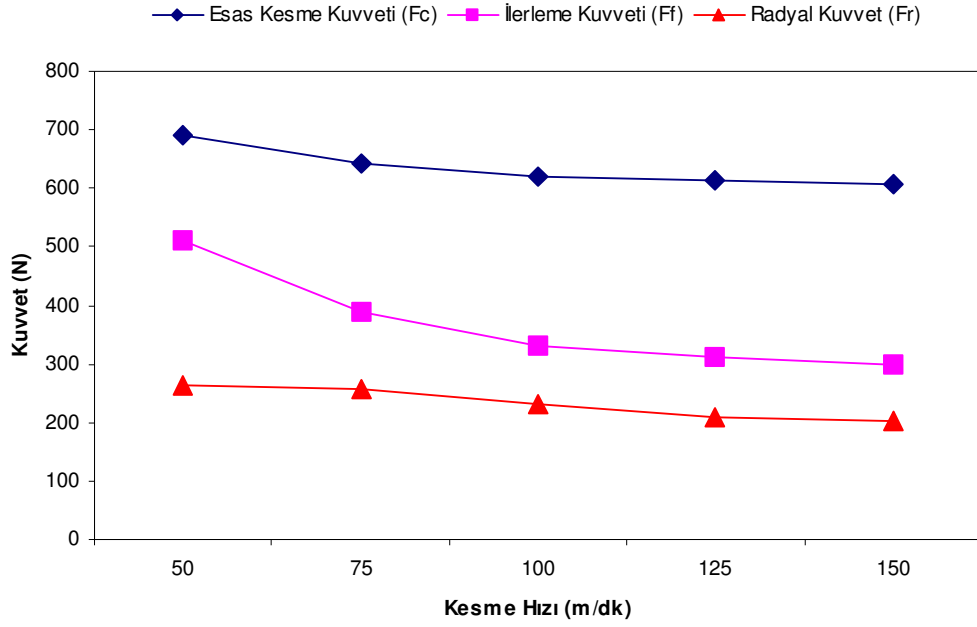
c. Kalıcı gerilmeyi ölçmek için deney numuneleri üzerinden çıkarılan parçalar tel erozyonda kesilmeden önce ve kesildikten sonra çok iyi muhafaza edilmeli ve kalıcı gerilmeyi etkileyebilecek olumsuz şartlardan korunmalıdır. Deney numuneleri sünger ya da köpüklü bir muhafaza içinde tutulmalıdır. Çarpma, düşme ve sarsıntı gibi olayların kalıcı gerilmeyi etkilediği düşünülmektedir.

d. Tel erozyonda kesilen numunelerdeki kalıcı gerilmeler hemen ölçülmelidir. Aksi takdirde geçen zaman içerisinde ısı vb. gibi etkenlerde kalıcı gerilme değerlerini etkileyeceği değerlendirilmektedir.

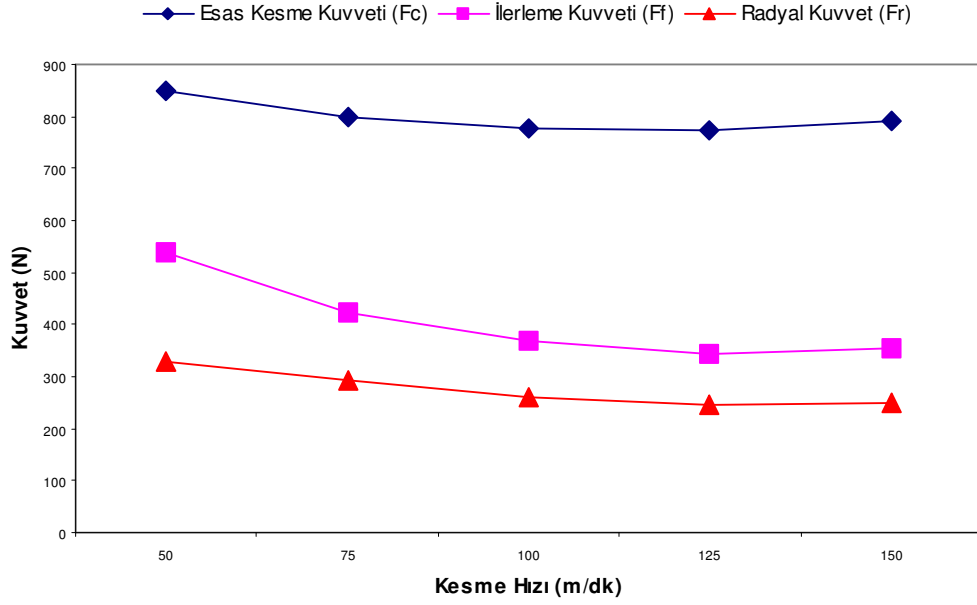
EKLER

EK-A

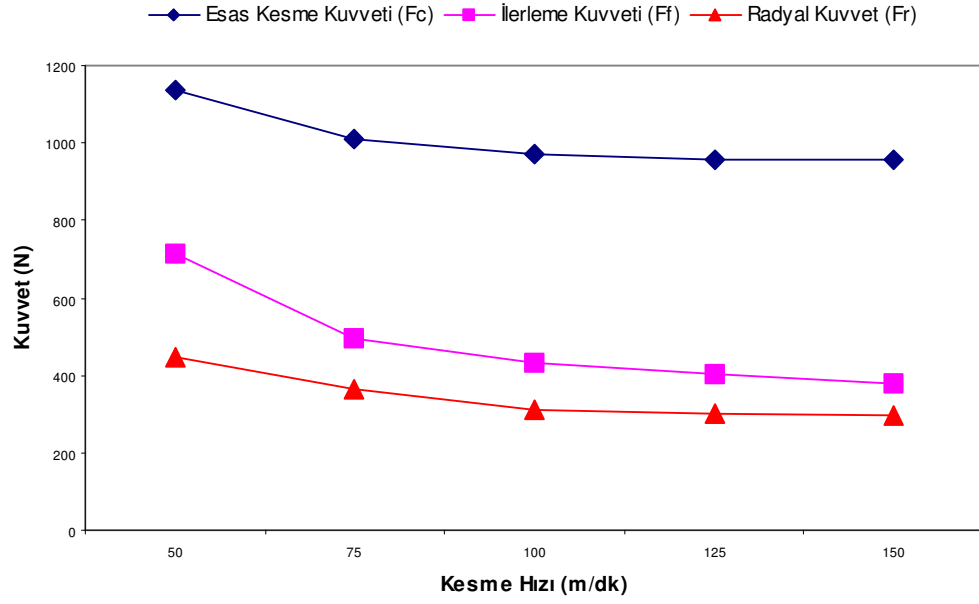
Çizelge 6.1'de Listelenen Deney
Sonuçları Baz Alınarak, Oluşturulan
Kuvvetlerin Grafikleri



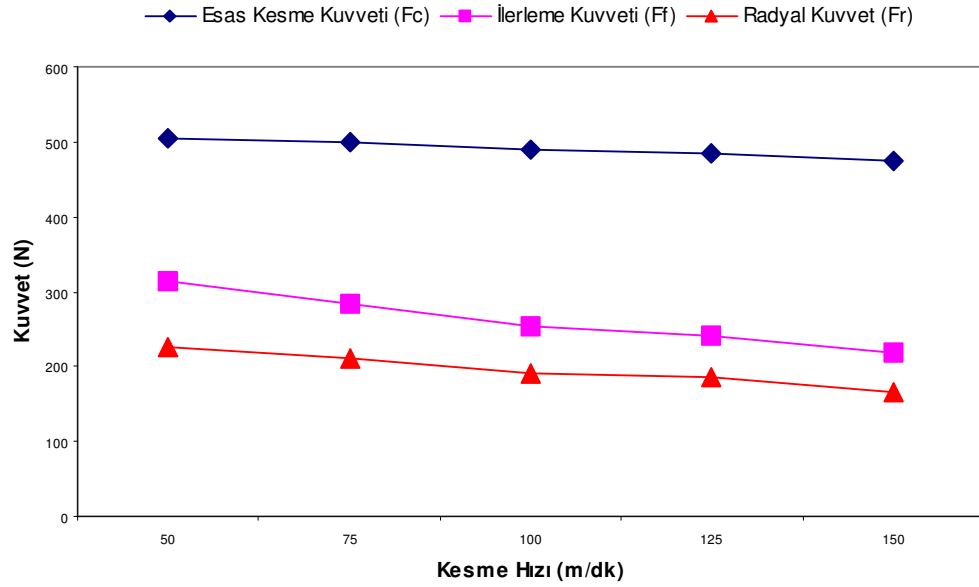
Şekil Ek 1.1. $f=0,15$ mm/d ve $a=2$ mm olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



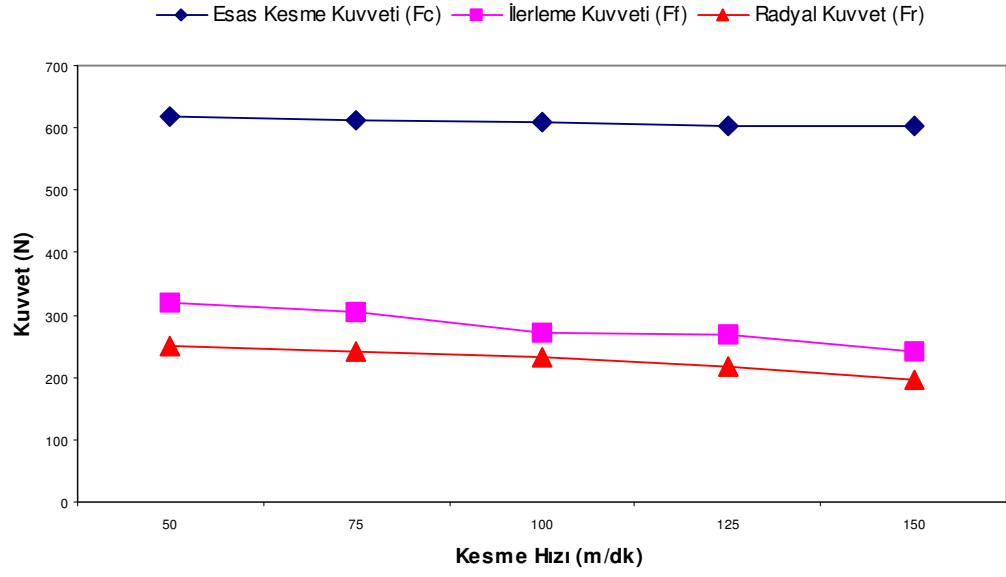
Şekil Ek 1.2. $f=0,20$ mm/d ve $a=2$ mm olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



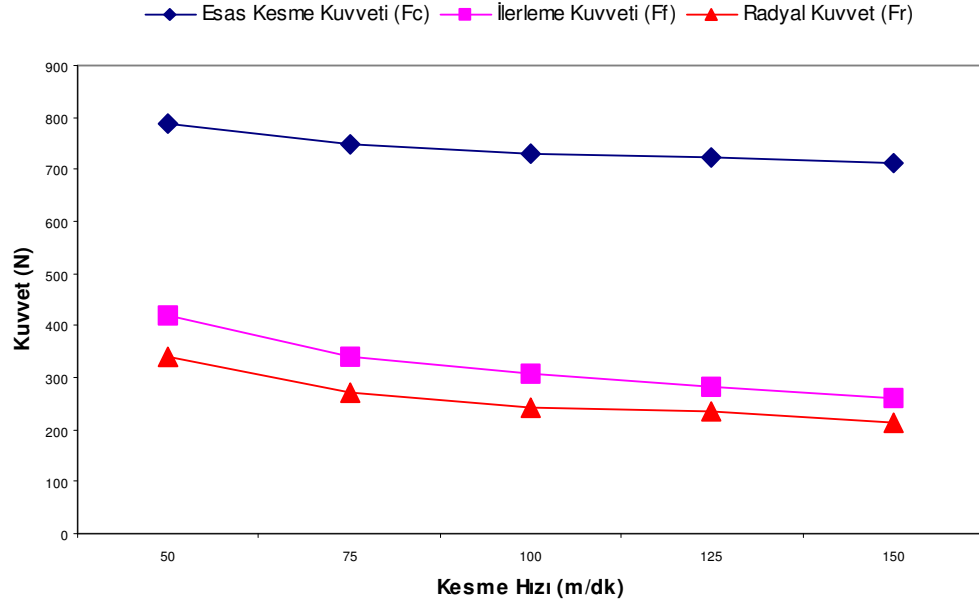
Şekil Ek 1.3. $f=0,25$ mm/d ve $a=2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



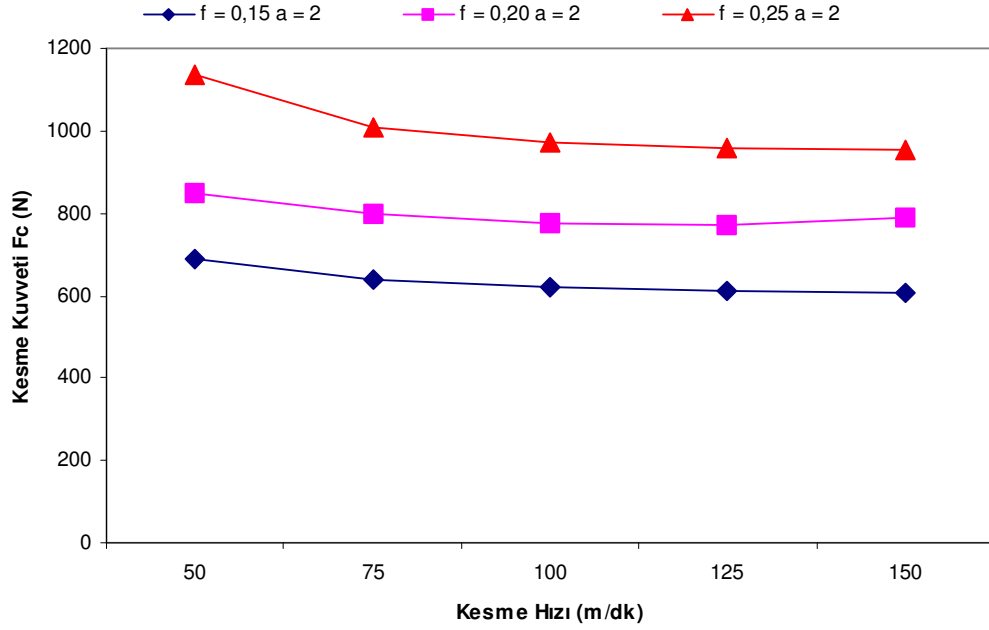
Şekil Ek 1.4. $f=0,15$ mm/d ve $a=1,5$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



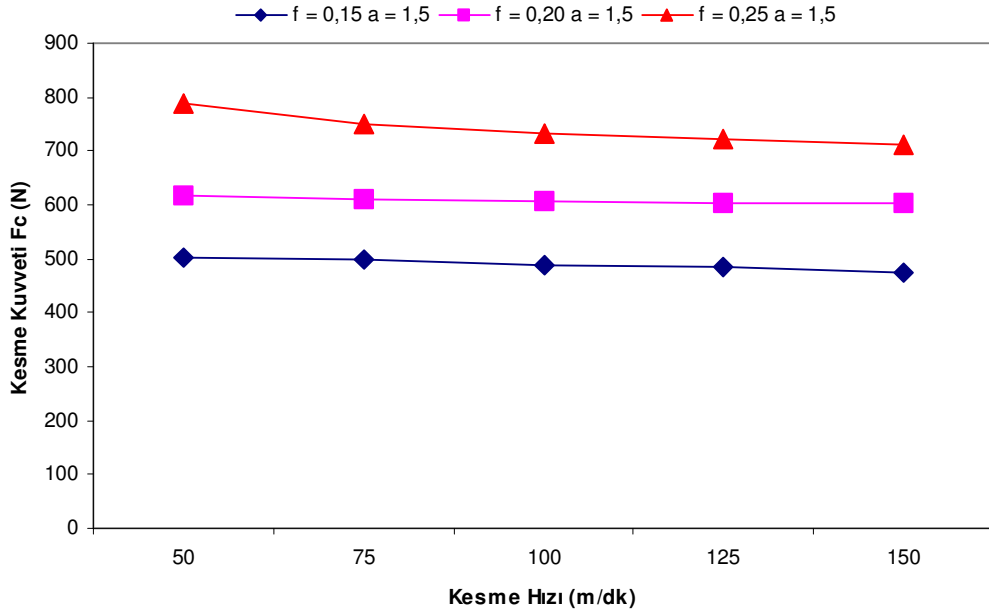
Şekil Ek 1.5. $f=0,20$ mm/d ve $a=1,5$ mm olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



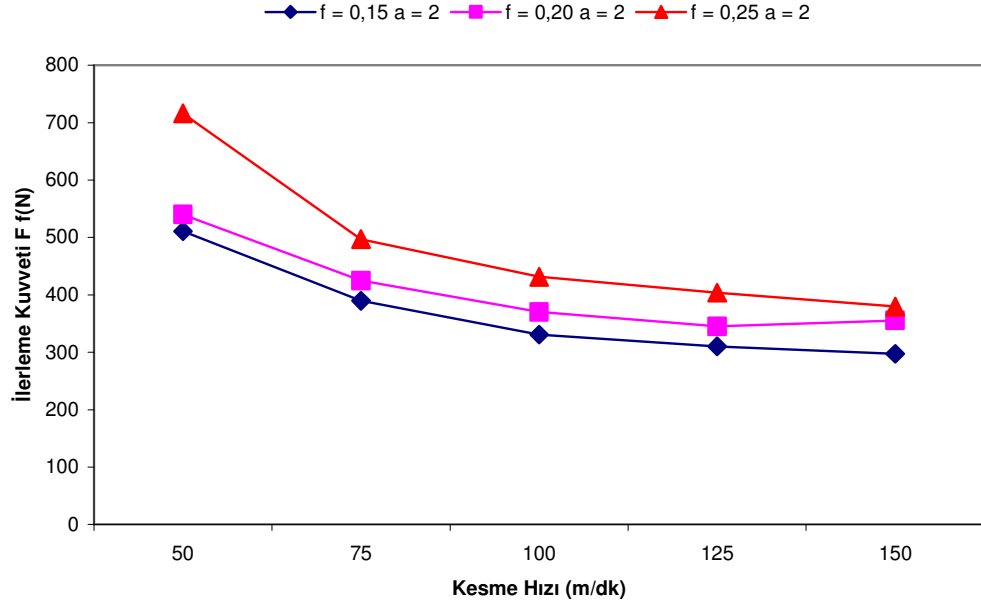
Şekil Ek 1.6. $f=0,25$ mm/d ve $a=1,5$ mm olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



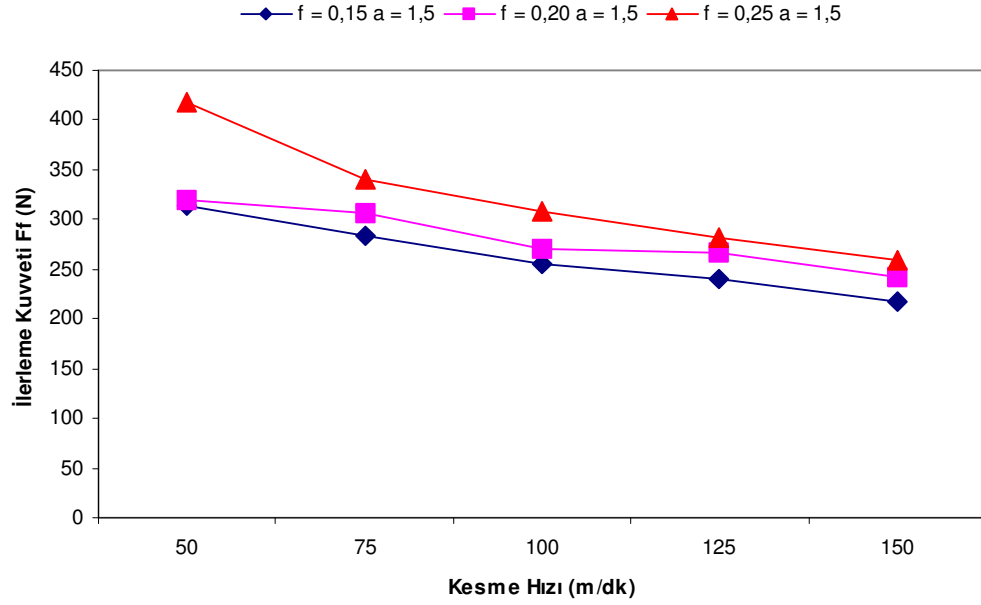
Şekil Ek 1.7. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



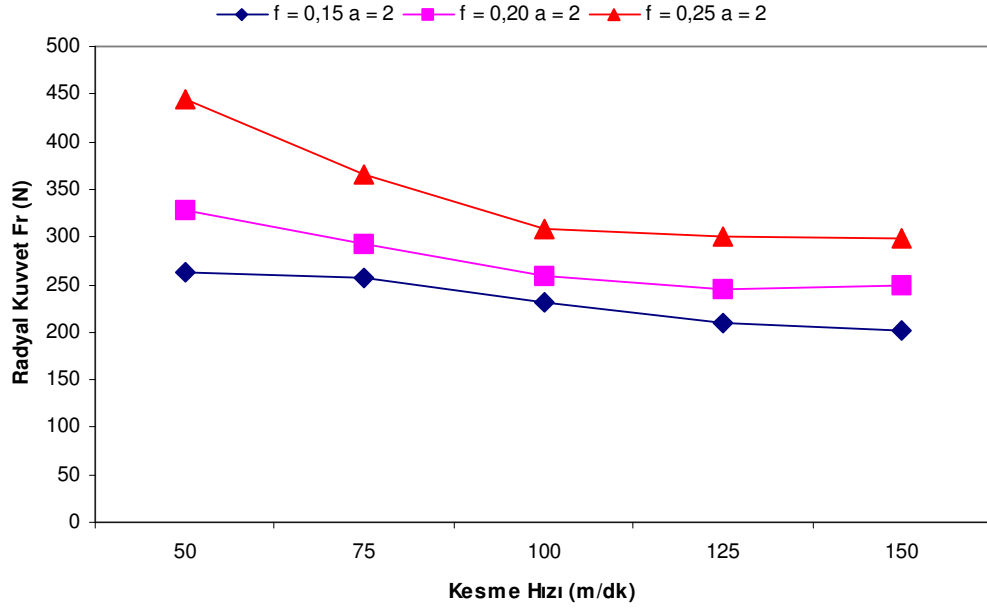
Şekil Ek 1.8. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=1,5$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



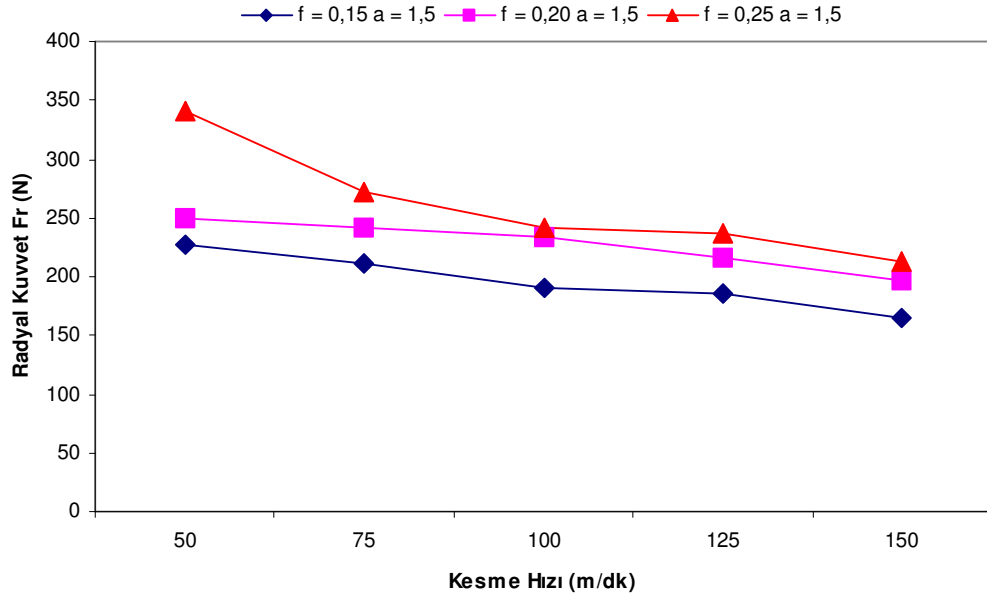
Şekil Ek 1.9. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak İlerleme Kuvvetlerinin Değişimi



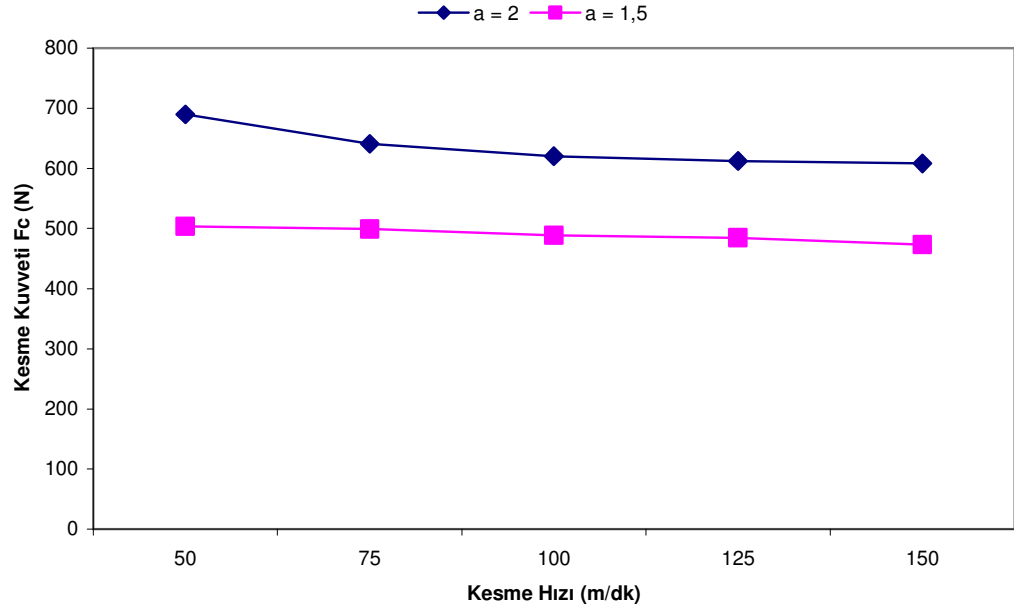
Şekil Ek 1.10. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=1,5$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak İlerleme Kuvvetlerinin Değişimi



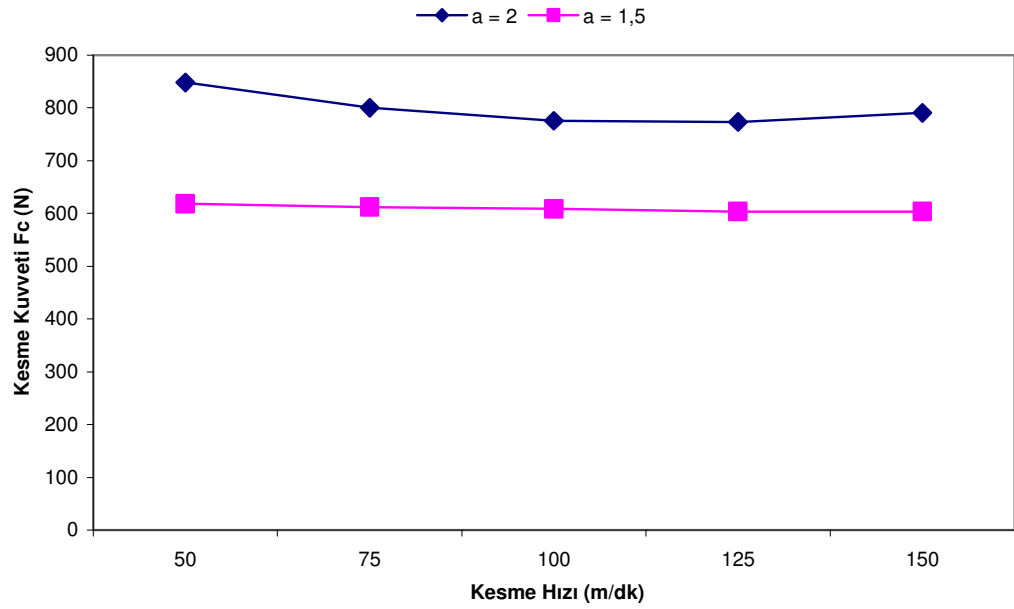
Şekil Ek 1.11. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Radyal Kuvvetlerinin Değişimi



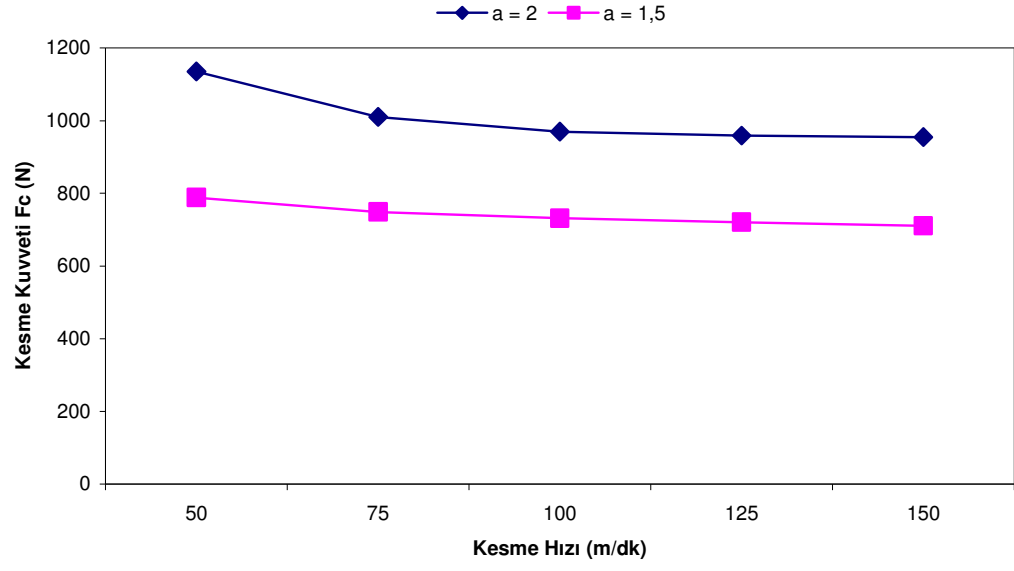
Şekil Ek 1.12. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=1,5$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Radyal Kuvvetlerinin Değişimi



Şekil Ek 1.13. $f=0,15$ mm/d ve $a=1,5-2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



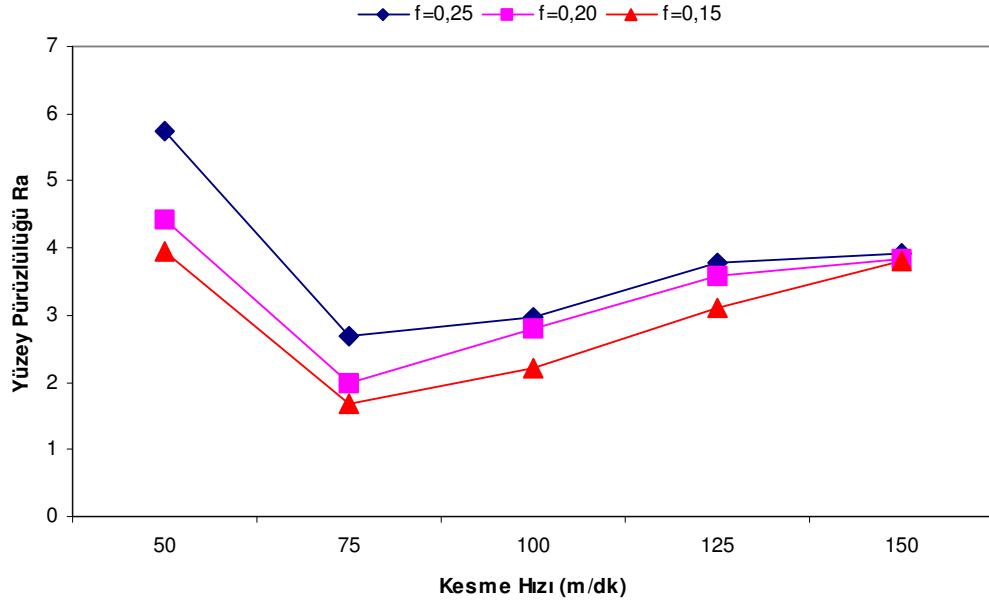
Şekil Ek 1.14. $f=0,20$ mm/d ve $a=1,5-2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi



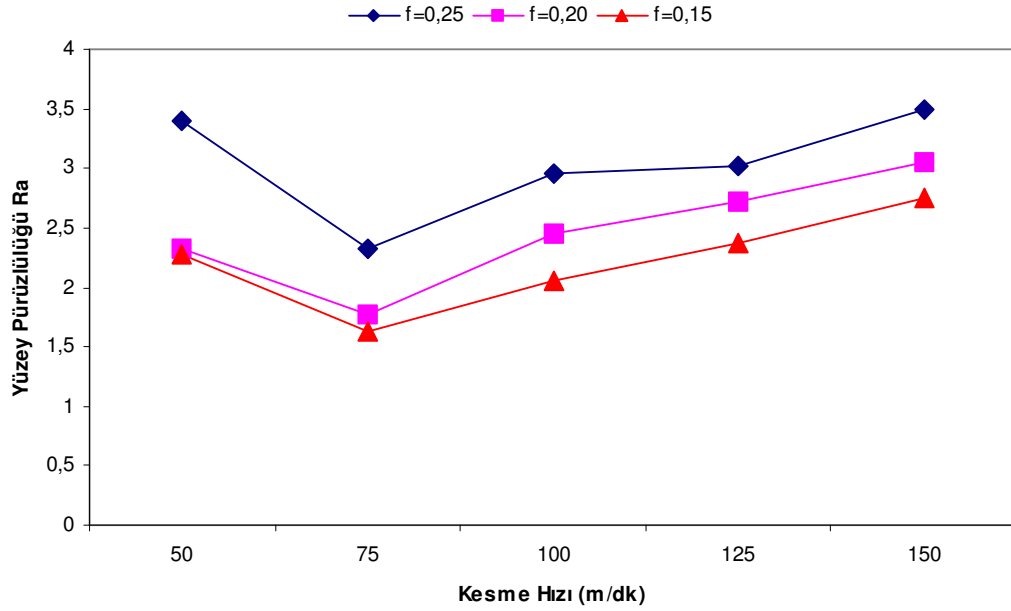
Şekil Ek 1.15. $f=0,25$ mm/d ve $a=1,5-2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerinin Değişimi

EK-B

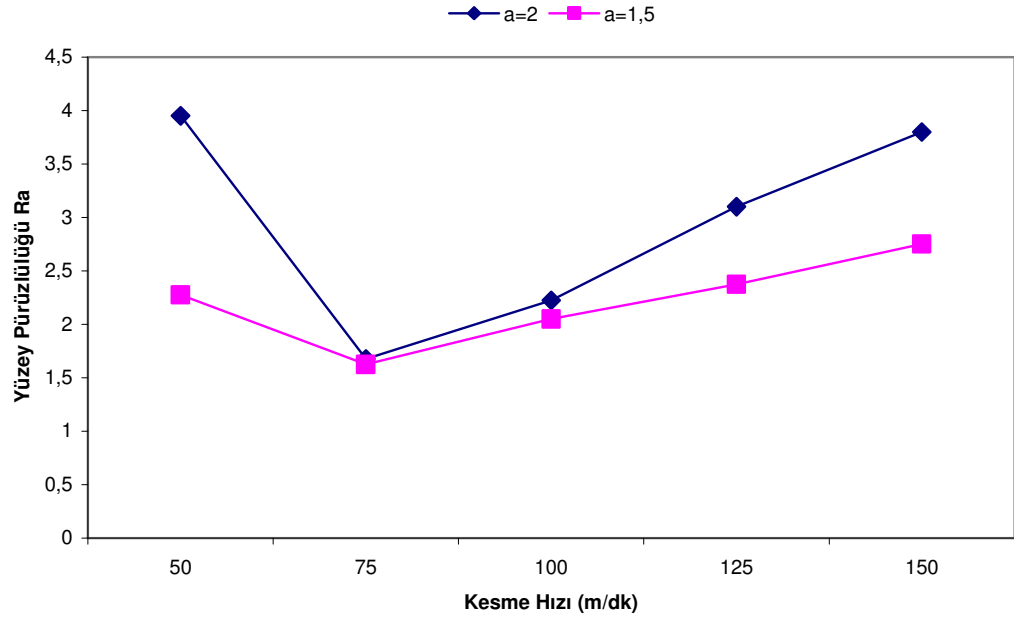
Çizelge 6.2’de Listelenen Deney
Sonuçları Baz Alınarak, Oluşturulan
Yüzey Pürüzlülüğü Grafikleri



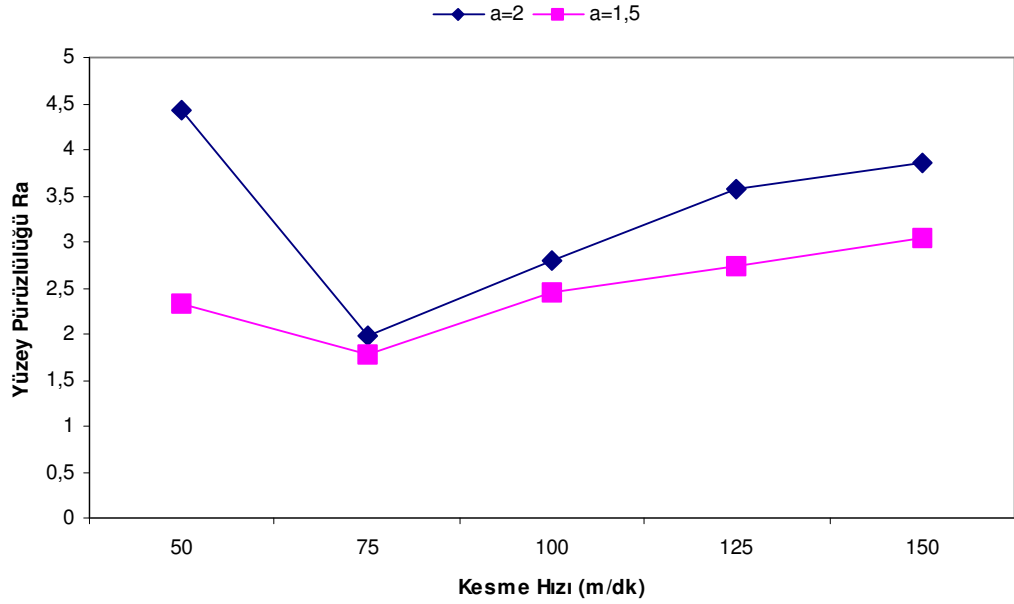
Şekil Ek 2.1. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri



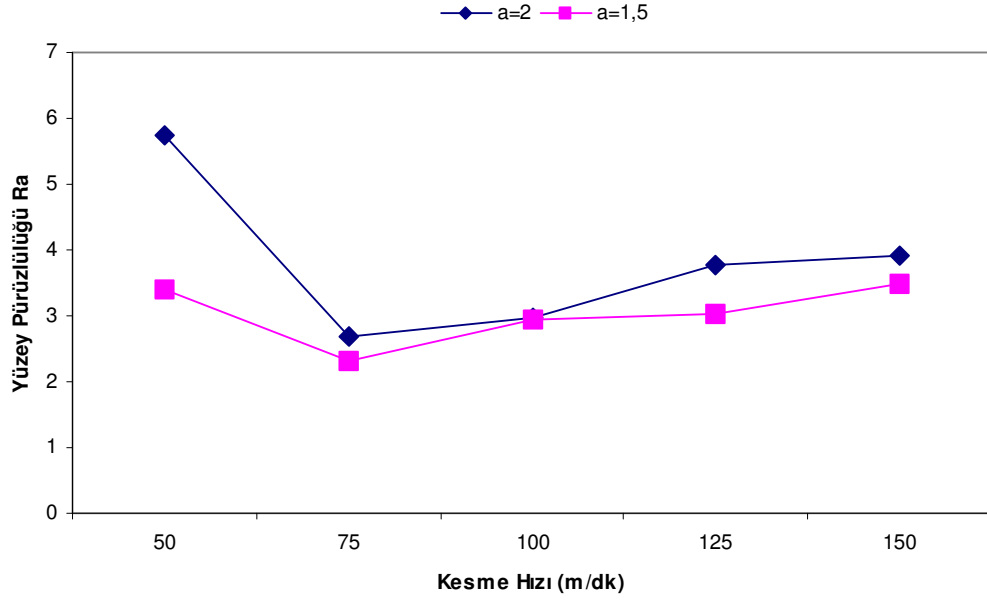
Şekil Ek 2.2. $f=0,15; 0,20; 0,25$ mm/d ve $a=1,5$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri



Şekil Ek 2.3. $f=0,15$ mm/d ve $a=1,5-2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri



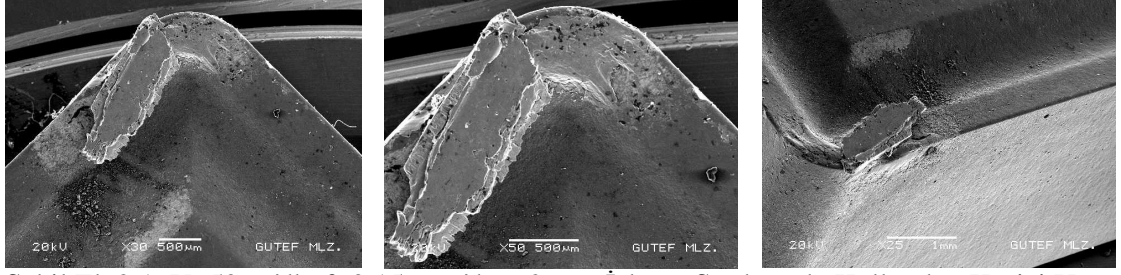
Şekil Ek 2.4. $f=0,20$ mm/d ve $a=1,5-2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri



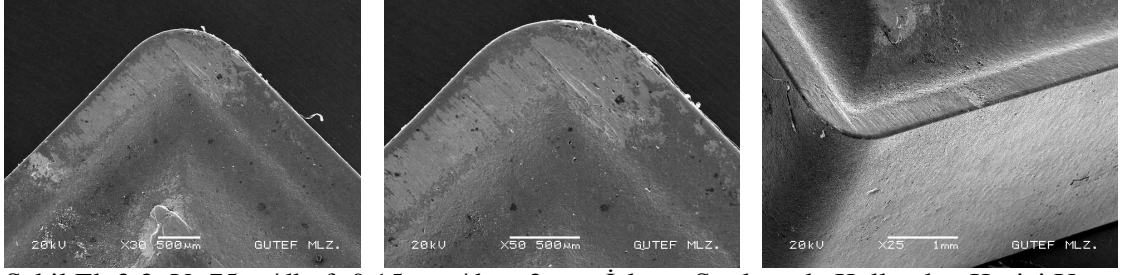
Şekil Ek 2.5. $f=0,25$ mm/d ve $a=1,5-2$ mm Olduğunda Kesme Hızına Bağlı Olarak Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

EK-C

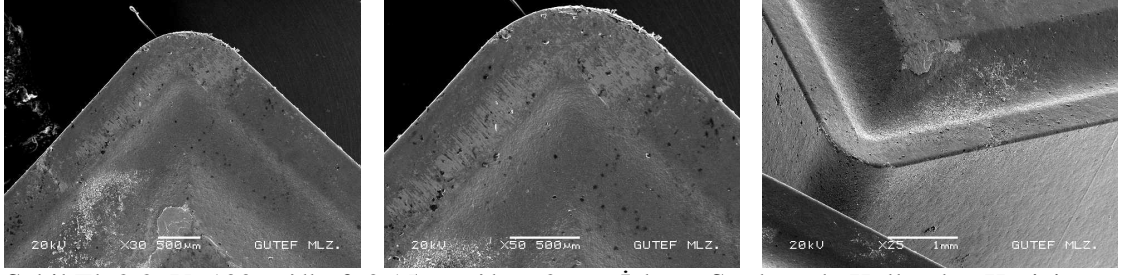
Deney Numunelerinin İşlenmesi
Esnasında Kullanılan Kesici
Uçların, Elektron Tarama
Mikroskobu (SEM)' İle Elde Edilen
Görüntüleri



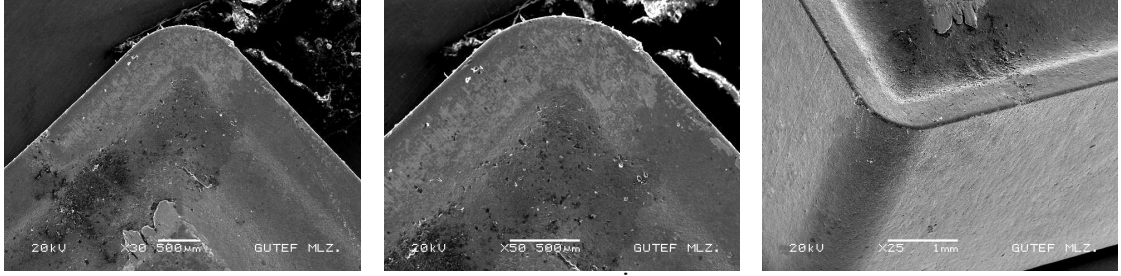
Şekil Ek 3.1. $V=50$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



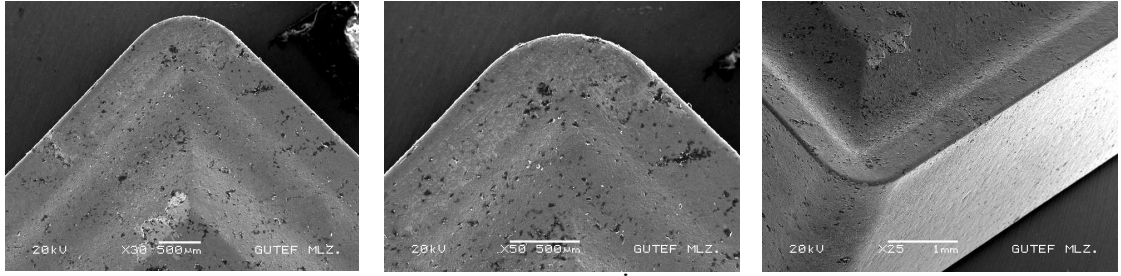
Şekil Ek 3.2. $V=75$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



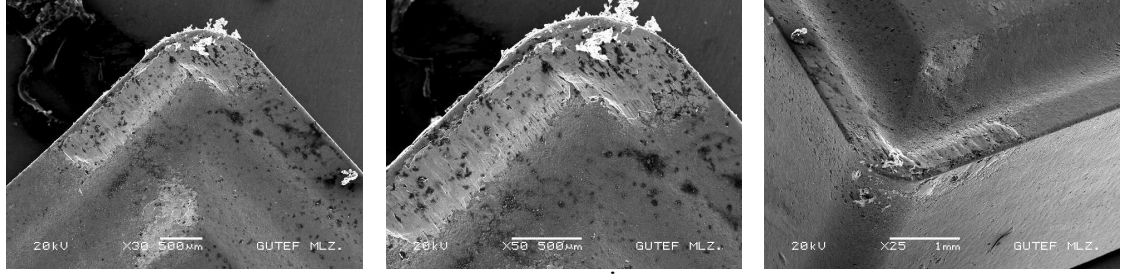
Şekil Ek 3.3. $V=100$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



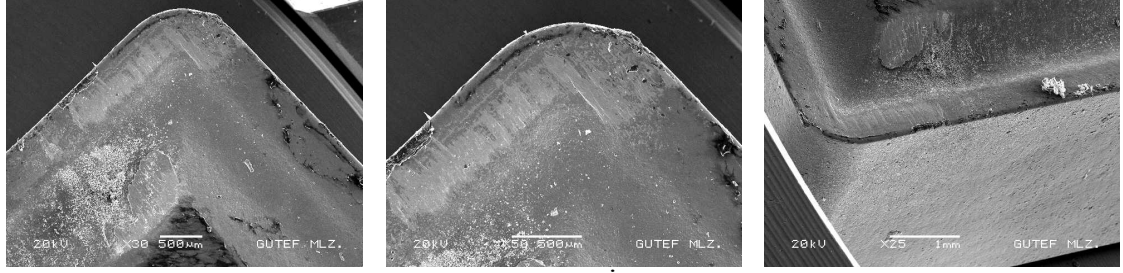
Şekil Ek 3.4. $V=125$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



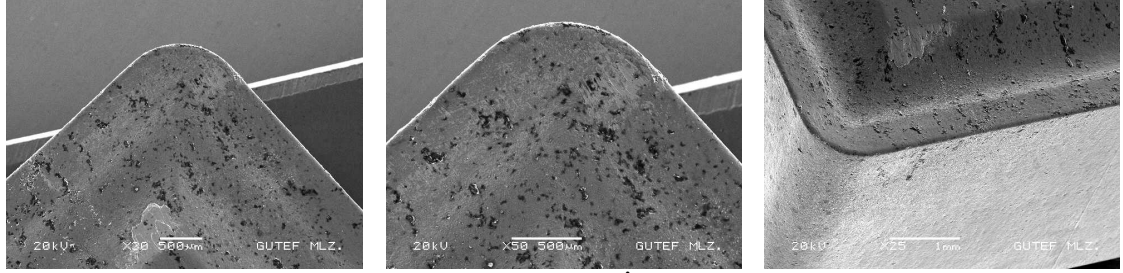
Şekil Ek 3.5. $V=150$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



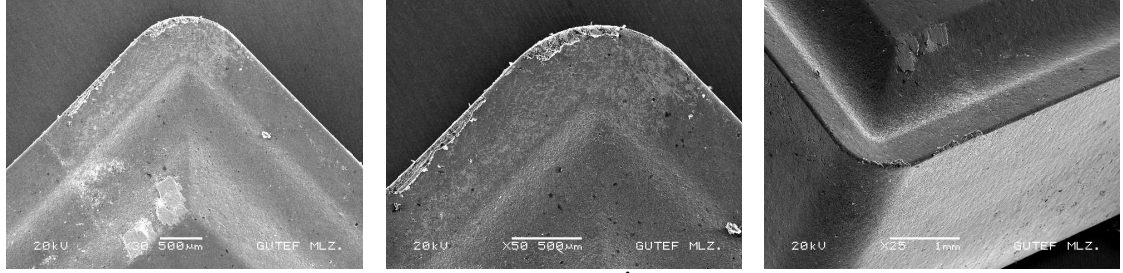
Şekil Ek 3.6. $V=50$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Uçun Görüntüsü



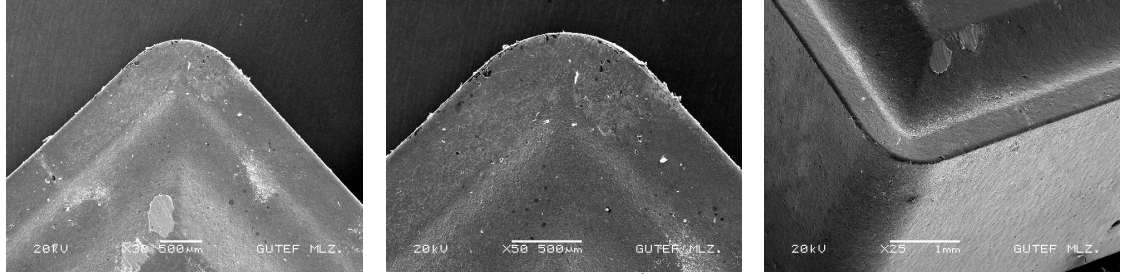
Şekil Ek 3.7. $V=75$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Uçun Görüntüsü



Şekil Ek 3.8. $V=100$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Uçun Görüntüsü



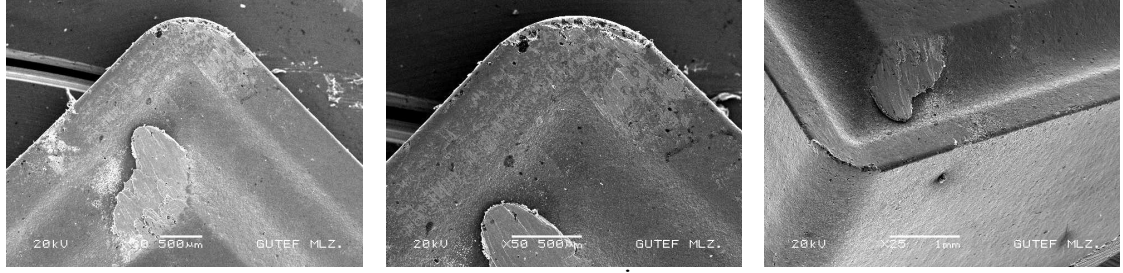
Şekil Ek 3.9. $V=125$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Uçun Görüntüsü



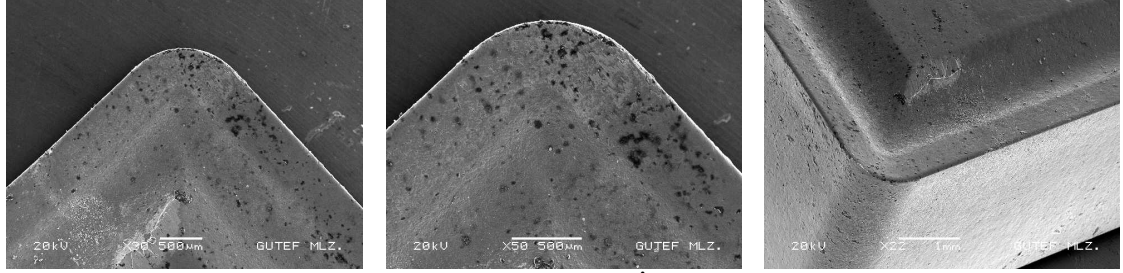
Şekil Ek 3.10. $V=150$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Uçun Görüntüsü



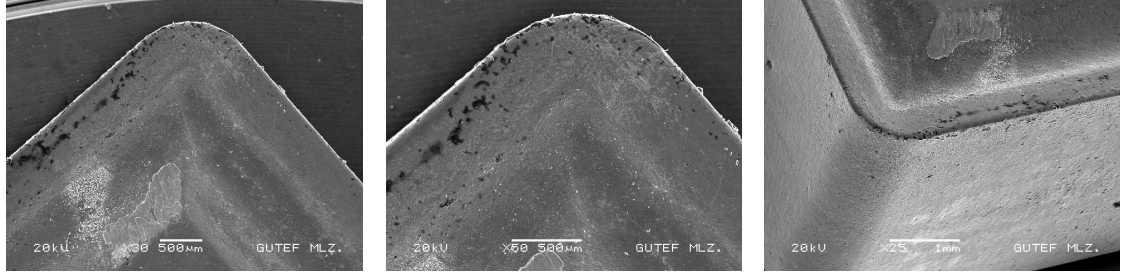
Şekil Ek 3.11. $V=50$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



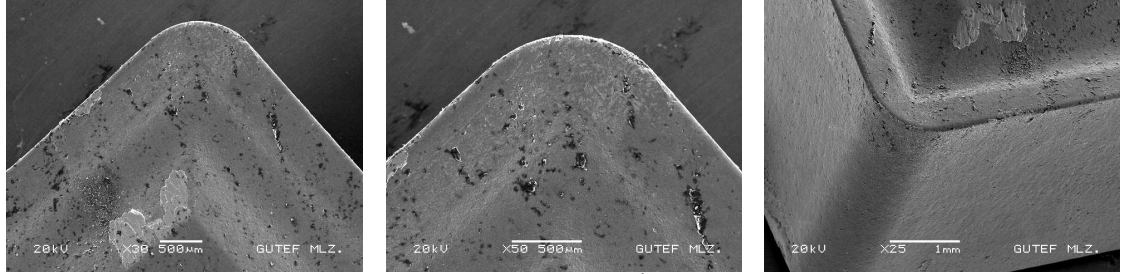
Şekil Ek 3.12. $V=75$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



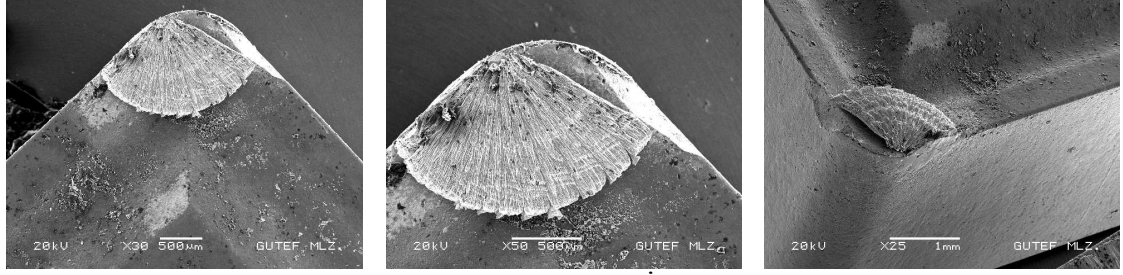
Şekil Ek 3.13. $V=100$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



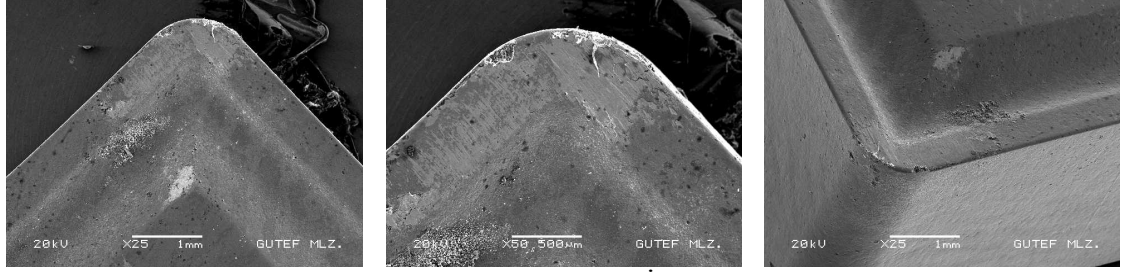
Şekil Ek 3.14. $V=125$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



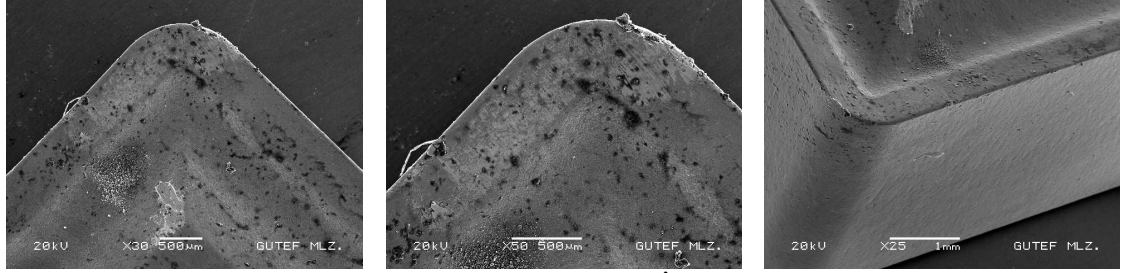
Şekil Ek 3.15. $V=150$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=2$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



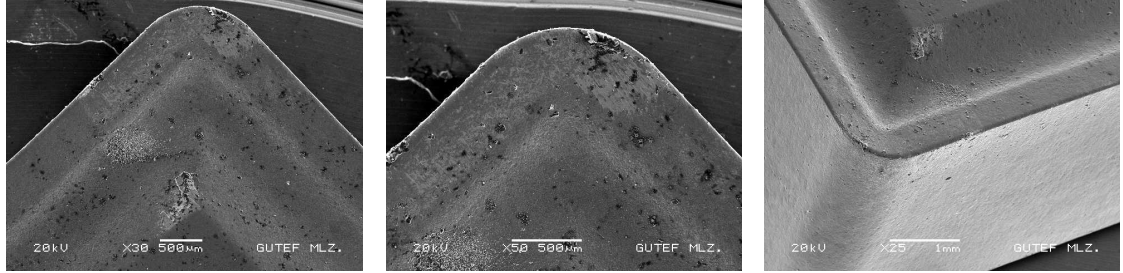
Şekil Ek 3.16. $V=50$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucun Görüntüsü



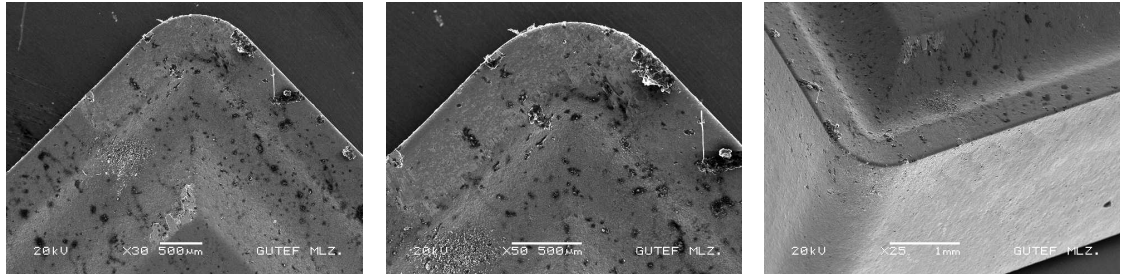
Şekil Ek 3.17. $V=75$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucun Görüntüsü



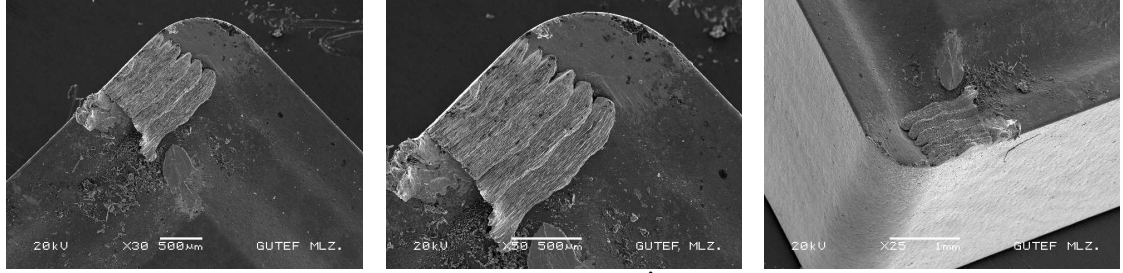
Şekil Ek 3.18. $V=100$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucun Görüntüsü



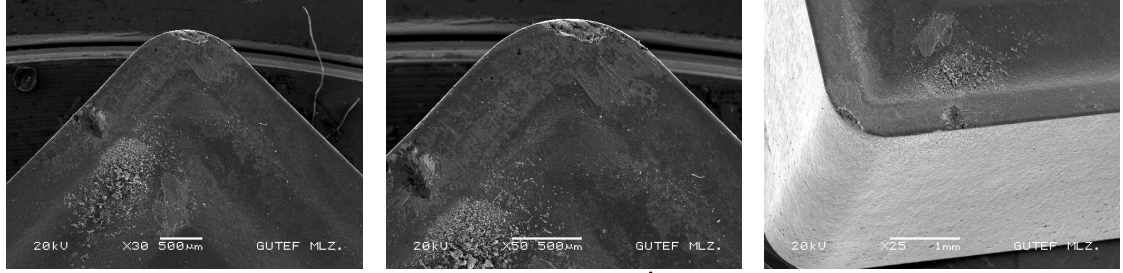
Şekil Ek 3.19. $V=125$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucun Görüntüsü



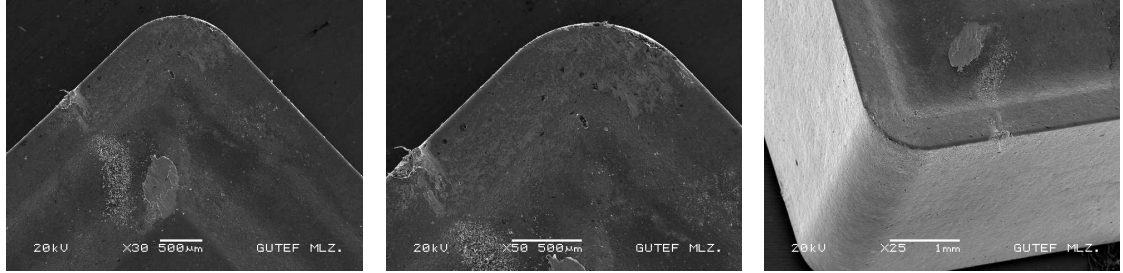
Şekil Ek 3.20. $V=100$ m/dk, $f=0,15$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucun Görüntüsü



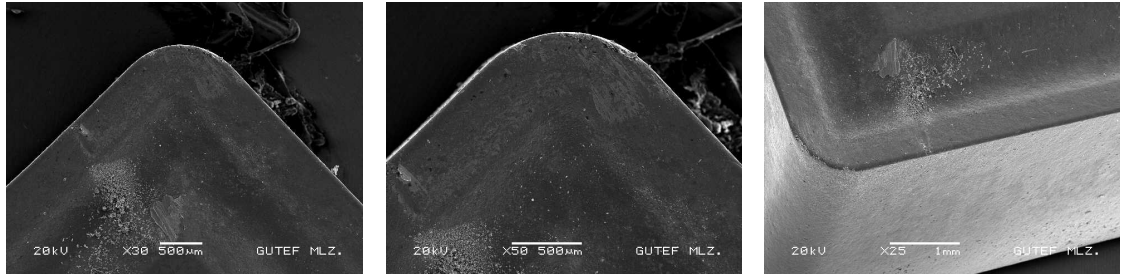
Şekil Ek 3.21. $V=50$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



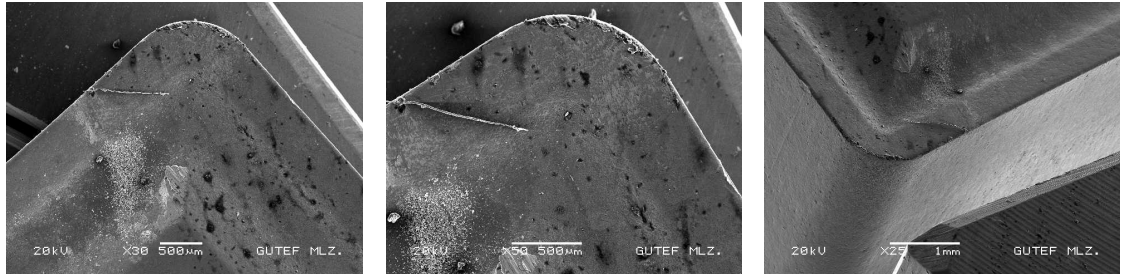
Şekil Ek 3.22. $V=75$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



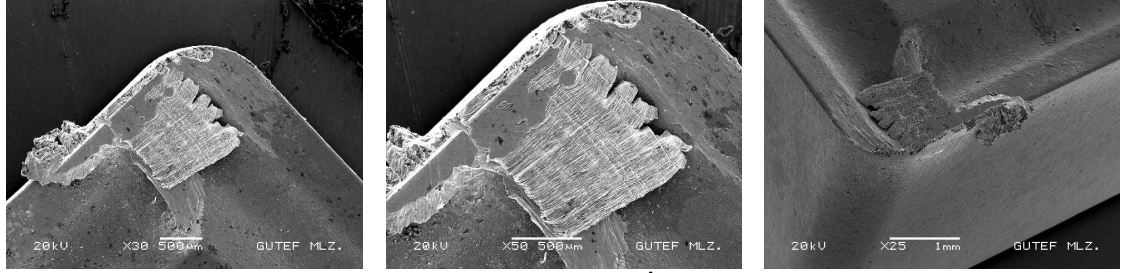
Şekil Ek 3.23. $V=100$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



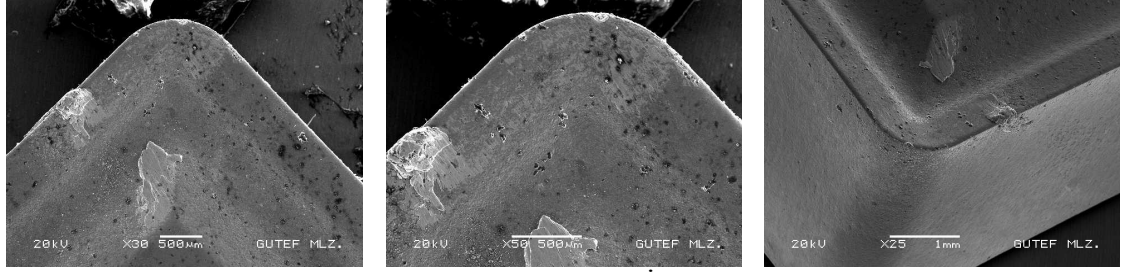
Şekil Ek 3.24. $V=125$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



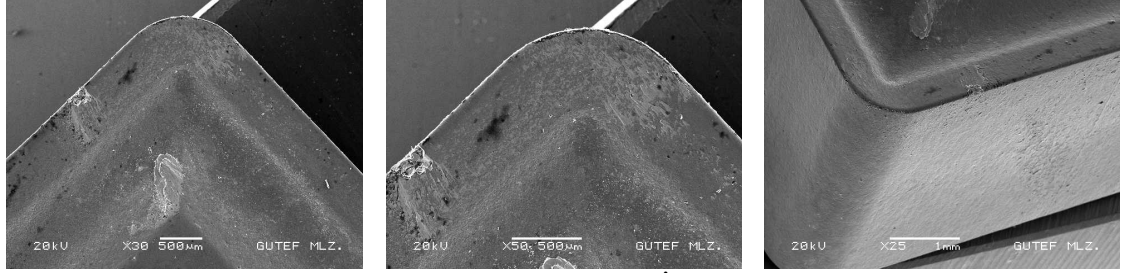
Şekil Ek 3.25. $V=150$ m/dk, $f=0,20$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



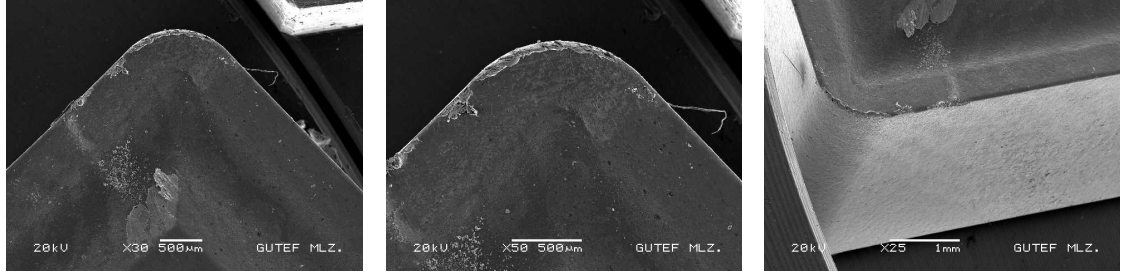
Şekil Ek 3.26. $V=50$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



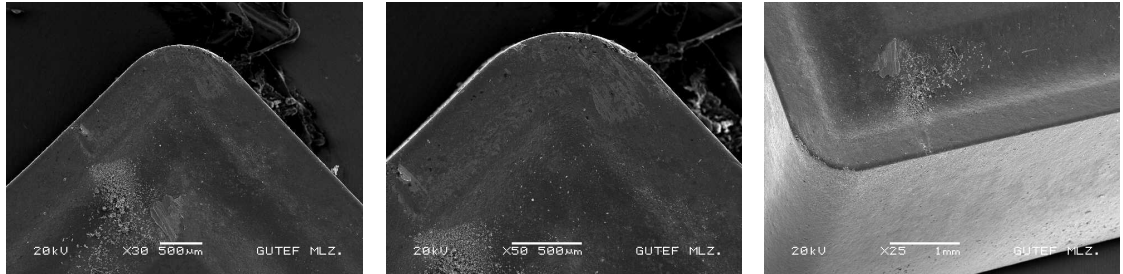
Şekil Ek 3.27. $V=75$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



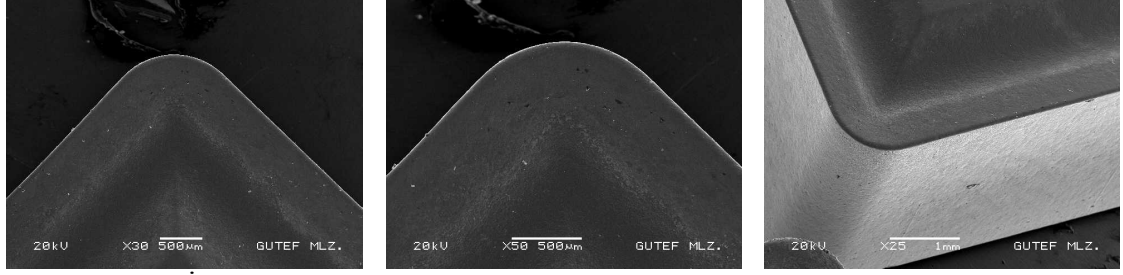
Şekil Ek 3.28. $V=100$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



Şekil Ek 3.29. $V=125$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



Şekil Ek 3.30. $V=150$ m/dk, $f=0,25$ mm/d, $a=1,5$ mm İşleme Şartlarında Kullanılan Kesici Ucu Görüntüsü



Şekil Ek 3.31. İşleme Yapmamış Kesici Uçun Görüntüsü

EK-D

Deney Numunelerinin İşlenmesi
Esnasında Oluşan Talaş Fotoğrafları



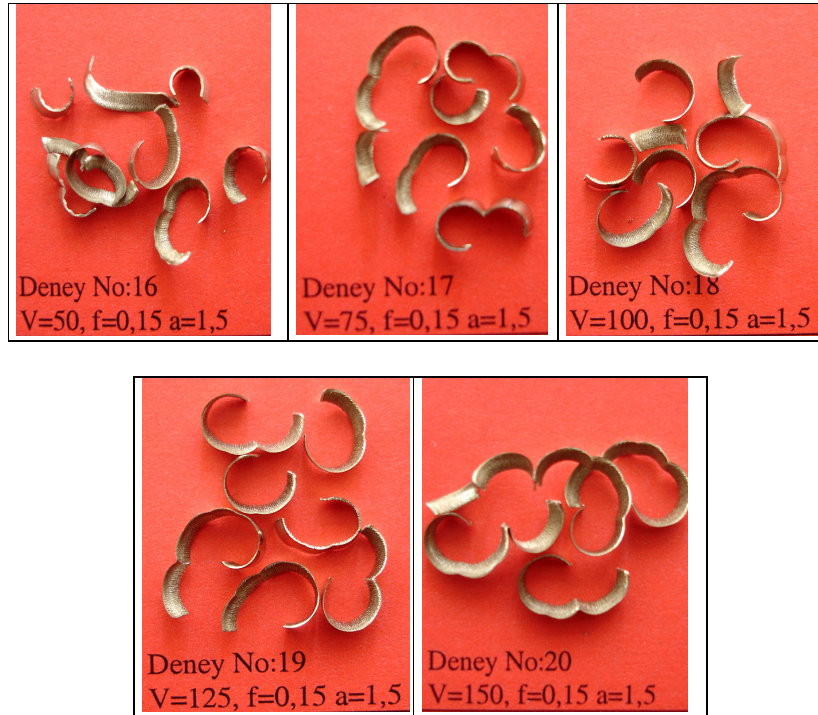
Şekil Ek 4.1 İlerlemenin 0,15 mm/d, Talaş Derinliğinin 2 mm Ve Farklı Kesme Hızlarında, İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Görüntüleri



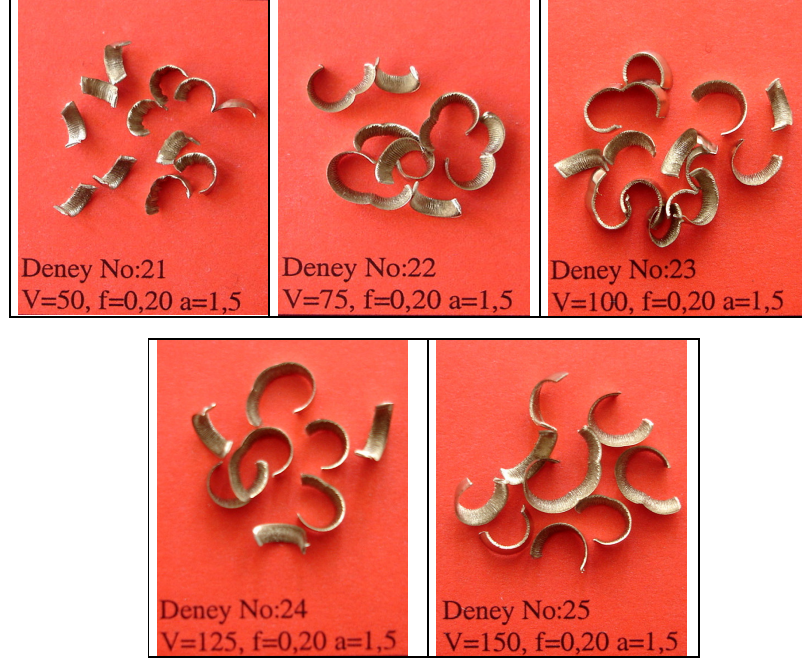
Şekil Ek 4.2 İlerlemenin 0,20 mm/d, Talaş Derinliğinin 2 mm Ve Farklı Kesme Hızlarında, İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Görüntüleri



Şekil Ek 4.3 İlerlemenin 0,25 mm/d, Talaş Derinliğinin 2 mm Ve Farklı Kesme Hızlarında, İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Görüntüleri



Şekil Ek 4.4 İlerlemenin 0,15 mm/d, Talaş Derinliğinin 1,5 mm Ve Farklı Kesme Hızlarında, İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Görüntüleri



Şekil Ek 4.5 İlerlemenin 0,20 mm/d, Talaş Derinliğinin 1,5 mm Ve Farklı Kesme Hızlarında, İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Görüntüleri



Şekil Ek 4.4 İlerlemenin 0,25 mm/d, Talaş Derinliğinin 1,5 mm Ve Farklı Kesme Hızlarında, İşlenen Deney Numunelerinden Elde Edilen Talaşların Görüntüleri

EK-E

Farklı Kesme Parametrelerinde
İşlenen Deney Numunelerinden
Katman Kaldırma Yöntemi İle
Tespit Edilen Kalıcı Gerilme
Değerleri

zaman (sn)	Sıra	Aşınma (mm)	1	2	3	4	5	6
0	1	0	-314,283	-969,349	-731,952	-764,491	-375,234	-119,831
20	2	0,0026	-308,884	-903,551	-701,793	-724,519	-372,255	-124,205
40	3	0,0052	-303,636	-841,591	-673,167	-686,844	-369,049	-128,201
60	4	0,0078	-298,528	-783,3	-646,005	-651,357	-365,623	-131,835
80	5	0,0103	-293,738	-730,556	-621,206	-619,198	-362,131	-135
100	6	0,0129	-288,875	-678,986	-596,724	-587,696	-358,301	-137,963
120	7	0,0155	-284,123	-630,61	-573,514	-558,078	-354,279	-140,605
140	8	0,0181	-279,474	-585,276	-551,516	-530,248	-350,074	-142,939
160	9	0,0207	-274,919	-542,839	-530,669	-504,114	-345,694	-144,978
180	10	0,0233	-270,451	-503,157	-510,919	-479,585	-341,148	-146,735
200	11	0,0258	-266,229	-467,472	-492,91	-457,435	-336,628	-148,17
220	12	0,0284	-261,911	-432,8	-475,151	-435,809	-331,782	-149,41
240	13	0,031	-257,659	-400,49	-458,33	-415,543	-326,796	-150,403
260	14	0,0336	-253,467	-370,417	-442,399	-396,559	-321,678	-151,163
280	15	0,0362	-249,331	-342,462	-427,309	-378,783	-316,438	-151,699
300	16	0,0388	-245,246	-316,508	-413,016	-362,144	-311,082	-152,023
320	17	0,0414	-241,205	-292,444	-399,474	-346,573	-305,621	-152,147
340	18	0,0439	-237,36	-270,987	-387,123	-332,546	-300,277	-152,086
360	19	0,0465	-233,397	-250,32	-374,936	-318,88	-294,631	-151,845
380	20	0,0491	-229,467	-231,235	-363,38	-306,094	-288,903	-151,433
400	21	0,0517	-225,569	-213,634	-352,418	-294,131	-283,1	-150,861
420	22	0,0543	-221,698	-197,426	-342,014	-282,934	-277,232	-150,137
440	23	0,0569	-217,852	-182,521	-332,134	-272,451	-271,305	-149,271
460	24	0,0594	-214,176	-169,338	-323,098	-262,996	-265,558	-148,313
480	25	0,062	-210,374	-156,744	-314,152	-253,767	-259,539	-147,193
500	26	0,0646	-206,591	-145,21	-305,637	-245,108	-253,484	-145,958
520	27	0,0672	-202,827	-134,66	-297,524	-236,975	-247,401	-144,614
540	28	0,0698	-199,079	-125,022	-289,786	-229,327	-241,296	-143,171
560	29	0,0724	-195,348	-116,227	-282,398	-222,124	-235,177	-141,635
580	30	0,075	-191,632	-108,21	-275,335	-215,329	-229,051	-140,014
600	31	0,0775	-188,074	-101,176	-268,827	-209,147	-223,16	-138,383
620	32	0,0801	-184,389	-94,5038	-262,334	-203,05	-217,04	-136,617
640	33	0,0827	-180,719	-88,4325	-256,101	-197,263	-210,933	-134,788
660	34	0,0853	-177,065	-82,9076	-250,107	-191,754	-204,845	-132,901
680	35	0,0879	-173,427	-77,8779	-244,335	-186,497	-198,783	-130,964
700	36	0,0905	-169,807	-73,295	-238,766	-181,466	-192,753	-128,982
720	37	0,093	-166,343	-69,267	-233,588	-176,818	-186,991	-127,041
740	38	0,0956	-162,76	-65,4299	-228,373	-172,16	-181,042	-124,989
760	39	0,0982	-159,197	-61,9116	-223,316	-167,661	-175,142	-122,91
780	40	0,1008	-155,656	-58,6739	-218,405	-163,302	-169,298	-120,81
800	41	0,1034	-152,139	-55,6809	-213,626	-159,063	-163,514	-118,693
820	42	0,106	-148,647	-52,8992	-208,969	-154,93	-157,797	-116,564
840	43	0,1086	-145,182	-50,2976	-204,423	-150,888	-152,151	-114,429
860	44	0,1111	-141,878	-47,939	-200,147	-147,073	-146,794	-112,373
880	45	0,1137	-138,473	-45,6086	-195,792	-143,169	-141,303	-110,237
900	46	0,1163	-135,1	-43,3789	-191,522	-139,32	-135,897	-108,108
920	47	0,1189	-131,764	-41,227	-187,329	-135,515	-130,582	-105,989
940	48	0,1215	-128,465	-39,1322	-183,208	-131,746	-125,361	-103,885
960	49	0,1241	-125,206	-37,0757	-179,153	-128,006	-120,239	-101,798

980	50	0,1266	-122,113	-35,1183	-175,31	-124,431	-115,411	-99,8119
1000	51	0,1292	-118,94	-33,0889	-171,37	-120,731	-110,495	-97,7706
1020	52	0,1318	-115,815	-31,0523	-167,482	-117,043	-105,688	-95,7573
1040	53	0,1344	-112,741	-28,9967	-163,643	-113,366	-100,996	-93,7751
1060	54	0,137	-109,719	-26,9117	-159,852	-109,696	-96,42	-91,8267
1080	55	0,1396	-106,752	-24,7885	-156,106	-106,032	-91,9644	-89,9149
1100	56	0,1422	-103,844	-22,6197	-152,403	-102,374	-87,6318	-88,0423
1120	57	0,1447	-101,104	-20,4858	-148,883	-98,8624	-83,5843	-86,2808
1140	58	0,1473	-98,3169	-18,2118	-145,263	-95,2164	-79,5005	-84,4918
1160	59	0,1499	-95,5954	-15,8785	-141,685	-91,5784	-75,5471	-82,7487
1180	60	0,1525	-92,942	-13,4839	-138,149	-87,9504	-71,7262	-81,0533
1200	61	0,1551	-90,3592	-11,027	-134,656	-84,3352	-68,0397	-79,4075
1220	62	0,1577	-87,8496	-8,50811	-131,207	-80,7361	-64,4894	-77,8131
1240	63	0,1602	-85,5075	-6,02874	-127,934	-77,294	-61,2054	-76,3297
1260	64	0,1628	-83,148	-3,39269	-124,576	-73,7377	-57,9263	-74,8402
1280	65	0,1654	-80,8684	-0,70114	-121,266	-70,2097	-54,7871	-73,4061
1300	66	0,168	-78,6708	2,041869	-118,008	-66,7152	-51,7888	-72,0287
1320	67	0,1706	-76,5572	4,831492	-114,803	-63,2593	-48,932	-70,7088
1340	68	0,1732	-74,5297	7,662097	-111,655	-59,8476	-46,2171	-69,4474
1360	69	0,1758	-72,59	10,52735	-108,565	-56,4859	-43,6444	-68,2453
1380	70	0,1783	-70,8094	13,30857	-105,653	-53,3062	-41,3046	-67,1459
1400	71	0,1809	-69,0469	16,22092	-102,687	-50,0601	-39,0105	-66,0618
1420	72	0,1835	-67,3769	19,14553	-99,7898	-46,8821	-36,8578	-65,0385
1440	73	0,1861	-65,8008	22,07382	-96,9632	-43,7785	-34,846	-64,0764
1460	74	0,1887	-64,3197	24,99676	-94,2108	-40,7555	-32,974	-63,1756
1480	75	0,1913	-62,9345	27,90495	-91,5359	-37,8195	-31,2408	-62,3363
1500	76	0,1938	-61,6939	30,67833	-89,0399	-35,0842	-29,7039	-61,5871
1520	77	0,1964	-60,4993	33,52913	-86,5262	-32,3367	-28,2386	-60,8681
1540	78	0,199	-59,4025	36,33568	-84,0994	-29,6942	-26,9074	-60,2102
1560	79	0,2016	-58,4039	39,08765	-81,7623	-27,1626	-25,708	-59,6131
1580	80	0,2042	-57,5036	41,77459	-79,518	-24,7472	-24,6383	-59,0763
1600	81	0,2068	-56,7013	44,38601	-77,3693	-22,4535	-23,6956	-58,5994
1620	82	0,2094	-55,9969	46,91141	-75,3186	-20,2863	-22,8772	-58,1818
1640	83	0,2119	-55,4111	49,24885	-73,4416	-18,3262	-22,2045	-57,8354
1660	84	0,2145	-54,8964	51,57533	-71,5901	-16,4204	-21,6206	-57,532
1680	85	0,2171	-54,4771	53,78525	-69,8433	-14,6536	-21,1512	-57,2856
1700	86	0,2197	-54,1519	55,86867	-68,2028	-13,0291	-20,7925	-57,0952
1720	87	0,2223	-53,9191	57,8159	-66,67	-11,5499	-20,5403	-56,96
1740	88	0,2249	-53,7771	59,61755	-65,2461	-10,2182	-20,3906	-56,8787
1760	89	0,2274	-53,7241	61,20423	-63,9803	-9,07829	-20,3388	-56,8504
1780	90	0,23	-53,7537	62,69455	-62,7718	-8,0401	-20,3762	-56,8717
1800	91	0,2326	-53,8669	64,01389	-61,6735	-7,1525	-20,5017	-56,9433
1820	92	0,2352	-54,061	65,15461	-60,6849	-6,41519	-20,71	-57,0639
1840	93	0,2378	-54,3327	66,10968	-59,8053	-5,82713	-20,9954	-57,2321
1860	94	0,2404	-54,6783	66,87266	-59,0335	-5,38651	-21,3521	-57,4464
1880	95	0,243	-55,0942	67,43777	-58,3678	-5,09071	-21,7741	-57,7053
1900	96	0,2455	-55,5564	67,78986	-57,8258	-4,9396	-22,2353	-57,9948
1920	97	0,2481	-56,0976	67,95292	-57,3615	-4,91687	-22,7664	-58,3363
1940	98	0,2507	-56,6956	67,90545	-56,9953	-5,026	-23,343	-58,7175
1960	99	0,2533	-57,3454	67,64481	-56,7236	-5,26073	-23,9579	-59,1366
1980	100	0,2559	-58,0414	67,16927	-56,5418	-5,61383	-24,6038	-59,5918

2000	101	0,2585	-58,7777	66,47807	-56,4451	-6,07702	-25,2728	-60,0812	
2020	102	0,261	-59,518	65,61029	-56,4273	-6,61752	-25,9305	-60,5822	
2040	103	0,2636	-60,3151	64,49772	-56,4807	-7,26846	-26,6216	-61,1332	
2060	104	0,2662	-61,133	63,17331	-56,6008	-7,99852	-27,3113	-61,7125	
2080	105	0,2688	-61,9644	61,64052	-56,78	-8,79497	-27,991	-62,3183	
2100	106	0,2714	-62,8015	59,90406	-57,01	-9,64385	-28,6515	-62,9485	
2120	107	0,274	-63,6363	57,96984	-57,2818	-10,5299	-29,2834	-63,6009	
2140	108	0,2766	-64,4602	55,84506	-57,5858	-11,4368	-29,8771	-64,2735	
2160	109	0,2791	-65,2338	53,63024	-57,8985	-12,3117	-30,4028	-64,9372	
2180	110	0,2817	-66,0099	51,15775	-58,2341	-13,2061	-30,8925	-65,6431	
2200	111	0,2843	-66,7474	48,52401	-58,5683	-14,0646	-31,3139	-66,3626	
2220	112	0,2869	-67,4362	45,74176	-58,8881	-14,8651	-31,656	-67,0935	
2240	113	0,2895	-68,0656	42,82522	-59,1798	-15,5844	-31,9079	-67,8337	
2260	114	0,2921	-68,6245	39,7902	-59,4287	-16,1975	-32,0583	-68,5807	
2280	115	0,2946	-69,0847	36,77634	-59,6132	-16,6624	-32,0963	-69,3035	
2300	116	0,2972	-69,4715	33,56092	-59,7322	-16,9892	-32,0134	-70,0575	
2320	117	0,2998	-69,7525	30,28328	-59,7596	-17,1272	-31,7937	-70,8115	
2340	118	0,3024	-69,9147	26,9658	-59,6771	-17,0453	-31,4247	-71,5633	
2360	119	0,305	-69,9448	23,63259	-59,4656	-16,7107	-30,8937	-72,3106	
2380	120	0,3076	-69,8291	20,30959	-59,1046	-16,0892	-30,1875	-73,0508	
2400	121	0,3102	-69,5532	17,02457	-58,5728	-15,1444	-29,2929	-73,7818	
2420	122	0,3127	-69,123	13,92932	-57,8798	-13,8961	-28,2422	-74,4737	
2440	123	0,3153	-68,4894	10,80678	-56,9475	-12,2059	-26,9381	-75,1796	
2460	124	0,3179	-67,6505	7,815751	-55,7753	-10,0752	-25,4042	-75,8691	
2480	125	0,3205	-66,5898	4,991732	-54,3378	-7,46091	-23,6261	-76,54	
2500	126	0,3231	-65,2907	2,372292	-52,6083	-4,31784	-21,5891	-77,1899	
2520	127	0,3257	-63,7358	-0,00291	-50,5593	-0,59905	-19,2779	-77,8164	
2540	128	0,3282	-61,983	-2,01755	-48,2609	3,565138	-16,7828	-78,3945	
2560	129	0,3308	-59,8742	-3,79026	-45,5002	8,557068	-13,889	-78,9683	
2580	130	0,3334	-57,4554	-5,18863	-42,3311	14,27524	-10,6747	-79,5118	
2600	131	0,336	-54,7072	-6,1643	-38,7214	20,77445	-7,1236	-80,0226	
2620	132	0,3386	-51,6096	-6,66665	-34,6376	28,1115	-3,21914	-80,4985	
2640	133	0,3412	-48,1422	-6,64273	-30,0449	36,34529	1,055531	-80,9372	
2660	134	0,3438	-44,2838	-6,03721	-24,9073	45,53683	5,717573	-81,3364	
2680	135	0,3463	-40,1852	-4,85278	-19,4189	55,3368	10,58186	-81,6808	
2700	136	0,3489	-35,4969	-2,93649	-13,1032	66,59237	16,05472	-81,996	
zaman	(sn)	Sıra	Aşınma	7	8	9	10	11	12
			(mm)						
0	1	0	-314,323	-631,588	-1265,4	-324,332	-136,717	-588,026	
20	2	0,0026	-308,298	-599,463	-1200,92	-325,167	-142,935	-553,222	
40	3	0,0052	-302,29	-569,339	-1138,99	-325,291	-148,448	-521,091	
60	4	0,0078	-296,305	-541,116	-1079,54	-324,752	-153,292	-491,484	
80	5	0,0103	-290,579	-515,679	-1024,65	-323,654	-157,352	-465,261	
100	6	0,0129	-284,66	-490,904	-969,847	-321,955	-160,988	-440,19	
120	7	0,0155	-278,783	-467,75	-917,311	-319,73	-164,058	-417,232	
140	8	0,0181	-272,954	-446,131	-866,968	-317,022	-166,594	-396,256	
160	9	0,0207	-267,178	-425,961	-818,75	-313,873	-168,63	-377,139	
180	10	0,0233	-261,46	-407,16	-772,591	-310,322	-170,194	-359,76	
200	11	0,0258	-256,022	-390,298	-730,087	-306,562	-171,282	-344,583	
220	12	0,0284	-250,432	-373,954	-687,775	-302,33	-172,009	-330,285	
240	13	0,031	-244,913	-358,754	-647,331	-297,801	-172,349	-317,399	

260	14	0,0336	-239,469	-344,627	-608,694	-293,011	-172,329	-305,822
280	15	0,0362	-234,103	-331,507	-571,803	-287,989	-171,976	-295,456
300	16	0,0388	-228,819	-319,328	-536,6	-282,766	-171,314	-286,209
320	17	0,0414	-223,62	-308,028	-503,026	-277,371	-170,367	-277,99
340	18	0,0439	-218,704	-297,937	-472,228	-272,045	-169,21	-270,979
360	19	0,0465	-213,678	-288,192	-441,689	-266,389	-167,77	-264,534
380	20	0,0491	-208,745	-279,157	-412,618	-260,637	-166,111	-258,876
400	21	0,0517	-203,906	-270,782	-384,96	-254,811	-164,252	-253,932
420	22	0,0543	-199,164	-263,015	-358,666	-248,934	-162,215	-249,631
440	23	0,0569	-194,518	-255,809	-333,685	-243,027	-160,017	-245,906
460	24	0,0594	-190,144	-249,369	-310,858	-237,335	-157,768	-242,809
480	25	0,062	-185,694	-243,136	-288,313	-231,422	-155,307	-240,034
500	26	0,0646	-181,344	-237,337	-266,939	-225,532	-152,736	-237,658
520	27	0,0672	-177,095	-231,935	-246,692	-219,681	-150,071	-235,628
540	28	0,0698	-172,949	-226,891	-227,528	-213,884	-147,327	-233,893
560	29	0,0724	-168,905	-222,172	-209,403	-208,153	-144,518	-232,406
580	30	0,075	-164,963	-217,744	-192,276	-202,503	-141,658	-231,124
600	31	0,0775	-161,27	-213,734	-176,71	-197,156	-138,873	-230,045
620	32	0,0801	-157,53	-209,791	-161,422	-191,695	-135,949	-229,046
640	33	0,0827	-153,891	-206,055	-147,014	-186,345	-133,011	-228,138
660	34	0,0853	-150,354	-202,5	-133,447	-181,115	-130,069	-227,287
680	35	0,0879	-146,918	-199,102	-120,686	-176,013	-127,133	-226,465
700	36	0,0905	-143,582	-195,84	-108,695	-171,046	-124,212	-225,641
720	37	0,093	-140,468	-192,812	-97,8587	-166,403	-121,427	-224,826
740	38	0,0956	-137,325	-189,757	-87,2779	-161,717	-118,563	-223,93
760	39	0,0982	-134,28	-186,782	-77,3673	-157,182	-115,74	-222,967
780	40	0,1008	-131,33	-183,871	-68,0952	-152,801	-112,965	-221,916
800	41	0,1034	-128,475	-181,01	-59,4309	-148,577	-110,245	-220,762
820	42	0,106	-125,712	-178,185	-51,3445	-144,514	-107,586	-219,491
840	43	0,1086	-123,04	-175,384	-43,8074	-140,611	-104,993	-218,089
860	44	0,1111	-120,556	-172,705	-37,0519	-137,011	-102,569	-216,61
880	45	0,1137	-118,058	-169,924	-30,5116	-133,427	-100,122	-214,925
900	46	0,1163	-115,647	-167,14	-24,4401	-130,006	-97,7566	-213,086
920	47	0,1189	-113,319	-164,347	-18,8123	-126,746	-95,4758	-211,086
940	48	0,1215	-111,073	-161,538	-13,6036	-123,646	-93,2831	-208,922
960	49	0,1241	-108,907	-158,709	-8,79047	-120,705	-91,1815	-206,593
980	50	0,1266	-106,897	-155,967	-4,51413	-118,024	-89,2489	-204,197
1000	51	0,1292	-104,881	-153,089	-0,41122	-115,386	-87,3328	-201,543
1020	52	0,1318	-102,939	-150,182	3,3614	-112,899	-85,5141	-198,726
1040	53	0,1344	-101,067	-147,245	6,824185	-110,558	-83,7941	-195,749
1060	54	0,137	-99,2644	-144,279	9,996801	-108,359	-82,1738	-192,618
1080	55	0,1396	-97,5277	-141,283	12,89816	-106,299	-80,6538	-189,338
1100	56	0,1422	-95,855	-138,26	15,54643	-104,372	-79,2346	-185,916
1120	57	0,1447	-94,3046	-135,328	17,87041	-102,64	-77,9648	-182,498
1140	58	0,1473	-92,7502	-132,256	20,07222	-100,96	-76,7427	-178,821
1160	59	0,1499	-91,2525	-129,163	22,0705	-99,3972	-75,6203	-175,027
1180	60	0,1525	-89,809	-126,053	23,88061	-97,9462	-74,5967	-171,128
1200	61	0,1551	-88,4174	-122,931	25,51722	-96,601	-73,6708	-167,133
1220	62	0,1577	-87,075	-119,802	26,99433	-95,3552	-72,8411	-163,056
1240	63	0,1602	-85,8286	-116,79	28,27666	-94,2453	-72,1325	-159,068
1260	64	0,1628	-84,5761	-113,66	29,47912	-93,176	-71,4864	-154,863

1280	65	0,1654	-83,3657	-110,539	30,55981	-92,1869	-70,9309	-150,612
1300	66	0,168	-82,1951	-107,433	31,53021	-91,2712	-70,4637	-146,329
1320	67	0,1706	-81,0621	-104,348	32,40125	-90,4221	-70,0821	-142,027
1340	68	0,1732	-79,9642	-101,291	33,18324	-89,6327	-69,7836	-137,721
1360	69	0,1758	-78,8992	-98,2684	33,88593	-88,8962	-69,5652	-133,425
1380	70	0,1783	-77,9041	-95,4012	34,49537	-88,2315	-69,4278	-129,317
1400	71	0,1809	-76,8973	-92,4668	35,06868	-87,5786	-69,3575	-125,082
1420	72	0,1835	-75,9169	-89,5879	35,58832	-86,9583	-69,3579	-120,898
1440	73	0,1861	-74,961	-86,7716	36,0619	-86,3638	-69,4254	-116,781
1460	74	0,1887	-74,0275	-84,025	36,49651	-85,7884	-69,5567	-112,745
1480	75	0,1913	-73,1145	-81,3552	36,89874	-85,2255	-69,7479	-108,802
1500	76	0,1938	-72,2543	-78,8668	37,26068	-84,6901	-69,9849	-105,113
1520	77	0,1964	-71,3763	-76,3674	37,61673	-84,1333	-70,2829	-101,394
1540	78	0,199	-70,5137	-73,9648	37,95717	-83,5705	-70,6295	-97,8084
1560	79	0,2016	-69,6647	-71,6654	38,28675	-82,9957	-71,021	-94,3682
1580	80	0,2042	-68,828	-69,4753	38,60978	-82,4033	-71,4532	-91,0853
1600	81	0,2068	-68,0021	-67,4004	38,93016	-81,7879	-71,9223	-87,9707
1620	82	0,2094	-67,1857	-65,4461	39,25139	-81,1441	-72,4241	-85,0352
1640	83	0,2119	-66,4085	-63,6855	39,56394	-80,494	-72,9337	-82,3904
1660	84	0,2145	-65,6075	-61,9824	39,89545	-79,7809	-73,4881	-79,8337
1680	85	0,2171	-64,8127	-60,4138	40,23585	-79,0259	-74,0634	-77,4828
1700	86	0,2197	-64,0235	-58,9837	40,58713	-78,225	-74,6555	-75,345
1720	87	0,2223	-63,2391	-57,6952	40,95093	-77,3748	-75,2606	-73,4266
1740	88	0,2249	-62,4588	-56,5512	41,32855	-76,4719	-75,8747	-71,7332
1760	89	0,2274	-61,7122	-55,5893	41,70558	-75,5514	-76,4702	-70,321
1780	90	0,23	-60,939	-54,734	42,11284	-74,5375	-77,091	-69,0803
1800	91	0,2326	-60,1691	-54,0276	42,5359	-73,464	-77,7098	-68,0739
1820	92	0,2352	-59,4025	-53,4702	42,97485	-72,3292	-78,3228	-67,3028
1840	93	0,2378	-58,6392	-53,0612	43,42948	-71,1322	-78,9267	-66,7664
1860	94	0,2404	-57,8796	-52,7992	43,89934	-69,8725	-79,5181	-66,4629
1880	95	0,243	-57,1242	-52,6822	44,3837	-68,5501	-80,0936	-66,3892
1900	96	0,2455	-56,4022	-52,7034	44,86222	-67,2198	-80,6292	-66,5305
1920	97	0,2481	-55,6567	-52,861	45,37201	-65,7764	-81,1649	-66,8923
1940	98	0,2507	-54,9177	-53,152	45,8928	-64,2735	-81,6759	-67,4654
1960	99	0,2533	-54,1861	-53,5707	46,42295	-62,7132	-82,1597	-68,2405
1980	100	0,2559	-53,4634	-54,1105	46,96066	-61,0986	-82,6137	-69,2067
2000	101	0,2585	-52,7511	-54,7637	47,50392	-59,4329	-83,0357	-70,3511
2020	102	0,261	-52,0774	-55,4905	48,0295	-57,787	-83,4093	-71,6061
2040	103	0,2636	-51,3902	-56,3397	48,57717	-56,0338	-83,7624	-73,0562
2060	104	0,2662	-50,719	-57,2733	49,12349	-54,2437	-84,0779	-74,6361
2080	105	0,2688	-50,0658	-58,2792	49,6658	-52,4229	-84,3542	-76,3257
2100	106	0,2714	-49,4332	-59,3443	50,20136	-50,5781	-84,5901	-78,1028
2120	107	0,274	-48,8238	-60,4542	50,72728	-48,7168	-84,7847	-79,9434
2140	108	0,2766	-48,2405	-61,5933	51,24057	-46,8475	-84,937	-81,8211
2160	109	0,2791	-47,7071	-62,7004	51,71932	-45,0508	-85,0433	-83,6352
2180	110	0,2817	-47,1842	-63,8465	52,19876	-43,1926	-85,1119	-85,5012
2200	111	0,2843	-46,6972	-64,9679	52,65616	-41,3554	-85,1376	-87,3138
2220	112	0,2869	-46,2499	-66,0439	53,08821	-39,5506	-85,1209	-89,038
2240	113	0,2895	-45,8462	-67,0521	53,49154	-37,7904	-85,0625	-90,6364
2260	114	0,2921	-45,4904	-67,9691	53,86271	-36,0879	-84,9632	-92,0691
2280	115	0,2946	-45,1976	-68,7413	54,18606	-34,5183	-84,8304	-93,2514

2300	116	0,2972	-44,9488	-69,4049	54,48411	-32,9704	-84,655	-94,2344
2320	117	0,2998	-44,7618	-69,8986	54,73971	-31,5239	-84,4434	-94,9196
2340	118	0,3024	-44,6417	-70,1927	54,94938	-30,1955	-84,1981	-95,2572
2360	119	0,305	-44,594	-70,2562	55,10961	-29,0026	-83,9215	-95,195
2380	120	0,3076	-44,6243	-70,0564	55,21695	-27,9637	-83,6166	-94,6778
2400	121	0,3102	-44,7386	-69,5588	55,26794	-27,0981	-83,2867	-93,6481
2420	122	0,3127	-44,9334	-68,7662	55,26066	-26,4481	-82,9495	-92,1183
2440	123	0,3153	-45,2307	-67,5786	55,19128	-25,9822	-82,582	-89,9049
2460	124	0,3179	-45,6311	-65,9818	55,05562	-25,7526	-82,2016	-86,9916
2480	125	0,3205	-46,1415	-63,9348	54,85043	-25,7825	-81,8133	-83,3095
2500	126	0,3231	-46,7694	-61,3946	54,57257	-26,0961	-81,4225	-78,7869
2520	127	0,3257	-47,5221	-58,3168	54,21897	-26,7187	-81,0347	-73,3487
2540	128	0,3282	-48,3709	-54,8071	53,80477	-27,6331	-80,6704	-67,184
2560	129	0,3308	-49,3916	-50,538	53,29405	-28,9392	-80,307	-59,7213
2580	130	0,3334	-50,5612	-45,5883	52,69911	-30,6351	-79,966	-51,1037
2600	131	0,336	-51,8883	-39,9062	52,01732	-32,7505	-79,6551	-41,244
2620	132	0,3386	-53,3819	-33,4377	51,2462	-35,3158	-79,3821	-30,0522
2640	133	0,3412	-55,0512	-26,1269	50,38339	-38,3628	-79,1553	-17,4348
2660	134	0,3438	-56,9058	-17,9162	49,42671	-41,9241	-78,9837	-3,2949
2680	135	0,3463	-58,873	-9,11684	48,41643	-45,865	-78,8793	11,82992
2700	136	0,3489	-61,1199	1,034841	47,26992	-50,5348	-78,8433	29,24972
zaman	Sıra	Aşınma	13	14	15	16	17	18
(sn)		(mm)						
0	1	0	-487,02	-370,577	-142,463	-440,32	-1281,59	-1414,14
20	2	0,0026	-475,742	-373,205	-139,634	-422,773	-1194,52	-1310,63
40	3	0,0052	-464,728	-375,116	-136,893	-406,085	-1112,91	-1213,23
60	4	0,0078	-453,97	-376,348	-134,235	-390,22	-1036,51	-1121,67
80	5	0,0103	-443,864	-376,93	-131,751	-375,707	-967,715	-1038,9
100	6	0,0129	-433,594	-376,944	-129,239	-361,353	-900,803	-958,045
120	7	0,0155	-423,566	-376,392	-126,795	-347,72	-838,386	-882,287
140	8	0,0181	-413,773	-375,307	-124,414	-334,776	-780,238	-811,386
160	9	0,0207	-404,211	-373,725	-122,093	-322,49	-726,142	-745,114
180	10	0,0233	-394,874	-371,676	-119,826	-310,831	-675,889	-683,248
200	11	0,0258	-386,105	-369,297	-117,696	-300,186	-631,003	-627,716
220	12	0,0284	-377,197	-366,425	-115,527	-289,675	-587,703	-573,874
240	13	0,031	-368,501	-363,176	-113,403	-279,709	-547,663	-523,819
260	14	0,0336	-360,013	-359,579	-111,32	-270,259	-510,7	-477,357
280	15	0,0362	-351,728	-355,661	-109,276	-261,302	-476,638	-434,298
300	16	0,0388	-343,642	-351,446	-107,268	-252,812	-445,305	-394,461
320	17	0,0414	-335,752	-346,96	-105,292	-244,766	-416,537	-357,668
340	18	0,0439	-328,346	-342,413	-103,422	-237,426	-391,148	-325,004
360	19	0,0465	-320,829	-337,463	-101,506	-230,183	-366,959	-293,696
380	20	0,0491	-313,496	-332,308	-99,6152	-223,319	-344,884	-264,947
400	21	0,0517	-306,344	-326,97	-97,7495	-216,812	-324,784	-238,605
420	22	0,0543	-299,37	-321,467	-95,9067	-210,642	-306,522	-214,523
440	23	0,0569	-292,571	-315,82	-94,0851	-204,791	-289,97	-192,559
460	24	0,0594	-286,195	-310,27	-92,3523	-199,449	-275,551	-173,313
480	25	0,062	-279,73	-304,39	-90,5682	-194,171	-261,998	-155,118
500	26	0,0646	-273,43	-298,415	-88,8015	-189,159	-249,803	-138,656
520	27	0,0672	-267,294	-292,361	-87,0509	-184,398	-238,857	-123,808
540	28	0,0698	-261,318	-286,242	-85,3156	-179,872	-229,058	-110,459

560	29	0,0724	-255,5	-280,072	-83,5947	-175,566	-220,308	-98,4989
580	30	0,075	-249,838	-273,865	-81,8876	-171,467	-212,511	-87,8238
600	31	0,0775	-244,538	-267,872	-80,2585	-167,708	-205,832	-78,6776
620	32	0,0801	-239,173	-261,625	-78,5765	-163,975	-199,653	-70,2361
640	33	0,0827	-233,957	-255,374	-76,9069	-160,41	-194,179	-62,7966
660	34	0,0853	-228,887	-249,129	-75,2491	-157,002	-189,334	-56,2724
680	35	0,0879	-223,962	-242,9	-73,6031	-153,74	-185,045	-50,5814
700	36	0,0905	-219,179	-236,695	-71,9686	-150,613	-181,246	-45,6459
720	37	0,093	-214,712	-230,759	-70,4079	-147,725	-177,997	-41,5437
740	38	0,0956	-210,203	-224,625	-68,7961	-144,835	-174,979	-37,8794
760	39	0,0982	-205,83	-218,538	-67,196	-142,053	-172,275	-34,7636
780	40	0,1008	-201,591	-212,504	-65,6078	-139,37	-169,834	-32,1343
800	41	0,1034	-197,486	-206,529	-64,0317	-136,778	-167,606	-29,9333
820	42	0,106	-193,513	-200,617	-62,4679	-134,271	-165,548	-28,1057
840	43	0,1086	-189,669	-194,775	-60,917	-131,841	-163,617	-26,6005
860	44	0,1111	-186,094	-189,226	-59,4382	-129,571	-161,846	-25,4126
880	45	0,1137	-182,501	-183,531	-57,9136	-127,275	-160,059	-24,4041
900	46	0,1163	-179,033	-177,916	-56,4032	-125,038	-158,296	-23,5861
920	47	0,1189	-175,689	-172,383	-54,9075	-122,856	-156,53	-22,9205
940	48	0,1215	-172,467	-166,936	-53,4271	-120,724	-154,734	-22,3721
960	49	0,1241	-169,366	-161,577	-51,9627	-118,637	-152,884	-21,9088
980	50	0,1266	-166,497	-156,508	-50,5703	-116,67	-151,037	-21,5161
1000	51	0,1292	-163,63	-151,325	-49,1391	-114,661	-149,027	-21,137
1020	52	0,1318	-160,88	-146,233	-47,726	-112,688	-146,911	-20,7638
1040	53	0,1344	-158,245	-141,233	-46,3316	-110,747	-144,676	-20,375
1060	54	0,137	-155,725	-136,326	-44,9567	-108,835	-142,312	-19,9516
1080	55	0,1396	-153,319	-131,511	-43,6021	-106,95	-139,81	-19,4768
1100	56	0,1422	-151,024	-126,788	-42,2686	-105,091	-137,164	-18,9362
1120	57	0,1447	-148,922	-122,334	-41,0069	-103,326	-134,48	-18,3428
1140	58	0,1473	-146,843	-117,79	-39,717	-101,512	-131,54	-17,6391
1160	59	0,1499	-144,872	-113,337	-38,4505	-99,7189	-128,448	-16,839
1180	60	0,1525	-143,008	-108,972	-37,2082	-97,9462	-125,205	-15,936
1200	61	0,1551	-141,25	-104,695	-35,9909	-96,1932	-121,815	-14,9253
1220	62	0,1577	-139,596	-100,504	-34,7995	-94,4593	-118,28	-13,804
1240	63	0,1602	-138,104	-96,5538	-33,6789	-92,8099	-114,751	-12,6201
1260	64	0,1628	-136,651	-92,5264	-32,5402	-91,1131	-110,952	-11,2789
1280	65	0,1654	-135,299	-88,5796	-31,4297	-89,4354	-107,028	-9,82713
1300	66	0,168	-134,047	-84,7114	-30,3479	-87,7769	-102,99	-8,26748
1320	67	0,1706	-132,892	-80,9197	-29,2957	-86,1383	-98,8474	-6,60392
1340	68	0,1732	-131,834	-77,2022	-28,2737	-84,5201	-94,6115	-4,84156
1360	69	0,1758	-130,872	-73,5567	-27,2825	-82,923	-90,2944	-2,98656
1380	70	0,1783	-130,034	-70,1171	-26,3591	-81,4082	-86,0785	-1,12212
1400	71	0,1809	-129,254	-66,6061	-25,4303	-79,8553	-81,6395	0,89321
1420	72	0,1835	-128,565	-63,1602	-24,5342	-78,3264	-77,1588	2,977749
1440	73	0,1861	-127,965	-59,7771	-23,6712	-76,8228	-72,6509	5,122109
1460	74	0,1887	-127,453	-56,4546	-22,8419	-75,3457	-68,1305	7,316307
1480	75	0,1913	-127,028	-53,1902	-22,0468	-73,8963	-63,6128	9,549853
1500	76	0,1938	-126,698	-50,1042	-21,3149	-72,5301	-59,2857	11,72445
1520	77	0,1964	-126,437	-46,9477	-20,5879	-71,1392	-54,8178	14,00318
1540	78	0,199	-126,257	-43,8432	-19,8962	-69,7801	-50,3981	16,28808
1560	79	0,2016	-126,156	-40,7885	-19,24	-68,4544	-46,0421	18,56751

1580	80	0,2042	-126,133	-37,782	-18,6196	-67,1634	-41,7649	20,82977
1600	81	0,2068	-126,186	-34,8219	-18,0351	-65,9086	-37,5815	23,06318
1620	82	0,2094	-126,313	-31,9066	-17,4867	-64,6914	-33,5065	25,25615
1640	83	0,2119	-126,502	-29,1444	-16,9935	-63,5578	-29,7037	27,31602
1660	84	0,2145	-126,768	-26,3131	-16,5159	-62,4185	-25,8821	29,39681
1680	85	0,2171	-127,101	-23,523	-16,0745	-61,3207	-22,2093	31,40427
1700	86	0,2197	-127,499	-20,7732	-15,669	-60,2658	-18,6978	33,32806
1720	87	0,2223	-127,961	-18,0631	-15,2993	-59,2549	-15,3591	35,15836
1740	88	0,2249	-128,483	-15,3923	-14,9651	-58,2891	-12,204	36,88596
1760	89	0,2274	-129,04	-12,8611	-14,6771	-57,404	-9,35264	38,44231
1780	90	0,23	-129,675	-10,2672	-14,4117	-56,5295	-6,58529	39,94441
1800	91	0,2326	-130,363	-7,71278	-14,1808	-55,7027	-4,02751	41,32087
1820	92	0,2352	-131,101	-5,19865	-13,9838	-54,9243	-1,68577	42,56571
1840	93	0,2378	-131,888	-2,72569	-13,8202	-54,1948	0,434747	43,67395
1860	94	0,2404	-132,719	-0,29518	-13,6893	-53,5146	2,330225	44,6417
1880	95	0,243	-133,593	2,091312	-13,5903	-52,8839	3,99832	45,46626
1900	96	0,2455	-134,47	4,342709	-13,5245	-52,3241	5,387066	46,12272
1920	97	0,2481	-135,418	6,636928	-13,4858	-51,7904	6,608334	46,66345
1940	98	0,2507	-136,399	8,880388	-13,4764	-51,3057	7,604661	47,06069
1960	99	0,2533	-137,409	11,07008	-13,4953	-50,8696	8,380316	47,31717
1980	100	0,2559	-138,446	13,20262	-13,5414	-50,4814	8,941443	47,43723
2000	101	0,2585	-139,505	15,2742	-13,6135	-50,1401	9,296144	47,42685
2020	102	0,261	-140,542	17,20471	-13,706	-49,855	9,451955	47,30101
2040	103	0,2636	-141,636	19,14408	-13,8252	-49,6021	9,433173	47,05884
2060	104	0,2662	-142,741	21,00877	-13,9662	-49,392	9,244236	46,71438
2080	105	0,2688	-143,855	22,79326	-14,1277	-49,2227	8,901801	46,28093
2100	106	0,2714	-144,972	24,49156	-14,3078	-49,0921	8,424886	45,77381
2120	107	0,274	-146,089	26,09723	-14,505	-48,9978	7,834948	45,21046
2140	108	0,2766	-147,201	27,60331	-14,7174	-48,9371	7,155965	44,61051
2160	109	0,2791	-148,263	28,95064	-14,9343	-48,9075	6,443838	44,01949
2180	110	0,2817	-149,353	30,2393	-15,171	-48,9035	5,669869	43,41352
2200	111	0,2843	-150,426	31,40486	-15,4171	-48,9232	4,893405	42,84264
2220	112	0,2869	-151,477	32,43831	-15,6704	-48,9627	4,149176	42,33589
2240	113	0,2895	-152,499	33,33014	-15,9286	-49,0177	3,47482	41,92485
2260	114	0,2921	-153,49	34,07026	-16,1895	-49,0836	2,91096	41,64376
2280	115	0,2946	-154,406	34,62892	-16,4406	-49,1526	2,513629	41,53037
2300	116	0,2972	-155,318	35,03997	-16,6995	-49,2251	2,296315	41,614
2320	117	0,2998	-156,182	35,26606	-16,9536	-49,2928	2,328055	41,94506
2340	118	0,3024	-156,992	35,29482	-17,2002	-49,3496	2,662046	42,56891
2360	119	0,305	-157,743	35,11324	-17,4364	-49,389	3,354849	43,5339
2380	120	0,3076	-158,429	34,70771	-17,6593	-49,4043	4,46646	44,89144
2400	121	0,3102	-159,044	34,06396	-17,8661	-49,3882	6,060386	46,69606
2420	122	0,3127	-159,563	33,20648	-18,0467	-49,3361	8,110283	48,90662
2440	123	0,3153	-160,021	32,05164	-18,2127	-49,2359	10,84857	51,75897
2460	124	0,3179	-160,39	30,61261	-18,353	-49,0805	14,27857	55,23896
2480	125	0,3205	-160,663	28,87254	-18,4643	-48,861	18,47843	59,41423
2500	126	0,3231	-160,833	26,81393	-18,5432	-48,568	23,53015	64,35587
2520	127	0,3257	-160,895	24,41857	-18,5861	-48,1919	29,5197	70,13852
2540	128	0,3282	-160,844	21,78016	-18,5901	-47,7422	36,24703	76,56469
2560	129	0,3308	-160,671	18,66868	-18,5518	-47,1726	44,34134	84,22774
2580	130	0,3334	-160,367	15,1624	-18,4664	-46,4881	53,65191	92,97429

2600	131	0,336	-159,926	11,24031	-18,3301	-45,677	64,28104	102,8937
2620	132	0,3386	-159,34	6,88064	-18,1388	-44,7272	76,33533	114,0792
2640	133	0,3412	-158,6	2,060903	-17,8884	-43,626	89,92574	126,6278
2660	134	0,3438	-157,7	-3,24215	-17,5747	-42,3604	105,1677	140,6409
2680	135	0,3463	-156,674	-8,81938	-17,2094	-40,9756	121,4925	155,5939
2700	136	0,3489	-155,435	-15,1409	-16,7589	-39,3472	140,3265	172,7888
zaman	Sıra	Aşınma	19	20	21	22	23	24
(sn)		(mm)						
0	1	0	-631,732	-513,816	-548,135	-641,463	-338,43	-867,242
20	2	0,0026	-610,692	-496,565	-513,164	-604,944	-346,255	-828,85
40	3	0,0052	-590,382	-479,392	-480,309	-570,792	-352,722	-792,368
60	4	0,0078	-570,778	-462,329	-449,467	-538,888	-357,91	-757,721
80	5	0,0103	-552,567	-446,058	-421,62	-510,226	-361,758	-726,065
100	6	0,0129	-534,27	-429,306	-394,45	-482,404	-364,646	-694,796
120	7	0,0155	-516,603	-412,754	-369,015	-456,502	-366,465	-665,143
140	8	0,0181	-499,542	-396,431	-345,227	-432,416	-367,282	-637,035
160	9	0,0207	-483,065	-380,361	-323,001	-410,045	-367,162	-610,407
180	10	0,0233	-467,149	-364,567	-302,255	-389,294	-366,167	-585,192
200	11	0,0258	-452,354	-349,662	-283,628	-370,78	-364,441	-562,22
220	12	0,0284	-437,477	-334,473	-265,556	-352,937	-361,903	-539,594
240	13	0,031	-423,099	-319,619	-248,736	-336,447	-358,662	-518,2
260	14	0,0336	-409,202	-305,118	-233,098	-321,227	-354,772	-497,979
280	15	0,0362	-395,765	-290,986	-218,571	-307,197	-350,285	-478,875
300	16	0,0388	-382,771	-277,236	-205,091	-294,279	-345,251	-460,834
320	17	0,0414	-370,203	-263,881	-192,593	-282,402	-339,717	-443,805
340	18	0,0439	-358,504	-251,423	-181,446	-271,895	-333,969	-428,337
360	19	0,0465	-346,721	-238,874	-170,7	-261,853	-327,588	-413,145
380	20	0,0491	-335,315	-226,749	-160,764	-252,65	-320,838	-398,82
400	21	0,0517	-324,271	-215,055	-151,581	-244,224	-313,76	-385,315
420	22	0,0543	-313,574	-203,798	-143,102	-236,515	-306,393	-372,588
440	23	0,0569	-303,21	-192,983	-135,277	-229,467	-298,773	-360,595
460	24	0,0594	-293,547	-183,005	-128,324	-223,264	-291,241	-349,719
480	25	0,062	-283,797	-173,066	-121,646	-217,359	-283,227	-339,05
500	26	0,0646	-274,343	-163,576	-115,487	-211,963	-275,059	-329,001
520	27	0,0672	-265,171	-154,536	-109,806	-207,03	-266,769	-319,534
540	28	0,0698	-256,27	-145,945	-104,566	-202,517	-258,385	-310,615
560	29	0,0724	-247,629	-137,8	-99,7283	-198,381	-249,935	-302,21
580	30	0,075	-239,238	-130,1	-95,2583	-194,583	-241,443	-294,288
600	31	0,0775	-231,396	-123,112	-91,276	-191,217	-233,262	-287,098
620	32	0,0801	-223,467	-116,271	-87,4324	-187,98	-224,76	-280,036
640	33	0,0827	-215,758	-109,862	-83,8633	-184,978	-216,285	-273,369
660	34	0,0853	-208,262	-103,878	-80,5407	-182,181	-207,856	-267,073
680	35	0,0879	-200,971	-98,3119	-77,4383	-179,562	-199,494	-261,12
700	36	0,0905	-193,876	-93,1559	-74,5314	-177,092	-191,216	-255,488
720	37	0,093	-187,232	-88,5774	-71,8993	-174,837	-183,35	-250,353
740	38	0,0956	-180,502	-84,2013	-69,3106	-172,594	-175,282	-245,282
760	39	0,0982	-173,946	-80,2088	-66,8535	-170,433	-167,342	-240,468
780	40	0,1008	-167,559	-76,5896	-64,5097	-168,336	-159,543	-235,889
800	41	0,1034	-161,336	-73,3329	-62,2618	-166,285	-151,897	-231,528
820	42	0,106	-155,269	-70,4274	-60,094	-164,265	-144,415	-227,367
840	43	0,1086	-149,355	-67,8611	-57,992	-162,26	-137,106	-223,389

860	44	0,1111	-143,806	-65,7019	-56,0204	-160,336	-130,249	-219,724
880	45	0,1137	-138,175	-63,7649	-54,0099	-158,326	-123,303	-216,063
900	46	0,1163	-132,682	-62,1294	-52,0296	-156,299	-116,552	-212,543
920	47	0,1189	-127,323	-60,7819	-50,0698	-154,245	-110,002	-209,151
940	48	0,1215	-122,093	-59,7086	-48,1218	-152,158	-103,658	-205,876
960	49	0,1241	-116,989	-58,8953	-46,1783	-150,03	-97,5241	-202,707
980	50	0,1266	-112,198	-58,3452	-44,3076	-147,942	-91,8265	-199,75
1000	51	0,1292	-107,332	-58	-42,3548	-145,722	-86,1121	-196,76
1020	52	0,1318	-102,583	-57,8715	-40,39	-143,452	-80,6142	-193,849
1040	53	0,1344	-97,9486	-57,9448	-38,4095	-141,128	-75,3338	-191,009
1060	54	0,137	-93,4256	-58,2048	-36,4106	-138,751	-70,2711	-188,233
1080	55	0,1396	-89,0119	-58,6363	-34,391	-136,32	-65,4254	-185,515
1100	56	0,1422	-84,7056	-59,2239	-32,3496	-133,837	-60,7956	-182,849
1120	57	0,1447	-80,6643	-59,922	-30,3655	-131,403	-56,5458	-180,33
1140	58	0,1473	-76,5632	-60,7715	-28,2802	-128,824	-52,3338	-177,753
1160	59	0,1499	-72,5642	-61,7318	-26,1733	-126,201	-48,3307	-175,216
1180	60	0,1525	-68,6659	-62,7879	-24,0463	-123,537	-44,5332	-172,715
1200	61	0,1551	-64,8671	-63,9244	-21,9008	-120,839	-40,9374	-170,248
1220	62	0,1577	-61,1667	-65,1264	-19,7395	-118,11	-37,5389	-167,813
1240	63	0,1602	-57,7003	-66,3302	-17,649	-115,463	-34,4527	-165,501
1260	64	0,1628	-54,1897	-67,6178	-15,4653	-112,693	-31,427	-163,124
1280	65	0,1654	-50,7747	-68,9276	-13,2756	-109,911	-28,5833	-160,777
1300	66	0,168	-47,4545	-70,2454	-11,0838	-107,125	-25,9157	-158,457
1320	67	0,1706	-44,2284	-71,5572	-8,89433	-104,342	-23,4182	-156,167
1340	68	0,1732	-41,0959	-72,8495	-6,71195	-101,569	-21,0842	-153,905
1360	69	0,1758	-38,0564	-74,109	-4,54151	-98,8157	-18,9071	-151,674
1380	70	0,1783	-35,2211	-75,2772	-2,47058	-96,1932	-16,9551	-149,558
1400	71	0,1809	-32,3627	-76,4354	-0,33856	-93,5001	-15,0652	-147,389
1420	72	0,1835	-29,5961	-77,5239	1,76597	-90,8502	-13,3111	-145,255
1440	73	0,1861	-26,9208	-78,5312	3,837543	-88,2518	-11,6853	-143,158
1460	74	0,1887	-24,3365	-79,4461	5,870658	-85,7133	-10,1802	-141,099
1480	75	0,1913	-21,8428	-80,2582	7,859803	-83,2431	-8,78838	-139,082
1500	76	0,1938	-19,5301	-80,9326	9,725879	-80,94	-7,54963	-137,183
1520	77	0,1964	-17,2131	-81,5143	11,61294	-78,6276	-6,35743	-135,254
1540	78	0,199	-14,9855	-81,9653	13,44005	-76,4073	-5,25561	-133,375
1560	79	0,2016	-12,847	-82,2772	15,20207	-74,2869	-4,2365	-131,548
1580	80	0,2042	-10,797	-82,4427	16,89402	-72,2739	-3,29247	-129,776
1600	81	0,2068	-8,83505	-82,4549	18,51115	-70,3751	-2,41599	-128,063
1620	82	0,2094	-6,96053	-82,3077	20,04898	-68,5975	-1,59961	-126,412
1640	83	0,2119	-5,23995	-82,011	21,44897	-67,0082	-0,86453	-124,886
1660	84	0,2145	-3,53495	-81,5366	22,81936	-65,4858	-0,14501	-123,365
1680	85	0,2171	-1,91519	-80,8894	24,09903	-64,1017	0,535524	-121,916
1700	86	0,2197	-0,37976	-80,0666	25,28487	-62,8607	1,183815	-120,54
1720	87	0,2223	1,072358	-79,066	26,37422	-61,767	1,806374	-119,242
1740	88	0,2249	2,442305	-77,8867	27,3649	-60,8241	2,409444	-118,024
1760	89	0,2274	3,683235	-76,5839	28,22285	-60,0625	2,976484	-116,931
1780	90	0,23	4,89576	-75,0542	29,01562	-59,4233	3,558324	-115,878
1800	91	0,2326	6,030214	-73,3479	29,70639	-58,9415	4,137366	-114,912
1820	92	0,2352	7,088262	-71,4677	30,29521	-58,6176	4,718556	-114,037
1840	93	0,2378	8,071726	-69,4175	30,78279	-58,4515	5,30645	-113,254
1860	94	0,2404	8,98259	-67,2021	31,17054	-58,4421	5,905189	-112,564

1880	95	0,243	9,823012	-64,8274	31,46056	-58,5873	6,518476	-111,97
1900	96	0,2455	10,56685	-62,4003	31,64994	-58,8701	7,124911	-111,49
1920	97	0,2481	11,27607	-59,7347	31,75737	-59,3092	7,77568	-111,087
1940	98	0,2507	11,92232	-56,9339	31,77794	-59,8911	8,449144	-110,781
1960	99	0,2533	12,50853	-54,0086	31,71697	-60,6099	9,147022	-110,574
1980	100	0,2559	13,03784	-50,9705	31,58066	-61,4583	9,870477	-110,466
2000	101	0,2585	13,5136	-47,8327	31,37618	-62,4279	10,62009	-110,455
2020	102	0,261	13,92389	-44,7347	31,1228	-63,4656	11,36551	-110,537
2040	103	0,2636	14,30524	-41,4437	30,80903	-64,6439	12,16575	-110,715
2060	104	0,2662	14,64436	-38,0992	30,454	-65,9115	12,99021	-110,988
2080	105	0,2688	14,94555	-34,7191	30,06884	-67,2548	13,83693	-111,352
2100	106	0,2714	15,21338	-31,3233	29,66578	-68,6592	14,70325	-111,805
2120	107	0,274	15,4527	-27,9326	29,25819	-70,1084	15,58578	-112,345
2140	108	0,2766	15,66862	-24,5695	28,86057	-71,5849	16,4804	-112,966
2160	109	0,2791	15,8592	-21,3841	28,50225	-73,0127	17,34747	-113,637
2180	110	0,2817	16,04517	-18,1461	28,17093	-74,486	18,25087	-114,406
2200	111	0,2843	16,22458	-15,0108	27,89965	-75,9258	19,14957	-115,243
2220	112	0,2869	16,40372	-12,0067	27,70781	-77,3084	20,03628	-116,141
2240	113	0,2895	16,58918	-9,16363	27,61614	-78,6084	20,90286	-117,094
2260	114	0,2921	16,78788	-6,51312	27,6467	-79,7991	21,74028	-118,095
2280	115	0,2946	16,99817	-4,17697	27,81316	-80,8142	22,5088	-119,094
2300	116	0,2972	17,2442	-2,00189	28,15286	-81,7056	23,25941	-120,164
2320	117	0,2998	17,52591	-0,12221	28,68832	-82,3978	23,94884	-121,255
2340	118	0,3024	17,85155	1,424076	29,44723	-82,8569	24,56439	-122,357
2360	119	0,305	18,22976	2,597244	30,45879	-83,0474	25,09241	-123,46
2380	120	0,3076	18,6695	3,355863	31,7537	-82,9317	25,51822	-124,552
2400	121	0,3102	19,18012	3,656749	33,36424	-82,4704	25,82613	-125,619
2420	122	0,3127	19,74702	3,472566	35,242	-81,6624	25,99546	-126,612
2440	123	0,3153	20,42532	2,743351	37,57152	-80,4011	26,02256	-127,594
2460	124	0,3179	21,20444	1,418038	40,32167	-78,666	25,87912	-128,51
2480	125	0,3205	22,09529	-0,55371	43,53119	-76,4096	25,54524	-129,346
2500	126	0,3231	23,10914	-3,22408	47,2405	-73,5828	24,99987	-130,083
2520	127	0,3257	24,25771	-6,64717	51,49176	-70,134	24,22082	-130,705
2540	128	0,3282	25,50044	-10,7006	56,13149	-66,1815	23,22966	-131,177
2560	129	0,3308	26,94888	-15,7645	61,57508	-61,355	21,92338	-131,518
2580	130	0,3334	28,56918	-21,7527	67,69592	-55,7416	20,31088	-131,686
2600	131	0,336	30,37475	-28,7267	74,54332	-49,2811	18,36529	-131,659
2620	132	0,3386	32,37943	-36,7505	82,16846	-41,9113	16,0585	-131,416
2640	133	0,3412	34,59752	-45,8897	90,62439	-33,5674	13,36115	-130,932
2660	134	0,3438	37,04378	-56,2122	99,96612	-24,1826	10,24262	-130,185
2680	135	0,3463	39,62529	-67,3187	109,8369	-14,1127	6,81715	-129,193
2700	136	0,3489	42,56374	-80,1672	121,0834	-2,48258	2,778556	-127,852
zaman	Sıra	Aşınma	25	26	27	28	29	30
(sn)		(mm)						
0	1	0	-394,467	19,4733	-1876,7	-921,494	-629,419	-504,065
20	2	0,0026	-391,619	-22,0132	-1745,89	-858,269	-616,646	-487,902
40	3	0,0052	-388,166	-60,0817	-1623,28	-799,368	-603,56	-472,317
60	4	0,0078	-384,152	-94,8998	-1508,5	-744,572	-590,199	-457,291
80	5	0,0103	-379,802	-125,465	-1405,14	-695,555	-577,127	-443,35
100	6	0,0129	-374,806	-154,374	-1304,61	-648,196	-563,333	-429,363
120	7	0,0155	-369,367	-180,499	-1210,81	-604,331	-549,369	-415,879

140	8	0,0181	-363,523	-203,988	-1123,41	-563,766	-535,267	-402,879
160	9	0,0207	-357,308	-224,985	-1042,08	-526,316	-521,059	-390,347
180	10	0,0233	-350,759	-243,627	-966,49	-491,802	-506,774	-378,264
200	11	0,0258	-344,176	-259,456	-898,946	-461,223	-492,991	-367,056
220	12	0,0284	-337,063	-273,864	-833,752	-431,97	-478,636	-355,808
240	13	0,031	-329,709	-286,302	-773,426	-405,16	-464,283	-344,963
260	14	0,0336	-322,143	-296,889	-717,69	-380,636	-449,957	-334,503
280	15	0,0362	-314,392	-305,743	-666,279	-358,252	-435,682	-324,415
300	16	0,0388	-306,484	-312,975	-618,934	-337,864	-421,478	-314,684
320	17	0,0414	-298,443	-318,694	-575,41	-319,335	-407,368	-305,294
340	18	0,0439	-290,61	-322,863	-536,941	-303,149	-393,906	-296,576
360	19	0,0465	-282,379	-325,913	-500,229	-287,891	-380,033	-287,817
380	20	0,0491	-274,084	-327,746	-466,661	-274,12	-366,307	-279,36
400	21	0,0517	-265,747	-328,455	-436,027	-261,72	-352,745	-271,192
420	22	0,0543	-257,386	-328,128	-408,124	-250,581	-339,361	-263,3
440	23	0,0569	-249,02	-326,852	-382,761	-240,598	-326,17	-255,672
460	24	0,0594	-240,988	-324,804	-360,596	-231,997	-313,68	-248,576
480	25	0,062	-232,664	-321,897	-339,686	-223,996	-300,903	-241,432
500	26	0,0646	-224,385	-318,271	-320,793	-216,87	-288,355	-234,518
520	27	0,0672	-216,165	-313,996	-303,756	-210,532	-276,045	-227,824
540	28	0,0698	-208,018	-309,142	-288,423	-204,901	-263,982	-221,338
560	29	0,0724	-199,957	-303,772	-274,648	-199,899	-252,176	-215,05
580	30	0,075	-191,995	-297,948	-262,295	-195,455	-240,633	-208,951
600	31	0,0775	-184,441	-291,974	-251,634	-191,643	-229,789	-203,256
620	32	0,0801	-176,702	-285,426	-241,695	-188,096	-218,781	-197,5
640	33	0,0827	-169,091	-278,588	-232,809	-184,914	-208,053	-191,905
660	34	0,0853	-161,618	-271,509	-224,868	-182,042	-197,611	-186,463
680	35	0,0879	-154,289	-264,236	-217,766	-179,426	-187,456	-181,166
700	36	0,0905	-147,112	-256,814	-211,407	-177,017	-177,593	-176,005
720	37	0,093	-140,36	-249,574	-205,907	-174,854	-168,385	-171,164
740	38	0,0956	-133,499	-241,974	-200,744	-172,721	-159,098	-166,248
760	39	0,0982	-126,807	-234,34	-196,07	-170,67	-150,106	-161,448
780	40	0,1008	-120,287	-226,704	-191,811	-168,664	-141,409	-156,755
800	41	0,1034	-113,944	-219,097	-187,898	-166,672	-133,007	-152,163
820	42	0,106	-107,78	-211,55	-184,267	-164,662	-124,899	-147,666
840	43	0,1086	-101,798	-204,088	-180,861	-162,61	-117,083	-143,258
860	44	0,1111	-96,22	-197,016	-177,748	-160,573	-109,84	-139,098
880	45	0,1137	-90,6001	-189,79	-174,631	-158,369	-102,59	-134,848
900	46	0,1163	-85,166	-182,717	-171,595	-156,059	-95,6233	-130,671
920	47	0,1189	-79,918	-175,813	-168,599	-153,626	-88,9373	-126,562
940	48	0,1215	-74,8559	-169,096	-165,609	-151,059	-82,5275	-122,516
960	49	0,1241	-69,9789	-162,579	-162,593	-148,344	-76,3895	-118,529
980	50	0,1266	-65,4629	-156,515	-159,643	-145,587	-70,7393	-114,747
1000	51	0,1292	-60,9453	-150,427	-156,5	-142,56	-65,1197	-110,863
1020	52	0,1318	-56,6081	-144,574	-153,263	-139,365	-59,7562	-107,026
1040	53	0,1344	-52,4491	-138,961	-149,913	-136	-54,6428	-103,233
1060	54	0,137	-48,4654	-133,596	-146,439	-132,464	-49,7732	-99,4797
1080	55	0,1396	-44,654	-128,483	-142,831	-128,757	-45,1409	-95,7641
1100	56	0,1422	-41,0116	-123,625	-139,081	-124,882	-40,7388	-92,0832
1120	57	0,1447	-37,665	-119,196	-135,338	-121	-36,7167	-88,574
1140	58	0,1473	-34,3429	-114,843	-131,302	-116,806	-32,7457	-84,9536

1160	59	0,1499	-31,1779	-110,747	-127,121	-112,46	-28,9833	-81,3609
1180	60	0,1525	-28,1656	-106,906	-122,798	-107,969	-25,4219	-77,794
1200	61	0,1551	-25,3013	-103,317	-118,339	-103,342	-22,0536	-74,2511
1220	62	0,1577	-22,58	-99,9768	-113,753	-98,5898	-18,8703	-70,7308
1240	63	0,1602	-20,0937	-96,9946	-109,232	-93,9124	-15,9764	-67,3659
1260	64	0,1628	-17,6382	-94,1262	-104,425	-88,9473	-13,1323	-63,8862
1280	65	0,1654	-15,3103	-91,4889	-99,5254	-83,8926	-10,449	-60,4258
1300	66	0,168	-13,1046	-89,0752	-94,5471	-78,7619	-7,9179	-56,984
1320	67	0,1706	-11,0153	-86,8768	-89,5064	-73,5695	-5,53076	-53,5602
1340	68	0,1732	-9,03689	-84,8847	-84,4205	-68,3302	-3,27908	-50,1541
1360	69	0,1758	-7,16353	-83,0894	-79,3078	-63,0594	-1,15447	-46,7656
1380	70	0,1783	-5,45592	-81,5392	-74,3844	-57,9762	0,776417	-43,5239
1400	71	0,1809	-3,77183	-80,1	-69,2757	-52,6894	2,676142	-40,17
1420	72	0,1835	-2,1756	-78,8261	-64,1992	-47,4182	4,473522	-36,8341
1440	73	0,1861	-0,66143	-77,7062	-59,1759	-42,1789	6,176761	-33,5169
1460	74	0,1887	0,776458	-76,7283	-54,2272	-36,9878	7,793959	-30,2189
1480	75	0,1913	2,1438	-75,8804	-49,3745	-31,8611	9,33309	-26,9411
1500	76	0,1938	3,397291	-75,1763	-44,8192	-27,0072	10,7467	-23,8093
1520	77	0,1964	4,642612	-74,5476	-40,2175	-22,0533	12,15529	-20,574
1540	78	0,199	5,83388	-74,0122	-35,7751	-17,2105	13,50852	-17,3623
1560	79	0,2016	6,976448	-73,5575	-31,5131	-12,4941	14,81367	-14,1756
1580	80	0,2042	8,075525	-73,1708	-27,4514	-7,91857	16,07781	-11,0155
1600	81	0,2068	9,136162	-72,8397	-23,6099	-3,49802	17,30778	-7,88382
1620	82	0,2094	10,16323	-72,5519	-20,0072	0,754179	18,51013	-4,78231
1640	83	0,2119	11,12351	-72,3045	-16,7849	4,67228	19,64606	-1,83047
1660	84	0,2145	12,09813	-72,0662	-13,7015	8,558269	20,81225	1,205786
1680	85	0,2171	13,05241	-71,8357	-10,9066	12,24091	21,96859	4,205478
1700	86	0,2197	13,99035	-71,6017	-8,41423	15,71023	23,12041	7,166216
1720	87	0,2223	14,91568	-71,3532	-6,2373	18,95733	24,27274	10,08548
1740	88	0,2249	15,83185	-71,0798	-4,38688	21,97443	25,4302	12,96065
1760	89	0,2274	16,70709	-70,7841	-2,92431	24,65249	26,55193	15,68108
1780	90	0,23	17,61416	-70,4333	-1,73986	27,20067	27,73141	18,46164
1800	91	0,2326	18,52049	-70,0297	-0,90411	29,50334	28,92738	21,18963
1820	92	0,2352	19,42823	-69,5652	-0,42046	31,55806	30,14284	23,86196
1840	93	0,2378	20,3392	-69,0323	-0,29006	33,36392	31,3803	26,47547
1860	94	0,2404	21,25481	-68,4242	-0,51165	34,92161	32,64182	29,02688
1880	95	0,243	22,17608	-67,7353	-1,08143	36,23354	33,92895	31,51279
1900	96	0,2455	23,06783	-66,9919	-1,95168	37,26708	35,19168	33,83811
1920	97	0,2481	24,00157	-66,1307	-3,18313	38,11072	36,53154	36,1854
1940	98	0,2507	24,94151	-65,1765	-4,73546	38,72634	37,89852	38,45667
1960	99	0,2533	25,88693	-64,1275	-6,59361	39,12377	39,29202	40,64816
1980	100	0,2559	26,83662	-62,9824	-8,73935	39,31493	40,71088	42,75607
2000	101	0,2585	27,7889	-61,7415	-11,1512	39,31386	42,15333	44,77651
2020	102	0,261	28,70495	-60,4592	-13,698	39,14666	43,56033	46,63303
2040	103	0,2636	29,65542	-59,0354	-16,5561	38,81789	45,04154	48,47026
2060	104	0,2662	30,60042	-57,5232	-19,5962	38,35176	46,53743	50,20802
2080	105	0,2688	31,53613	-55,9278	-22,7826	37,77151	48,04369	51,84214
2100	106	0,2714	32,45818	-54,2557	-26,0755	37,1029	49,55534	53,36836
2120	107	0,274	33,3616	-52,5148	-29,4316	36,37424	51,06668	54,78237
2140	108	0,2766	34,24084	-50,7144	-32,803	35,61648	52,57134	56,07981
2160	109	0,2791	35,0577	-48,9373	-36,0108	34,89176	54,00517	57,21328

2180	110	0,2817	35,87095	-47,0534	-39,2572	34,17735	55,47529	58,26913
2200	111	0,2843	36,63984	-45,147	-42,3524	33,54171	56,91541	59,19513
2220	112	0,2869	37,3563	-43,2336	-45,231	33,02698	58,31616	59,9867
2240	113	0,2895	38,01154	-41,3307	-47,8232	32,67824	59,66735	60,63922
2260	114	0,2921	38,59611	-39,4574	-50,0542	32,54366	60,95801	61,14801
2280	115	0,2946	39,0821	-37,7036	-51,7847	32,66391	62,13094	61,49732
2300	116	0,2972	39,49785	-35,9509	-53,0712	33,10129	63,26777	61,71048
2320	117	0,2998	39,81074	-34,2953	-53,7459	33,914	64,30662	61,76588
2340	118	0,3024	40,00843	-32,7634	-53,714	35,16295	65,23317	61,65868
2360	119	0,305	40,07784	-31,3835	-52,8751	36,91242	66,0322	61,38406
2380	120	0,3076	40,00511	-30,1863	-51,1235	39,23015	66,68757	60,93714
2400	121	0,3102	39,77558	-29,2045	-48,3478	42,18739	67,18226	60,31304
2420	122	0,3127	39,39265	-28,4957	-44,6043	45,70361	67,48968	59,54127
2440	123	0,3153	38,80996	-28,0391	-39,4746	50,136	67,61613	58,55532
2460	124	0,3179	38,02236	-27,907	-32,9573	55,44013	67,52595	57,37758
2480	125	0,3205	37,01196	-28,1407	-24,9179	61,70177	67,19834	56,00308
2500	126	0,3231	35,76003	-28,7837	-15,2158	69,01052	66,61152	54,42686
2520	127	0,3257	34,24694	-29,8818	-3,7041	77,45989	65,7427	52,64393
2540	128	0,3282	32,52672	-31,4119	9,213908	86,75061	64,61922	50,73
2560	129	0,3308	30,44106	-33,5454	24,72607	97,72406	63,1272	48,52712
2580	130	0,3334	28,03098	-36,2839	42,52019	110,1384	61,27971	46,10276
2600	131	0,336	25,27333	-39,6832	62,76879	124,103	59,0499	43,45192
2620	132	0,3386	22,14403	-43,8011	85,65106	139,7316	56,4098	40,56962
2640	133	0,3412	18,61805	-48,6985	111,3531	157,1421	53,33041	37,45087
2660	134	0,3438	14,66941	-54,4384	140,0677	176,4567	49,7816	34,09071
2680	135	0,3463	10,44899	-60,8135	170,7052	196,9418	45,89753	30,62751
2700	136	0,3489	5,592147	-68,4002	205,9169	220,3629	41,3362	26,77942
zaman	Sıra	Aşınma	31					
(sn)		(mm)						
0	1	0	-1017,97					
20	2	0,0026	-890,346					
40	3	0,0052	-770,215					
60	4	0,0078	-657,253					
80	5	0,0103	-555,098					
100	6	0,0129	-455,281					
120	7	0,0155	-361,715					
140	8	0,0181	-274,11					
160	9	0,0207	-192,183					
180	10	0,0233	-115,661					
200	11	0,0258	-46,9334					
220	12	0,0284	19,74765					
240	13	0,031	81,78371					
260	14	0,0336	139,4148					
280	15	0,0362	192,8731					
300	16	0,0388	242,3824					
320	17	0,0414	288,1591					
340	18	0,0439	328,8492					
360	19	0,0465	367,9029					
380	20	0,0491	403,8196					
400	21	0,0517	436,7861					
420	22	0,0543	466,9818					

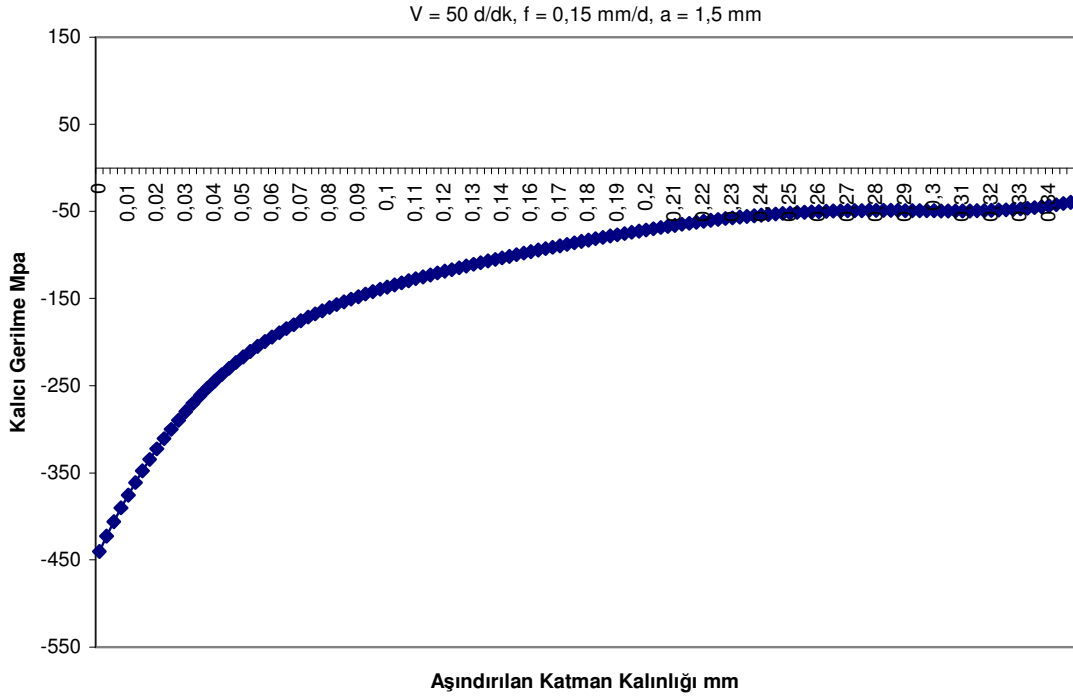
440	23	0,0569	494,579
460	24	0,0594	518,8186
480	25	0,062	541,7935
500	26	0,0646	562,6409
520	27	0,0672	581,5067
540	28	0,0698	598,5305
560	29	0,0724	613,8458
580	30	0,075	627,58
600	31	0,0775	639,4079
620	32	0,0801	650,3877
640	33	0,0827	660,1293
660	34	0,0853	668,737
680	35	0,0879	676,3102
700	36	0,0905	682,9426
720	37	0,093	688,5154
740	38	0,0956	693,5556
760	39	0,0982	697,9033
780	40	0,1008	701,6327
800	41	0,1034	704,8134
820	42	0,106	707,5105
840	43	0,1086	709,7845
860	44	0,1111	711,6247
880	45	0,1137	713,2289
900	46	0,1163	714,5652
920	47	0,1189	715,6782
940	48	0,1215	716,6086
960	49	0,1241	717,3937
980	50	0,1266	718,0427
1000	51	0,1292	718,637
1020	52	0,1318	719,176
1040	53	0,1344	719,6834
1060	54	0,137	720,1805
1080	55	0,1396	720,6853
1100	56	0,1422	721,2133
1120	57	0,1447	721,7546
1140	58	0,1473	722,3625
1160	59	0,1499	723,0242
1180	60	0,1525	723,7452
1200	61	0,1551	724,5292
1220	62	0,1577	725,3776
1240	63	0,1602	726,2539
1260	64	0,1628	727,2259
1280	65	0,1654	728,2562
1300	66	0,168	729,3395
1320	67	0,1706	730,469
1340	68	0,1732	731,6368
1360	69	0,1758	732,8335
1380	70	0,1783	734,0021
1400	71	0,1809	735,2251
1420	72	0,1835	736,4442
1440	73	0,1861	737,6466

1460	74	0,1887	738,8189
1480	75	0,1913	739,9476
1500	76	0,1938	740,9784
1520	77	0,1964	741,9801
1540	78	0,199	742,8955
1560	79	0,2016	743,7103
1580	80	0,2042	744,4101
1600	81	0,2068	744,9808
1620	82	0,2094	745,4084
1640	83	0,2119	745,6722
1660	84	0,2145	745,7811
1680	85	0,2171	745,709
1700	86	0,2197	745,4447
1720	87	0,2223	744,9778
1740	88	0,2249	744,2988
1760	89	0,2274	743,4382
1780	90	0,23	742,3202
1800	91	0,2326	740,9692
1820	92	0,2352	739,3809
1840	93	0,2378	737,5527
1860	94	0,2404	735,4835
1880	95	0,243	733,174
1900	96	0,2455	730,7293
1920	97	0,2481	727,9582
1940	98	0,2507	724,9608
1960	99	0,2533	721,746
1980	100	0,2559	718,3252
2000	101	0,2585	714,7121
2020	102	0,261	711,0718
2040	103	0,2636	707,1314
2060	104	0,2662	703,055
2080	105	0,2688	698,8672
2100	106	0,2714	694,5953
2120	107	0,274	690,2702
2140	108	0,2766	685,9255
2160	109	0,2791	681,7642
2180	110	0,2817	677,4924
2200	111	0,2843	673,3212
2220	112	0,2869	669,2981
2240	113	0,2895	665,4743
2260	114	0,2921	661,9052
2280	115	0,2946	658,7682
2300	116	0,2972	655,8736
2320	117	0,2998	653,4202
2340	118	0,3024	651,4793
2360	119	0,305	650,1267
2380	120	0,3076	649,4424
2400	121	0,3102	649,511
2420	122	0,3127	650,3702
2440	123	0,3153	652,1797
2460	124	0,3179	655,0204

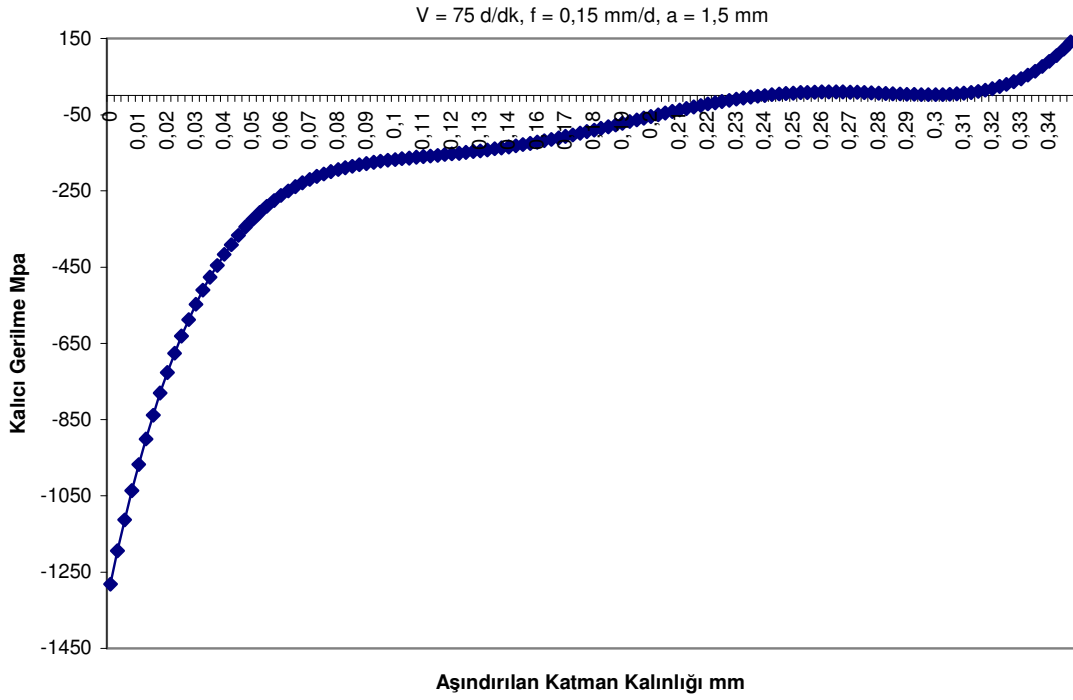
2480	125	0,3205	658,9962
2500	126	0,3231	664,2157
2520	127	0,3257	670,7928
2540	128	0,3282	678,508
2560	129	0,3308	688,099
2580	130	0,3334	699,4161
2600	131	0,336	712,5943
2620	132	0,3386	727,7747
2640	133	0,3412	745,1039
2660	134	0,3438	764,7343
2680	135	0,3463	785,9273
2700	136	0,3489	810,5374
Toplam	45	dakika	

EK-F

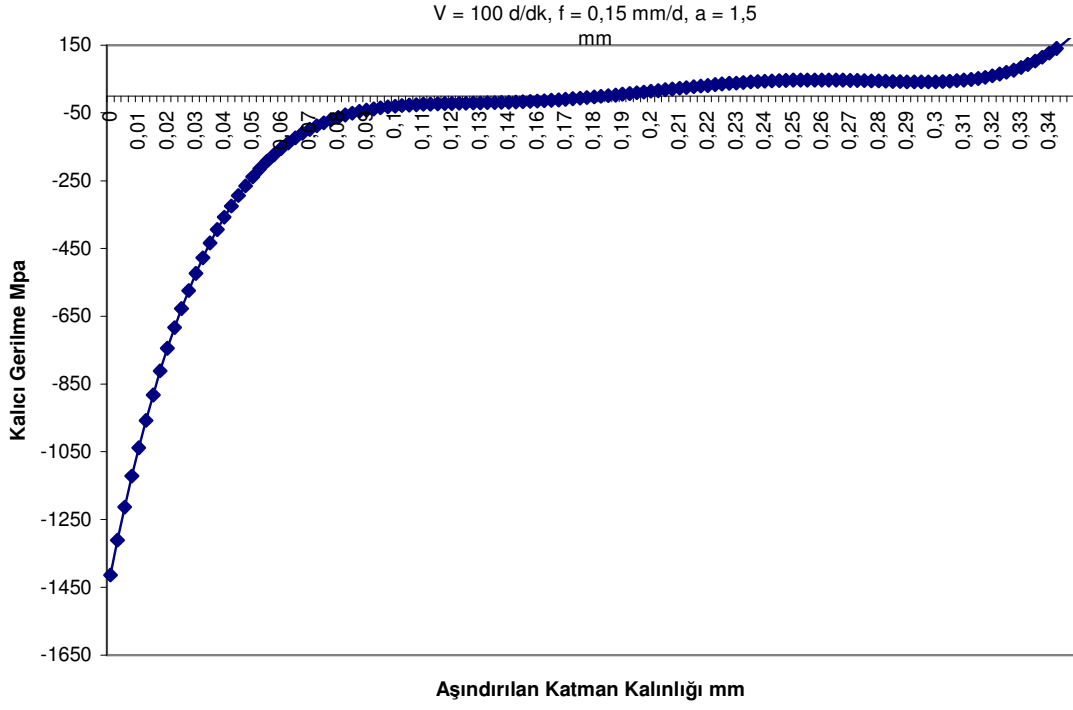
Farklı Kesme Parametrelerinde İşlenen
Deney Numunelerindeki Kalıcı Gerilme
Değerlerinin Grafikleri



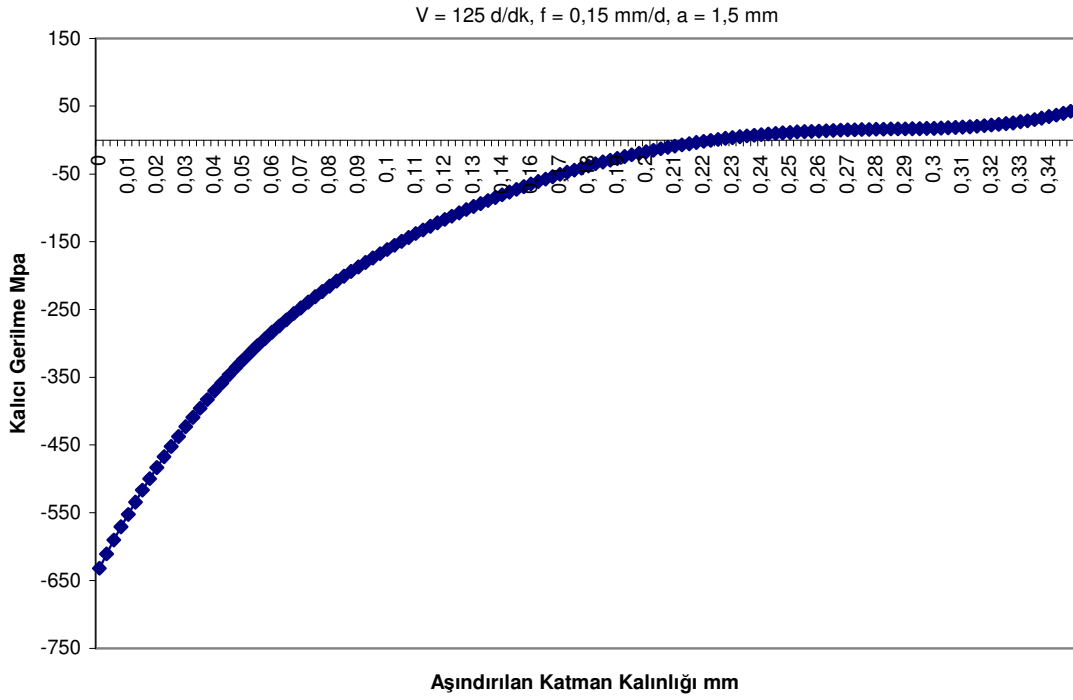
Şekil Ek 6.1. $V=50 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



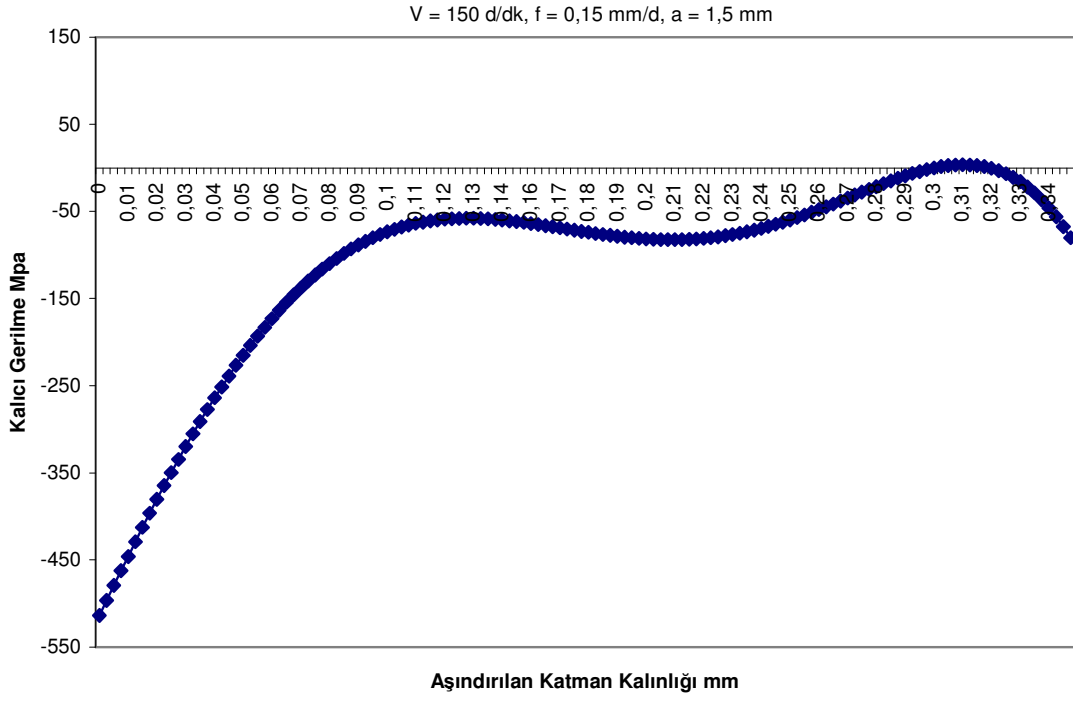
Şekil Ek 6.2. $V=75 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



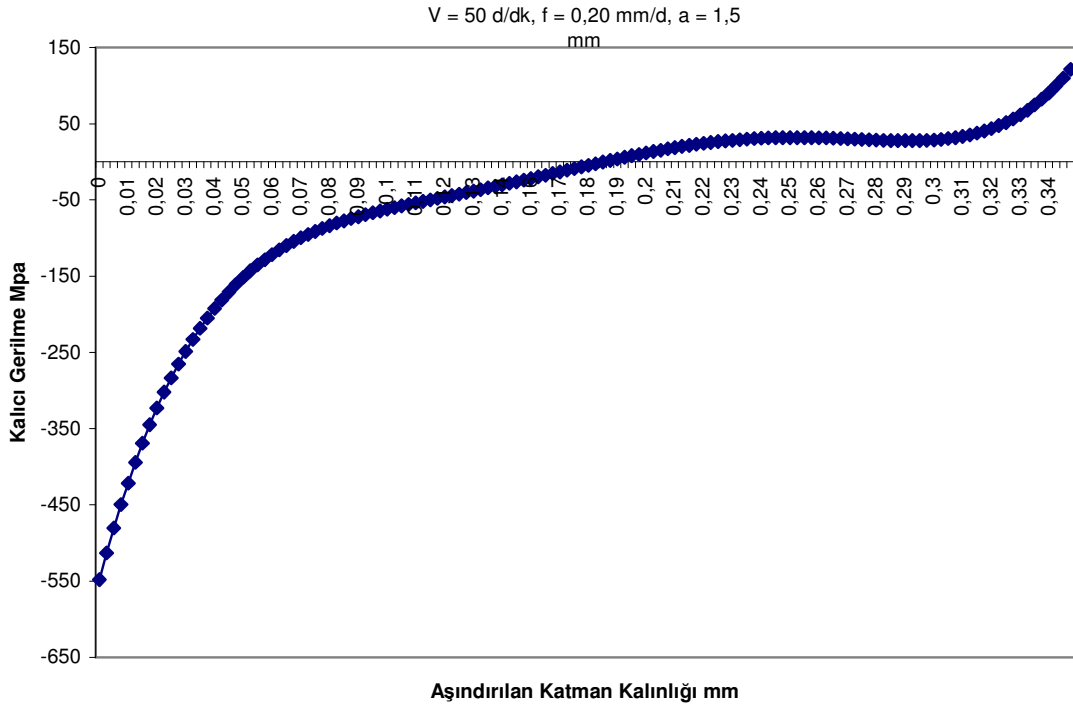
Şekil Ek 6.3. $V=100 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



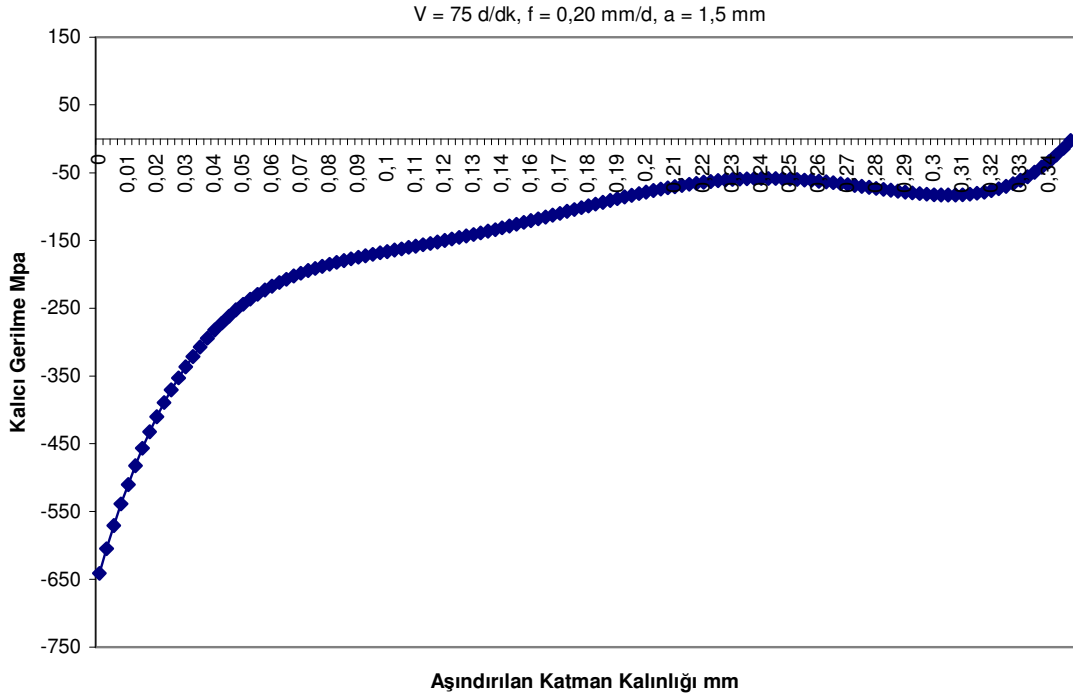
Şekil Ek 6.4. $V=125 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



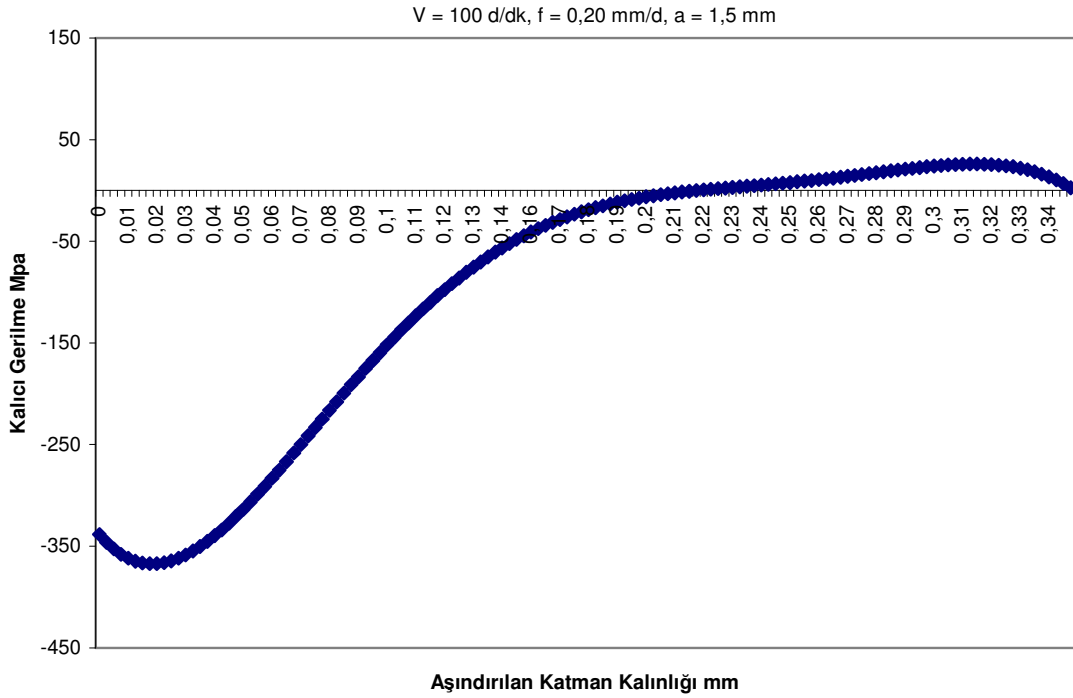
Şekil Ek 6.5. $V=150 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



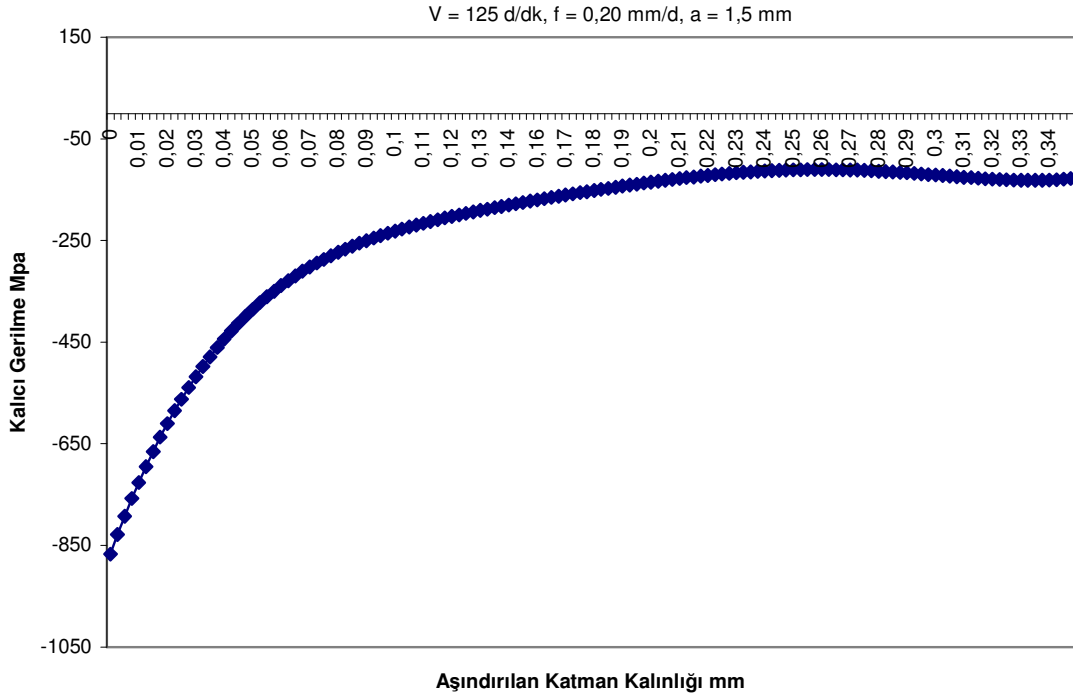
Şekil Ek 6.6. $V=50 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



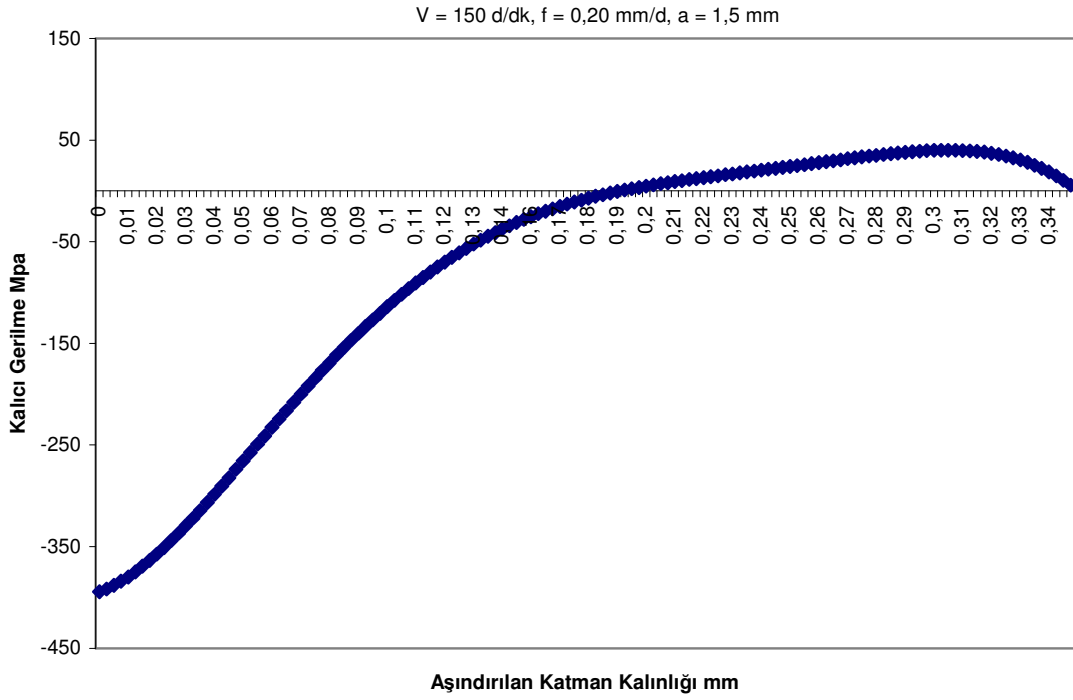
Şekil Ek 6.7. $V=75 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



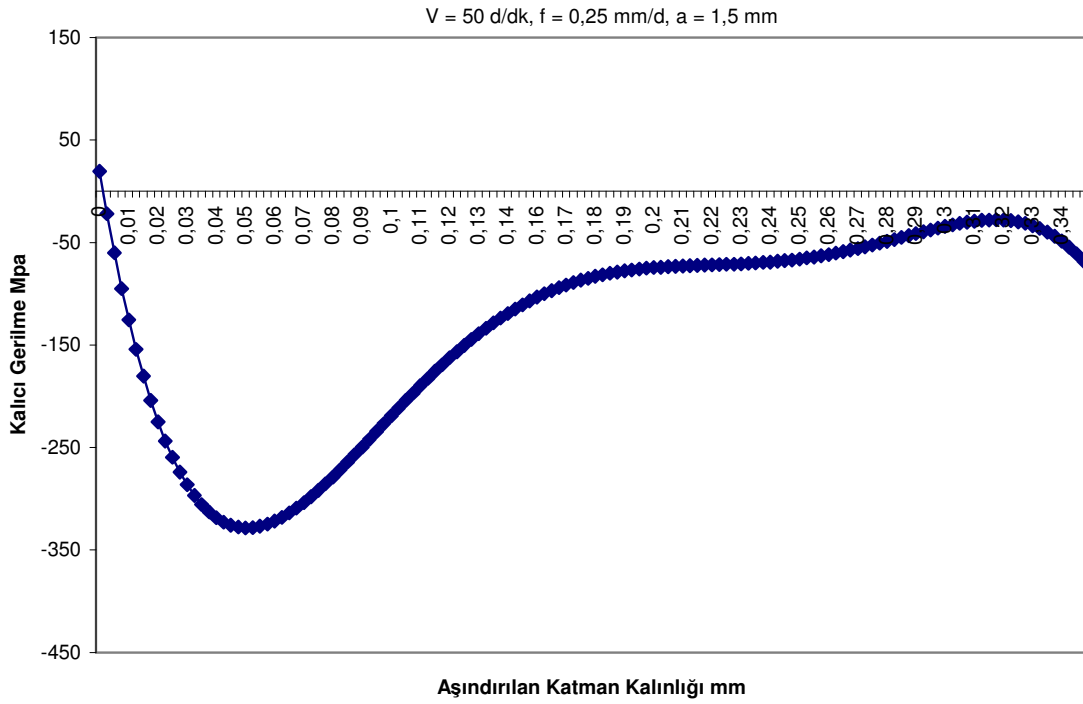
Şekil Ek 6.8. $V=100 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



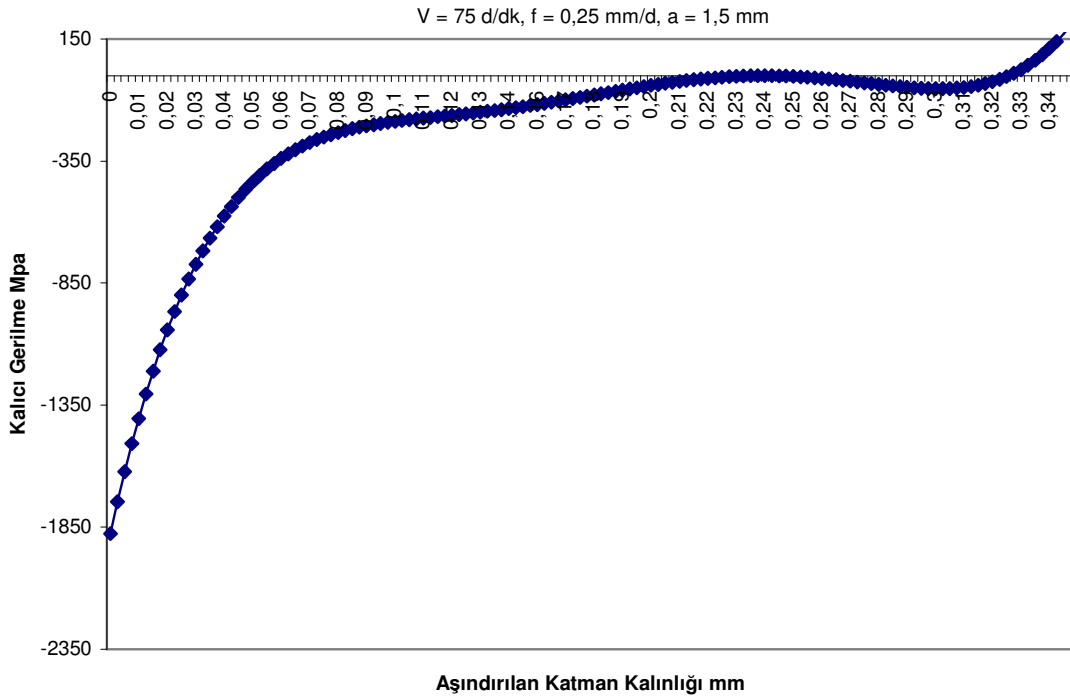
Şekil Ek 6.9. $V=125 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



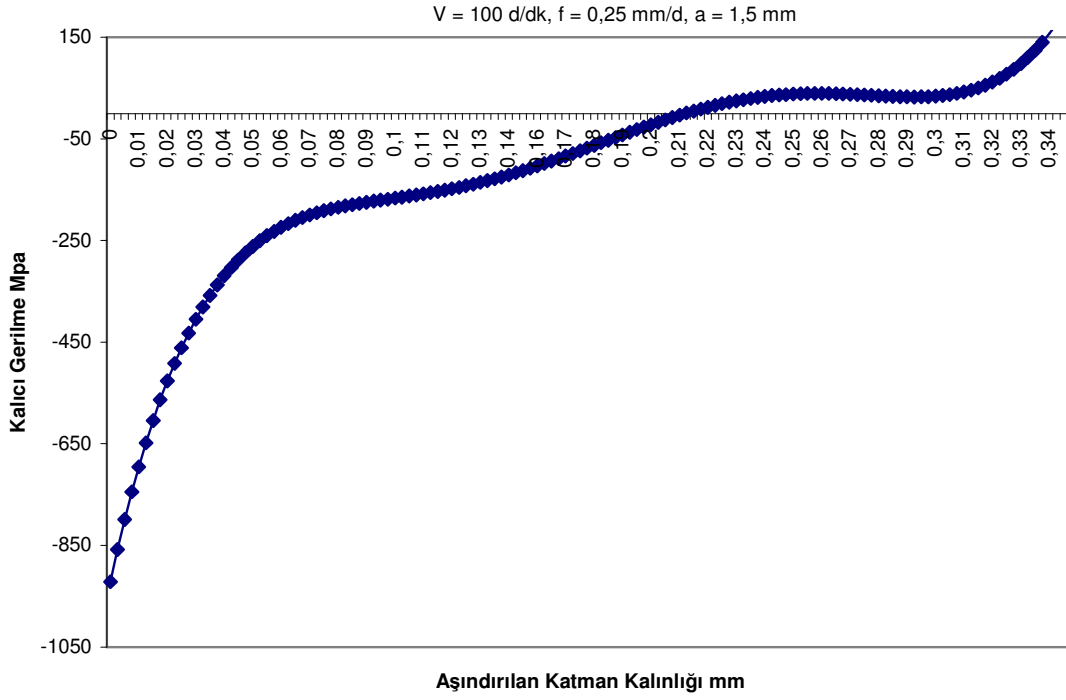
Şekil Ek 6.10. $V=150 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



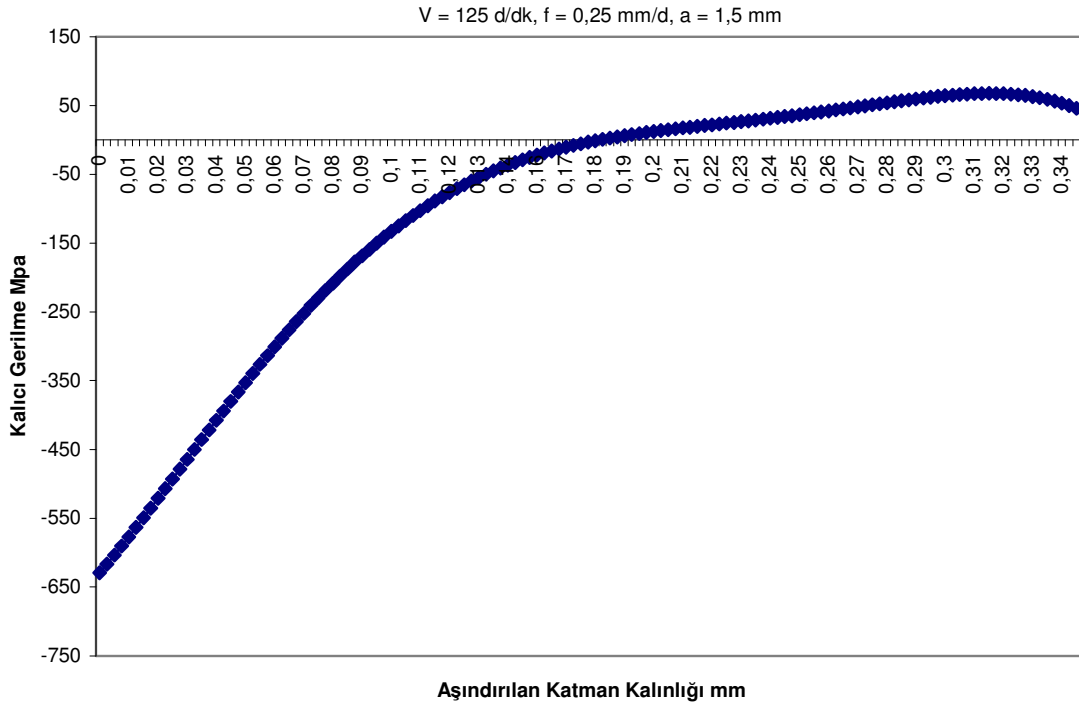
Şekil Ek 6.11. $V=50 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



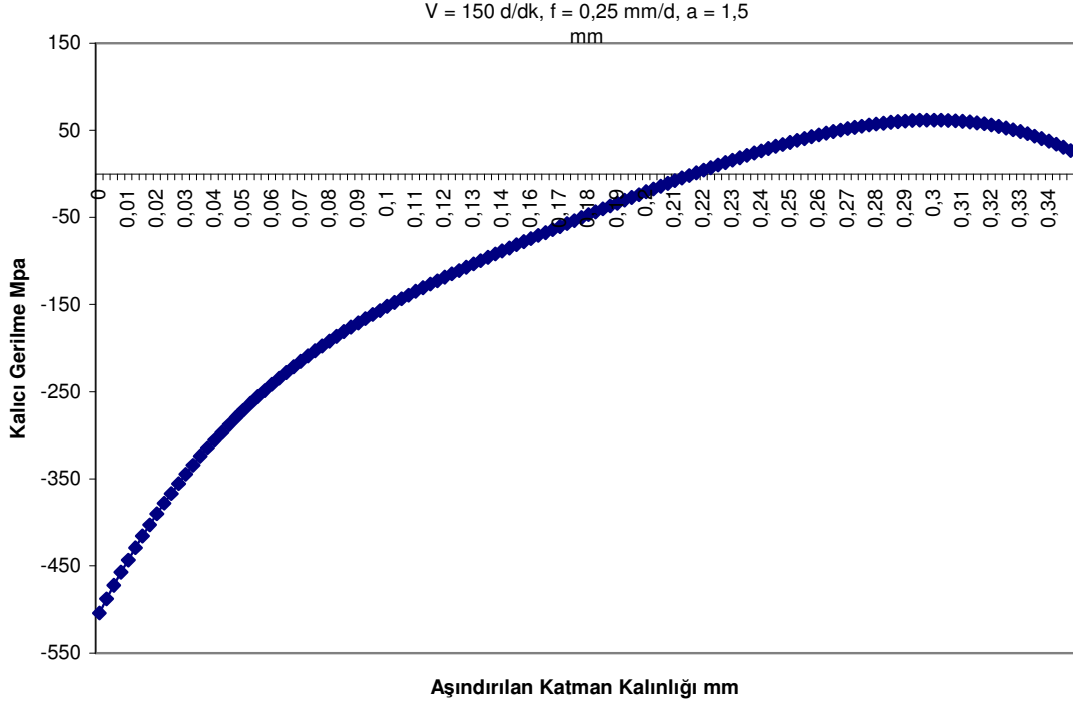
Şekil Ek 6.12. $V=75 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



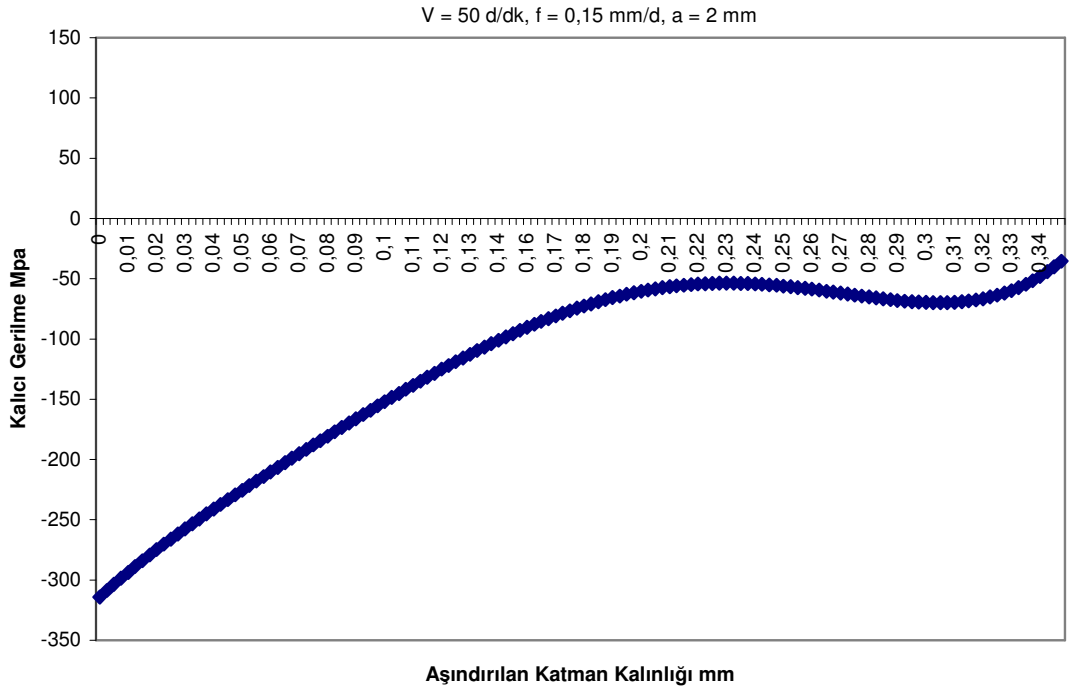
Şekil Ek 6.13. $V=100 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



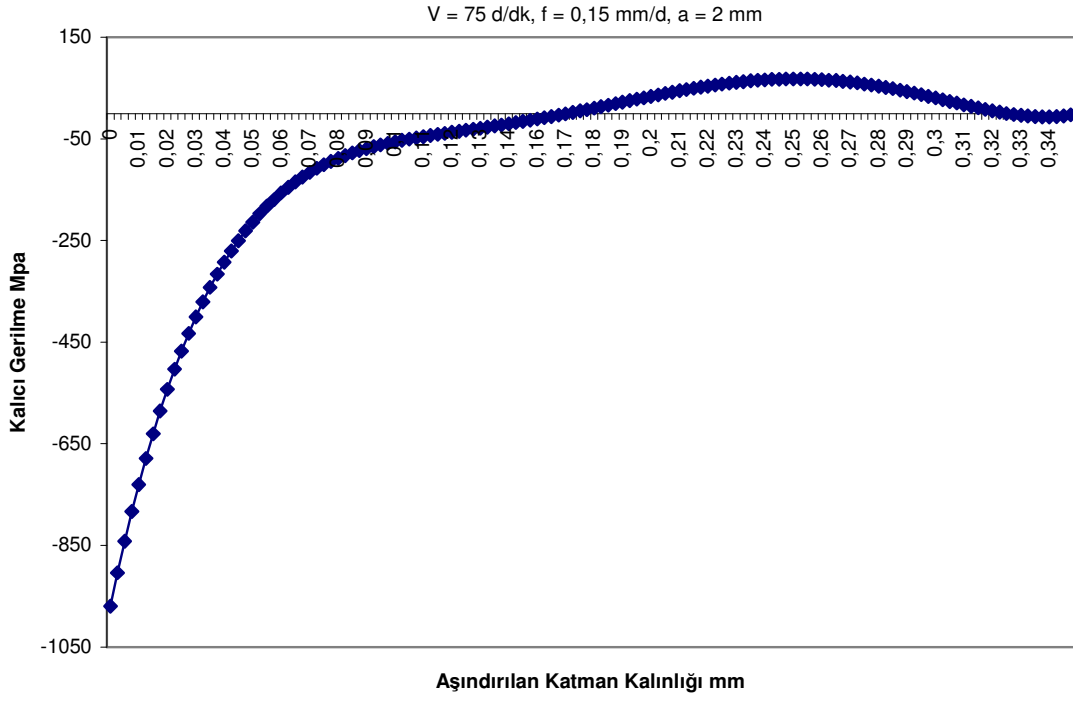
Şekil Ek 6.14. $V=125 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



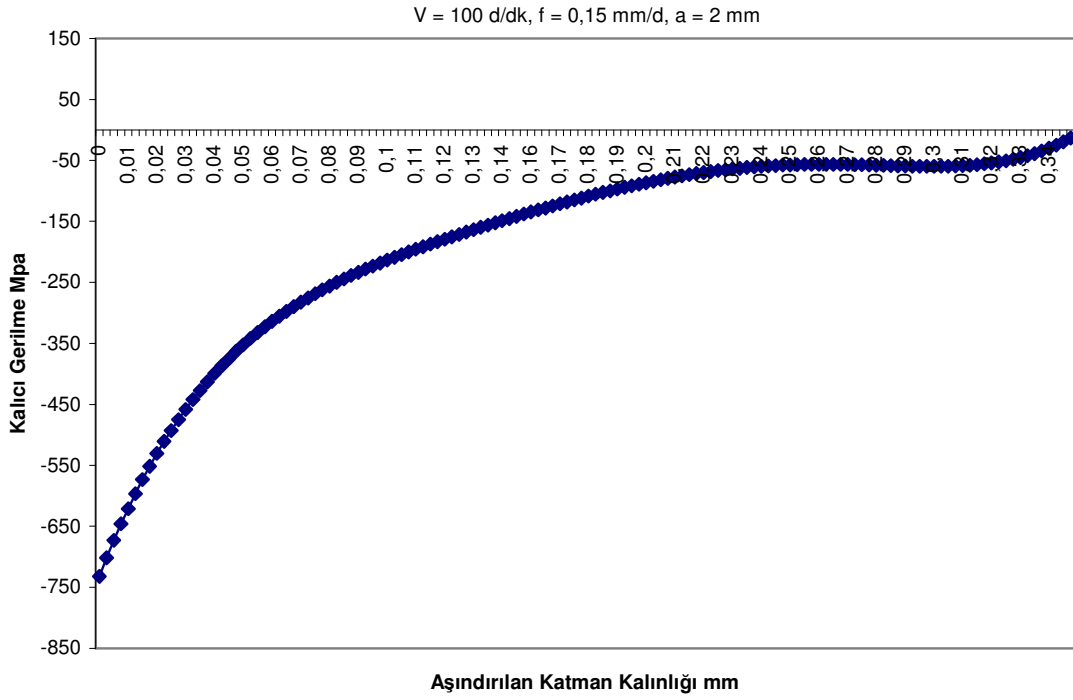
Şekil Ek 6.15. $V=150 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=1,5 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



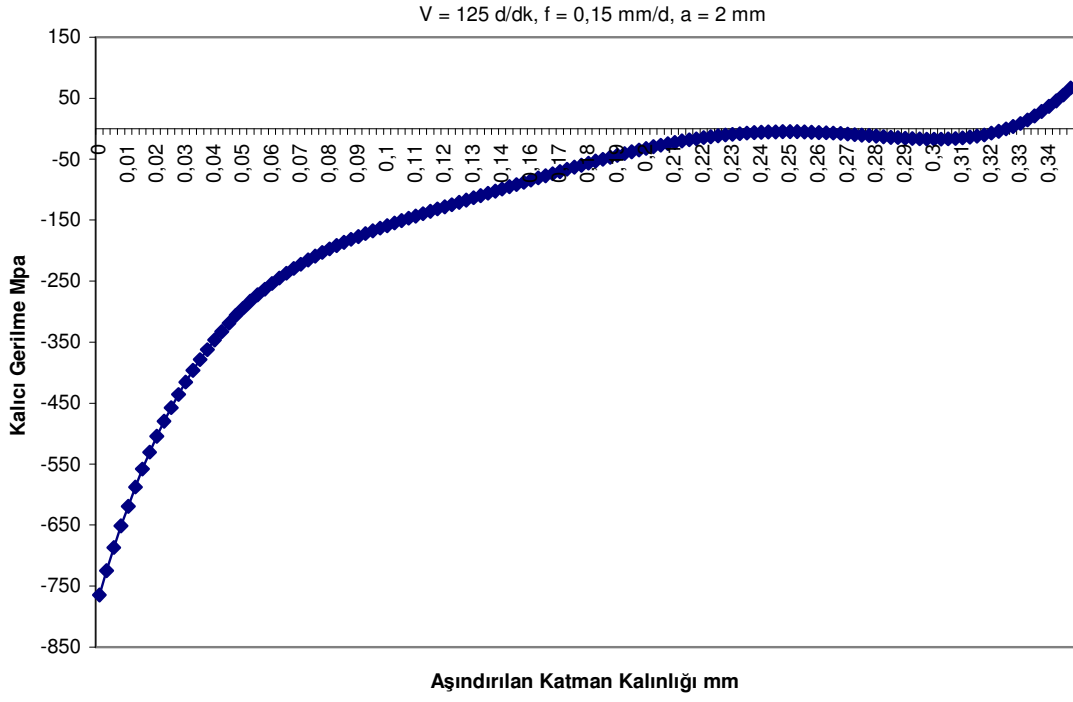
Şekil Ek 6.16. $V=50 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



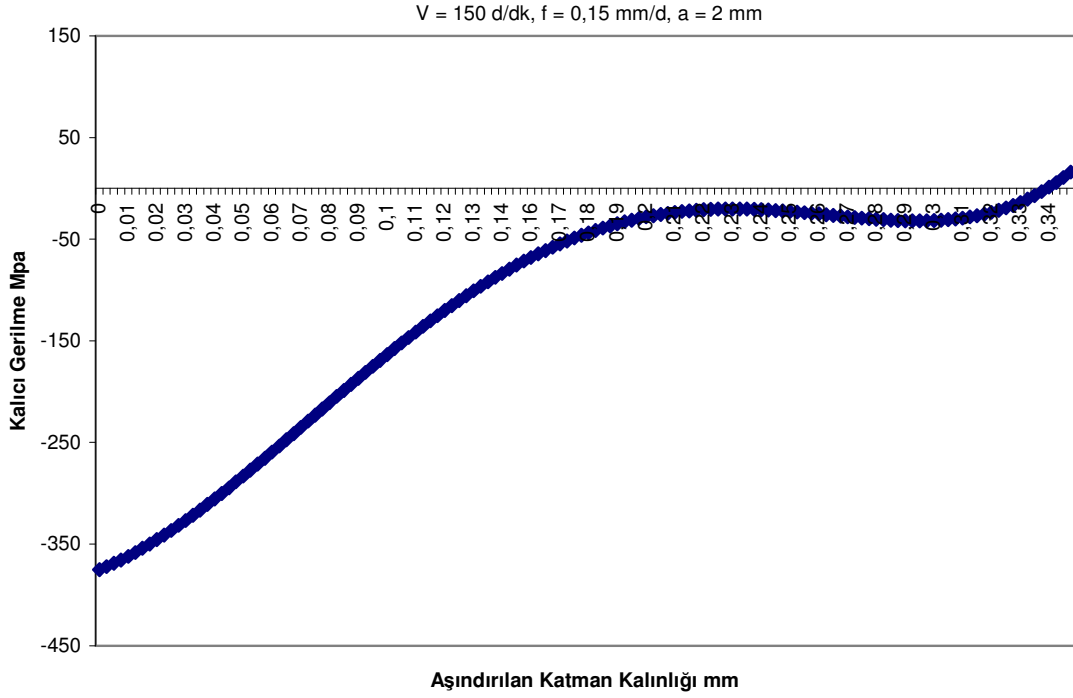
Şekil Ek 6.17. $V=75 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



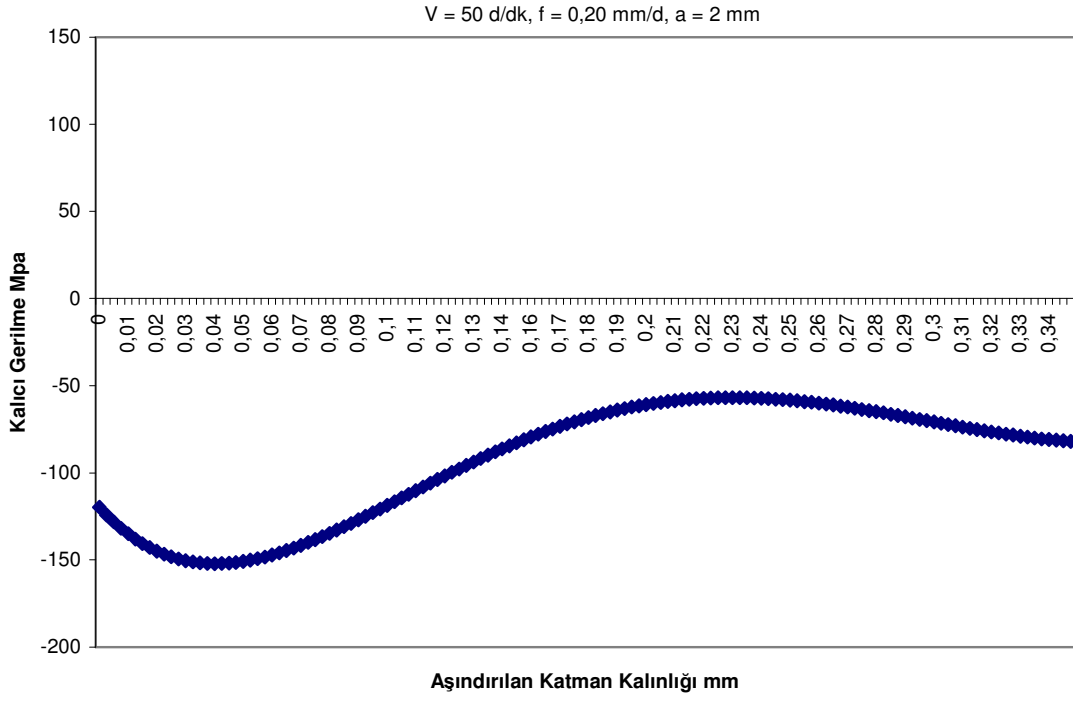
Şekil Ek 6.18. $V=100 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



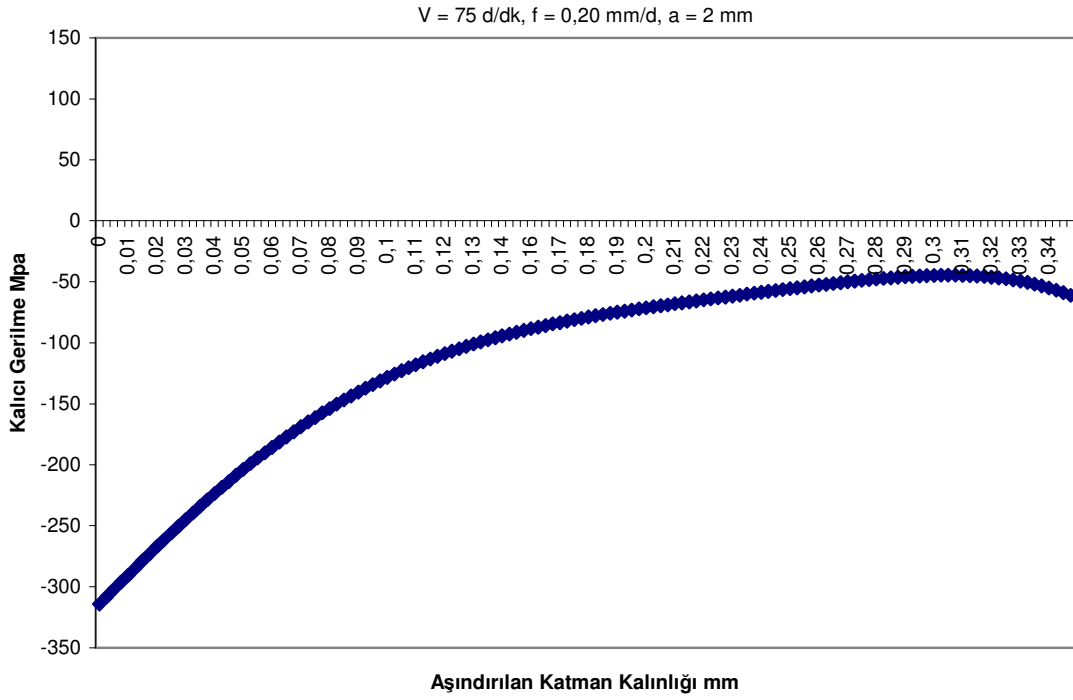
Şekil Ek 6.19. $V=125 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



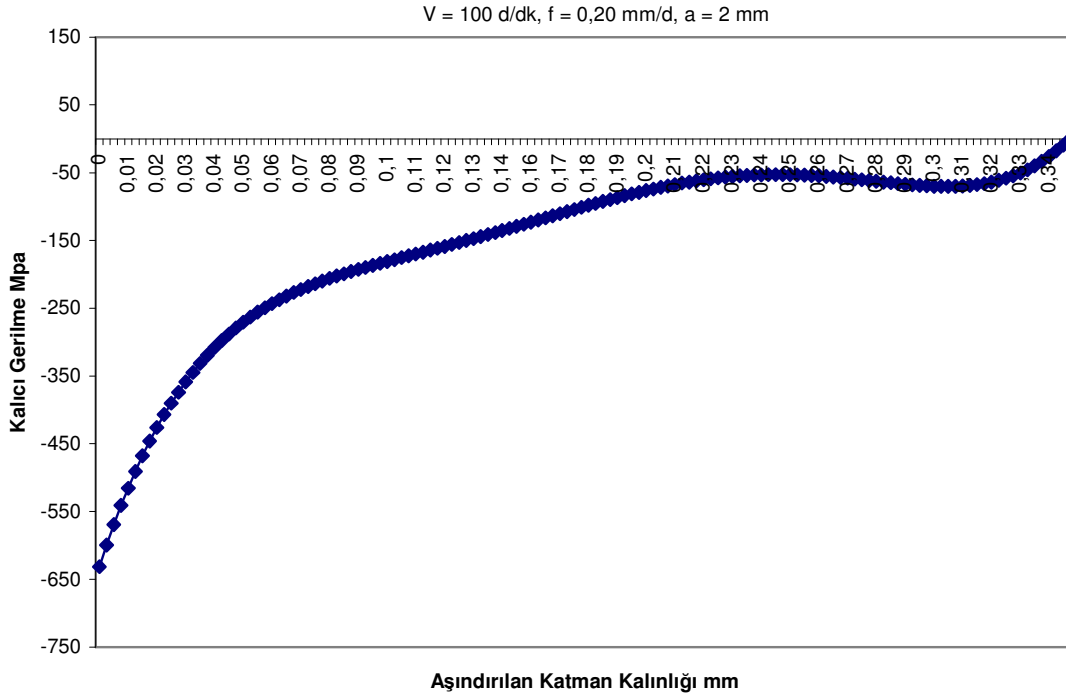
Şekil Ek 6.20. $V=150 \text{ m/dk}, f=0,15 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



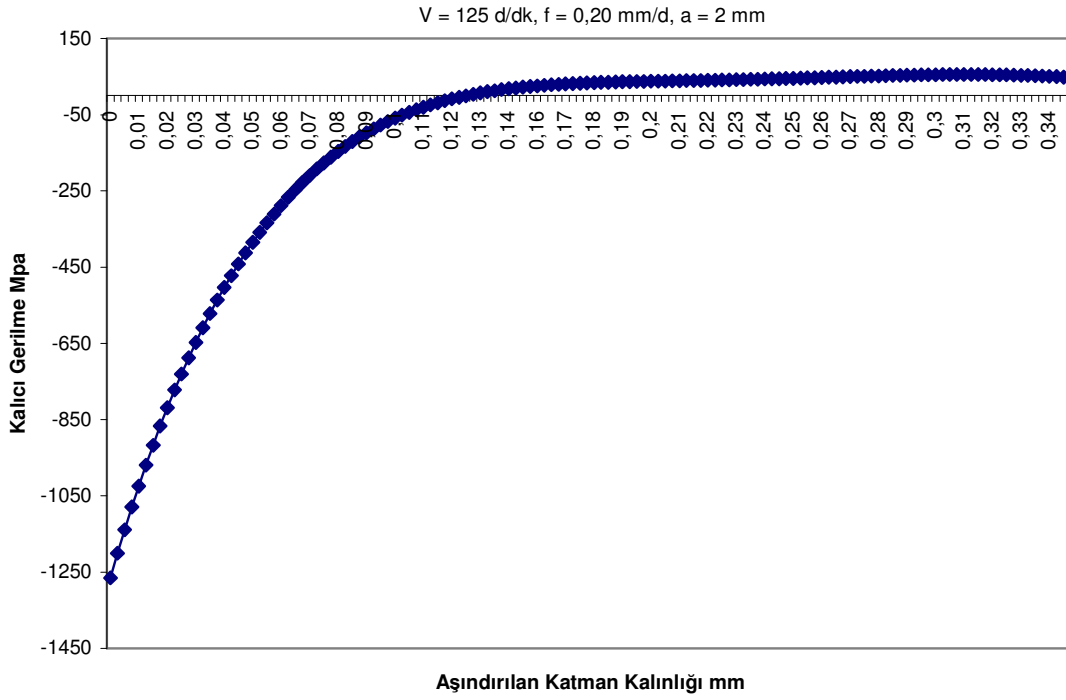
Şekil Ek 6.21. $V=50 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



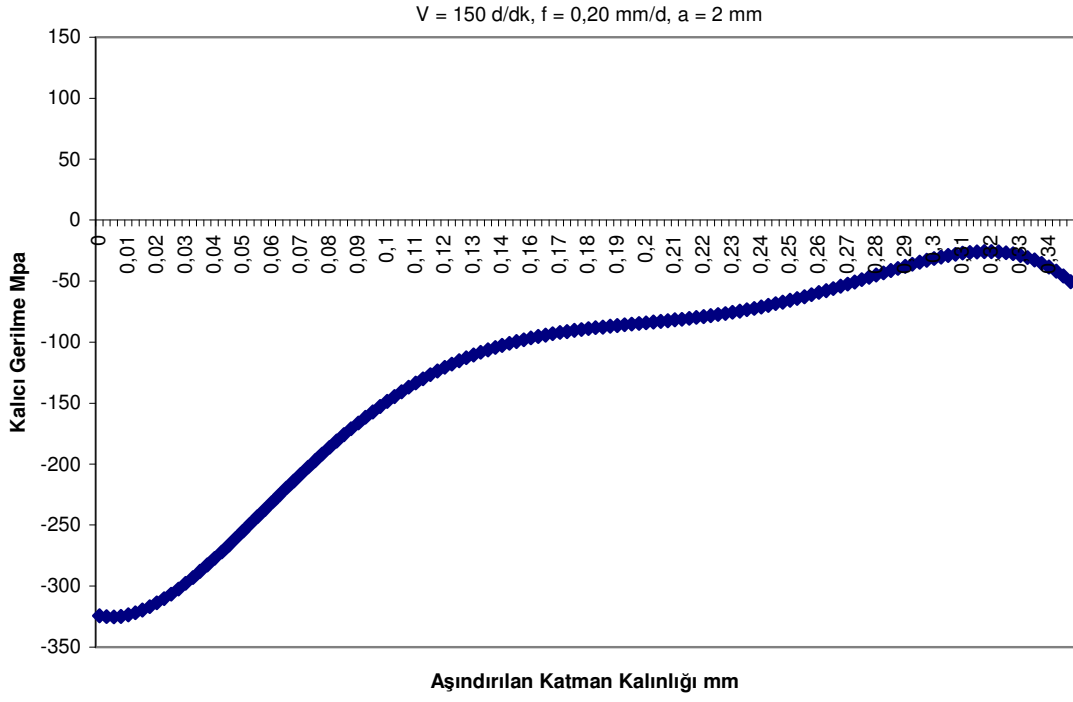
Şekil Ek 6.22. $V=75 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



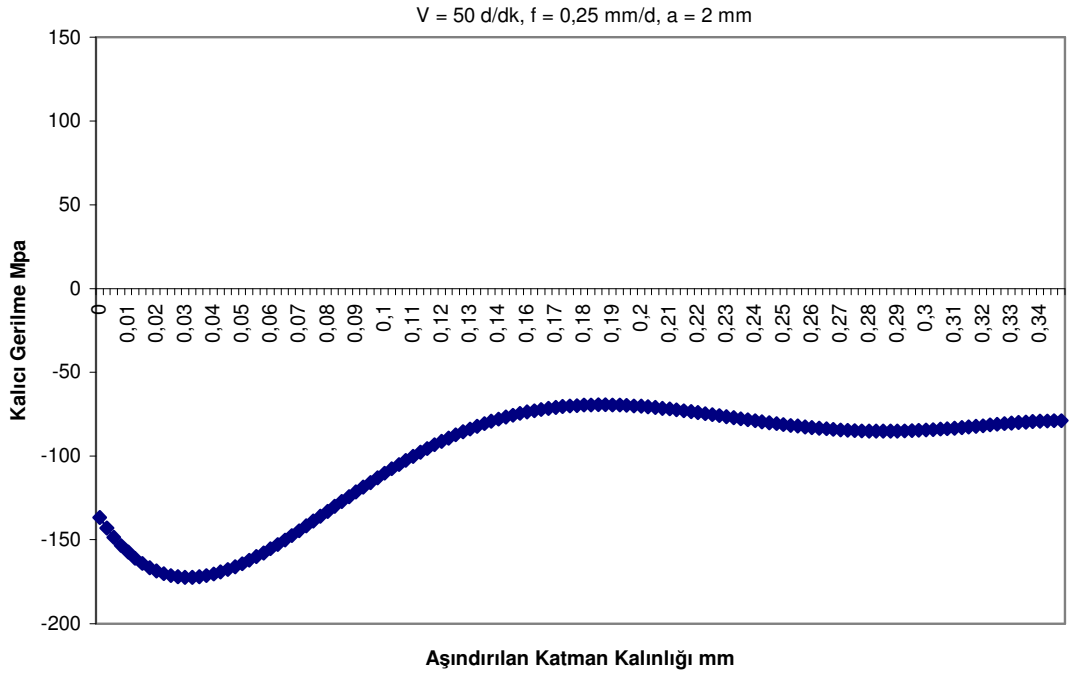
Şekil Ek 6.23. $V=100 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



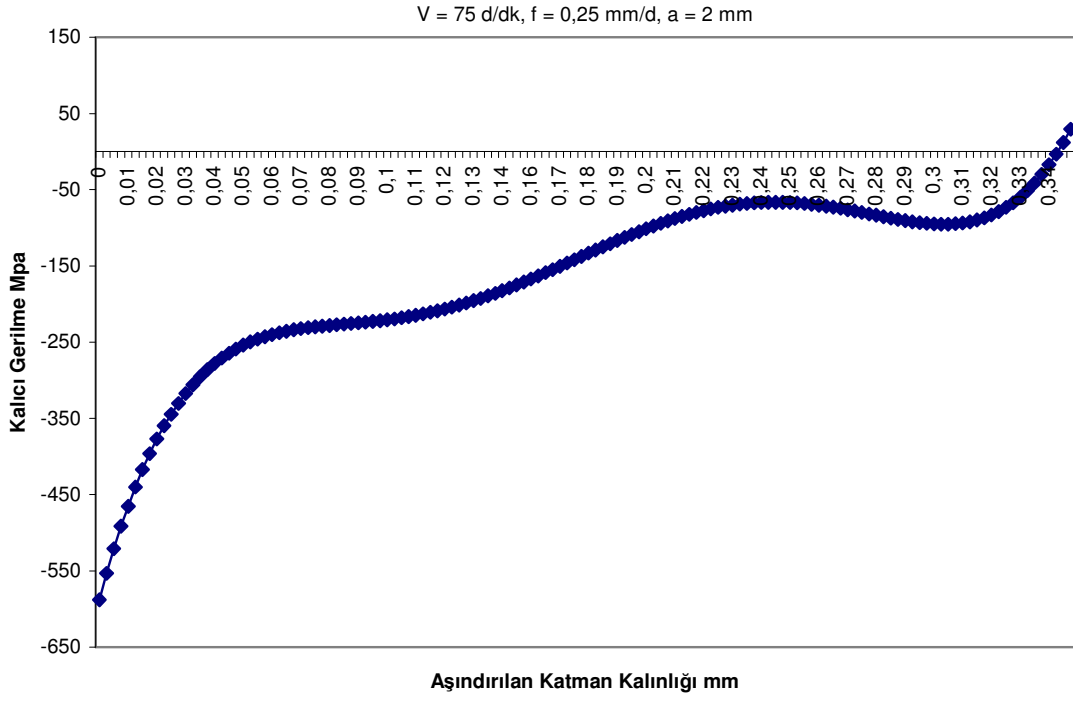
Şekil Ek 6.24. $V=125 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



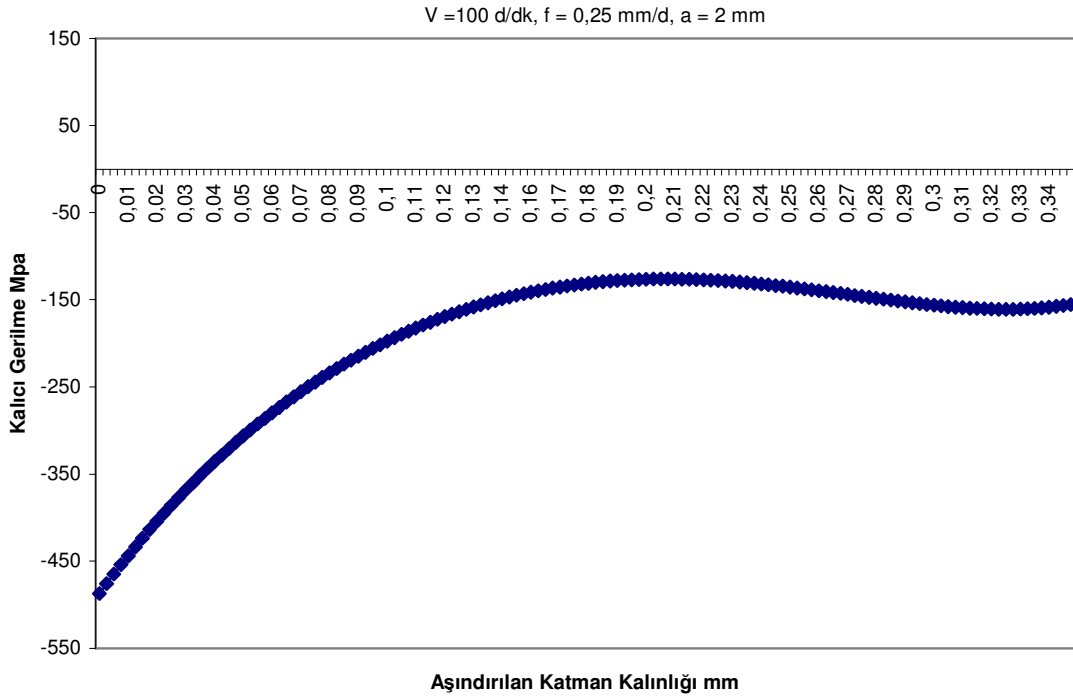
Şekil Ek 6.25. $V=150 \text{ m/dk}, f=0,20 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



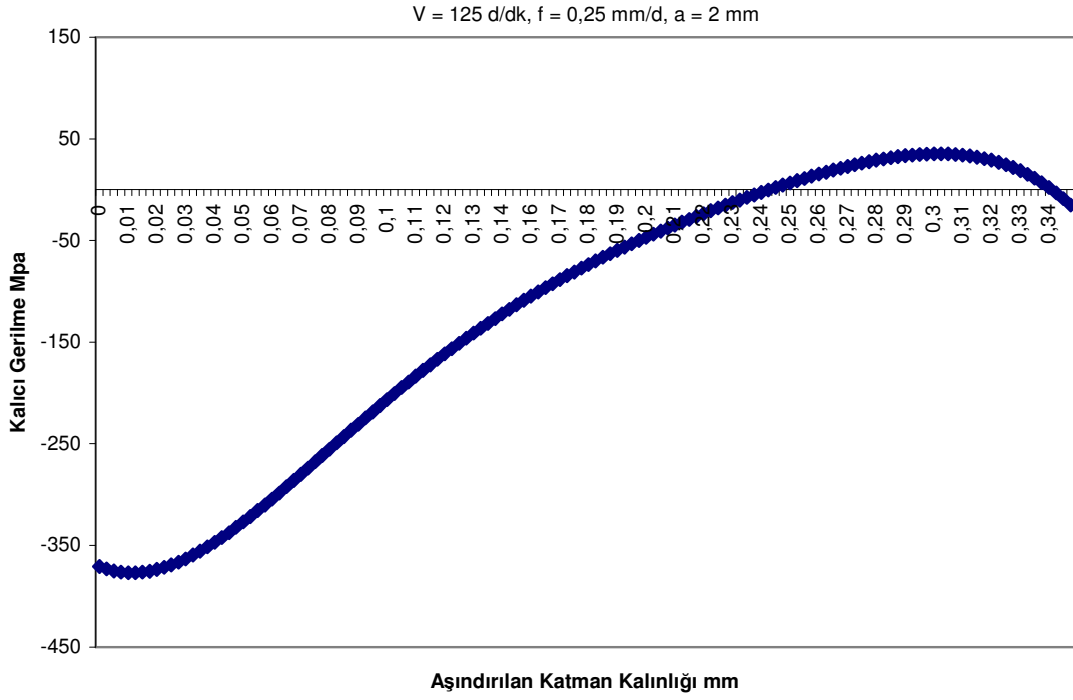
Şekil Ek 6.26. $V=50 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



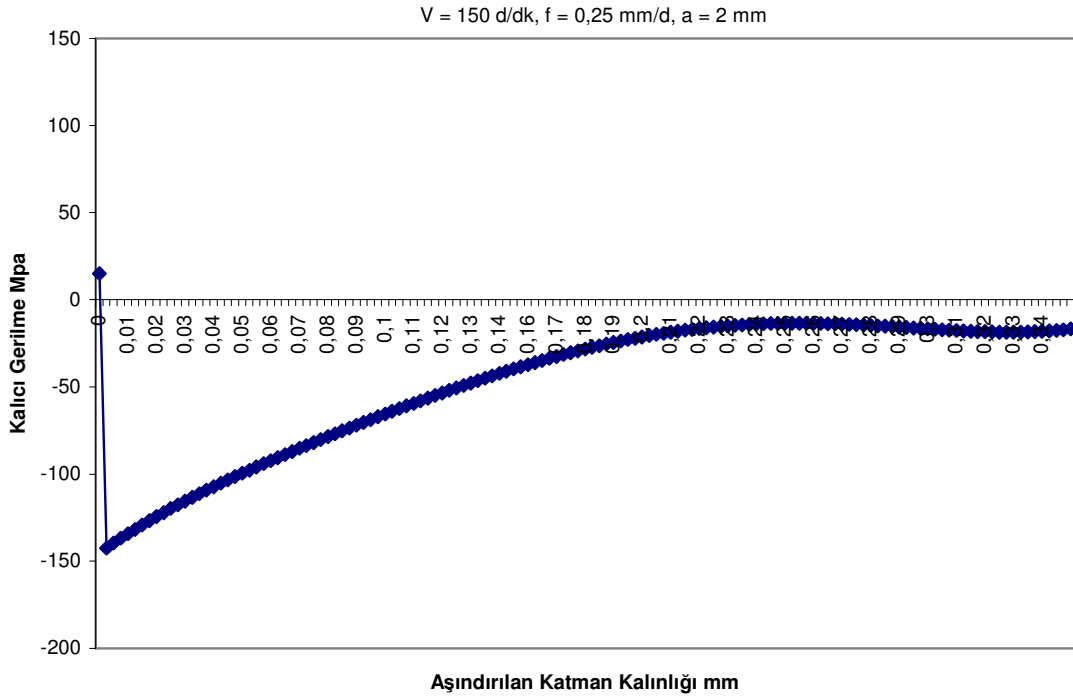
Şekil Ek 6.27. $V=75 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



Şekil Ek 6.28. $V=100 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



Şekil Ek 6.29. $V=125 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme



Şekil Ek 6.30. $V=150 \text{ m/dk}, f=0,25 \text{ mm/d}, a=2 \text{ mm}$ İşleme Şartlarında Oluşan Kalıcı Gerilme

KAYNAKLAR

- [1] Kınıkoğlu, N.G., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, ed. Özkal S., Literatür Yayıncılık, İstanbul,(2001), s. 513-518.
- [2] Sandvik Coromant Co. Inc., Modern Metal Cutting-A Practical Handbook, Sweden, (1997).
- [3] Erdoğan, M., Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Cilt1, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2000.
- [4] Erdoğan, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt1, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (1998), s. 326-332.
- [5] Bahadır, A., Kumar, B.R., Chowdhury, G.S, "Evaluation Of Changes İn X-Ray Elastic Contants And Residual Stress As A Fuction Of Cold Rolling Of Austenitic Steels" Materials Science and Techonology, V20, 3, (2004),p.,387-392.
- [6] ORS Bülteni, Ors Rulmanları ve Makaralarının Yorulma Ömrünün Artırılması İçin Kalıcı Gerilmelerin İyileştirilmesi, Sayı 5, (2004)
- [7] Bray, D. E., Pathak, N., Srinivasan, M. N., "Residual Stress Mapping İn A Steam Turbine Disk Using The LCR Ultrasonic Technique", *Material Evaluation*, (1996).
- [8] Fetullayev, E. K., "Talaş Kaldırma Yöntemi İle Üretilen Vidalı Elemanlara Yüze Katında Oluşan Artık Gerilmelerin Vida Elemanlarına Etkisi", Uluslararası Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, ANKARA, (1998).
- [9] Kasap, M., AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinde En Uygun Kesme Parametrelerin ve İşleme Şartlarının Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2001).
- [10] Çiftci, İ., Kasap, M., Şeker, U., "Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Deneysel Çalışmalar Üzerine Bir Değerlendirme", *Teknoloji*, (1999), 3-4, 131.
- [11] Korkut, İ., Kasap, M., Çiftci, İ., Şeker U., "Determination Of Optimum Cutting Parameters During Machining Of AISI 304 Austenitic Stainless Stell", *Materials& Desing*, V 25, (2004), p. 303-305.
- [12] Shoping and Treating of Steel, United States Steal Co., USA, (1971)
- [13] Mills, B., Redford, A. H., Machinability Of Engineering Materials, University of Salford, Uk, (1983), p.107-108.
- [14] Shaw, M.C., "Metal Cutting Principles", Oxford University Press, London, ISBN 0-19-859002-4, (1984).

- [15] Trent, E.M., Metal Cutting, Butterworths Press, (1989).
- [16] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw Hill Book C., U.K. (1985)
- [17] Almen, J. O., Black, P. H., Residual Stresses and Fatigue in Metals, McGraw-Hill Book Company, U.S.A., (1964).
- [18] Belejchak, P., “Machining Stainless Steel”, *Advanced Materials & Processes*, (1997), p 23-25.
- [19] Kang, K. J., Sony, J. H., Earmme, Y. Y., “A Metod For The Measurement Of Residual Stress Using A Fracture Mechanics Approach”, *Journal Of Strain Analysis*, V24, N1, (1989).
- [20] Smith, D. J., Leggatt, R. H., Webster, P. J., Mills G., “Neutron Diffraction Measurements Of Residual Stress And Plastic Deformation İn An Aluminium Alloy Weld”, *Journal Of Strain Analysis*, V23, N4, (1989).
- [21] Leggatt, R. H., Smith, D. J., Smith, D. S., Fauve, F., “Development And Experimental Validation For Residual Stress Measurement”, *Journal Of Strain Analysis*, V31, N3, (1996).
- [22] Winholtz, R. A., Cohen, J. B., “Changes In The Macrostressses and Microstressses İn The Steel With Fatigue”, *Materials Science and Engineering*, A154, (1992).
- [23] http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.html.
- [24] Heindlhofer, K., Evaluation Of Residual Stres, McGraw Hill Book Company Inc., U.S.A.(1948).
- [25] Nikitin, I., Scholtes, B., Maier, H.J. and Altenberger, I., “High Tempature Fatigue Behavior And Residual Stress Stability Of Laser-Shock Peened And Deep Rolled Austenitic Steel AISI 304”, *Scripta Materialia*, Volume 50, Issue 10, (2004), P. 1345-1350.
- [26] Akkurt, M., Kent M., Makine Elemanları, Birsen Kitapevi Yayınlar, İstanbul, (1984), s 453-460.
- [27] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw Hill Book C., U.K.,(1985).
- [28] Koç, E., Makine Elemanları, Nobel Kitabevi, Adana, (2003), s 30.
- [29] Fethullayev, E.K., Akyıldız, H.K., Teknolojik Gerilmelerin Makine Parçalarının Üretiminde Önemi, Erciyes Üniversitesi Yayını, Kayseri, (2000).
- [30] Fetullayev, E. K., "Vidalarda Meydana Gelen Artık Gerilmelerin Teknolojik Faktöre Bağlı Olarak Tayin Edilmesi", 7. Uluslararası Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, ANKARA, (1996).

- [31] Hebbbar, R. R., A Residual Stress Analyzer For Machined Surfaces, M. Sc. Thesis, Purdue University, U.S.A.(1989)
- [32] Polushkin, E.P., Defect And Failure Of Metals, Elsevier Publishing Co., U.S.A.,(1956,),s 137-151
- [33] Walpi, D.J., Understanding How Components Fail, American Society For Metals, U.S.A., (1993)
- [34] Hetanyi, M. Handbook Of Experimental Stress Analysis, John Willy & Sons Inc., U.S.A., (1950).
- [35] Marshall, C.W., Maringer, R.E., Dimensional Instability On Introduction, Pergamon Press Ltd., UK.(1977), p. 139-163., p. 342-395.
- [36] Kafkas, F., Katman Kaldırma Tekniğine Dayalı Olarak Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesini Sağlayan Bilgisayarlı Ölçme Cihazının Tasarımı Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2001).
- [37] Karataş, Ç., Fetullayev, E., Kafkas, F., “AISI 5115 Çelikten İmal Edilen Dişli Çarkın Diş Dibindeki Kalıcı Gerilmelerin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara,(2001)
- [38] Henriksen, E. K., “Residual Stress In Machined Surfaces”, Transactions ASME Journal Of Engineering for Industry, Vol. 73, (1951), p. 69-76.
- [39] Liu, C.R. and Barash, M.M., “The Mechanical State Of Sublayer Of A Surface Generated By Chip Removal Process”, J. Eng. Ind. ASME. Vol. 98, (1979), p.1192-1208.
- [40] Leskovar, P. And Peklenik, J., “Influence Affecting Surface Integrity In TheCutting Process”, Ann. CIRP, (1981), p. 245-248.
- [41] Matsumoto, Y., Barash, M. And Liu, C.R., “Effect Of Hardness On The Surface Integrity Of AISI 4340 Steel”, J. Eng. Ind. ASME. Vol. 108, (1986), p.196-175.
- [42] Jang, D. Y. And Seireg, A., “A Model For Predicting Residual Stresses In Metal Cutting”, Proc. Jap. Int. Tribology Conf. Nagoya, (1990), p. 439-444.
- [43] Dewald, A.T., Rankin, J.E., Hill, M.R., Schaffers, K.I., “An Improved Cutting Plan For Removing Laser Amplifier Slabs From Yb:S-FAP Single Crystals Using Residual Stress Measurement And Finite Element Modelling”, Journal Of Crystal Growth; 265, 3-4, p., 627-641
- [44] Giuliani, A., Albertini, G., Manescu, A., “Residual Stress Analysis On Tensile MMC Specimens After Loading/Unloading Deneys In Several Conditions”, Physica B: Condensed Matter, Volume 350, Issues 1-3, Supplement 1, (2004), P.E499-E501.
- [45] Balart, M.J., Edwards, B.L, Fitzpatrick, M.E., “The Onset Of Tensile Residual Stress In Grinding Of Hardened Steels”, Materials Science Engineering, (2003)

- [46] Tonshoff, H.K., Brinksmeier, E., “Determination Of Mechanical And Thermal Influences On Machined Surfaces By Microhardness And Residual Stress Analysis”, *Ann. CIRP*, 29, (1980), p. 519-530.
- [47] Brinksmeier, E., Cammett, J. J., Leskovar, P., Peters, J. And Tonshoff, H.K., “Residual Stresses-Measurement And Causes In Machining Processes”, *Ann. CIRP*, 31, (1982), p. 491-510.
- [48] Jang, D. Y., Wang, L., “Predicting Stress Distribution In Workpiece Using F.E.M.”, *Mo. Acad. Sci.Conf.*, (1992).
- [49] Wiesner, C., “Residual Stress After Orthogonal Machining Of AISI 304; Numerical Calculation Of The Thermal Component And Comparison With Experimental Result”, *Metall. Trans. A.*, 23-a, (1992), p. 989-996.
- [50] Jang, D. Y., Watkins, T.R., Kozaczek, K. J., Hubbard, C.R., Cavin O.B., “Surface Residual Strees In Machined Austenitic Stainless Steel”, *Wear*, 194, (1992), p. 989-996.
- [51] Dahlman, P., Gunnberg, F., Jacobson, M., “The Influence Of Rake Angle, Cutting Feed And Cutting Depth On Residual Stress In Hard Turning”, *Journal Of Materials Processing Technology*, V.,147, Issue 2, (2004)
- [52] Sasahara, H., Obikawa, T., Shirakshi, T., “Prediction Model Of Surface Residual Stress Within A Machined Surface By Combining Two Orthogonal Plane Models”, *Journal Of Machine Tools And Manufacture*, V.,44, 7-8, (2004), p., 815-822
- [53] Shet,C, Deng, X., “Residual Stresses And Strains In Orthogonal Metal Cutting”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* V 43, (2003), p. 573–587
- [54] Lutteroti, L., Chateigner, D., Ferrari, S., Ricote, J., “Texture, Residual Stress And Structural Analysis Of Thin Films Using A Combined X-Ray Analysis”, *Thin Solid Films*, 450, (2004), pp.34-41.
- [55] Rogante, M., Battistella, P., Rustichelli, F., “Residual Stress Measurement By Neutron Diffraction In AA6082 Extruded Samples Submitted To Different Quenching Rates”, *Meas Science Technology*, V 10, pp.56-73
- [56] Kono Y, Hara A, Yazu S, Uchida T, Mori Y. “Cutting Performance Of Sintered CBN Tools, Cutting Tool Materials”. *Proceedings of the International Conference, American Society for Metals, Ft. Mitchell, KY, September 15-17, (1980), p. 218-95.*
- [57] H.K. Tonshoff, H.G. Wobker, D. Brandt, “Tribological Aspects Of Hard Turning With Ceramic Tools”, *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers* 51 (1995) 163–168.

- [58] D.W. Wu, Y. Matsumoto, "The Effect Of Hardness On Residual Stresses In Orthogonal Machining Of AISI 4340 Steel". Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry 112, (1990), p.245–252.
- [59] Xing, Y.M., Lu, J., " An experimental Study Of Residual Stress Induced By Ultrasonic Shot Peening", Journal of Materials Processing Technology, Volume 152, Issue 1, (2004), P. 56-61.
- [60] Hossain, S., Daymond, M.R., Truman, C.E., Smith, D.J., "Prediction And Measurement Of Residual Stress In Quenched Stainless-Steel Spheres", Materials Science And Engineering, (2004)
- [61] Grum, J., Sturm, R., "A New Experimental Technique For Measuring Strain And Residual Stresses During A Laser Remelting Process", Journal of Materials Processing Technology, Volume 147, Issue 3, (2004), P. 351-358.
- [62] Yang, Y.S., Na, S.J., "A Study On Residual Stresses In Laser Surface Hardening Of A Medium Carbon Steel"
- [63] Lee, M.K., Kim, G.H., Kimand, K.H., Kim, W.W., "Control Of Surface Hardnesses, Hardening Depths, And Residual Stresses Of Low Carbon % 12 Cr Steel by Flame Hardening", Surface and Coatings Technology vol184, (2004), P.,239-246
- [64] Kim, C., Kim, D.J., Seok, C.S., Yang, W.H., "Finite Element Analysis Of Residual Stress By Cold Expansion Method Under The Influence Of Adjacent Holes", Journal Of Materials Processing Techonology, (2004)
- [65] DW. Konig, A. Berktold, K.F. Koch, "Turning Versus Grinding-A Comparison Of Surface Integrity Aspects And Attainable Accuracy", Annals of the CIRP 42 (1), (1993), p.39–43.
- [66] M. Field, J.F. Kahles, J.T. Cammett, "A Review Of Measuring Methods For Surface Integrity", Annals of the CIRP 20, (1971), p.153–163.
- [67] K. Okushima, Y. Kakino, "The Residual Stresses Produced By Metal Cutting", Annals of the CIRP 10 (1), (1971), p. 13–14.
- [68] J. Shih, H.T.Y. Yang, "Experimental And Finite Element Predictions Of The Residual Stresses Due To Orthogonal Metal Cutting", International Journal for Numerical Methods in Engineering 36, (1993), 1487–1507.
- [69] R. Liu, Y.B. Guo, "Finite Element Analysis Of The Effect Of Sequential Cuts And Tool-Chip Friction On Residual Stresses In A Machined Layer", International Journal of Mechanical Sciences 42, (2000), p.1069–1086.
- [70] Maciejewski,G., Diuzewski, P., "Nonlinear Finite Element Calculations Of Residual Stress In Dislocated Crystals", Computational Materials Science, Volume 30, Issues 1-2, (2004), P. 44-49.

- [71] Liu, C.R., Barash, M.M., “Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry V 104,(1982), p. 257–264.
- [72] Sigwart, A., Fessenmeyer, W., Oberflache Und Randschicht”. VDI Berichte 1227, VDI Verlag, (1995).
- [73] Y. Matsumoto, D. Magda, D.W. Hoepfner, T.Y. Kim, “Effect Of Machining Processes On The Fatigue Strength Of Hardened AISI 4140 Steel”, J. Eng. Ind. 13, (1991), p., 154–159.
- [74] M.H. El-Axir, “A Method Of Modeling Residual Stress Distribution In Turning For Different Materials”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42,(2002), p.,1055–1063.
- [75] Lin, Z.C., Lin, Y.Y., Liu, C.R., “Effect Of Thermal Load And Mechanical Load On The Residual Stress Of A Machined Workpiece”, Int. J. Mech. Sci. 33 (4), (1991), p. 263–278.
- [76] N. Devarajan, M.K. Asundi, S. Somasundaran, “Experimental Method For Predicting Residual Stresses Due To Turning In Stainless Steel”, Exp. Tech. 8 (1984), p. 22–26.
- [77] Hamdi, H., Zahouani, H., Bergheau, J.M., “Residual Stress Computation In A Grinding Process”, Journal of Material Processing Technology, Volume 147, Issue 3, (2004), P.277-285
- [78] Jeffrey D. Thiele, Shreyes N. Melkote, Roberta A. Peascoe, Thomas R. Watkins, “Effect Of Cutting-Edge Geometry And Workpiece Hardness On Surface Residual Stresses In Finish Hard Turning Of AISI 52100 Steel”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 122, (2000), p.642-649.
- [79] Zone-Ching Lin, Wun-Ling Lai, H.Y. Lin, C.R. Liu, “The Study Of Ultra-Precision Machining And Residual Stress For Nip Alloy With Different Cutting Speeds And Depth Of Cut”, Journal of Materials Processing Technology, V97, (2000), p.200-210.
- [80] Lin, Z.C., Lai, W.L., Lin H.Y., Liu, C.R., “Residual Stress With Different Tool Flank Wear Lengths In The Ultra Precision Machining Of Ni-P Alloys, Journal of Materials Processing Technology, V 65, (1997), p.,116-126.
- [81] Lin, Z.C., Lin, Y.Y., “A Study Of Oblique Cutting For Different Low Cutting Speeds”, Journal of Materials Processing Technology, V 115, (2001), p., 313-325.
- [82] Ship-Peng Lo, “An Analysis Of Cutting Under Different Rake Angles Using The Finite Element Method”, Journal of Materials Processing Technology 105 (2000), p., 143-151

- [83] Lin, Z.C., Yarnag, Y.D, “ Three Dimensional Cutting Process Analysis with Different Cutting Velocities”, Journal of Materials Processing Technology, V 70, (1997), p.22-33.
- [84] Eriksson, C.L., Larsson, P.L., Rowcliffe, D.J., “Strain Hardening And Residual Stress Effects In Plastic Zones Around Indentations”, Materials Science And Engineering, 340, (2003), P., 193-203
- [85] Saoubi, R.M., Outeiro, J.C., Changeux, B., Lebrun, J.L., Morafo Dias, A. “Residual Stress Analysis In Orthogonal Machining Of Standard And Resulfurized AISI 316L Steels”, Journal of Materials Processing Technology 96, (1999), p., 225-233.
- [86] Dülek, E., Karataş, Ç., Sarıtaş, S., “Bilyeli Dövülmüş Ç1020 Malzemede Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi İle İncelenmesi” Gazi Üni. Müh. Mim, Fak. Der., 19,3, (2003) s.107-116.
- [87] Chang, P.H., Teng, T.L., “Numerical And Experimental Investigations On The Residual Stresses Of The Buttwelded Joints”,
- [88] Lin, Y.C., Chen, P.Y., “Effect Of Nitrogen Content Retained Ferrite On The Residual Stress In Austenitic Stainless Steel Weldments”, (2001)
- [89] Engelhard, G., Habip, L.M., Pellkofer, D., Schmidt, J., Weber, J., Nuclear Engineering And Desing, V198, Issue1-2, “Optimization Of Residual Welding Stresses In Austenitic Steel Piping. Proofdeneying And Numerical Simulation Of welding And Postwelding Processes”, (2000)
- [90] Clapham, L., abduallah, K., Jeswiet, J.J., Wild, P.M., Rogge, R., “ Neutron diffraction residual Stress Mapping In Same Gauge And Differential Gauge Tailor-Welded Blanks”, Journal Of Materials Processing Technology, V 148, (2004), pp. 177-185
- [91] Staron, P., Koçak, M., Williams, S., Wescott, A., “Residual Stress In Friction Stir-Welded Al Sheets”, International Conference On Neutron Scaltfering (KNS) München, Komisia-X Zagadnienia Konstrukcyjne Polaczen Spawanvch-Zapobieganie Pekaniu, X1533-03, (2004)
- [92] Zhu, X.K., Chao, Y.J., “Numerical Simulation Of Transient Tempature And Residual Stress In Friction Stir Welding Of 304 L Stainless Steel”, Journal Of Materials Processing Technology, V 146, (2004), pp. 263-272
- [93] Lin, Y.C., Chou, C.P., “A New Technique For Reducing The Residual Stress Iduced by Welding In Type 304 Stainless Steel”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 48, Issues 1-4, (1995), P.693-698.
- [94] B. Clausen, T. Leffers and T. Lorentzen’ “On The Proper Selection Of Reflections For The Measurement Of Bulk Residual Stress By Diffraction”, Acta Metallurgica At Metarialia, V51, No:20, (2003], P.,6181-6188

- [95] Tuck Ma Fin, C.W., The Measurement Of Residual Stress, British Gear Associated, (2000), <http://www.Bga.Org.Uk>.
- [96] http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/residualstress/technique_information.html
- [97] <http://www.astresstech.com>. American Stress Technologies.inc.
- [98] <http://www.protoxid.com.x-ray>
- [99] <http://www.vishay.com>
- [100] <http://www.umist.ac.uk/material/research/residual/html>.
- [101] <http://www.bruker-axs.de>
- [102] <http://www.lambda-research.com/str.html>.
- [103] http://www.hmi.de/bensc/instrumentation/stress/stress_en.html.
- [104] http://www.stresstech.fi/show_solution
- [105] <http://www.Itlinc.com/pstressResidual.html>.
- [106] <http://www.hytecinc.com/hei./rsm.html>.
- [107] Honner, M., Litog,P., Svanter, M., “Thermography Analyses Of The Hole Drilling residual Stress Measuring Technique”, Infrared Physics&Technology, v 25, (2004), P., 131-142.
- [108] <http://www.efunda.com/engineering Fundamentals>
- [109] <http://www.metals.about.com/od/publications>.
- [110] Sicot, O., Gong, X.L., Cherouat, A., Lu, J., “Influence Of Experimental Parameters On Determination Of Residual Stress Using The Incremental Hole-Drilling Method”, Composites Science And Technology, V 64 No 2, (2004) pp. 171-180.
- [111] Dike, J.J., Johnson, G.G., “Residual Stress Determination Using Acoustoelasticity”, Journal Of Applied Mechanics, V 57, (1990).
- [112] Bolshakov, V.N., Gorbash, V.G., “An Instrument For Measurement Of Mechanical Stress”, Soviet Journal Of Nondestructive Deneying, V. 24, N. 6, (1989).
- [113] Lu, J., Handbook Of Measurement Of Residual Stress, Society For Experimental Mechanics, Prentice-Hall,Inc., France, (1996), s., 342-411.
- [114] Fettullayev, E., Karataş, Ç., Kafkas, F., Teknolojik Gerilmelerin Teorik ve Deneysel Yöntemlerle Değerlendirilmesini Sağlayan Bilgisayarlı Ölçme Cihazının

Tasarımı ve İmalatı, 4. Uluslar arası Mekatronik Tasarım ve Modelleme Çalışma Toplantısı, Ankara, (1999)

[115] TML Strain Gage Katoloğu

[116] Korkut, İ., “Torna Tezghasında Strain Gage İle Ölçüm Yapan Bilgisayar Bağlantılı Dinamometre Tasarımı ve İmalatı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (1996).

[117] Nolting, B.E., Cihaz Teknolojisi, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, Eskişehir, (1994), s.,79-82.

[118] Window, A.L., Holister, G.S., Strain Gage Technology, Applied Science Publishers Ltd., U.K., (1983), S., 102-176

[119] Pletcher, D., Walsh, F.C., Industrial Electrochemistry, Chapman And Hall Ltd., U.K., (1990), s., 210-243.

[120] Kola, K., Electrochemical Machining, West Virginia University, College Of Engineering And Mineral Research, <http://www.cemr.wnu.edu>.

[121] Lissaman, A.J., Martin, S.J., Principles Of engineering Production, Edward Arnold A Division Of Hodder And Stoughton Ltd., (1990), s., 134-161.

[122] Boothroyd, G., Fundamental Of Machining And Machine Tools, McGraw-Hill Ltd., U.K., (1981), s., 282-311

[123] Keskin, İ., Malzeme El Kitabı, Onarsan İnşaat Sanayii ve Ticaret A.Ş., Genişletilmiş II. Baskı, Ankara, (1991)

[124] TS 10329 (ISO 3685), “Torna Kalemleri-Ömür Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, (1992)

[125] Yardımoğlu, B., Boyar, L., “Talaşlı İmalatta Takıma Gelen Kuvvetlerin Deneysel İncelenmesi”, 5.Ulusal Makine ve İmalat Kongresi, Ankara (1992)

[126] Mendi, F., “Tornalama teorisi ve hesapları”, Takım Tezghaları Teori Ve Hesapları, ISBN 975-06008-0-3, Ankara, (1996)

[127] Otmanbölük, N., Ay, İ., ve Aksoy, Z., “Tornalamada Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü İçin Ortogonal-Ring Dinamometresi Tasarımı”, Malzeme ve İmalat Sempozyumu, Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizli, (1987)

[128] Günay, M., “Talaş Kaldırma İşlemlerinde Kesici Takım Talaş Açısının Kesme Kuvvetlerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2003)

[129] Paul Degarmo, Black, E., Ronaldo, A.K., “Material and Process in Manufacturing”, Prentice Hall International Inc. (1997)

- [130] Şeker, U., Takım Tasarımı Ders Notları. (1997)
- [131] Akkurt, A., Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, Birsen Yayınevi, İstanbul, (1996)
- [132] Material-Removal Process and Machine Tools, Mark Standart Handbook for Mechanical Engineers, 9th ed., New York, Mc Graw Hill
- [133] Oxley, P.L.B., The Mechanics of Machining- An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood Limited, England, (1989)
- [134] Lissaman, A.J., Martin, S.J., Principles of Engineering Production, Hong Kong, (1982)
- [135] J.E. Gordon, The New Science of Strong Materials, Penguin Books, (1968) p258-261