

**VİDALARIN TALAŞLI İMALATINDA İMALAT
PARAMETRELERİNİN VİDA DIŞ DİBİNDEKİ KALINTI
GERİLMELER ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Fırat KAFKAS

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2007

ANKARA

Fırat KAFKAS tarafından hazırlanan VİDALARIN TALAŞLI İMALATINDA İMALAT PARAMETRELERİNİN VİDA DIŞ DİBİNDEKİ KALINTI GERİLMELER ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

.....

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

.....

Makine Müh. Anabilim Dalı, T.O.B.B.

Yrd. Doç Dr. Çetin KARATAŞ

.....

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

.....

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

.....

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. A. Tamer ÖZDEMİR

.....

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 30/10/ 2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Fırat KAFKAS

**VİDALARIN TALAŞLI İMALATINDA İMALAT PARAMETRELERİNİN
VİDA DIŞ DİBİNDEKİ KALINTI GERİLMELER ÜZERİNE ETKİLERİNİN
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)**

Fırat KAFKAS

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2007**

ÖZET

Bu çalışmada, talaş kaldırarak vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemleri neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmelerin deneysel olarak belirlenmesini, bu tornalama işlemlerinin oluşturduğu kalıntı gerilmelerin karşılaştırılmasını ve tornalama işlemlerinde kullanılan parametrelerin kalıntı gerilmeler üzerine olan etkilerinin araştırılmasını amaçlanmaktadır. Bu amaçla, değişik işleme parametreleri kullanılarak, AISI 4140 ve AISI 4340 malzemeler üzerinde farklı tornalama işlemleri yapılmış ve kalıntı gerilmeler üzerine işleme parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Kalıntı gerilmeler katman kaldırma metodu kullanılarak belirlenmiştir. Katmanların seri olarak kaldırılması elektro kimyasal işleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Farklı tornalama işlemleri neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmelerin yüzeyden olan derinliğe bağlı değişim grafikleri oluşturulmuştur.

Kalıntı gerilim değişim grafiklerinden elde edilen temel kalıntı gerilme sınırları işleme parametrelerinin etkisini incelemek için kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, talaş kaldırma işleminde kalıntı gerilmelerin mekanik ve ısı etkilerden meydana geldiği tespit edilmiştir. Isıl etkileri artıran tüm işleme

parametrelerinin çekme kalıntı gerilmelerini, plastik deformasyonu arttıran parametrelerin ise basma Kalıntı gerilmelerini oluşturduğu gözlenmiştir. Vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemlerinde kesme biçiminin farklı talaş oluşumu meydana getirdiği ve kalıntı gerilmeleri etkileyen en önemli faktörün talaş oluşumunun farklılığından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Kalıntı gerilmeler, metal kesme, çelikler, vida açma, kanal açma, tornalama
Sayfa Adedi : 205
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CHIP
REMOVAL PARAMETERS ON RESIDUAL STRESSES AT SCREW ROOTS**

(Ph. D. Thesis)

Fırat KAFKAS

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2007

ABSTRACT

In this study, the experimental determination of the residual stresses which were resulted from threading, grooving and turning processes by means of chip removal, the comparison of residual stresses which generated with various turning processes and investigation of the effects of parameters in turning processes on residual stresses are aimed. For this purpose, various turning processes were carried out using different machining parameters on AISI 4140 and AISI 4340 steels and the effects of the processing parameters on residual stresses were investigated.

Residual stresses were determined by layer removal method. Sequential removing of layers was carried out using electrochemical machining. The changes in residual stresses resulted from different turning processes were plotted with respect to the distances from the original surface.

Limits of main residual stress obtained from the gradient of residual stresses plots were used for the investigation on the effect of the process parameters. As a result of this study, it is obtained that in chip removal the residual stresses were resulted from mechanical and thermal effects. Thus, it is observed that the tensile residual stresses were resulted from the parameters which increase the thermal effects and the compressive residual stresses were resulted from the

parameters which increase the plastic deformation. It is also determined that the various cutting shapes in machining processes such as the threading, the grooving and the turning causes the different chip formations and these different chip formations have the most important effect on the residual stresses.

Science code	: 708.3.028
Key Words	: Residual stresses, metal cutting, steels, threading, grooving, turning
Page Number	: 205
Adviser	: Assist. Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, çalışmayla ilgili sıkıntılı anlarımda sürekli benimle beraber olan, değerli görüşleriyle beni yönlendiren kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ'a, kalıntı gerilmeler konusundaki deneyimlerini bana aktaran değerli hocam Sayın Doç. Dr. Eldar FETULLAYEV'e, deneysel çalışma safhasında değerli görüşlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, kesme deneylerinin yapılması sırasında yardımını esirgemeyen değerli arkadaşım Sayın Öğr. Gör. Dr. Ali Rıza MOTORCU'ya, çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Sayın Arş.Gör. Fatih ŞAHİN'e, Arş.Gör. Onuralp ULUER'e, Arş.Gör. Volkan KILIÇLI'ya ve Arş.Gör. Volkan KIRMACI'ya, böyle bir çalışmayı tamamlamak için sabrını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxii
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL BİLGİLER	5
2.1. Talaş Biçimi ve Oluşumu Üzerine Uç Radyüsünün Etkisi	5
2.1.1. Simetrik kesme kenarıyla kesme teorisi	7
2.2. Kalıntı Gerilmeler	8
2.2.1. Kalıntı gerilme tipleri	8
2.2.2. Kalıntı gerilmelerin kaynağı	8
2.2.3. Kalıntı gerilmelerin etkileri	11
2.3. Kalıntı Gerilme Bileşenlerinin Yönleri	13
2.4. Kalıntı Gerilme Grafiklerinin İfadesi	14
2.5. Kalıntı Gerilme Ölçüm Metotlarının Sınıflandırılması	16
2.5.1. Mekaniksel gerilme ölçüm metotları	16
2.5.2. Kırınım yardımıyla gerilme ölçümü	20
2.5.3. Dalga metotları	22
2.5.4. Diğer metotlar	24
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27

Sayfa

3.1. Deneysel Çalışmalar	27
3.2. Teorik ve Deneysel Çalışmalar	33
3.3. Modelleme çalışmaları	37
3.4. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi	43
4. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİ NETİCESİNDE KALINTI GERİLME OLUŞUMU VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KALINTI GERİLMELER ÜZERİNE ETKİSİ	46
4.1. Talaş Kaldırma ve Kalıntı Gerilme	46
4.2. Talaş Kaldırmada Kalıntı Gerilme Oluşturan Mekanizmalar	48
4.2.1. Termal deformasyon	48
4.2.2. Mekanik deformasyon	49
4.2.3. Termoplastik deformasyon	50
4.3. İşleme Parametrelerinin Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkisi	54
4.3.1. Takım geometrisi ve özelliklerinin etkisi	55
4.3.2. İş malzemesi türünün etkisi	70
4.3.3. Kesme parametrelerinin etkisi	75
4.4. Teknolojik Analiz	96
5. MATERYAL VE METOT	104
5.1. Kesme Deneyleri	104
5.1.1. İş parçası malzemeleri	105
5.1.2. Kesici takımlar ve takım tutucular	107
5.1.3. İşleme parametreleri	109
5.1.4. Deney parçalarının hazırlanması	110
5.1.5. Takım tezgahı	111
5.1.6. Kesme deneylerinin yapılışı	112

Sayfa

5.2. Ölçüm Deneyleri	114
5.2.1. Elektro kimyasal katman kaldırma cihazı.....	114
5.2.2. Ölçüm numunelerinin biçimi	116
5.2.3. Ölçümlerin yapılışı	117
5.3. Verilerin Değerlendirilmesi	118
5.3.1. Verilerin analizi ve düzenlenmesi.....	118
5.3.2. Kalıntı gerilme bileşenlerinin hesaplanması.....	119
5.3.3. Kalıntı gerilme bileşenlerinin analizi.....	121
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	123
6.1. Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	123
6.1.1. Vida açma işlemine ait sonuçlar	124
6.1.2. Kanal açma işlemine ait sonuçlar	130
6.1.3. Düz Tornalama işlemine ait sonuçlar	136
6.2. İşleme Parametrelerinin Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkileri	140
6.2.1. Vida açma parametrelerinin etkisi	142
6.2.2. Kanal açma parametrelerinin etkisi	155
6.2.3. Düz tornalama parametrelerinin etkisi.....	168
6.3. Tornalama İşlemleri ve Kalıntı Gerilmeler Arasındaki İlişki	180
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	182
7.1. Sonuç.....	182
7.2. Öneriler	184
KAYNAKLAR	186
ÖZGEÇMİŞ	204

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yüzey bütünlüğünün etkileri	15
Çizelge 2.2. Değişik kalıntı gerilme ölçüm metotlarının karşılaştırmalı özeti	26
Çizelge 4.1. Kalıntı gerilme oluşumunun özeti (S: Yüzeyden derinlik, T: Çekme kalıntı gerilmesi, C: Basma kalıntı gerilmesi, ↑: Artma eğilimi, ↓: Azalma eğilimi).....	52
Çizelge 4.2. Karbon çeliklerinin eşdeğer karbon miktarları (C_{eq})	72
Çizelge 4.3. Araştırılan alaşımlı çeliklerin kimyasal ve mekaniksel özellikleri	73
Çizelge 5.1. AISI 4140 ve AISI 4340 çeliğin kimyasal kompozisyonu	105
Çizelge 5.2. AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerin fiziksel özellikleri	105
Çizelge 5.3. Isıl işlem şartları ve elde edilen sertlik değerleri	106
Çizelge 5.4. Deneysel kesme çalışmasında kullanılan kesici uçlar	108
Çizelge 5.5. Kesicilere ait Takım Tutucular	108
Çizelge 5.6. Kaplamaların ısıl iletim katsayıları	109
Çizelge 5.7. Kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri	109
Çizelge 5.8. Tornalama işlemlerine ait işlem sıraları.....	111
Çizelge 5.9. JOHNFORD T35 CNC torna tezgahının özellikleri.....	111
Çizelge 6.1. Vida açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları	143
Çizelge 6.2. Vida açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları	147
Çizelge 6.3. Vida açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları	150
Çizelge 6.4. Vida açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları	153
Çizelge 6.5. Kanal açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları	156

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.6. Kanal açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları	160
Çizelge 6.7. Kanal açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları	163
Çizelge 6.8. Kanal açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları	166
Çizelge 6.9. Düz tornalama işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları	169
Çizelge 6.10. Düz tornalama işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları.....	172
Çizelge 6.11. Düz tornalama işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları	175
Çizelge 6.12. Düz tornalama işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları.....	178

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Talaş biçimi üzerine kesici takım uç radyüsünün etkisi; a) $r=3,2$ mm, b) $r=1,2$ mm	5
Şekil 2.2. Talaş oluşumunda kesici uç radyüsünün etkisi	6
Şekil 2.3. Minimum talaş kalınlığının etkisi a) $h < h_m$, b) $h = h_m$, c) $h > h_m$. (R, kesici kenar radyüsü; h , deforme olmamış talaş kalınlığı; h_m , minimum talaş kalınlığı)	7
Şekil 2.4. Talaş karşılaşmasının gösterildiği simetrik kenarlı kesme modeli	8
Şekil 2.5. Kalıntı gerilmelerin kaynağı a) Yaylar gerilmemiş, b) Yaylar gerilmiş	9
Şekil 2.6. İş parçası yüzeyine göre kalıntı gerilme bileşenlerinin yönleri	13
Şekil 2.7. Tipik kalıntı gerilme sınırları	14
Şekil 2.8. Yüzey altı yorulma çatlak oluşumu a) Çatlağın oluşum yerinin optik fotoğrafı, b) Çatlak oluşumunun grafiksel ifadesi.....	15
Şekil 2.9. Katman kaldırma esnasında kalıntı gerilmenin yeniden dağılımı.....	16
Şekil 2.10. Kaldırılmış katman kalınlığının bir fonksiyonu olarak eğilme deformasyonu	17
Şekil 3.1. İlerleme ile ilişkili bileşke gerilme	28
Şekil 3.2. Ortogonal kesme ile işlenmiş yüzey için kesme hızı ve kalıntı gerilmeler arasındaki ilişki	28
Şekil 3.3. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 1045 çeliğin kuru işlenmesinde kesme hızının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi a) $V=213$ m/dak., b) $V=86$ m/dak., c) 35 m/dak., d) 8 m/dak.....	30
Şekil 3.4. Maryaşılandırılmış % 18 nikelli çelik için maksimum kalıntı gerilmeler üzerine aşınma yeri uzunluğunun etkisi	32
Şekil 3.5. Kalıntı gerilme dağılımı üzerine iş parçası sertliğinin etkisi	34
Şekil 3.6. Kalıntı gerilme oluşumu (A) Basma yüklemeleri baskın olduğunda basma kalıntı gerilmeleri ile sonuçlanır, (B) Çekme yüklemeleri baskın olduğunda çekme kalıntı gerilmeleri ile sonuçlanır	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.7. Deneysel ve tahmin yöntemleri ile elde edilmiş kalıntı gerilme dağılımı (30° pah açılı, yuvarlatılmış takım)	38
Şekil 3.8. İşlenmiş yüzey altındaki derinliğe göre üç durum için bütünleşmiş termal ve mekanik yükler altındaki kalıntı gerilmeler	38
Şekil 3.9. Ölçülmüş ve tahmin edilmiş kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması	39
Şekil 3.10. X-Ray kırınımından ve sonlu eleman metotlarından elde edilmiş kesme doğrultusundaki kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması	40
Şekil 3.11. Al 7001 malzemeye ait deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması a) $V=171$ m/dak., $f=0,2$ mm/dev., b) $V=117$ m/dak., $f=0,35$ mm/dev.....	41
Şekil 3.12. Deneysel ve nümerik olarak elde edilmiş kalıntı gerilmeler arasındaki karşılaştırma.....	42
Şekil 4.1. Griffiths'e göre bileşen yüzeyinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine termal faz dönüşümünün etkisi.....	48
Şekil 4.2. Griffiths'e göre mekaniksel deformasyonun bileşen yüzeyinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine etkisi	49
Şekil 4.3. Griffiths'e göre termal ve plastik deformasyonun mekaniksel deformasyonun bileşen yüzeyinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine etkisi	50
Şekil 4.4. Talaş kaldırma esnasında kalıntı gerilme oluşumu a) Tornalama ile kalıntı gerilme oluşumu, b) Kalıntı gerilme oluşum mekanizmaları.....	52
Şekil 4.5. Farklı talaş açılarının (γ) kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi a) $\gamma=5^\circ$, b) $\gamma=10^\circ$, c) $\gamma=15^\circ$, d) $\gamma=20^\circ$	55
Şekil 4.6. Inconel 718'de farklı talaş yüzey biçimlerinin etkisi (A2: Negatif talaş açılı takım, D: Pozitif talaş açılı takım).....	57
Şekil 4.7. Tipik kesici kenar tasarımları ve farklı biçimleri	58
Şekil 4.8. Kesici kenar biçiminin kalıntı gerilme ve etki derinliği üzerine etkisi (RC= 62, kesme hızı= 120 m/dak., ilerleme oranı= 0,1 mm/dev.) a) Maksimum kalıntı gerilme; b) Maksimum gerilmenin etki derinliği	59

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. İlerleme miktarının ve kesme derinliğinin işlenmiş parça yüzeyindeki kalıntı gerilmeler üzerine etkisi a) İlerleme miktarın etkisi, b) Kesme derinliğinin etkisi	60
Şekil 4.10. Tornalama esnasında kesici uç radyüsünün aksenal kalıntı gerilme dağılımı üzerine etkisi S) Takım birinci noktada, T) Takım ikinci noktada, U) Takım üçüncü noktada	60
Şekil 4.11. Kesici takım uç radyüsünün yüzeyde neden olduğu kalıntı gerilmeler	61
Şekil 4.12. Kalıntı gerilmeler üzerine takım uç radyüsünün etkisi (A1: $r=0,8$ mm- negatif talaş açılı, B: $r=1,2$ mm negatif talaş açılı ve C: $r= 1,6$ mm negatif talaş açılı takım).....	62
Şekil 4.13. Kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı çevresel kalıntı gerilmelerin değişimi	63
Şekil 4.14. Kaplamalı ve kaplamasız takımlar için yüzeydeki çevresel kalıntı gerilmeler	63
Şekil 4.15. Sert tornalamada TiN kaplamanın etkisi (27MnCr5, 850 HV, $a=0,15$ mm, TNGA 160408 S, $f= 0,1$ mm/dev) a) Yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, b) Çevresel kalıntı gerilme üzerine etkisi	64
Şekil 4.16. Keskin takım kullanıldığında farklı kesme hızlarının ve ilerleme oranlarının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi; Takım S: TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN kaplamalı, Takım H: kaplamasız a) V=40 m/dak., b) V=80 m/dak., c) 120 m/dak., d) 40 m/dak.....	67
Şekil 4.17. Kör takım kullanıldığında farklı kesme hızlarının ve ilerleme oranlarının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi; Takım S: TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN kaplamalı, Takım H: kaplamasız a) V=40 m/dak., b) V=80 m/dak., c) 120 m/dak., d) 40 m/dak.....	68
Şekil 4.18. Kalıntı gerilme profili üzerine takım aşınmasının etkisi a) İş parçasına bağlı çevresel kalıntı gerilme değişimi, b) Takımın yan yüzey aşınma miktarı, c) Tam aşınmasına bağlı çevresel kalıntı gerilme değişimi, d) Beyaz katman kalınlığı	69
Şekil 4.19. Takım ömrüne bağlı kalıntı gerilme ve nüfuziyet derinliğinin değişimi	70
Şekil 4.20. Kalıntı gerilmeleri etkileyen faktörler	71

Şekil	Sayfa
Şekil 4.21. Karbonlu çeliklerde kalıntı gerilmelerin temel etki grafikleri a) İlerleme miktarının etkisi, b) Uç radyüsünün etkisi.....	72
Şekil 4.22. Karbon çeliği için ortalama kalıntı gerilmelerin bir fonksiyonu olarak karbon ve eşdeğer karbon içerikleri	73
Şekil 4.23. Alaşımlı çeliklerde kalıntı gerilmelerin temel etki grafikleri (a) İlerleme miktarının etkisi (b) Uç radyüsünün etkisi	74
Şekil 4.24. Ortalama kalıntı gerilmenin bir fonksiyonu olarak karbon ve alaşımlı çeliklerin mekaniksel karakteristikleri	74
Şekil 4.25. CBN kesici takımın yüzey bütünlüğü üzerine etkisi a) Kesme hızının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi, b) Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi	75
Şekil 4.26. Kesme hızına bağlı kalıntı gerilme değişimleri a) Düşük ve orta kesme hızlarında çevresel kalıntı gerilmeler, b) Düşük ve orta kesme hızlarında eksenel kalıntı gerilmeler, c) Yüksek kesme hızlarında çevresel kalıntı gerilmeler, d) Yüksek kesme hızlarında çevresel kalıntı gerilmeler	76
Şekil 4.27. Kesme hızına bağlı kalıntı gerilme dağılımı a) Eksenel kalıntı gerilmeler, b) Çevresel kalıntı gerilmeler	77
Şekil 4.28. Kesme hızının kalıntı gerilme bileşenleri üzerine etkisi a) Çekme katmanı derinliği üzerine etkisi, b) Yüzey kalıntı gerilmeleri üzerine etkisi	78
Şekil 4.29. Kesme sonrası kalıntı gerilmeler	80
Şekil 4.30. İlerleme miktarının işlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerine etkisi a) Çevresel kalıntı gerilmeler, b) Eksenel Kalıntı gerilmeler	81
Şekil 4.31. Çevresel kalıntı gerilmeler üzerine ilerleme miktarı ve kesme hızının etkisi	82
Şekil 4.32. Farklı ilerleme miktarlarının çevresel kalıntı gerilmeler üzerine etkisi	83
Şekil 4.33. İlerleme miktarlarının eksenel kalıntı gerilmeler üzerine etkisi	83
Şekil 4.34. İlerleme miktarının kalıntı gerilme bileşenleri üzerine etkisi a) Çekme katmanı kalınlığı üzerine etkisi, b) Kesme kuvvetleri üzerine etkisi	84

Şekil	Sayfa
Şekil 4.35. Alın tornalamada ölçülmüş kalıntı gerilme ($R=0,8$ mm, $f=0,1$ mm/dev)	85
Şekil 4.36. Farklı kesme derinlikleri için çevresel kalıntı gerilmelerdeki değişim....	85
Şekil 4.37. Paso sayısının çevresel kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi	86
Şekil 4.38. Malzeme sertliğinin ilerleme miktarına bağlı olarak kalıntı gerilme bileşenleri üzerine etkisi a) Basma kalıntı gerilmeleri üzerine etkisi, b) Faydalı derinlik üzerine etkisi.....	88
Şekil 4.39. Farklı sertlikteki malzemeler için ilerleme miktarının nüfuziyet derinliği üzerine etkisi a) Eksenel kalıntı gerilmeler, b) Çevresel kalıntı gerilmeler	88
Şekil 4.40. Farklı kesici kenar geometrileri kullanılarak işlenmiş malzemelerdeki kalıntı gerilmeler üzerine iş parçası sertliğinin ve ilerleme miktarının etkisi a) Eksenel gerilme, $R=22,9$ μm , b) Çevresel gerilme, $R=22,9$ μm , c) Eksenel gerilme, $R=121,9$ μm , d) Çevresel gerilme, $R=121,9$ μm	89
Şekil 4.41. Inconel 718 malzemenin mikro sertlik profilleri a) Yeni takım, $f=0,15$ mm/dev., b) Kör takım $f=0,15$ mm/dev., c) Yeni takım, $f=0,25$ mm/dev., d) Kör takım $f=0,25$ mm/dev.....	92
Şekil 4.42. Cıvataların vida bölgelerindeki tipik mikro yapı görüntüleri a) Isıl işlem öncesi haddelme, b) Isıl işlem sonrası haddelme, c) Isıl işlem öncesi talaşlı işleme, d) Isıl işlem sonrası talaşlı işleme	94
Şekil 4.43. Inconel 718 çeliğin CBN takım kullanılarak tornalanmasında kalıntı gerilmeler üzerine soğutma sıvısının etkisi.....	95
Şekil 4.44. Kuru ve kroyojenik soğutma altında farklı ilerleme ve kesme hızları altında ortalama takım-talaş ara yüz sıcaklığındaki değişim a) SNMG uç, b) SNMM uç	96
Şekil 4.45. Silindirik tornalama operasyonun çalışma parametreleri	99
Şekil 4.46. UNI-ISO 39NiCrMo5 çelik için eksenel kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiği	99
Şekil 4.47. UNI-ISO Fe370 çelik için eksenel kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiği	100
Şekil 4.48. UNI-ISO C45 çelik için eksenel kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiği	100

Şekil	Sayfa
Şekil 4.49. Tornalanmış bir parçanın yüzey bütünlüğünü arttırmak için parametre seçim kuralları	102
Şekil 5.1. Tornalama operasyonlarında deney numunelerini bağlamak için kullanılan sıkma halkalı malafanın detay resmi	110
Şekil 5.2. Vida helis açısı ve vida takımı eğim açısı arasındaki ilişki	113
Şekil 5.3. Elektro kimyasal katman kaldırma düzeneği	114
Şekil 5.4. Elektro kimyasal katman kaldırma sistemine ait parçalar	115
Şekil 5.5. Elektro kimyasal katman kaldırma sistemi	116
Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan numunelerin biçimi ve hazırlanması a) Kesme deneyleriyle hazırlanmış numune, b) Eksenel yönlü kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için hazırlanmış (1) numuneler, c) Çevresel yönlü kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için hazırlanmış (2) numuneler	117
Şekil 5.7. Deformasyon değerinin belirlenmesi için hazırlanan deney düzeneği	118
Şekil 5.8. Hesaplama prosedürü akış şeması	120
Şekil 6.1. Metrik vida açılmış AISI 4140 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım	125
Şekil 6.2. Metrik vida açılmış AISI 4340 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım	127
Şekil 6.3. Metrik vida açılmış AISI 4140 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım	129
Şekil 6.4. Metrik vida açılmış AISI 4340 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım	130
Şekil 6.5. Kanal açılmış AISI 4140 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım	132
Şekil 6.6. Kanal açılmış AISI 4340 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım	133

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. Kanal açılmış AISI 4140 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım.....	134
Şekil 6.8. Kanal açılmış AISI 4340 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım.....	135
Şekil 6.9. Düz tornalanmış AISI 4140 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN kaplamalı takım, d-f) TiCN kaplamalı takım.....	137
Şekil 6.10. Düz tornalanmış AISI 4340 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN kaplamalı takım, d-f) TiCN kaplamalı takım.....	138
Şekil 6.11. Düz tornalanmış AISI 4140 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN kaplamalı takım, d-f) TiCN kaplamalı takım.....	139
Şekil 6.12. Düz tornalanmış AISI 4340 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri a-c) TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN kaplamalı takım, d-f) TiCN kaplamalı takım.....	140
Şekil 6.13. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ; c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}	144
Şekil 6.14. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{min} ; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{max} ; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0	148
Şekil 6.15. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ; c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}	151

Şekil**Sayfa**

- Şekil 6.16. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
 a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0 154
- Şekil 6.17. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
 a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\min}$;
 c) Maksimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\max}$ 158
- Şekil 6.18. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
 a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0 161
- Şekil 6.19. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
 a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\min}$;
 c) Maksimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\max}$ 164
- Şekil 6.20. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
 a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0 167
- Şekil 6.21. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
 a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\min}$;
 c) Maksimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\max}$ 170
- Şekil 6.22. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
 a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0 173
- Şekil 6.23. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
 a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\min}$;
 c) Maksimum kalıntı gerilme, $\sigma_{\max}$ 176
- Şekil 6.24. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
 a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0 179

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
α	Yan boşluk açısı
β	Eğim açısı
ρ	Helis açısı
γ	Talaş açısı
φ	Vida açmada paso sayısına karşılık gelen katsayı
χ	Yaklaşma (giriş) açısı
λ	Ön boşluk açısı
γ_{eff}	Kayma açısı
Δ_{apx}	Radyal ilerleme miktarı
σ	Kalıntı gerilme
σ_y	Yüzeydeki kalıntı gerilme değeri
σ_{max}	Maksimum kalıntı gerilme
σ_{min}	Minimum kalıntı gerilme
$\sigma(e)$	Malzeme kalınlığı boyunca ki kalıntı gerilme dağılımı
$\sigma_e(e)$	Kaldırılmış katmanda var olan yüzey kalıntı gerilmesi
$\Delta\sigma$	Toplam gerilme değişimi
δ	Sehim
λ	Yüzeye gelen dalga boyu
ε	Elastik gerinim
$\Delta\theta$	Bragg saçılma açısındaki değişim
σ_y	Yüzey katmanındaki kalıntı gerilmeler
σ_f	Kesme kuvvetlerinin neden olduğu kalıntı gerilmeler
σ_θ	Sıcaklığın nedene olduğu kalıntı gerilmeler
σ_p	Yüzey katmanındaki faz dönüşümünün neden olduğu kalıntı gerilmeler
a	Talaş derinliği

a_p	Toplam diş derinliği
a_0	Faydalı gerilme etki derinliği
a_{min}	Minimum gerilme etki derinliği
a_{max}	Maksimum gerilme etki derinliği
C_{eq}	Eşdeğer karbon oranı
d_{hkl}	Ara düzlem boşluklarındaki mesafe
d_2	Vidanın etkin çapı (bölüm dairesi apı)
E	Malzemenin elastikiyet modülü
e	Numunenin yüzey alanına göre ele alınan alanın kalınlığı
f	İlerleme miktarı
F_x	İlerleme kuvveti
F_y	Radyal kuvvet
F_z	Kesme kuvveti
H	Toplam kalınlık
HV	Vickers cinsinden sertlik
h	Kesilmemiş talaş kalınlığı
h_m	Kritik minimum talaş kalınlığı
h_t	Hatve
l	Uzunluk
m, c, t	Malzeme, malzeme kompozisyonu ve ısıl işlem vektör tanımları
n_{ap}	Toplam paso sayısı
n_z	Ağız sayısı
P	Yük
r	Uç radyüsü
R	Kesici kenar radyüsü
R_a	Yüzey pürüzlülük değeri
RC	Rockwell C cinsinden sertlik değeri
V	Kesme hızı
x	Gerçek paso sayısı

Kısaltmalar	Açıklama
Al₂O₃	Alümina Oksit
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> -Amerikan demir çelik enstitüsü standardı
BSD	Birinel Sertlik Değeri
BCD	<i>Binary Code Decimal</i> - Ondalık İkili Kod Düzeni
C	Karbon
CBN	Kübik Bor Nitrid
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> -Bilgisayar Sayısal Kontrol
DAYD	Düşük Alaşımli Yüksek Dayanımlı
HK	Isıl İletim Katsayısı
K-MTCVD	<i>Kennametal, Chemical Vapour Deposition</i> - Kennametal-Kimyasal Buhar Biriktirme
MS	Malzeme Sertliği
MRR	<i>Metal Removal Rate</i> -Malzeme Kaldırma Miktarı
PS	Paso Sayısı
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> -Fiziksel Buhar Biriktirme
TiN	Titanyum Nitrid
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrid
TiCN	Titanyum Karbo Nitrid

1. GİRİŞ

Kalıntı gerilmeler dış kuvvetler kaldırıldığında cisim içerisinde varlığını koruyan gerilmeler olarak tanımlanır. Böyle gerilmeler cisim içerisindeki homojen olmayan gerinim alanlarının sonucudur. Homojen olmayan gerinimi çevreleyen malzemenin elastik sabiti cisim içerisinde kalıntı gerilme alanına neden olur ve gerilmelerin denge oluşturma gereksinimleri sonucunda, cisim geometrik değişikliklere zorlanır [1].

Metal kesme operasyonlarının neden olduğu kalıntı gerilmeler yaklaşık elli yıldan beri çalışılan bir konudur [2]. Bu çalışmalar geniş bir iş parçası malzemesi grubu (karbon çelikleri, sertleştirilmiş çelikler, paslanmaz çelikler ve özel alaşımlar vb.) için işlenmiş katmanlardaki kalıntı gerilmelerin deneysel ve modellenmiş sonuçlarını içermektedir [3-23]. Bazı yayınlarda, işlenmiş katmanlardaki kalıntı gerilmelerin oluşumu için bazı ampirik, analitik ve nümerik öneriler sunulmuştur [3, 5, 8, 10, 14, 15, 24-34]. Önceden yapılmış çalışmalar referans oluştursa da bunların ortak bulunduğu fikir, metal kesmede oluşan kalıntı gerilmelerin mekanik yük, termal yük ve faz dönüşümü olgularından kaynaklandığında birleşir [35]. Bütün çabalara rağmen kalıntı gerilmelere neden olan mekanizmaların tamamen anlaşılması çok zordur ve bu konudaki çalışmalar hala geliştirilmektedir. Özellikle, kalıntı gerilmeler üzerine mekanik ve termal mekanizmaların gerçek etkileri henüz tam olarak belirlenememiştir [3-5, 7, 9, 26, 27, 31, 36-45].

Talaşlı imalat, plastik olarak deforme edilerek oluşturulmuş yeni yüzey katmanında kalıntı gerilmelerin oluşmasıyla sonuçlanan homojen olmayan gerinimlere neden olur. Plastik olarak deforme olmuş malzeme katmanı, tane sınırları gibi iş parçasındaki mikro yapıya ait nitelikler, yüksek ışık kaynağı yardımıyla mikro grafiksel olarak gözlenebilir. Talaşlı imalat işlemi en temel anlamda, üç temel bölgede yer alan iş parçası malzemesi kütlesinin deformasyonu işlemidir. Bu bölgelerdeki termal ve mekanik mekanizmalar iş parçası yüzeyinde oluşmuş homojen olmayan gerinimlerin bulunduğu katmanlara neden olur [1].

Kesme bölgesi de denilen birinci deformasyon bölgesi malzemenin talaş biçimini aldığı bölgedir ve işleme sürecinin kalbidir. Aşırı derecede büyük gerinimler, plastik işin dağılmasıyla ortaya çıkan yüksek gerinim oranları ve sıcaklıklar birinci deformasyon bölgesindeki iş parçası malzemesinde oluşur ve birinci deformasyon bölgesindeki malzeme davranışları işleme yönteminin karakterini büyük ölçüde etkiler. Kesici takım ve yeni biçimlenmiş talaş arasındaki ara yüzey boyunca mevcut olan ikinci deformasyon bölgesi takım üzerinden geçen talaşın hareketinden dolayı iş parçası malzemesi ve takımın tam bir etkileşimine neden olur. Büyük kesme gerinimleri ve yüksek sıcaklıklar, hem iş parçası ve takım malzemesinin kaynaşmasından hem de bu bölgedeki malzemenin kayma/sürtünme etkileşiminden bu bölgeyi karakterize eder [1].

Kesici takım ve yeni oluşmuş iş parçası yüzeyi arasındaki ara yüzey boyunca oluşan üçüncü deformasyon bölgesi, takımın geçtiği yeni oluşturulmuş yüzeyin hareketinden, takım ve iş parçası malzemesinin tam etkileşiminden sonuçlanan ikinci deformasyon bölgesine benzer. Yeni oluşmuş iş parçası yüzeyindeki kalıntı gerilmeyle sonuçlanan homojen olmayan gerinimlerin gelişimi üzerinde sırasıyla üçüncü ve birinci deformasyon bölgesi baskındır. İkinci defromasyon bölgesi, yeni oluşmuş yüzey üzerinde küçük etkilerinden dolayı belirli bir rol oynamaz. Homojen olmayan gerinimlerin ve dolayısıyla kalıntı gerilmelerin gelişiminde üçüncü deformasyon bölgesinin rolü hem mekanik hem de termal yöndedir. Mekanik kısım takımın ölçülebilir kenar radyüsü altında süpürülen malzemenin deformasyonundan kaynaklanır; termal kısım ise bölgedeki plastik iş ve sürtünmeden, termal gerinimlerin gelişiminden ve iş parçası malzemesi davranışlarının sıcaklık üzerindeki etkisinden kaynaklanan ısının sonucu olarak oluşur. Toplamda daha sınırlandırılmış olmasına rağmen, homojen olmayan gerinimlerin ve kalıntı gerilmelerin gelişiminde birinci deformasyon bölgesi hem mekanik hem de termal rol oynar. Takım ve malzemenin hayli arkasında uzayan birinci deformasyon bölgesi çoğu zaman üçüncü bölgedeki deformasyon olayının birinci bölgedeki deformasyonla karşılaşacağını işaret eder. Benzer olarak, birinci deformasyon bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklık iş parçası malzemesi içerisine ve takımın kenar radyüsü etrafından takım

içerisine nüfuz eder, bu olay da yeni oluşmuş yüzeydeki plastik gerinimin gelişiminde bir rol oynar [1].

Dayanımı arttırmış şekilde çalıştırılması tasarlanmış bileşenler (çevrimsel yükler, çok değişken atmosfer veya bunların bileşimi gibi çalışma ortamları) için işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeler yorulma, sürünme ve gerilmeli korozyon çatlama direnci üzerinde sınırlayıcı etkilere sahiptir. İnce ve/veya narin bileşenler için, kalıntı gerilmeler bileşen geometrisinde değişikliklere neden olacak ya da tolerans sınırlarının dışında gerçekleştirilen işlemler esnasında geniş etkilere sahip olacaktır. Ham malzemenin korunması ve bileşenlerin ağırlıklarının azaltılması gibi ekonomik/çevresel teşviklerin sürekliliği olarak, gelişen tasarım teknikleri malzeme dayanımının daha etkili kullanıldığı daha ince bileşenlere doğru hareket etmeye devam edecektir [1].

Talaşlı imalat neticesinde oluşmuş kalıntı gerilme problemlerinin önemi tornalama, frezeleme gibi geleneksel işleme yöntemlerinden kaynaklanan kalıntı gerilmelerin tahmini için faydalı modellerin gelişimi ve kalıntı gerilme oluşum mekanizmasının anlaşılabilmesinin geliştirilmesine bağlıdır. Günümüzdeki çalışmaların amacı bu ihtiyaçları işaret etmektedir.

Vidalar üzerindeki kanalların çentik etkisi oluşturmaları nedeniyle yorulma dayanımı açısından önemli bileşenlerdir. Kalıntı gerilmeler ise bir bileşenin yorulma ömrü üzerinde çok önemli etkilere sahiptir. Vida ve kanal açma işlemlerinde talaş oluşumu yoğun bir termal ve plastik deformasyon etkisi altında gerçekleşir. Bu termal ve plastik deformasyon kalıntı gerilmeleri meydana getiren mekanizmalardır. Literatürde genellikle düz tornalama işlemleri nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmeler incelenmiştir. Vida ve kanal açma işlemlerinin kalıntı gerilmeler üzerine etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmanın literatürdeki bu eksikliği dolduracağına inanılmaktadır.

Vida açma işlemi neticesinde vida dış dibinde oluşan kalıntı gerilmelerin incelenmesi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Ayrıca, kanal açma ve düz tornalama

işlemleri de gerçekleştirilerek, kalıntı gerilmeler açısından bu üç tornalama işlemi arasındaki farklılıkların da ortaya konulması sağlanmıştır. Çalışmada, kalıntı gerilmeler katman kaldırma tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu metotta, numune yüzeyinden katmanların seri olarak kaldırılması neticesinde kalıntı gerilmelerin meydana getirdiği deformasyon değişimleri ölçülerek kalıntı gerilmeler hesaplanmaktadır.

Bu bilgiler ışığında gerçekleştirilen bu çalışmanın amacı;

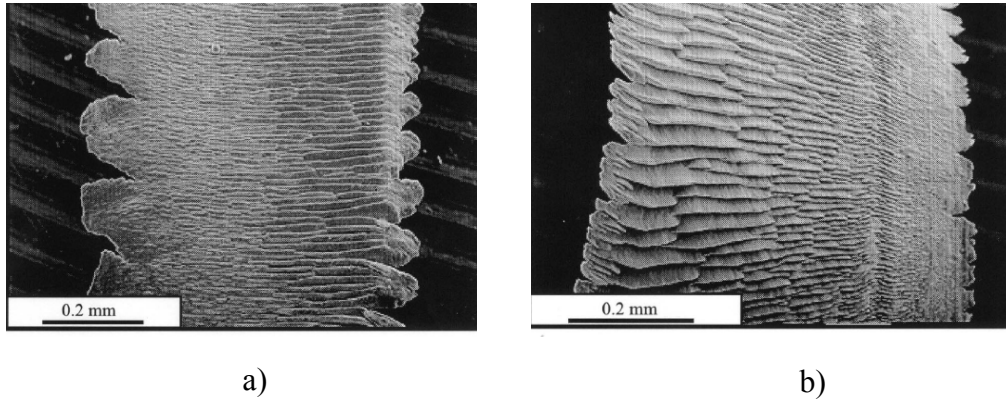
- Vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemlerinin farklı kesme parametreleri altında gerçekleştirilmesi,
- Vida ve kanal açılmış numuneler ile düz tornalanmış numunelerden kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için gerekli elektro kimyasal aşınma ve deformasyon ölçümlerinin yapılması,
- Ölçülen değerleri, numuneye ait malzeme sabitlerini ve diğer sabit değişkenleri kullanarak her bir numune için kalıntı gerilme değerlerinin hesaplanması,
- Hesaplama neticesinde elde edilen kalıntı gerilme değerlerinin katman derinliğine bağlı olarak değişim profillerinin oluşturulması,
- Kalıntı gerilme profillerinden çıkarılan temel kalıntı gerilme sınırları (yüzeydeki gerilme, maksimum gerilme, minimum gerilme ve bunların etki derinlikleri) üzerine kesme hızı, paso sayısı/ilerleme oranı, kesici kaplamasının ısı iletim katsayısı ve malzeme sertliği gibi işleme parametrelerin kalıntı gerilmeler üzerine etkilerinin incelenmesi,
- Vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemlerinden kaynaklanan kalıntı gerilme oluşumlarının karşılaştırılması,

olarak özetlenebilir.

2. KAVRAMSAL BİLGİLER

2.1. Talaş Biçimi ve Oluşumu Üzerine Uç Radyüsünün Etkisi

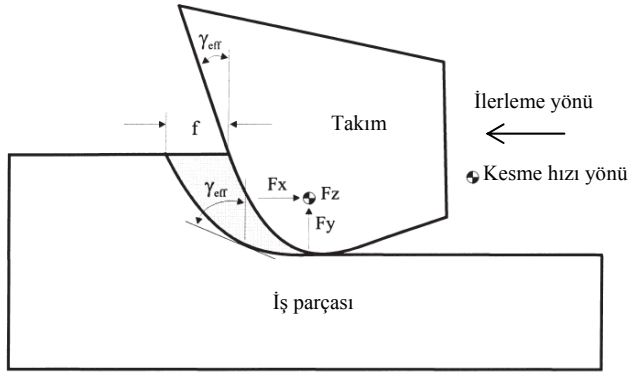
Talaş oluşumu kalıntı gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü kalıntı gerilmeler kesme bölgesinde meydana gelen deformasyon ve ısı miktarına göre biçimlenir. Özellikle vida açma işlemlerinde kesici uç radyüsü diğer kesici takımlara nazaran daha önemlidir. Çünkü kesici uç radyüsü talaş kenarında çentiklenmeye neden olur. Vida takımının üç kenarından kesme yaptığı düşünülürse, kesme bölgesinde talaş oluşumunun zorluğu daha iyi anlaşılabilir. Şekil 2.1 uç radyüsünün talaşın çentiklenmesi üzerindeki etkiyi göstermektedir. Sürüklenme kenarının yakınındaki gerçek talaş kalınlığındaki azalma Talaş kenarındaki çentiklenmeyi açıklayabilir [46].



Şekil 2.1. Talaş biçimi üzerine kesici takım uç radyüsünün etkisi;
a) $r=3,2$ mm, b) $r=1,2$ mm [46]

Talaş oluşumu temel olarak uç radyüsü boyunca yerleştiğinden, talaş kalınlığının kenar kavisi boyunca değiştiği varsayılır (Şekil 2.2). Uç radyüsü nedeniyle talaş kalınlığı gittikçe sıfıra yaklaşır ve sürüklenme kenarında yüksek basınca neden olur. Talaş kalınlığının minimum olduğu takımın sürüklenme kenarındaki malzeme talaşın en zayıf kenarından yırtılmasına sebep olan yüksek gerilmelere maruz kalır. Ayrıca, talaş parçacığının hızındaki değişim talaş genişliği boyunca ki düzenli olmayan yer değiştirmeleri kolaylaştırır ve böylece talaş kenar çentiklenmesine neden olur [46]. Talaş kenar çentiklenmesinin oluşumu sürüklenme kenar aşınmasını kolaylaştırır. Talaş, kesici kenarın üzerinde hareket ettiği pozisyonlarda takımın kesici

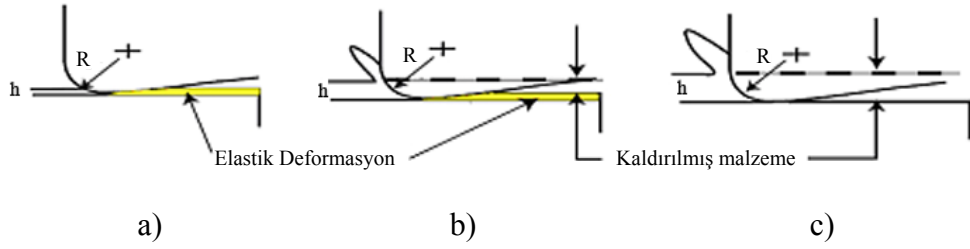
kenarlarında krater aşınması gibi talaş çentiklenmesinin sebep olduğu çentik kenar aşınması oluşturur [47]. Talaş oluşum süreci esnasında ısınmış çentikli talaş yüzeye doğru dönebilir ve yüzeye kaynaklanabilir. Kaynaklanmış malzeme çok sert ve kırılgandır, bu yüzden takım aşınma miktarını etkili biçimde artırır [48].



Şekil 2.2. Talaş oluşumunda kesici uç radyüsünün etkisi [46]

Şekil 2.3, talaş kalınlığına göre talaş oluşumunu göstermektedir. Şekil 2.3a'da gösterildiği gibi, kesilmemiş talaş kalınlığı (h) kritik minimum talaş kalınlığından (h_m) küçük olduğu zaman, elastik deformasyon meydana gelir ve kesici iş parçasından herhangi bir malzeme kaldıramaz. Kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığına yaklaştıkça, talaşlar iş parçasının kesilmesiyle biçimlendirilmeye başlar. Şekil 2.3b'de gösterildiği gibi bir miktar elastik deformasyon hala oluşmaktadır. Sonuç olarak, iş parçasından kaldırılmış derinlik istenen derinlikten az olacaktır. Buna karşılık, Şekil 2.3c'de görüldüğü gibi kesilmemiş talaş kalınlığı minimum talaş kalınlığının üstünde artırıldığında, elastik deformasyon olgusu belirgin bir şekilde azalır ve bütün kesme derinliği talaş olarak kaldırılır [49-52].

Bazı araştırmacılar kesme kuvvetlerini izleyerek takım yan yüzey aşınmasının etkisini incelemişlerdir [53, 54]. Aşırı sürtünme ve iş parçası ile takım ucu arasındaki sürtünmeden kaynaklanan termal yükler yan yüzey aşınmasını artırır. Bu durum çekme kalıntı gerilmelerine neden olur ve oldukça ince ve sert bir mikro yapıya sahip beyaz katmanlar oluşturur [55].



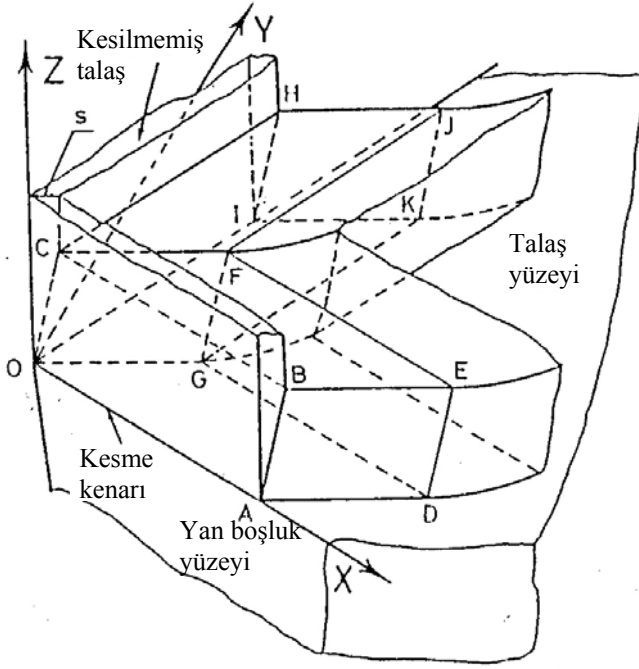
Şekil 2.3. Minimum talaş kalınlığının etkisi [49]

a) $h < h_m$, b) $h = h_m$, c) $h > h_m$. (R, kesici kenar radyüsü; h, deforme olmamış talaş kalınlığı; h_m , minimum talaş kalınlığı)

2.1.1. Simetrik kesme kenarıyla kesme teorisi

Simetrik kesme kenarına sahip kesici “üst, köşe ve yan” olmak üzere üç kesici kenara sahiptir. Üç kenarlı bir kesici, talaş kaldırırken kesicinin kesme kenarlarının her biri eşzamanlı olarak talaş oluşturur. Bu kesici kenarlardan biçimlenen talaş kesmeye karşı daha fazla direnç gösterir ve özgül kesme kuvveti ortagonal kesmedekinden daha büyük olur. Talaşlar farklı doğrultularda akarken birbiriyle çarpışır, bu da kesme alanına ya da talaş yüzeyine tesir eden kuvvetleri etkiler. Burada ki olgu “talaşların karşılaşması” olarak adlandırılır [56].

Şekil 2.4, tornalamada simetrik kenarlı kesme modelini gösterir. Takım 0° 'lik talaş açılı IOA kesme kenarına sahip nokta uçlu düzgün bir takımdır. Yaklaşma açısı $2\varepsilon'$ dur. $2b$ genişliğindeki iş malzemesi z ekseninin negatif doğrultusunda ilerler ve talaş yüzeyi üzerindeki kesme kuvvetince deformasyona uğratılır. Kesme düzlemleri OABC ve OIHC paralel kenarlarıdır. İş malzemesi kesme düzlemleri boyunca geçer ve talaş olarak GD yada GK ($GD \parallel OA$, $GK \parallel OI$) konumundaki talaş yüzeyinden ayrıldığı varsayılan OG doğrultusunda akar. OA ve OI kesme kenarları tamderinlikte-olmayan üç kenarlı kesmelerde eş zamanlı olarak çalıştığından, sadece bir kesme kenarının kestiği düşünülmüştür [56].



Şekil 2.4. Talaş karşılaşmasının gösterildiği simetrik kenarlı kesme modeli [56]

2.2. Kalıntı Gerilmeler

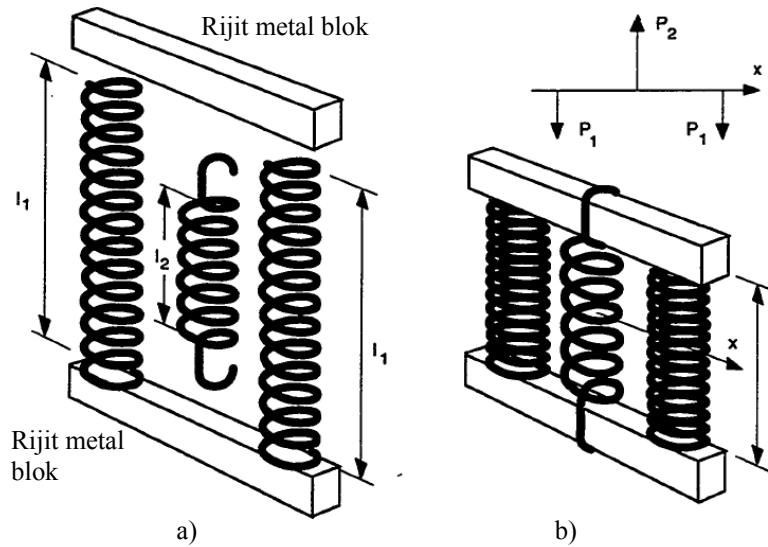
2.2.1. Kalıntı gerilme tipleri

Metalik malzemeler söz konusu olduğunda, kalıntı gerilmeler makro, mikro ve sub-mikroskopik kalıntı gerilmeler olmak üzere üç tip olmaktadır. Makro kalıntı gerilmeler, plastik deformasyondan ileri gelebilir ve geniş bir alanı etkilerler. Mikro gerilmeler, mikro yapıdaki homojensizlikler nedeniyle (örneğin faz dönüşüm süreçleri) meydana gelirler, özellikle tanelerde etkili olurlar ve genellikle rasgele dağılmışlardır. Mikro kalıntı gerilmeler makro gerilmeler içerisine dahil olmuştur. Sub-mikroskopik kalıntı gerilmeler ise kristal kafesi oluşturan atomlar arasında meydana gelir [57-59].

2.2.2. Kalıntı gerilmelerin kaynağı

Kalıntı gerilmeleri ölçmek için herhangi bir metoda karar vermeden önce kalıntı gerilmelerin kaynağının anlaşılması gerekir. Kalıntı gerilmeleri oluşturan en yaygın mekanizmalar, bileşeni elastik sınırı ötesinde geren dış etkenlerden kaynaklanır. Dış

etkenler bileşen üzerinden kaldırıldığında, uyumsuzluklar plastik olarak deforme olmuş bölge ve hala elastik olarak davranan deforme olmuş bölgenin etrafı arasında meydana gelir. Plastik olarak gerilmiş kısımlar çevresindeki elastik malzemeyle uyum elde edene kadar elastik olarak yer değiştirme eğiliminde olacak ve sonuçlanan gerilmelere kalıntı gerilmeler denilecektir. Meydana gelen makro kalıntı gerilmelerden sorumlu dış etkenler; kaynak gibi termal kaynaklar, nitrürleme gibi kimyasal işlemler veya faz dönüşümleri malzeme sınırlarında çekme uygulaması biçiminde yer alabilir [60, 61]. Şekil 2.5a'da görüldüğü gibi l_1 uzunluğunda birbirinin aynı iki helisel yaydan, farklı uzunluktaki başka bir yaydan $l_2 < l_1$ ve tamamen rijit metal bloklardan oluşan mekaniksel bir montaj dikkate alalım, eğer merkezdeki yay Şekil 2.5b'de görüldüğü gibi bloklara kanca ile tutturulacak olursa, montaj doğal olarak bloklar arasındaki yayların uzunluklarını dikkate alınmadığı bir denge pozisyonu oluşturacaktır [60].



Şekil 2.5. Kalıntı gerilmelerin kaynağı [60]

a) Yaylar gerilmemiş, b) Yaylar gerilmiş

Şekil 2.5 incelendiğinde, merkez çekme yüküne maruz kaldığı için başlangıçta kısalmış, oysa dışarıdaki yaylar basmaya çalışmaktadır. Bu haliyle, sisteme hiçbir dış kuvvet uygulanmamaktadır. Montaj tarafından karşılanan bütün yükler statik olarak dengededir ve yaylarda gerinim enerjisi depolanmasına neden olur. Bu durum

düzensiz plastik ya da termal gerinim sonrası söylenen ve bileşenleri çevreleyen kalıntı gerilme durumları ile aynıdır.

Bu üç yay benzetimi iki metal plakanın kaynaklanmasıyla oluşan farklı termal gerinim içeren gerçek bir örnek için uygulanabilir. Merkezdeki yay ısı etkilenmiş bölgenin son durumunu ve dıştaki iki yay da çevredeki elastik malzemeyi ifade edebilir [60]. Ark kaynağının neden olduğu kalıntı gerilmelerin oluşumu kısa süreli elastik-plastik termal gerilme alanlarını ve metalürjik faz dönüşümlerini içeren çok karmaşık işlemleri kapsar [62].

Kalıntı gerilmeler genellikle aşağıda sıralanan kaynaklar nedeniyle meydana gelir. Bunlar;

- İşleme, biçimlendirme, birleştirme, döküm ve kaplama gibi imalat işlemleri neticesinde oluşan düzensiz plastik deformasyonlardan ileri gelir. Bu işlemlerin bazıları termal etkilerin sonucu olarak plastik ya da viskoplastik deformasyonlar oluşturur,
- Nitrüleme gibi kimyasal işlemler,
- Faz dönüşümüne neden olan ısı işlemler [57].

Metallerin soğuk şekillendirilmesi ve işlenmesi gibi işlemler düzensiz elastik-plastik deformasyonla bütünleşmiştir. Talaş kaldırma yoluyla metallere uygulanan bir çok biçimlendirme işlemi malzemenin yüzey topografyasında değişiklikler oluşturur. İş parçasından küçük metal parçacıklarının ayrılması kama biçimli kesici takımın kuvvetle iş parçasının içerisine batmasıyla sağlanır ve malzeme ilk önce elastik daha sonra da plastik olarak deforme olarak talaşın fiziksel ayrılmasını meydana getirir. Bundan dolayı, iş parçası üzerinde yeni biçimlenmiş yüzey alt katmanların zorlamasıyla gerinmiş bir durumda kalır. Kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği (talaş kaldırma miktarı), malzeme özellikleri, takım geometrisi ve şartları, soğutma vb. gibi çeşitli parametrelere bağlı olan seviyeler alt yüzey kalıntı gerilme durumunun oluşumunu etkiler [63]. Eğer kısmi ısı oluşumu yüksek miktarda ise, faz

dönüşümleri veya viskoplastik deformasyonlar da gerilmelerin son halini etkileyebilir.

2.2.3. Kalıntı gerilmelerin etkileri

Mekanik bir bileşende kalıntı gerilmelerin mevcudiyeti her zaman olumsuz bir etkiye sahip değildir. Örneğin, bileşende doğru işaret ve büyüklüğe sahip kalıntı gerilmelerin bulunması çok büyük faydalar sağlayabilir. Bu nedenle kalıntı gerilmeler, tasarım aşamasında, tasarımcılar tarafından dikkate alınması gereken bir faktördür. Her bir özel uygulama, kalıntı gerilmelerin işareti ve dağılımına ilişkin doğru çözümleri kabul etmek için muhtemel yorulma mekanizmalarının dikkatli bir çalışmasını gerektirir. Örneğin, basma kalıntı gerilmeleri yorulma direncini, gerilmeli korozyon direncini arttırmak için, çatlak yayılımını engellemek veya yavaşlatmak için veya bir yapının yük taşıma kapasitesini arttırmak için mekaniksel olarak oluşturulabilir [64].

Kalıntı gerilmelerin seviyesi ve bilinmeyen etkilerini hesaba katmak için genellikle yapısal bütünlüğün kabul edilebilir bir düzeyini sağlayacak geniş güvenlik faktörleri kullanılır. Ayrıca, havacılık/uzay veya biomedikal gibi boyut ve ağırlığın önemli bir faktör olduğu bazı uygulamalarda kalıntı gerilme etkilerini en aza indirgeyecek oldukça yüksek güvenlik faktörlerinin kabulü mantıksızdır. Kalıntı gerilmelerin dağılımı, seviyesi ve işareti hakkındaki bilgiler alternatif tasarım/imalat metotlarını benimsemek için ya da yorulma, gevrek kırılma, gerilmeli korozyon çatlaması, ve burkulma gibi kırılma mekanizmalarına karşı alınacak karşı tedbirleri uygulamak için zorunludur. Hem tasarım hem de analiz için kalıntı gerilmelerin dağılımının belirlenmesine yönelik gereksinim en uygun karşı tedbirlerin belirlenmesi için sağlanmıştır [64].

Hasar mekanizmalarına göre kalıntı gerilmelerin etkisi aşağıdaki şekilde özetlenebilir [57];

- Yorulma ömrü genellikle kırılma biçiminde meydana gelen hasar çevrimine göre tanımlanır. Yorulma çatlak başlangıcı ve özellikler çatlak yayılma miktarı imalat ürünü olarak ya da ilerleyen çatlak ucunun plastik etkisiyle kendi kendine oluşmasıyla önceden var olabilecek kalıntı gerilmelerce etkilenir. Kalıntı gerilmelerin dağılımı ve değeri hakkındaki bilgiler, yorulma çatlak gelişimini hassas bir şekilde karakterize etmek için veya çalışma ömrünü önceden belirlemek için başvurulacak herhangi bir model için gereklidir.
- Özellikle kaynaklı yapılarda akma dayanımına yakın seviyelere erişebilen kalıntı gerilmelerin mevcudiyeti ekseriya gevrek kırılma mekanizmalarına neden olur. Gevrek kırılmayı başlatacak kritik yırtık boyutu bilgisi çalışma uygunluğuna karar vermek için önemlidir.
- Gerilmeli korozyon çatlama katastrofik hasar üreten potansiyele sahiptir. Kalıntı gerilme dağılımlarına ait bilgilere uygun karşı tedbirlerle katastrofik hasarı engellemek ya da en azından geciktirmek için ihtiyaç duyulur.
- İnelastik kolon veya yanal burkulma basma yüklerine maruz kalmış yapısal üyelerde meydana gelebilir. Bu durumda, basma kalıntı gerilmelerinin varlığı kritik gerilme veya momentlerin azalması yüzünden yük taşıma kapasitesini düşürür. Kalıntı gerilmelerin seviyelerine ait bilgilere belirlenen bir yapının zarar görmeksizin taşıyabileceği çalışma yükünü belirlemek için gerek duyulur.

Genelde kalıntı gerilmeler hakkında aşağıdaki durumlar söylenebilir [57];

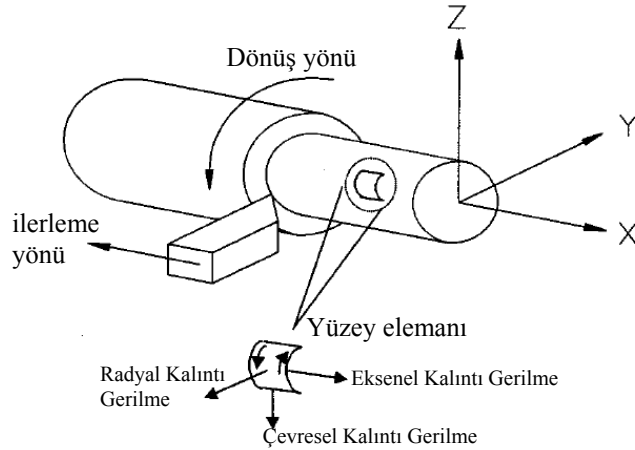
- Makro ve mikro kalıntı gerilmeler arasındaki ayrım yapmak için net bir sınır yoktur.
- Çekme kalıntı gerilmelerinin yorulma çatlak yayılımı ve gerilmeli korozyon çatlama gibi hasar mekanizmaları üzerine zararlı etkiler meydana getirdiği bilinmesine rağmen, basma kalıntı gerilmelerinin her zaman faydalı olmayacağına da dikkat edilir. Basma kalıntı gerilmeleri kolon ya da kirişlerin yük taşıma kapasitelerini de etkileyebilir.

- Bir bileşende istenilen kalıntı gerilmelerin yerleşmesi belirli bir yükleme tipinin (yorulma yada sürünme) zamana bağlı gerilme gevşemesi etkisinden dolayı sadece geçici bir yerleşme olabilir.
- Yorulma, gerilmeli korozyon çatlaması vb. nedenlerle oluşabilecek hasarlara direnci arttırmak için dikkate alındığında, kalıntı gerilme profillerinin belirlenmesi tasarım ve analiz kararları açısından, doğru ölçümlerdeki gereksinimlere karar vermek için ve onların faydalarını belirlemek için gereklidir.

2.3. Kalıntı Gerilme Bileşenlerinin Yönleri

Kalıntı gerilmeler, kesme kuvveti bileşenlerinin bulunduğu kararlı kesme bölgelerinde belirlenmektedir. Bu doğrultular temel gerilme bileşenlerinin yönlerini belirlediğinden, iş parçasının yüzeyindeki ve alt yüzeyindeki kalıntı gerilmelerin analizi için seçilirler [2, 65].

Şekil 2.6’de bütün kalıntı gerilme bileşenleri ve yönleri gösterilmektedir [11].



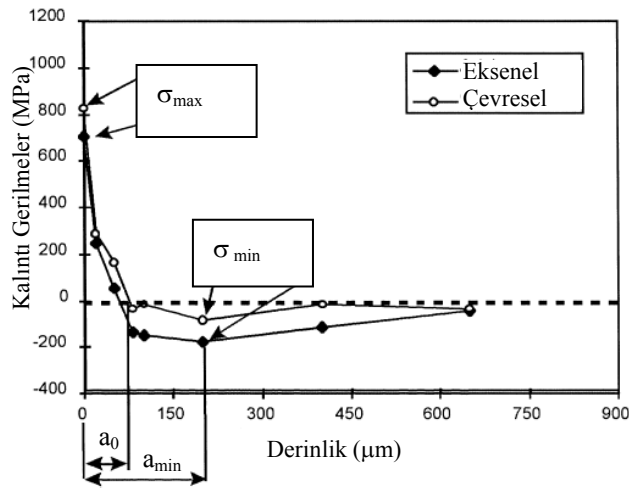
Şekil 2.6. İş parçası yüzeyine göre kalıntı gerilme bileşenlerinin yönleri [11]

İlerleme artışı genellikle eksenel gerilmelerin daha fazla çekme (daha az basma) olmasına neden olur. Radyal doğrultulardaki gerilmeler diğer gerilme bileşenlerinden genellikle küçük olmaktadır. Bu nedenle, bütün deneysel çalışmalarda radyal yöndeki kalıntı gerilmeler dikkate alınmaz. Çünkü kalıntı gerilmelerin eksenel ve

çevresel bileşenleri net bir fiziksel yoruma sahiptir. Bu bileşenler üzerine sertlik ve kenar radyüsünün etkisi daha büyük önemle dikkate alınır [11].

2.4. Kalıntı Gerilme Grafiklerinin İfadesi

Şekil 2.7, tipik kalıntı gerilme sınırlarının dağılımını göstermektedir. Burada, $\sigma_{\max}$, maksimum kalıntı gerilmeyi; $\sigma_{\min}$, minimum kalıntı gerilmeyi gösterir. Ayrıca a_0 ve $a_{\min}$ iş parçasındaki kalıntı gerilmelerce etkilenmiş katmanının kalınlığını göstermektedir [9, 66].

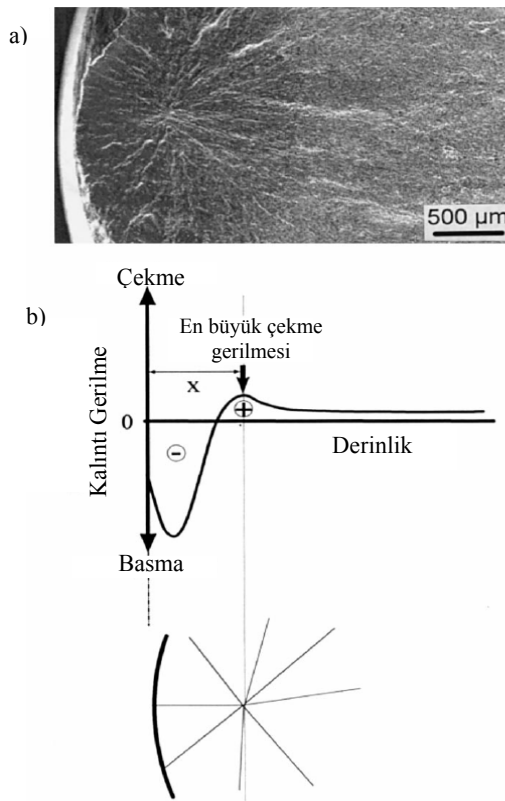


Şekil 2.7. Tipik kalıntı gerilme sınırları [9]

Mekaniksel olarak yüzey işlemlerine tabi tutulmuş numunelerdeki yüksek çevrim yorulma çatlakları genellikle dış yüzeydeki faydalı basma kalıntı gerilmelerini dengeleyen çekme kalıntı gerilmelerinden dolayı yüzey altında oluşur. Şekil 2.8, bu oluşumu göstermektedir[67].

Yorulma ömrü üzerinde yüzey işlem uygulamalarının etkisi öncelikle oluşturulmuş kalıntı gerilmelerin derinliğine ve değerine ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki değişmeye bağlıdır. Wagner, mekaniksel yüzey işlemi görmüş numunelerdeki yüksek-çevrim yorulma çatlaklarının genellikle faydalı basma kalıntı gerilmelerini dengeleyen maksimum çekme kalıntı gerilmelerinin bulunduğu yüzeyin altındaki noktada çekirdeklediğini ortaya koymuştur [67, 68].

Bütün mekaniksel yüzey işlemleri karakteristik bir yüzey pürüzlülüğüne, yüzeye yakın kısımlarda dislokasyon yoğunluğuna (soğuk çalışma-pekleşme, gerinim sertleşmesi) ve makro kalıntı gerilmelerin gelişimine önderlik eder. İşlenmiş parçanın yüzey bütünlüğünün parça yorulma çatlakları üzerine olan etkileri Çizelge 2.1’de tablo şeklinde verilmiştir[67, 69, 70].



Şekil 2.8. Yüzey altı yorulma çatlak oluşumu [67]

- a) Çatlağın oluşum yerinin optik fotoğrafı,
b) Çatlak oluşumunun grafiksel ifadesi

Çizelge 2.1. Yüzey bütünlüğünün etkileri [67]

	Çatlak oluşumu	Çatlak yayılım hızı
Yüzey pürüzlülüğü	Hızlandırır	Etkisiz
Gerinim sertleşmesi	Geciktirir	Hızlandırır
Kalıntı basma gerilmesi	Etkisiz denecek kadar az	Geciktirir

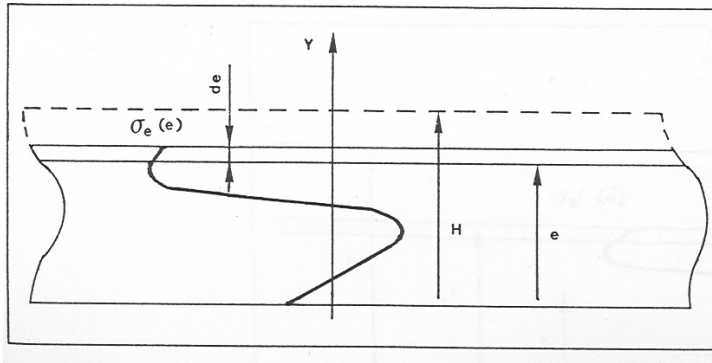
2.5. Kalıntı Gerilme Ölçüm Metotlarının Sınıflandırılması

2.5.1. Mekaniksel gerilme ölçüm metotları

Bu metotlar ister kalıntı gerilmelerin oluşumu esnasında isterse tam tersi durumda gevşemeyle gerilmelerin elde edebilmesi esasına dayanır. Oldukça yavaş ve dikkatli bir biçimde malzemeden talaş kaldırılması neticesinde oluşan deformasyon değişikliklerinin izlenmesine göre değerlendirme yapar [71].

Katman Kaldırma Tekniği

Bu metodun temeli basittir. Kalıntı gerilmelerin bulunduğu düzlem bir parça iç momentler ve kuvvetlerin statik dengesini bozmayacak şekilde biçim değiştirir. İnce bir paralele kenar test numunesinde bu biçim değişiklikleri sehim (δ) olarak ifade edilir. Bu sehim kalıntı gerilmenin büyüklük ve tipine bağlıdır ve malzeme kalınlığı boyunca ki dağılımı $\sigma_e(e)$ ' nin bir fonksiyonu yardımıyla karakterize edilir. Burada e numunenin yüzey alanına göre ele alınacak alanın kalınlığıdır (Şekil 2.9) [72].



Şekil 2.9. Katman kaldırma esnasında kalıntı gerilmenin yeniden dağılımı [72]

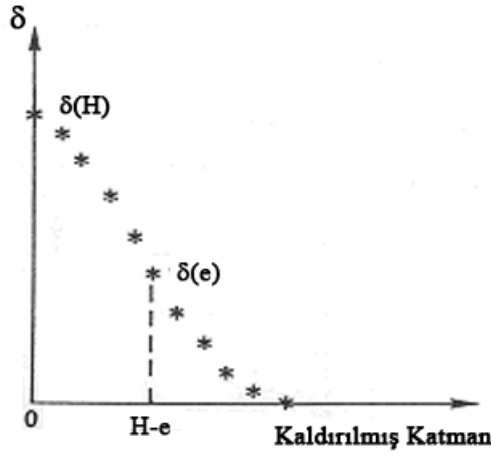
Eğer kalıntı gerilmelerin bulunduğu malzeme katmanı kimyasal işleme ile düzgün olarak kaldırılırsa, aynı zamanda iç kuvvetlerin ve momentlerin dengesi yeniden oluşacaktır. Bu dengenin yeniden elde edilmesi için, parça biçim değiştirecektir. de kalınlığındaki katmanın kaldırılmasıyla oluşan $d\delta$ sehimindeki değişime bağlı (Şekil 2.9) kaldırılmış katmanda var olan $\sigma_e(e)$ yüzey gerilmesi Eş. 2.1 yardımıyla ifade edilebilir.

$$\sigma_e(e) = -\frac{4}{3} E \frac{e^2}{l^2} \frac{d\delta}{de} \quad (2.1)$$

burada l sehimin ölçüldüğü uzunluğu, E ise malzemenin elastikiyet modülünü ifade eder.

Bu denklem aşağıdaki hipotezlerin kabulüne bağlıdır [72].

- Ön gerilmeli deney numunesi homojendir ve izotropiktir: temel gerilmeler bu gerilmelerin eksenine ile çakışiktır.
- Kalınlık boyunca var olan gerilme ihmal edilebilir.
- Enine gerilmeler öncelikli olarak ihmal edilebilecek olsa bile, tam anlamıyla hesaba katılmış olmalıdır.



Şekil 2.10. Kaldırılmış katman kalınlığının bir fonksiyonu olarak eğilme deformasyonu [72]

Bu nedenle, sadece test numunesinin eksenine paralel temel gerilme dikkate alınır. Bu gerilme, sabit bir eğriye sahip olan sabit bir bükme momentinin zorlamasına maruz kalmış bir kirişteki gerilme durumuna benzetilebilir. Gerilme sadece derinliğe göre değişecek ve deney numunesinin bütün genişliği ve uzunluğu boyunca değişmeyecektir [72].

İşlenmeden önce (de katmanı kaldırılmadan önceki yüzeyde) deney numunesinde var olan, $\sigma(e)$, kalıntı gerilme,

$$\sigma(e) = \sigma_e(e) + \Delta\sigma \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir.

e ölçüsü üzerindeki katmanların kaldırılması sonucu e ölçüsündeki toplam gerilme değişimini ifade eden $\Delta\sigma$,

$$\Delta\sigma = -\frac{8 \cdot E \cdot e}{l^2} \cdot \int_h^e d\delta + \frac{8}{3} \cdot \frac{E}{l^2} \cdot \int_h^e e' \cdot d\delta \quad (2.3)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Bu durumda, Eş. 2.1 ve 2.3, Eş. 2.2'de yerine konularak,

$$\sigma(e) = -\frac{4}{3} \cdot E \cdot \frac{e^2}{l^2} \cdot \frac{d\delta}{de} - \frac{8 \cdot E \cdot e}{l^2} \cdot \int_h^e d\delta + \frac{8}{3} \cdot \frac{E}{l^2} \cdot \int_h^e e' \cdot d\delta \quad (2.4)$$

deney numunesinde var olan toplam kalıntı gerilmeyi belirlemek için gerekli eşitlik elde edilir.

Katman kaldırma tekniği genellikle katmanlar ve kaplamalar içerisindeki gerilmeleri belirlemek için kullanılır. Katmaların kaldırılması esnasında oluşan deformasyon değişimleri kaldırılan tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olarak gerilmedeki uygun varyasyonların hesaplamasını mümkün kılar. Deformasyonlar, temaslı (profilometre, strain gage vb.) yada temassız (video, lazer tarama, ızgaralama, çift kristal kırınım topolojisi vb.) ölçü araçlarından biri kullanılarak ölçülebilir. Elde edilen deformasyon değerleri $0,1 \text{ mm}^{-1}$ civarının altındadır. Ölçümler genellikle çok eksenli deformasyonları ve mekaniksel kararlılığı sağlamak için dar şeritler (genişlik/uzunluk $<0,2$) üzerinde yapılır [71-77].

Katman kaldırma işlemi metalik ve polimerik kompozitlerdeki, ayrıca plazma, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme kullanılarak üretilmiş kaplamalardaki gerilmeleri belirlemek için uygulanabilmektedir [71-77].

Metal malzemelerde elektro kimyasal parlatma yöntemiyle katmanların seri bir biçimde kaldırılması mümkündür. İşlemeden kaynaklanan ilave bir gerilme oluşturmaması, elektro kimyasal parlatma yönteminin katman kaldırma işlemi için tercih edilmesinde ki en büyük sebeptir. Bunun yanında, bu yöntem diğer yöntemlere göre oldukça ucuzdur ve amaca uygun çok özel aparatlar gerektirmez.

Bu çalışmada, kalıntı gerilmelerinin belirlenmesinde katman kaldırma metodu kullanılmış ve katman kaldırma işlemi elektro kimyasal yöntemle gerçekleştirilmiştir.

Delik Delme Metodu

Kalıntı gerilmeler içeren bir numunenin gerilmesiz gibi görünen bölgeleri lokal olarak işlendiğinde, farklı bir biçim içerisinde gevşeyecektir ve kalıntı gerilmenin hesaplanması için işlenen yer civarından veriler elde edilebilecektir. Yöntem genellikle etrafındaki gerinimlerin ya rozet strain gage, moire interferometresi, laser interferometresi ya da holografik yöntemler kullanılarak ölçüldüğü bir deliğin delinmesini içerir [78-81]. Artışlı olarak derinleştirilen delik neticesinde derinlikle beraber gerilmedeki değişim sonuçlarını görmek mümkün olmasına rağmen, çapa eşit bir derinlikten daha fazlasında inandırıcı ölçümleri elde etmek zordur. Üç gerinim ölçere sahip rozetle sadece gerilme alanının iki düzlem bileşenini ölçmek mümkündür. Bununla birlikte, bu metot ucuzdur, kullanım alanı geniştir ve polimerik malzemelerde dahi kullanılmaktadır. Deformasyona neden olan işleme derinliğini azaltmak için mekanik delik delmenin yerine su jeti tercih edilmektedir Eğer kalıntı gerilmeler akma gerilmesinin %50'sine yakınına aştığında, o zaman lokalize olmuş akmaların neden olduğu hatalar artabilir. Bu metot kaplamalardaki kalıntı gerilmeleri belirlemek için kullanılırken, kırılma ya da 100 μm 'den ince kaplamalar için gerçekten de uygun değildir [82].

Çatlak Uyma Metodu

Çatlak uyma metodu gerinim ölçme interferometresi kullanılarak çatlakların çevresindeki gerilme gevşemesini gözlemlemek için küçük bir yarık açılmasını içerir [83]. Yarık derinliğinin gittikçe artırılmasıyla, nispeten basit gerilme dağılımları için derinliğin fonksiyonu olarak çatlakla dik gerilme alanına karar vermek mümkündür [84]. Bu metodun bir değişimi tavanların kan damarlarının kalıntı gerilme durumunu değerlendirmek için bile kullanılabilir [85].

Diğer Mekanik Metotlar

Son olarak, değişik diğer tabaka kaldırma teknikleri belirtilmiştir. Örneğin matris boyunca aşındırmayla yada lif uzunluğundaki değişiklikleri ölçmekle sürekli liflerden oluşan metal matrisin lif fazındaki kalıntı termal gerilmeleri gözlemlemek de mümkün olmaktadır. Diğer metotlar, EDM ile kesit kesme yada düzlemsellikteki sapmalardan önceki normal gerilmelerin belirlenmesi esasına dayanmaktadır [86].

2.5.2. Kırınım yardımıyla gerilme ölçümü

Ara düzlem boşluklarındaki (d_{hkl}) değişiklikler yüzeye gelen dalga boyu (λ) bilgisi vasıtasıyla elastik gerinimi (ε) belirlemek için Bragg denklemi kullanılarak elde edilebilir ve Bragg saçılma açısındaki ($\Delta\theta$) değişim

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (2.5)$$

dalga boyunu verir ve

$$\varepsilon = \frac{\Delta d_{hkl}}{d_{hkl}} = -\cot\theta \cdot \Delta\theta \quad (2.6)$$

dır. Bu gerilmesiz boşlukların ($d_{0,hkl}$) hassas bir şekilde ölçülmesini gerektirir. Gerinim sonuçları ancak uygun bir rijitlik değeri kullanıldığında gerilmeler şekline dönüştürülebilir [87,88].

Elektron Kırınımı

Bu metot, hızlı bir biçimde 10 nm gibi çok yüksek uzaysal çözünürlük çapına odaklanabilen elektron ışınlarının kullanılmasını gerektirir. Işın elektron kırınım tekniği, genel olarak en büyük gerinim çözünürlüğünü elde etmek için kullanılır. Sadece 100 μm 'den ince numuneler için uygulanabilir, bu da yüzey gevşeme etkilerine hassas sonuçları gösterir ve gerinim değerleri kalınlık boyunca bir bütünü ifade eder. Bununla birlikte metot, nikel esaslı süper alaşımların γ/γ' fazları arasındaki uyumsuz gerilmelerin yada çok küçük elektronik aygıt yapılarındaki makrogerilmelerin ölçülmesine imkan tanır [89].

X-Işını Kırınımı

Dalga Boyutları $\lambda \approx 0,1-0,2$ nm seviyesinde olan X-ışınları çok ince bir yüzey katmanına nüfuz eder. Bu sınırlama genellikle düzlem gerilmeler ($\sigma_{3i}=0$) olduğu varsayılan örneklenmiş bölgenin küçük nüfuziyet derinliğinde $\sin^2\psi$ tekniğindeki avantajları kullanabilir. Bu teknik, hassas bir gerinmesiz d_0 kafes boşluğunun belirlenmesi ihtiyacını önler. Çünkü düzlem gerinimler için numune eğriliği ile ölçülmüş kafes boşluğunun eğimi doğrudan düzlemdeki gerilmenin değeri ile ilişkili olabilir [89].

Nötron Kırınımı

Atomik boşluklarla karşılaştırılabilir dalga boylarına göre nötronlar X-ışınlarına nazaran bazı avantajlara sahiptir. Mühendislik malzemeleri içerisine nötronların etkisi belirgin olarak birkaç santimetredir. Yayılma bölgesinin sınırlandırılmasıyla ve düz yarıklı ya da radyal toplayıcılara sahip detektörün görüş alanıyla, numune içerisindeki derinlikten, sadece küçük bir hacimden ($>1 \text{ mm}^3$) yansıma şiddeti elde etmek mümkündür [90].

Kuvvetli X-Işınları (Synchotron)

Synchotron (veya kuvvetli) X-ışınları günümüzde belli başlı merkezler tarafından elde edilebilmektedir. Synchotron kaynakları konvansiyonel kaynaklardan milyonlarca kez daha kuvvetli olmalıdır ve konvansiyonel X-ışınlarından binlerce kez daha derine etki edebilecek yüksek enerji fotonları (20-300 keV) sağlayabilmelidir. Günümüzde küçük araştırmalar gerçekleştirilmektedir, fakat büyük derinliklerde (alüminyum için 50 mm kadar) çok hızlı veri toplama zamanı (<1 s) ancak küçük yanal ölçüm boyutları (>20 μm) kullanıldığında mümkündür [71, 91].

2.5.3. Dalga metotları

Manyetik Dalga Teknikler

Manyetiklenebilen malzemeler gerildiği zaman tercih edilen alan dizilişi değişir, mıknatıslanmanın büyümesi (pozitif mıknatıslanma) veya azalması (negatif mıknatıslanma) çekme gerilmesi ile daha yakın yönelmiş alanlara neden olur. Manyetik anizotropi içeren malzemeler, uygulama doğrultusundan uzakta indüklenmiş bir manyetik alana yol açar. Bir bobin sensör bileşen yüzeyinin düzlemindeki bu küçük dönüşleri izleyebilir. Hiç dönüş gözlenmediği zaman, manyetik alan ve gerilmenin temel eksenleri paraleldir. Manyetik metotların hem gerilmelere hem de bileşenin mikro yapısına hassas olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, bunların kalibrasyon deneyleri kullanılarak dikkate alınmasını gerektirmekle birlikte, mıknatıslanması ve karakteristiği çok iyi bilinen malzemeler için, manyetik metotlar ucuzdur ve tahribatsız kalıntı gerilme ölçümü için pratik çözümler sunar [71, 73].

Elektrik Dalgaları Tekniği

Girdap akım (eddy current) teknikleri test edilen malzemedeki girdap akımlarının indüklenmesi esasına ve test bobinin empedansındaki değişiklikler yüzünden

elektriksel iletkenlik ya da manyetik geçirgenlikteki değişikliklerin taranması esasına dayanır. Nüfuz etme derinliği uyarı sinyalinin değiştirilmesi ile değişebilir ve prob uygulanmış gerilme doğrultusunu tanımayabilir. Girdap akım metotlarının plastik iş ve mikro yapı değişikliklerine olan hassasiyeti nedeniyle, temel kalıntı gerilme ölçümlerin için çok uygun değildirler. Fakat endüstriyel kalite kontrol işlemlerinin bir parçası olarak muayene hattında çabuk ve ucuz bir metot olarak kullanılabilir [71, 73].

Ultrasonik Dalga Tekniği

Bir malzeme gerilmeye maruz kaldığı zaman, ultrasonik hızlarında değişiklikler gözlemlenebilir. Bir gerilme ölçümünden elde edilen değişiklikler dalga yolu boyunca ki ortalamalardır. Analizler için zorunlu olan akusto elastik sabitler genellikle kalibrasyon testleri kullanılarak hesaplanır. Farklı dalga tipleri kullanılabilir, fakat genel olarak kullanılan metot, kritik olarak yansımış boyuna dalga metodudur. Metot geniş bir malzeme hacmi üzerinden makro gerilmelerin ölçülmesini sağlar. Ultra ses dalga hızları mikro yapıdaki homojensizliklere bağlı olabilir ve çok eksenli gerilmelerin etkilerini ayırt etmek de zordur. Bunla birlikte metot, ucuz ve pratik olduğundan, rutin muayene prosedürleri ve büyük bileşenlerin endüstriyel çalışmaları için çok uygundur [71, 73].

Piezospektroskopik (Raman) Etki Teknikleri

Karakteristik Raman ya da flüoresan ışıldama, hidrostatik gerilmelerdeki değişikliklerle lineer olarak değişen çizgiler oluşturur. Raman spektrumuna verilen en iyi örnekler silikon karpit ve alümine-zirkonyumu kapsar [91]. Bu metot faydalıdır. Çünkü spektral boşluklar kolayca oluşabilir ve hassas bir şekilde ölçülebilir. Optik bir mikroskop kullanılarak, hemen hemen birkaç mikrometre boyutundaki ilgili bölgelerin seçimi mümkündür Ayrıca, epoksi yada safir gibi bazı matris malzemeleri optik geçirgenlik verdiğinde, alt yüzeyden bilgiler elde etmek mümkündür Sonuç olarak, lif uçlarından merkeze gelişen gerilmeler hakkında temel

bilgiler alınmasını sağladığı ve mikro ile makro gerilmeleri ayırt ettiği için, bu metotlar lifli kompozitler üzerinde çalışmaya çok elverişlidir [92, 93].

2.5.4. Diğer metotlar

Termoelastik Metotlar

Malzemenin elastik deformasyonu sıcaklık altında (çeliklerde 1 MPa için 1 mK) küçük değişikliklere neden olur. Uygun bir kızılötesi kamerası kullanıldığında gerilmedeki değişikliklerden kaynaklanan etkileri gösteren termal değişiklikleri haritalamak mümkündür. Sıcaklık altında sıcaklığa bağlı olarak tanımlanan termoelastik sabit kullanılarak hidrostatik gerilme bileşeninin elde edilmesi mümkündür. Etki genellikle kızılötesi kameraların hassasiyeti ile ilgili olarak oldukça küçüktür ve bu nedenle günümüzdeki kullanımı sınırlıdır ama yorulma çalışmaları için çok uygundur [71].

Foto elastik Metotlar

Malzeme gerilmesiyle anizotropik olarak geçirgenliği değişen malzemelerdeki ışığın hızındaki eğilim foto elastik etki olarak adlandırılır. Böyle objeler karşılıklı kutuplar arasında beyaz veya tek renkli ışık altında bakıldığında karışık saçaklanma modellerine neden olur [71].

Dönüşüm Gerinimleri Ölçümü

Serbest dönüşüm gerinimlerinin karakterizasyonu için kullanılan teknikler serbest yüzeyde yapılmış gözlemlere bağlıdır. Bir ana faz numunesi metalografik olarak hazırlanır ve kısmi olarak ürün fazı içerisinde dönüştürülür. Serbest yüzeyde meydana gelen yer değişimleri, gerilmeler hakkında bilgi verir [71].

Çizikler, termal kanallar, kayma hatları gibi yer değişimleri ölçü türünden sapmalar şeklinde ölçülebilir Ölçüm, dönüşüm neticesinde eğilen numune yüzeyi boyunca oluşan açıdır. Bu biçim gerinimlerinin sabit düzlem gerinimi olduğu varsayımı,

hareket doğrultusunun belirlenmesine yardımcı olur. İlgili dönüşümlerin bir çoğu nispi olarak yüksek sıcaklıklarda meydana gelir [94-97].

Uygun olmayan bir metodun seçilmesi doğru olmayan gerilme ölçümüne neden olabileceği gibi, uygun olmayan seçiminden kaynaklanan yanlış gerilme bileşeninin ölçümüne de sebep olabilecektir. Çizelge 2.2’de çok sık kullanılan birkaç tekniğin özeti tablo halinde verilmiştir [71-73].

Çizelge 2.2. Değişik kalıntı gerilme ölçüm metotlarının karşılaştırmalı özeti [72]

Metot	Ölçüm Derinliği	Uzaysal Çözünürlük	Hassasiyet	Açıklama
Delik Delme (gerilme gevşemelerinin neden olduğu gevşemeler)	~1,2 * delik derinliği	50 µm derinlik	± 50 MPa artan derinlikle azalan hassasiyet nedeniyle sınırlı	Düzlemdeki tip I gerilmeleri ölçülür; yarı tahribatlıdır.
Katman Kaldırma (gerilme artışı yada gevşemesinin neden olduğu çarpılma)	Kalınlığın 0,1-0,5 mm katı	Kalınlığın 0,05 mm'si; yanal çözünürlük yok	Ölçülebilen eğrilik çapı ile sınırlı	Artışlı olarak kullanılmadıkça, gerilme alanları hassas olarak belirlenemez; düzlemdeki tip I gerilmeleri ölçülür
X-ışın kırınımı (atomik gerinim ölçer)	<50 µm (Al); 5 µm (Ti); 1 mm (katman kaldırıldıkça)	1 mm yanal; 20 µm derinli boyunca	± 20 MPa, $\sin^2\psi$ 'deki yada yüzey durumundaki doğrusallık bozukluklarınca sınırlıdır	Sadece yüzey sonuçları için tahribatsız; yüzey hazırlamaya hassastır; Tepe değişimi tip I, <II>; tepe genişliği tip II, III
Kuvvetli X-Işınları (Syncotron-atomik gerinim ölçer)	150-50 mm (Al)	Gelen açığa yanal olarak 20 µm; ışına paralel olarak 1 mm	±10 x 10 ⁻⁶ mm/mm, tane örneklem istatistiği ile sınırlı	Küçük ölçüm hacmi aynı kalitede olmayan toz desenlerine neden olur; Tepe değişimi tip I, <II>, II; tepe genişliği tip II, III
Nötron kırınımı (atomik gerinim ölçer)	200 mm (Al); 25 mm (Fe); 4 mm (Ti)	500 µm	±50 x 10 ⁻⁶ mm/mm, nötron sayım istatistiği ve gerilmesiz yüzeyin güvenilirliği ile sınırlıdır.	Zorluklar mevcuttur; düşük veri toplama oranı; pahalı ; Tepe değişimi tip I, <II>
Ultrasonik (elastik dalga hızındaki değişimlerle ilişkili gerilmeler)	>10 cm	5 mm	%10	Mikro yapılara hassastır ; tip I, II, III
Manyetik (gerilme ile manyetik alanlardaki değişimler)	10 mm	1 mm	%10	Mikro yapılara hassastır ; sadece manyetik malzemeler için tip I, II, III
Raman	<1 µm	yaklaşık <1 µm	$\Delta\lambda \approx 0.1 \text{ cm}^{-1} \equiv 50 \text{ MPa}$	Tip I, II

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

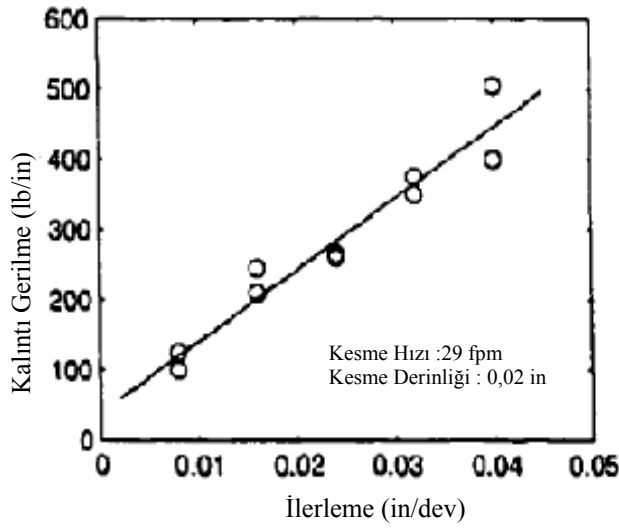
Talaşlı imalat neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler üzerine yapılmış literatür çalışmalarındaki fazlalık, kalıntı gerilme olgusundaki artan ilginin bir göstergesidir. Talaşlı imalat neticesinde oluşmuş kalıntı gerilme olgusunun genel anlamını belirlemek ve anlaşılmasındaki boşlukları kapatmak için gelecekte zorunlu olarak gösterilecek çabaları ortaya koymak, konu üzerine yapılmış kapsamlı literatür çalışmalarıyla gerçekleştirilmiştir.

Talaşlı imalat nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine yapılmış referans niteliğindeki çalışmaların daha iyi anlaşılabilmesi için bu çalışmalar deneysel çalışmalar, teorik ve deneysel çalışmalar ile modelleme çalışmaları olmak üzere üç başlık altında incelenmiştir.

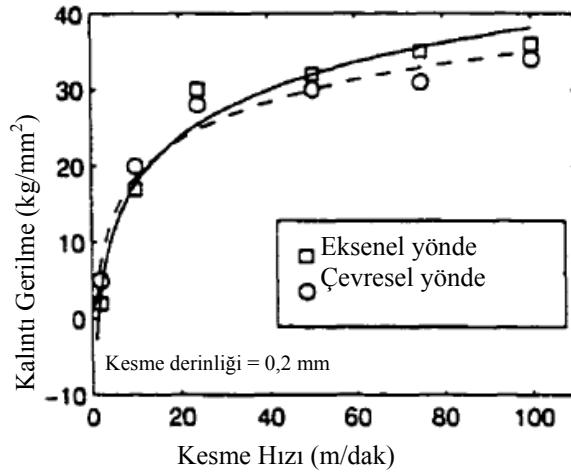
3.1. Deneysel Çalışmalar

1951’de, Henriksen, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine ilk önemli çalışmayı yapmıştır [3]. Deneylerini ortagonal işleme esasına dayalı olarak düşük karbonlu çelikler üzerinde gerçekleştirmiş ve kalıntı gerilme ölçümlerinde katman kaldırma tekniğini kullanmıştır. Henriksen, talaş kaldırma neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeleri araştırarak hem termal hem de mekaniksel etkilerin kalıntı gerilmelerin oluşumunda önemli bir rol oynadığı sonucuna varmıştır. Fakat bu oluşumda mekaniksel etkilerin baskın olduğunu vurgulamıştır. Henriksen, değişik kesme durumlarının ve takım açılarının gerilme profilleri üzerinde (Şekil 3.1) bir etkiye sahip olduğuna dikkat çekmiş, fakat bu etkiler için çok az açıklama sunmuştur. Çalışmasının sonucunda Henriksen, şartların sınırlamalarını tartışarak elde ettiği bulguların; kesme sıvısı ve kesme hızı etkilerinin işleme operasyonu ile oluşturulmuş kalıntı gerilmelerin ve farklı malzemelerde gelişen kalıntı gerilmelerin incelenmesini kapsayacak konulara açıklık getirecek bir araştırma olduğunu savunmuştur.

Okushima ve Kakino'nun çalışmalarına kadar konuya pek önem gösterilmemiştir. Okushima ve Kakino kalıntı gerilemelerin anlaşılmasına yardımcı olacak işleme ile oluşmuş kalıntı gerilme problemine ilişkin ilk önemli analizi uygulamışlardır. X-Işını tekniği kullanarak orta karbonlu çeliklerin ortagonal kesme ile oluşturulmuş kalıntı gerilmelerin titiz bir deneysel araştırmasını gerçekleştirmişlerdir. Ölçümler iş parçasının yüzeyindeki takımın kesici kenar doğrultusundaki ve kesme doğrultusundaki normal gerilmeler için yapılmıştır (Şekil 3.2) [3, 26].



Şekil 3.1. İlerleme ile ilişkili bileşke gerilme [26]

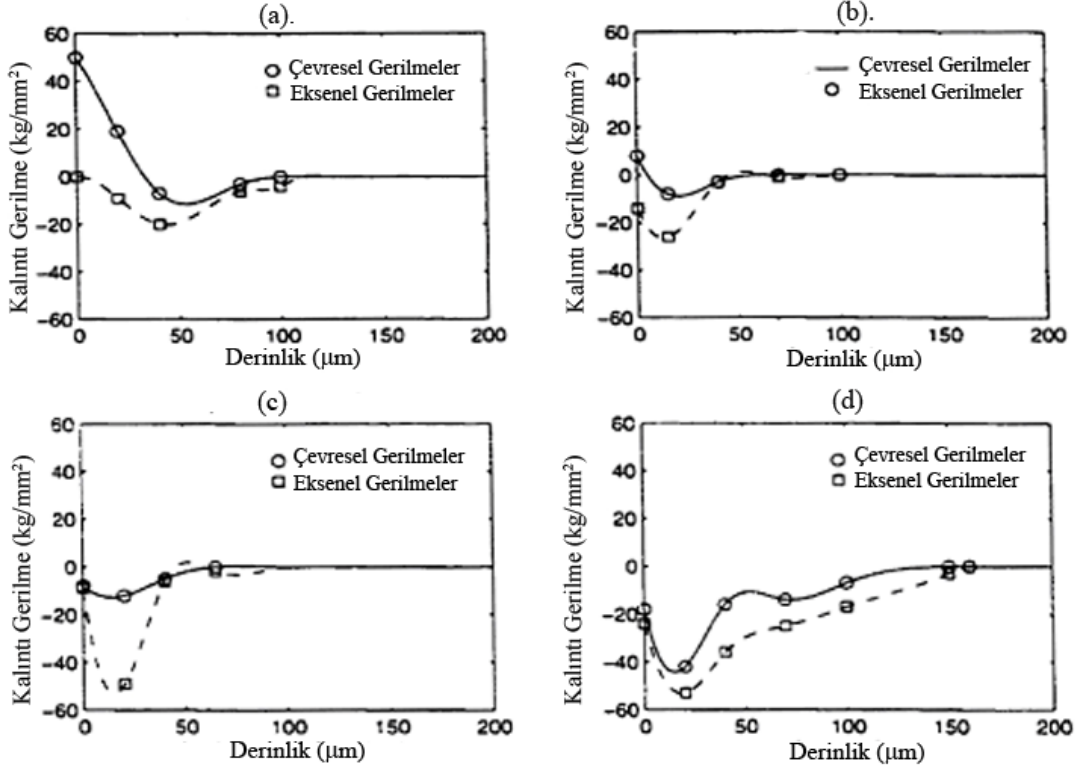


Şekil 3.2. Ortogonal kesme ile işlenmiş yüzey için kesme hızı ve kalıntı gerilmeler arasındaki ilişki [26]

Bu ölçümler kesici kenar doğrultusundaki (kesme doğrultusuna dik-radyal gerilmeler) normal gerilmenin kesme doğrultusundaki gerilme kadar önemli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle de kesici kenar doğrultusundaki radyal gerilmeler ihmal edilmemiştir. Deneysel çalışmalarını tamamlamak için Okushima ve Kakino kesme kuvvetini ifade edecek bir noktada toplanmış yükü ve termal sınır şartlarını ifade edecek bir termal kaynak dağılımını kullanarak kesme prosesinin basit bir termomekaniksel sonlu eleman modelini geliştirmişlerdir. Sonlu eleman modeli termal etkiler nedeniyle çekme kalıntı gerilmelerinin geliştiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, artan kesme hızlarıyla termal etkilerin daha önemli olmaya başladığını ve yüksek kesme hızlarında çekme gerilmelerinin arttığını gösteren deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Ayrıca, Okushima ve Kakino tornalamadan kaynaklı kalıntı gerilmelerin ilk önemli ölçümlerini de gerçekleştirmişlerdir. Adi karbonlu çeliklerin tornalanması üzerine yapılmış deneylerde, düşük kesme hızlarının basma kalıntı gerilmelerine, yüksek kesme hızlarında ise çekme kalıntı gerilmelerine neden olduğunu tespit etmişlerdir. Detaylı deneysel çalışmaların miktarı ve deneysel sonuçları açıklamak için gerçekleştirilen nümerik modelleme çabalarına katkıları nedeniyle, Okushima ve Kakino'nun çabaları belki de zamanın en önemli çalışması olmuştur [26].

Tornalamadan kaynaklanan kalıntı gerilmelerin anlaşılmasında 1975'de Tsuchida ve ark.'nın gerçekleştirdiği çalışma önemli bir ilerleme sağlamıştır [98]. Bu çalışmada literatürdeki eksiklikler tanımlanarak ve özellikle de iş parçasının derinliğine bağlı kalıntı gerilmelerin dağılımı bilgisinin eksikliği üzerine olan yetersizlikler doldurmaya çalışılmıştır. Tsuchida ve ark.'ı adi karbonlu çeliklerin tornalanmasını gerçekleştirildikten sonra, hem eksenel hem de çevresel doğrultudaki kalıntı gerilmeleri ölçmek için X-ray kırınımından faydalanmışlardır. Tsuchida ve ark. tarafından elde edilen çok miktardaki veriler işlenmiş bileşenlerin alt yüzeyindeki kalıntı gerilme profillerini açığa çıkarmışlardır (Şekil 3.3). Bu sonuçlar sadece yüzeye yakın kalıntı gerilmeler hakkında bilgi verdiğinden, tam gerilme profillerinin araştırılması gerektiğine işaret eder. Ayrıca, araştırmacılar işleme nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine kesme derinliğinin, ilerlemenin, kesme sıvısının, iş parçasına uygulanmış ısı işlemin etkilerini ortaya çıkarmışlardır. Tsuchida ve

ark.'nın sonuçları, Okushima ve Kakino tarafından da gözlenmiş olan kesme hızı artışıyla çekme gerilmelerinin arttığını göstermiştir.



Şekil 3.3. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 1045 çeliğin kuru işlenmesinde kesme hızının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [98]

a) V=213 m/dak., b) V=86 m/dak., c) 35 m/dak., d) 8 m/dak.

Okushima ve Kakino ve de Tsuchida ve ark.'nın çalışmalarına paralel, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilme olgusuna ilişkin gerçekleştirilen çalışmalar 1970'lerin sonunda hızla artmıştır. Dikkatle yapılmış denemeler yüzeyin ayrıntılı karakterizasyonunu verdiği için bu durum “yüzey bütünlüğü” terimi ile adlandırılmıştır. Yüzey bütünlüğü; malzeme yüzeyinin eksiksiz tasvirini, dahili yüzey mükemmelliğini, yüzey pürüzlülüğünü, yüzey ve alt yüzey mikroyapısını, oksit oluşumunu, kalıntı gerilmeleri ve kalıntı gerilme karakteristiklerinin bileşen davranışı üzerine etkilerini tanımlamak için kullanılır. Henriksen'nin açıklamalarından 20 yıl sonra Field ve Kahles, işlenmiş bileşenlerin yüzey bütünlüğü üzerine çok iyi ve özlü bir eleştiri yapmışlardır [99]. Yaptıkları açıklamalar, işleme neticesinde oluşan kalıntı gerilmelerin gelişiminde mekaniksel ve termal

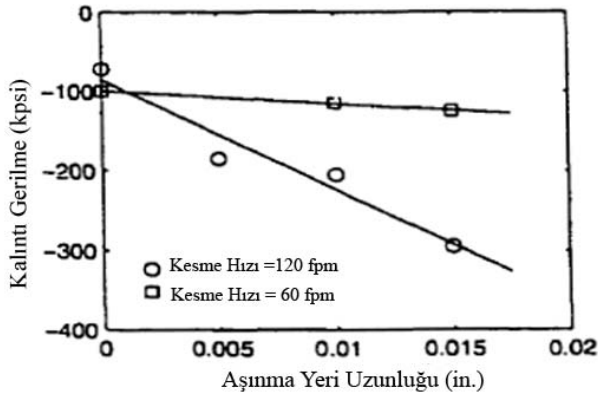
mekanizmaların çalıştığını ve sonuçlanan gerilmeler üzerinde iş parçası malzemesinin, işleme operasyonu tipinin ve kesme şartları şiddetinin etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Daha sonra, Prevey ve Field, Inconel 718 ve 7075 alüminyumun parmak freze ile işlenmesiyle elde edilen deneysel sonuçları yayınlamışlardır [100]. Bu çalışma, kapsamlı olmamakla birlikte araştırmacılar parmak freze ile işleme neticesinde oluşan kalıntı gerilmelerdeki noktadan noktaya değişimi göstermeye çabalamışlardır. Fakat iş parçası boyunca olan kesici yolu üzerindeki bilgileri elde edememişlerdir. Neticede, sonuçların yorumlanması zor olmuştur.

Aynı zamanda, ortagonal kesme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine olan veri tabanı Jeelani ve Zopecy'in (Şekil 3.4) ve Azargoon'un benzer çalışmalarıyla genişletilmiştir [101-103]. Bu araştırmacılar iş parçasının derinliği boyunca kesme doğrultusu yönündeki kalıntı gerilmeleri belirlemek için deformasyon tekniğini kullanmışlardır. Bu çabaların en önemli katkısı kalıntı gerilmeler üzerine takım aşınmasının etkisinin araştırılmış olmasıdır. Jeelani ve Bailey, %18 nikelli maryaşlandırılmış çelikte kesici takımın artan yan yüzey aşınma yerinin kesme doğrultusundaki çekme kalıcı gerilmelerin büyüklüğünde artmaya neden olduğunu bulmuşlardır [104]. Azargoon ise yan yüzey aşınmasının Ti-Al alaşımında basma kalıntı gerilmelerinin artmasına neden olduğunu bulmuştur [103]. Liu ve Barash, yüzey bütünlüğü çerçevesinde işleme nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine yan yüzey aşınmasının etkisini araştırmak için bir takım çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [4, 5]. Kesme doğrultusundaki normal kalıntı gerilmelerde aşınma yerinin ve kesme hızının etkisi üzerine benzer çalışmalar Leskovar ve Peklenik tarafından gerçekleştirmiştir [24]. Deneysel çabaların önemine rağmen, yazarların hiçbiri işlemedeki kalıntı gerilmeler üzerine yan yüzey aşınmasının etkileri için ikna edici açıklamalar ileri sürememişlerdir.

Diğer yandan, Dahlman ve ark., AISI 52100 çeliğin tornalanması sonucu talaş açısı ve kesme parametrelerinin kalıntı gerilmeleri nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Kalıntı gerilmeleri X-ışını metodu ile ölçmüşler ve çalışma neticesinde kalıntı

gerilmelerdeki belirgin değişikliklerin ilerleme ve talaş açısı değişimiyle oluşturulduğunu belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar kalıntı gerilmeler üzerine talaş yüzeyi eğiminin güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. İlerleme oranının artmasıyla basma gerilmelerinde de artma olduğunu, fakat farklı kesme derinliklerinin farklı gerilme seviyesi oluşturmadığını yani kesme derinliğinin kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olmadığını bulmuşlardır [105].



Şekil 3.4. Maryaştırılmış % 18 nikelli çelik için maksimum kalıntı gerilmeler üzerine aşınma yeri uzunluğunun etkisi [102]

Arunachalam ve ark., CBN ve seramik takımlar kullanılarak Inconel 718 malzemesi üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, bu takımların yüksek kesme hızlarında yüzey bütünlüğü ve özellikle de kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini incelemiştir. İşleme neticesi oluşan kalıntı gerilmeler kesme hızı, soğutma, takım geometrisi ve takım kaplama tipinin fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak, karma seramik takımların CBN takımlardan daha yüksek bir büyüklükte çekme kalıntı gerilmelerine neden olduğunu göstermiştir [106].

Sharman ve ark., Inconel 718 malzemesinin işlenmesinde yüzey bütünlüğü üzerine kesici takım malzemesi, geometrisi ve takım aşınmasının etkilerini incelenmişlerdir. Sonuçlar, takım aşınmasının yüzey bütünlüğü üzerine de oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Kör takımla işlemenin termal etkileri arttırmasından dolayı daha büyük mikro yapısal deformasyona, mikro sertlik değişimlerine ve yüzeyde yüksek çekme gerilmelerine neden olduğunu belirlemişlerdir [107].

Outeiro ve ark., AISI 316L'nin tornalanmasının neden olduğu kalıntı gerilmeleri incelemiştir. Özellikle kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi kesme şartlarının etkisini ele almışlardır. Kalıntı gerilmeleri X-Işını ile ölçmüşler ve kalıntı gerilmeler üzerine kesme şartlarının etkisini kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesiyle analiz ederek sonuçta, kalıntı gerilmeler üzerine kesme kuvvetlerinin önemli bir role sahip olduğunu göstermişlerdir [2].

Kishaways ve Elbestatwi, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin yüksek hızda tornalanması esnasında aşınma karakteristiğini ve yüzey bütünlüğünü incelemiştir. İşlenmiş yüzey altında geniş ölçekli kalıntı gerilme dağılımlarının kesme parametrelerine ve kesici kenar oluşumuna bağlı olduğunu tespit etmişlerdir [108].

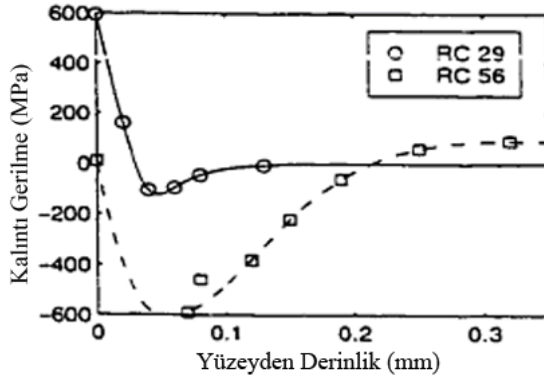
Matsumoto ve ark., yüzey bütünlüğü üzerine malzeme sertliğinin etkisini ilk kez deneysel olarak araştırmışlar ve malzeme sertliğinin işlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilme durumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır [109, 110].

3.2. Teorik ve Deneysel Çalışmalar

Takımın temel kesici kenarı işlenmiş yüzeyi oluşturmaz, buna karşılık takımın ikincil kesici kenarı yüzey oluşturmada öncelikli olarak sorumludur. Ayrıca, hız ve sürtünme artışının sıcaklık artışına neden olması günümüzde bilinen bir gerçektir ve çekme kalıntı gerilmeleri için fiziksel açıklama sunulmamasına rağmen bu çok yüksek sıcaklıkların çekme kalıntı gerilmelerini arttırdığından bahsedilir [25].

1986'da Matsumoto ve ark., AISI 4340 çeliğin sertliğinin yüzey bütünlüğü üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında işleme nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmelerin anlaşılmasında ilerleme sağlamışlardır (Şekil 3.5) [111]. Ortogonal kesmeyle değişik sertlik değerine sahip AISI 4340 çeliğin işlenmesi neticesinde kesme ve kesici kenar doğrultusundaki normal gerilmelerin ölçümü, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine malzeme sertliğinin önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. İş parçası sertliğinin artması, kalıntı gerilmeleri çekme sisteminden basma sistemine

hareket ettirmiş ve Matsumoto ve ark., Mervin ve Johnson'un yuvarlanma temas modelinin bir uyarlamasını kullanarak bu sonuçları açıklamaya çalışmışlardır [112]. İlave olarak, Matsumoto ve ark., işleme ile oluşturulmuş kalıntı gerilmeler üzerindeki termal etkileri en aza indirmek içinde uğraş vermişler, fakat modelleme çabalarıyla termal etkileri araştıramamışlardır [111].



Şekil 3.5. Kalıntı gerilme dağılımı üzerine iş parçası sertliğinin etkisi [111]

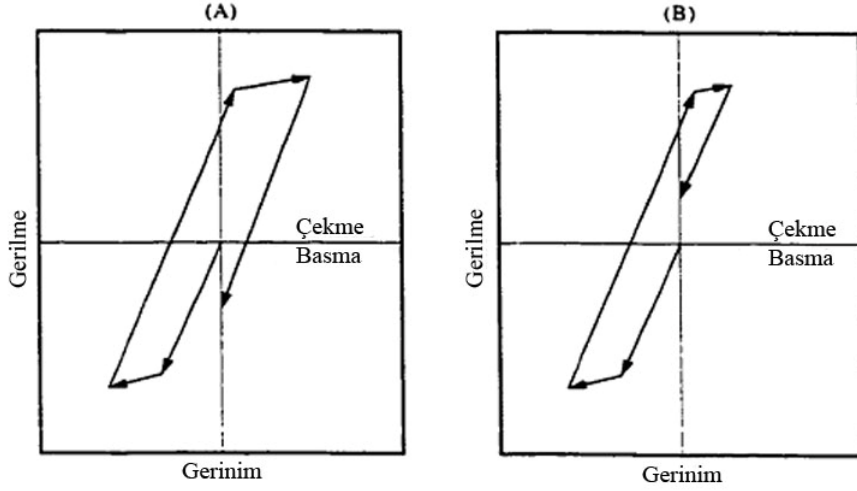
Jeelani ve ark., 2024-T351 malzemesinde kesme hızının ve talaş açısının kalıntı gerilmeler üzerine etkisini ve %18 nikelli maryaşlandırılmış çelikteki kalıntı gerilmeleri çalışmışlardır [37, 113]. Schieber ve Schlicht, yüzeyi sertleştirilmiş çeliğin tornalanmasıyla oluşmuş kalıntı gerilmelere bakmışlardır [114]. Brinksmeier, sertleştirilmiş çeliğin frezelenmesini ve tornalamasını incelemiştir [115]. Sadat, Inconel 718 malzemesinde kontrollü takım temaslarının etkilerini araştırmış ve kesme hızının AISI 4340 çeliğin ortogonal kesmedeki etkilerini çalışarak deneysel sonuçlar için bazı mantıklı öneriler sunmuştur [116-118]. El-Khabeery ve Fattouh, pirinç, alüminyum alaşımı ve değişik çeliklerin frezelenmesi çalışmasında işleme ile oluşmuş kalıntı gerilmelerin araştırılmasında ilk kez bir deneysel tasarım modeli kullanmışlardır [119]. Xie ve ark., takım yan yüzey aşınmasının ve takım yüzey pürüzlülüğünün AISI 4140 çelikteki kalıntı gerilmeler üzerine etkisini incelemiştir [120]. Bayoumi ve ark., 6061-T6'nın ortogonal kesmedeki kalıntı gerilmeler üzerine ilerleme ve kesme hızının etkilerini araştırmışlardır. [6].

Matsumoto ve ark., AISI 4340 çeliğin ortogonal işlemeden elde edilen önceki verilerin yeniden analiziyle, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmelerin

anlaşılmasına daha fazla katkı sağlamışlardır [111, 121, 122]. Wu ve Matsumoto, işleme ile oluşturulmuş çekme ve basma kalıntı gerilmelerine neden olan durumları belirlemek için basit ama çok gerekli sebeplerin izahını sunmuşlardır (Şekil 3.6). Onların açıklamalarına göre; takımdan geçerek akan malzeme hem basma hem de çekme biçiminde gerilme çevrimine maruz kalır. Basma gerinimlerinin çekme gerinimlerinin üzerine çıktığı zamanki durumlarda, sıfır gerinime erişmek için yüklemenin kaldırılması ile oluşan gerilme çekmedir. Çekme gerilmelerinin basma gerilmelerini aştığı zıt durumlardaysa, sıfır gerinime erişmek için yüklemenin kaldırılması ile oluşan gerilme basmadır. Bu fikrin temelinde, kalıntı gerilmeleri önceden tahmin etmek için takımın altındaki ve gerilme alanlarının önündeki bilgilerden biri gereklidir. Wu ve Matsumoto, bu gerilme alanlarına, tahmini sınır şartları esasına dayalı öncelikli kesme düzlemi üzerinde Boussinesq denkleminin integrasyonu yardımıyla yaklaşmışlardır. Kesme düzlemi açısı bilgisiyle alttaki takıma yaklaşan ve geçen malzeme noktasının gerilme/gerinim öyküsü çıkartılabilmekte ve böylece meydana gelen kalıcı gerilmeler belirlenebilmektedir. Ayrıca, Wu ve Matsumoto, işlemeden meydana gelen termal etkileri ve termal ısınmayla oluşmuş kalıntı gerilmeleri belirleyebilmek için basit bir sonlu eleman modeli de geliştirmişleridir. Sonuç olarak, sıcaklık etkilerinin yalnız başına çok az bir tesire sahip olduğunu vurgulamışlardır. Wu ve Matsumoto'nun termal ve mekaniksel modelleri analizlerde birleştirilememiş ve bu durum önerilen model için önemli bir sınırlama oluşturmuştur. Yine de, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeleri nitel olarak belirlemek için bir temelin gelişimi ve termal etkilerin teoriksel incelemesi için bu yayın döneminin en kapsamlı araştırması olmuştur [121].

Sadat ve Reedy, Inconel 718 malzemede kontrollü ve doğal temaslı takımların kalıntı gerilmeler üzerine etkilerini çalışmışlardır [123]. Wiesner, AISI 304 çelikteki kalıntı gerilmeleri araştırmış ve termal mekanizmaları nitel olarak belirlemek için basit bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir [8]. Jang ve ark., paslanmaz çeliklerde tornalamadan kaynaklanan kalıcı gerilmeleri incelemişlerdir [7, 124]. Fuh ve Wu, değişik takımlarla frezeleme neticesinde 2014-T6 alüminyum alaşımında oluşan kalıntı gerilmeleri incelemişler, fakat bütün kesme genişliği boyunca yayılmış

gerilmelerin ortalaması olan kalıntı gerilmeleri ölçmeye çalıştıklarından verilerin değerleri birbiriyle uyuşmamıştır [125, 126].



Şekil 3.6. Kalıntı gerilme oluşumu [121]

(A) Basma yüklemeleri baskın olduğunda basma kalıntı gerilmeleri ile sonuçlanır, (B) Çekme yüklemeleri baskın olduğunda çekme kalıntı gerilmeleri ile sonuçlanır

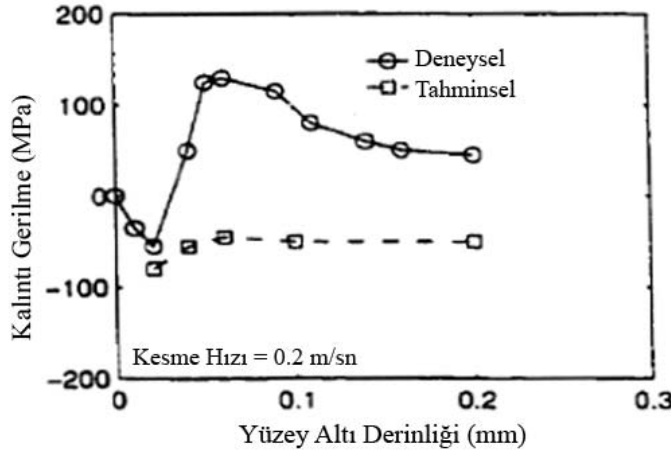
Sasahara ve ark., tornalama ile işlenmiş yüzey katmanlarındaki yüzey kalıntı gerilmelerinin değişimini çalışmışlardır. Takım köşe radyüsünün boyutu ve ilerleme oranı kalıntı gerilmeyi etkilediği sonucundan yola çıkarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ilerleme oranı ve uç radyüsü etkisini tartışmışlardır. Sonuç olarak, küçük köşe radyüsüne sahip takım kullanıldığında, kesme doğrultusuna dik yüzey kalıntı gerilmelerinin basma olacağını bulmuşlar, buna karşılık, ilerleme oranı düştükçe yüzey kalıntı gerilmelerinin çekmeden basmaya dönüştüğünü görmüşlerdir [127].

Kesme şartlarının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi birçok çalışmada açığa çıkarılmaya çalışılmıştır. Talaş açısı, boşluk yüzeyi gibi takım özellikleri, sürekli veya süreksiz tip gibi talaş biçimleri, özellikle de kesme hızı çalışılmıştır. Ortogonal kesme işlemi bu çalışmaların hedefidir ve kalıntı gerilmeler ile kesme süreçlerinin mekanik ve termal durumları arasındaki ilişkinin açıklanmasına yardımcı olmuştur [28, 128-131].

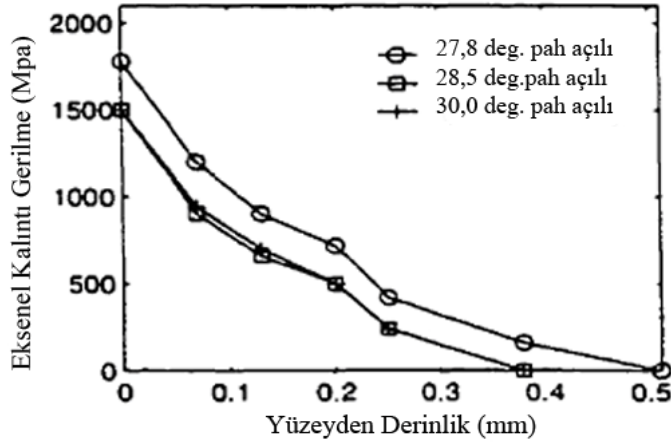
3.3. Modelleme çalışmaları

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla uyumlu biçimde, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeleri belirlemek için sonlu eleman metotlarının bir tahmin metodu olarak kullanılması hız kazanmaya başlamıştır. Belki de bu konudaki ilk önemli çabayı, Okushima ve Kakino'dan sonra Howerton göstermiştir [132]. Howerton, Eulerian sonlu eleman formülasyonu kullanarak rijit-plastik bir malzeme modelinde kararlı işleme esnasında gelişmiş gerilmeleri tahmin etmiştir. İşlemeden kaynaklanan kalıntı gerilmeleri elde etmek için, Eulerian analizlerinin sonuçlarını geniş-deformasyonlu Lagrangian sonlu eleman formülasyonunda sınır şartları olarak kullanmıştır. Model ve deneysel sonuçların karşılaştırması sıcaklık alanları, takım kuvvetleri, talaş kalınlığı ve kalıntı gerilmelere göre hazırlanmıştır. Şekil 3.7, Howerton'un model ve deneysel verileri arasındaki tatmin edici uyumu göstermektedir. Howerton, bu çalışmada, kalıntı gerilmelerin gelişiminde etkili olan mekanizmaları açıklayacak bir yorum getirememiştir [132].

Lin ve ark., işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeleri tahmin etmek için düzlem gerinim durumları altındaki malzeme hareketinin termo-elastoplastik davranışını kullanarak çok daha az kapsamlı bir sonlu eleman modeli ileri sürmüşlerdir [36]. Formülasyon, Lagrangian karakterine uygundur ve Von-Misses akma fonksiyonu ile izotropik sertleşmenin birleşimidir. Lin ve ark., kesme düzlemine doğrudan uygulanan ve dikkate alınan sınır şartlarından talaş akışının elimine edilmesiyle metal kesme problemini basitleştirmişlerdir. Bu yaklaşım, model karmaşıklığını önemli ölçüde azaltırken, öncelikli olarak kesme düzleminin nasıl ayırt edileceği ve kesme bölgesindeki sınır şartlarının herhangi bir hassasiyette nasıl seçileceği gibi iki önemli soruyu ortaya çıkarmıştır. Araştırmacılar deneysel sonuçlara dayanarak bu soruların cevabını verirken, deneylerle modellerin karşılaştırması sorulardaki geçerliliği modellerin yansıtmadığını göstermiştir (Şekil 3.8) [36].



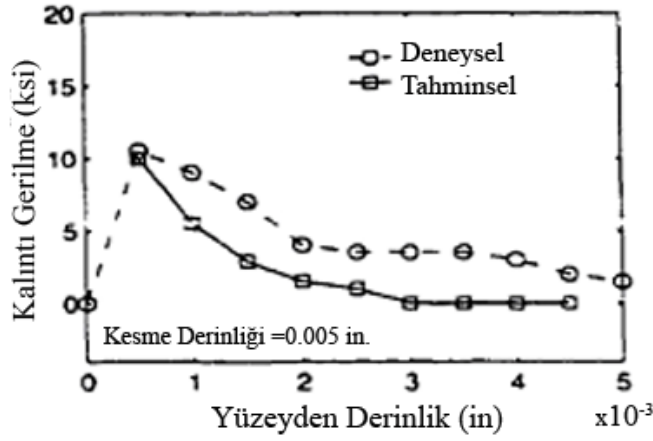
Şekil 3.7. Deneyssel ve tahmin yöntemleri ile elde edilmiş kalıntı gerilme dağılımı (30° pah açılı, yuvarlatılmış takım) [132]



Şekil 3.8. İşlenmiş yüzey altındaki derinliğe göre üç durum için bütünleşmiş termal ve mekanik yükler altındaki kalıntı gerilmeler [36]

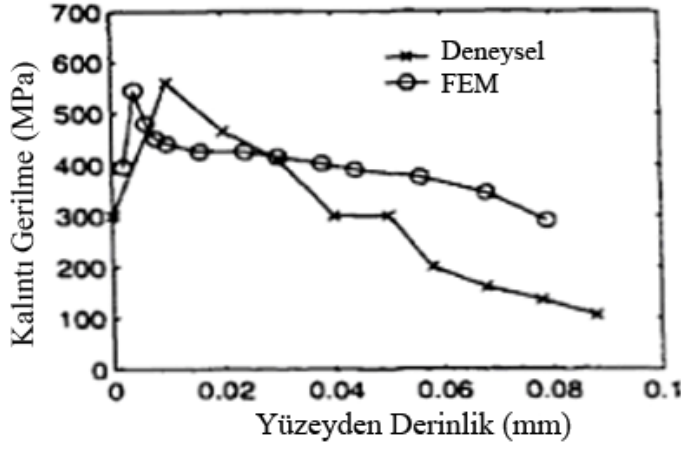
Daha sonra, bu model, Lin ve Lee tarafından işleme ile oluşmuş kalıntı gerilme profilleri üzerine yan yüzey aşınmasının etkisini belirlemek için de kullanılmıştır [133]. Model, yan yüzey aşınma durumunun benzetimini yapmak için yararlanılan sınır şartları, eski modelin genişletilmiş bir şeklidir. Ayrıca, Lin ve ark., kalıntı gerilmeler üzerine kesme açısının etkisini göstermek için model çıktılarını kullanarak tutarlı bir deneme de yapmışlardır [36].

Hsu [134] ve Chien [135], analizlerde metal kesme sınır şartlarının bütün koşullarını içeren ilk sonlu eleman kodlarını geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarda, sonlu eleman sistemi Eulerian'a göre kurulmuştur. İş parçası malzeme davranışını viskoplastik olarak ele almışlar, termal etkiler hesaba katmışlar ve elastik deformasyon formüllerini bir tek analizde kalıntı gerilmeler meydana gelmesine müsaade edecek tarzda sunmuşlardır. Model onaylanmıştır, fakat deneysel sonuçlar ve tahminler arasında istenilen bir uyumu göstermediği görülmüştür (Şekil 3.9). Lin ve ark.'nın çalışmalarına göre [36, 133] Hsu ve Chien, işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmelere neden olan mekanizmalar üzerine sadece tutarlı bir yorum getirmişlerdir [134, 135].



Şekil 3.9. Ölçülmüş ve tahmin edilmiş kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması [134]

Son olarak Shih ve ark., işleme neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeleri önceden tahmin edebilmek için uygun metal kesme sınır şartları yardımıyla bir Lagrangian sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir [136,137]. İş parçası malzemesini Von-misses akma fonksiyonu ve Prager'in sertleşme kuralına karşılık gelecek şekilde elastik-viskoplastik olarak ele almışlar, ayrıca termal etkilerde hesaba katmışlardır. Deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması yaklaşımın istenilen seviyede olduğunu gösterdiğinde (Şekil 3.10) modelin onaylanması da sağlanmıştır. Diğer sonlu eleman modellerine bakıldığında, işlemeden kaynaklanan kalıntı gerilmelere neden olan mekanizmaları açıklamak için çok az çaba gösterildiği görülmektedir.

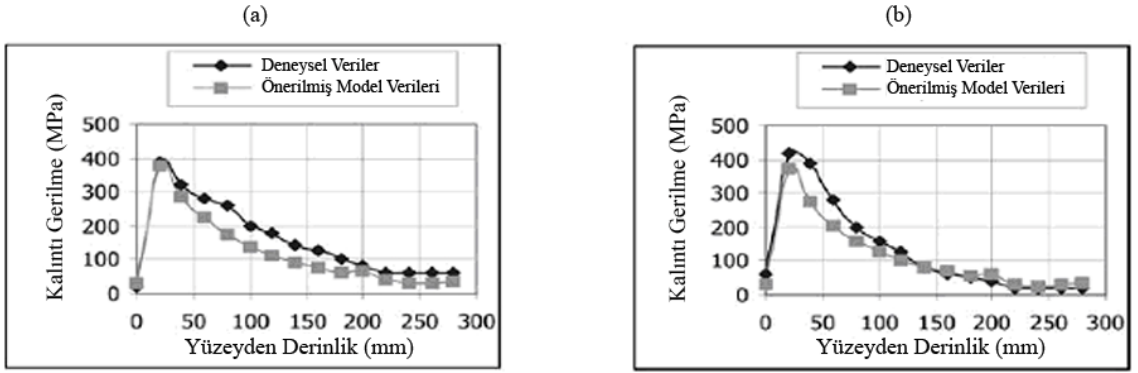


Şekil 3.10. X-Ray kırınımından ve sonlu eleman metotlarından elde edilmiş kesme doğrultusundaki kalıntı gerilmelerin karşılaştırılması [136]

Barash ve Schoech, kalıntı katmanların derinliklerini tahmin etmek için yarı analitik bir model geliştirmişlerdir [38]. Lajczok ise sonlu elemanlar metodu yardımıyla metal kesme problemini ve kalıntı gerilmeleri araştırmıştır [138]. Natarajan ve ark., Okushima ve Kakino'nun modeliyle benzer nitelikte bir sonlu eleman modeli geliştirmişler [39, 139-141], Field ve ark. ise kalıntı gerilmeler üzerine küçük bilgiler kapsayan yüzey bütünlüğü için öncelikli ölçüm metotları ile ilgili bir yayın sunmuştur [142]. Liu, çeliklerin yüzey bütünlüğünü araştırırken [40], Shirakashi ve ark., kalıntı gerilmeleri önceden tahmin edebilmek için bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir [41,143, 144].

El-Axir çalışmasında, kalıntı gerilmelerin tahmin kabiliyetine sahip daha kapsamlı bir model ele almıştır [145]. Bu modelin diğer modeller üzerindeki temel avantajı kalıntı gerilmeler üzerine işleme parametrelerinin etkisini bulmak ve bu kalıntı gerilmelerin hem konumunu hem de derinliklerini belirlemektir. SS304, ST37, 7001 ve 2024 Al ve pirinç olmak üzere beş farklı malzeme kullanılmıştır. Kalıntı gerilmeleri etkileyen üç girdi parametresi olarak da malzeme çekme dayanımı, kesme hızı ve ilerleme oranı seçmiştir. İşlenmiş yüzeylerdeki kalıntı gerilme profillerini sehim metodu kullanılarak belirlemiştir.

Modelleme sonucunda elde edilen veriler işlenmiş yüzeylerde düşük çekme gerilmeleri meydana geldiğini ve yüzeyden mesafe arttıkça çekme kalıntı gerilmelerinin de arttığını göstermiştir. Deney sonuçları ile model sonucunda elde edilen veriler karşılaştırıldığında oldukça hassas bir biçimde uyuştugu görülmüştür (Şekil 3.11) [145].

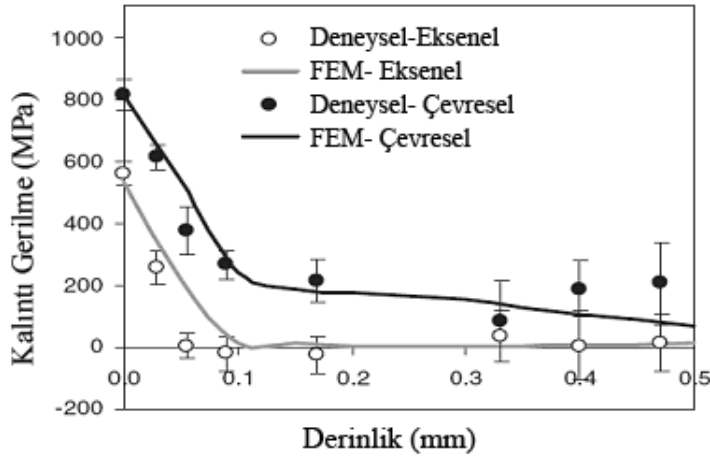


Şekil 3.11. Al 7001 malzemeye ait deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması [145]
a) $V=171$ m/dak., $f=0,2$ mm/dev., b) $V=117$ m/dak., $f=0,35$ mm/dev.

Ee ve ark., termal elastik–viskoplastik FEM modeli işlenmiş bileşenlerdeki kalıntı gerilmeleri belirlemek için kullanmışlardır [147]. Outeiroa ve ark., çalışmalarında AISI 316L’nin işlenmiş yüzey ve alt yüzeylerinde oluşan kalıntı gerilmeler üzerine takım geometrisi, kaplama tipi, kesme şartları parametrelerinin etkisini incelemişlerdir [65]. Çalışma sonunda, deneysel ve modelleme verilerini karşılaştırmışlar ve elde edilen sonuçların birbirleriyle çok iyi bir uyuma sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.12). Çevresel gerilmeler eksenel gerilmelerden daha yüksektir, öyle ki çevresel gerilmeler parça performansı için çok daha kritiktir. Bu nedenle gerçekleştirdikleri analizlerde sadece çevresel kalıntı gerilmeleri dikkate almışlardır [65].

İşlenmiş yüzey ve yüzey altı bölgelerdeki kalıntı gerilmeler kesici takım, iş parçası, takım/talaş ara yüzeyi, ilerleme oranı, kesme derinliği ve kesme hızı gibi kesme parametreleri tarafından etkilenir. İşlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilme profilini tahmin etmek malzeme davranışını ve baskın faktörler arasındaki karmaşık etkileşimi tasvir

edecek özel bir malzeme modelinin olmayışı nedeniyle zordur. Hua ve ark., çalışmalarında, sert malzemenin işlenmiş yüzeyindeki kalıntı gerilmeler üzerine kesme şartları ile beraber iş parçası sertliği ve takım geometrinin etkilerini elastik-viskoplastik FEM formülasyonlarından geliştirilmiş, oldukça yakınlarda önerilmiş, olan sertlik-esaslı akma gerilme modelini kullanarak incelenmişlerdir [66]. İşlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilmenin nüfuziyet derinliği kadar, kesici kenar biçiminin faydası üzerindeki etkilerine de özellikle dikkat çekmişlerdir. Keskin kenarlı, küçük radyüslü, büyük radyüslü, pahlı ve çift pahlı olarak adlandırılmış farklı kesme kenarı biçimleri kullanılarak işlenmiş yüzeylerdeki kalıntı gerilme profilleri elde edilmeye çalışılmıştır. Nümerik sonuçlar, büyük kenar radyüsü+pahlı kenar biçiminin optimal bir kombinasyonunun etkili olduğunu göstermiş ve aşırı fazla ilerleme miktarının hem eksenel hem de çevresel doğrultuda basma kalıntı gerilmelerinin artmasına yardımcı olduğunu göstermişlerdir [66].



Şekil 3.12. Deneysel ve nümerik olarak elde edilmiş kalıntı gerilmeler arasındaki karşılaştırma [65]

Lo çalışmasında, hassas kesme operasyonları esnasında işlenmiş iş parçası ve talaş üzerine takım talaş açısının etkisini incelemek için elastik-plastik FEM metodunu kullanırken [147], Shet ve Deng ise bitirilmiş iş parçasındaki kalıntı gerilme ve gerinim alanları üzerine odaklanmış, düzlem gerinim durumları altındaki metal kesme prosesini analizi ve simülasyonunda FEM metodunu kullanmıştır [148]. Deng, analizlerinde sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri, talaş açısı ve sürtünme katsayısı

değerlerini dikkate almıştır. Termal soğumanın kalıntı gerilme seviyelerinin arttırdığını, talaş açısının ve sürtünme katsayılarının etkisinin bu parametre sınırlarına bağlı olduğunu ve lineer olmadığını bulmuştur [148].

Modelleme üzerine yapılmış diğer çalışmalarda, işlenmiş katmanların mekaniksel karakteristikleri üzerine işleme parametrelerinin (talaş açısı ve hızı), sürtünme katsayısının ve malzeme akış gerilmesinin etkisini elastik-plastik simülasyonlarla analizleri yapılmış, çoklu kesmede kalıntı gerilmeleri tahmin etmek için sonlu eleman yazılımları kullanarak termal-elastik-viskoplastik modeller geliştirilmeye çalışılmıştır. Buna rağmen, bu çalışmalarda, sürekli talaş olduğu ve keskin bir takım kullanıldığı varsayıldığından kesme esnasında faz dönüşümlerinin neden olduğu kalıntı gerilmeler dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak, modelleme ile elde edilen veriler gerçek durumlarla karşılaştırılamamaktadır[131].

3.4. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi

1950'den beri talaşlı imalat neticesinde oluşmuş kalıntı gerilme fenomenini değerlendirmek için oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Araştırmaların çoğunluğu ortogonal kesmede yoğunlaşmıştır, genelde tornalama üzerine çalışmıştır ve frezeleme üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlıdır. Üzerinde çalışılmış iş parçası malzemeleri, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları, karbon çelikleri, yüksek dayanımlı çelikler, maraging çelikler ve nikel esaslı süper alaşımlardır. Bu çalışmalar takım geometrisinin (talaş açısı, uç radyüsü, talaş temas uzunluğu), kesme şartlarının (ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği, paso sayısı), takım aşınmasının (yan kenar aşınması) ve yağlama/soğutma durumlarının talaşlı imalat neticesinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Tartışmalarının sınırlandırılmış olduğu gözlemler, düşük sıcaklıkların basma gerilmelerine, yüksek sıcaklıkların ise çekme gerilmelerine neden olduğunun ötesine geçememiştir.

İşleme neticesinde gelişmiş kalıntı gerilmeler üzerine gerçekleştirilmiş araştırmalar iki temel görevde birleşmiştir:

1. Kalıntı gerilme oluşum mekanizmalarının etki düzeyi,
2. Kalıntı gerilmelerin önceden tahmini.

Birincisi, temel kalıntı gerilme oluşum mekanizmasının ve kalıntı gerilmelerin nispi öneminin anlaşılmasındaki amaçtır. Basit analizi nedeniyle ortogonal işleme genellikle deneysel durum olarak benimsenmiştir. Hem analitik hem de nümerik modelleme işleme şartları, malzeme özellikleri ve işleme neticesinde oluşturulmuş kalıntı gerilmeler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmıştır.

Kalıntı gerilmeler üzerindeki ikinci araştırma amacı, endüstriyel işlemlerde (temelde tormalama ve taşlama) kalıntı gerilmelerin tahminidir. Bununla birlikte, bütün çalışmalarda kalıntı gerilmelerin oluşum mekanizması hakkında sıhhatli bir yorum yoktur ve ortaya çıkarılan modeller tamamen deneylere dayanmaktadır. Bu tür yaklaşımların temel problemi, elde edilen modellerin birden farklı malzemeye uygulanmasından kaynaklanmasıdır.

Kalıntı gerilme oluşumu kesme prosesinin bir sonucudur. Geçmişte işleme proseslerinin neden olduğu kalıntı gerilmeleri çalışmış olan metodolojiler farklı araştırmacıların elde etmiş olduğu deneysel kalıntı gerilme sonuçları ile karşılaştırılmayabilir. İhtiyaçlar kalıntı gerilmelerin işleme parametrelerinin bir sonucu olarak ortaya koyacak çalışmalara ihtiyaç duymaktadır.

İşlemenin neden olduğu kalıntı gerilmelerin kaynağını anlamak için, bu gerilmeler kesme deneyinin mekanik ve termal olgularındaki değişimler dikkate alınarak analiz edilmelidir. Örneğin, eğer önceki çalışmaların verileri kullanılarak kesme şartlarının parametreleri ile kalıntı gerilmeler ve kesme kuvvetlerini arasında bir bağıntı kurulmaya çalışılırsa, kesme hızı arttırıldığı zaman, hem kalıntı gerilme hem de kesme kuvvetleri aynı oranda azalacaktır, buna karşılık ilerleme arttırıldığında ise artacaktır. Kesme derinliği arttığında ise kalıntı gerilmeler her zaman artmaz .

Literatürdeki kalıntı gerilme verileri özetlendiğinde, yüzey katmanındaki kalıntı gerilme σ_y ,

$$\sigma_y = \sigma_f + \sigma_\theta + \sigma_p \quad (3.1)$$

şeklinde üç bileşene bağlı olarak tarif edilebilir. Burada σ_f ; kesme kuvvetlerinin neden olduğu kalıntı gerilme, σ_θ ; sıcaklığın nedene olduğu kalıntı gerilmeler, σ_p ; yüzey katmanındaki faz dönüşümünün neden olduğu kalıntı gerilmelerdir [35].

Temel ifadeler kalıntı gerilmeleri oluşturan durumları nitel olarak ifade etmek için ileri sürülmüştür, fakat kesmeyi takiben iş parçası gerinimlerinin sıfır olduğu gerçeğine uymayan varsayımlardan dolayı daha da geliştirilmesi gerektiğine dikkat çekilmemiştir. Önemli ifadeler taşıyan modelleme çalışmaları üzerine son yıllarda yapılmış yayınlar, kalıntı gerilmelerin birçok davranışını sağlayan sonlu eleman modelleme metotlarını kullanmıştır. Fakat, sonlu eleman modelleri talaşlı imalat nedeniyle kalıntı gerilmelerin olduğu mekanizmaları ifade etmek için kullanıldığında gerilmelerin bütün potansiyelini yansıtamadığı unutulmamalıdır.

Literatür incelenmesi sonucunda, deneysel olarak yapılan çalışmalarda tornalama işlemlerinin ortagonal kesmenin en kolay yolu olan düz tornalama işlemi ile gerçekleştirildiği görülmüştür. Kesici takımın farklı biçimde kesme yaptığı vida açma, kanal açma gibi farklı tornalama işlemleri neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmelerin incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle, literatürde görülen bu eksikliği kapatacağı düşüncesiyle vida açma, kanal açma ve düz tornalama nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmeleri incelenmek, işleme parametrelerinin bu farklı tornalama işlemleri nedeniyle oluşmuş kalıntı gerilmeleri nasıl etkilediğini belirlemek ve karşılaştırmalarının yapılması için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kalıntı gerilmeler katman kaldırma metodu ile belirlenmiştir. Bu metot, maliyetinin ucuz ve parçanın bütününe yayılmış kalıntı gerilmeleri belirlediği için tercih edilmiştir.

4. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİ NETİCESİNDE KALINTI GERİLME OLUŞUMU VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KALINTI GERİLMELER ÜZERİNE ETKİSİ

4.1. Talaş Kaldırma ve Kalıntı Gerilme

Yorulma, sürünme ve gerilmeli korozyon çatlaması nedeniyle oluşmuş bazı kırılma biçimleri her zaman parçanın yüzeyinde başlar ve bu çatlakların konumu büyük çapta yüzey kalitesine bağlıdır. Bu nedenle, herhangi bir parçanın işlenmesinde, tercih edilen yüzey bütünlüğünü yerine getirmek ilk zorunluluktur. Yüzey bütünlüğü üç temel bileşene sahiptir. Bunlardan ilki, yüzey pürüzlülüğünün ifadesi olan yüzey dokusu (yüzey bitirme, boyutsal ve biçim tamlığı gibi), ikincisi işleme sonucu oluşmuş yüzey katmanlarının metalürjik yapısı (mikro sertlik, mikro yapısal değişiklikler), üçüncüsü yüzey ve yüzey altı bölgelerinde oluşmuş kalıntı gerilmelerdir [131, 149].

Mil ve rulman yatakları gibi aşırı gerilmiş bileşenler için, fonksiyonel bir yüzeyin parlaklığı ve bütünlüğü yorulma ömrü için çok kritiktir. Diğer bir değişle, uygulanmış yüzey bitirme operasyonları (taşlama, sert tornalama vb.) çalışma durumlarında parçanın işlevselliğini doğrudan etkiler [131].

İşleme operasyonları genellikle iş parçasının yüzey katmanlarında kalıcı gerilmeler oluşmasına neden olacak yüksek gerilme ve gerinim oranlarına sahip büyük miktarda plastik deformasyon içerir. Bu gerilmeler bileşen ömrü üzerinde hem yararlı hem de zararlı etkilere sahip olabilir. Basma kalıntı gerilmeleri yorulma ömrü, sürünme ömrü ve gerilmeli korozyon çatlama direnci üzerinde faydalı olabilirken, çekme kalıntı gerilmeleri aynı özellikler üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu nedenle, işlenmiş yüzey ve yüzey tabakalarındaki kalıntı gerilmelerle ilgili bilgilerin özellikle çalışma hasarının ya da ömür azalmasının sebep olabileceği havacılık endüstrisindeki parçaların üretiminde ve tasarımında çok değerli olabileceği net olarak görülebilir [119, 150-152].

İş parçasındaki kalıntı gerilmeler malzemenin geçtiği süreç ve işleme biçimleri ile ilgilidir. İş parçasının yüzey ve yüzey altı katmanlarındaki malzeme özellikleriyle bütünleşmiş kalıntı gerilmeler ve mikro yapı değişiklikleri üzerindeki bilgiler bileşenin çalışma ömrünü kontrol eden yüzey bütünlüğü için çok önemlidir. İşlenmiş iş parçası üzerindeki kalıntı çekme gerilmelerinin durumunu düzeltmek için, oldukça pahalı olmasına rağmen, ısıtma işlemi, lebleme, bilyeleme ve kaplama gibi değişik metodlar kullanılabilir. Tornalamadan önce ve tornalama esnasında iş parçası için önerilmiş ön gerilme metodu, tornalama operasyonu neticesinde meydana gelen kalıntı çekme gerilmeleri problemleriyle baş etmenin basit ve etkili bir aracı olarak kullanılabilir. Ön gerilme için uygulanan kuvvet daha sonra serbest bırakılır. Sonuç olarak, çekme gerilmesi uygulanarak değişik tornalama durumları altında işlenmiş iş parçasının çekme gerilmelerinden ziyade basma kalıntı gerilmeleri üretmesi sağlanabilir [153-156].

Genelde ince işlenmiş parçanın yüzeyindeki yüksek basma kalıntı gerilmeleri ve yüzey katmanındaki yüksek sertliği parçanın yorulma ömrünü uzatacak ve performansını geliştirecek gibi görünür. Bu nedenle, bugün endüstrideki eğilim yavaş ve yoğun maliyete sahip taşlama işlemini, birçok avantajından dolayı sertleştirilmiş bileşenlerin işlenmesinde tornalama operasyonu ile değiştirebilmektir. Deneysel çalışmalar, taşlama ile karşılaştırıldığında sertleştirilmiş iş parçalarının iyi kontrol edilmiş kesme şartları altında tornalamanın basma kalıntı gerilmeleri ve azalmış mikro yapısal hasarlara sahip tercih edilebilir yüzey kalitesi oluşturabileceğini göstermiştir [109, 131].

Yüzey durumları ve imalatla ilişkili değişiklikler yorulma direncini güçlü bir biçimde etkiler. Soğuk çalışmadan kaynaklanan sertlik (pekleşme) ve kalıntı gerilme mekanik süreçlerdeki anahtar faktörlerdir. Presleme, kesme, tornalama, frezeleme ve taşlama gibi işlem yöntemleri bir soğuk çalışma etkisi oluşturur. Bu işlemler parçanın yüzeyinde ve yüzey katmanlarında yüksek sertliğe ve çekme kalıntı gerilmelerine neden olur. Bunun sonucu olarak, malzemenin yorulma direnci azalır. Yinede, haddelendirme veya ezme ile oluşturulmuş soğuk çalışma basma kalıntı gerilmelerine neden olduğundan, yorulma direncini artırır [157-160].

4.2. Talaş Kaldırmada Kalıntı Gerilme Oluşturan Mekanizmalar

Talaş kaldırarak işleme neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmeler temelde;

- Termal deformasyon,
- Mekanik deformasyon,
- Termal ve plastik deformasyonun birleşimi,

olmak üzere üç kaynaktan etkilenecek oluşur [131, 147, 160].

4.2.1. Termal deformasyon

İş parçası ısıtıldığında yüzey katmanlarında meydana gelen hacim değişikliği termal kaynaklı kalıntı gerilmelere neden olur. Eğer yüzey katmanlarının hacminin artmasına neden olacak faz dönüşümü varsa, yüzey katmanları büzülmeye çalışacaktır. Bununla birlikte, bileşen malzemesinin yüzey altı bu büzülmeye direnç gösterecek, bu da yüzey katmanını çekmeye uğratacaktır (Şekil 4.1) [160].



Şekil 4.1. Griffiths'e göre bileşen yüzeyinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine termal faz dönüşümünün etkisi [160]

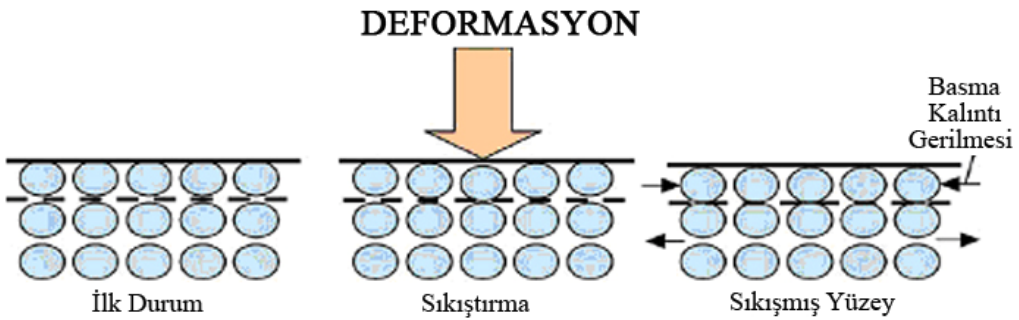
Eğer yüzey katmanının hacmi artarsa (örneğin nitrürlemedeki gibi iç kısma atomların difüzyonuyla), o zaman malzemenin iç kısmı bu çekmeye direnecek bu suretle yüzey katmanlarının basma etkisine girmesine neden olacaktır [160].

İşleme sırasındaki ısı oluşumunun sonucu olarak, bir sıcaklık alanı belirir ve bu alan iş parçası malzemesinin yapısını etkiler. Maksimum sıcaklık yüzeyde meydana gelir ve yüzeyden artan mesafeyle azalır. Isı arttığı zaman, alt-yüzey bölgeleri sıcaklığın düşük olduğu derin bölgelerden daha hızlı genişleyebilir. Bu bölgelerin birbiriyle bağlantıları yüzeydeki basma gerilmelerinin azalmasına neden olur ve nihayetinde basma gerilmeleri dönüşerek çekme gerilmeleri halini alır [153].

Termal gerilmeler temel olarak iş parçası ve aşınma bölgesi arasındaki sürtünmeden kaynaklanır. Yüksek değerlerdeki doğrudan gerilme seviyesi, iş parçası ve takım arasındaki nispi hareketle birleşen yüksek sürtünme seviyesinin sebep olduğu yüksek teğetsel gerilmeler oluşturur. Bu nedenle, ısıнын çoğunun iş parçası içine aktığı varsayılmalıdır. Yapılan sıcaklık ölçümlerinden maksimum sıcaklığın takımın yan boşluk yüzeyinde olduğu tespit edilmiştir [160-162].

4.2.2. Mekanik deformasyon

Bazı sıkıştırma biçimlerinin hareket ettirdiği malzemenin yüzey katmanları mekanik deformasyona bağlı kalıntı gerilmelere neden olur. Bileşen yüzeyinde etkili bir ısı yoktur ve kalıntı gerilmeler basma niteliğindedir. Bu etki, bilyeleme ya da parlatma operasyonlarını da temsil eden Şekil 4.2’de görülebilir [160].

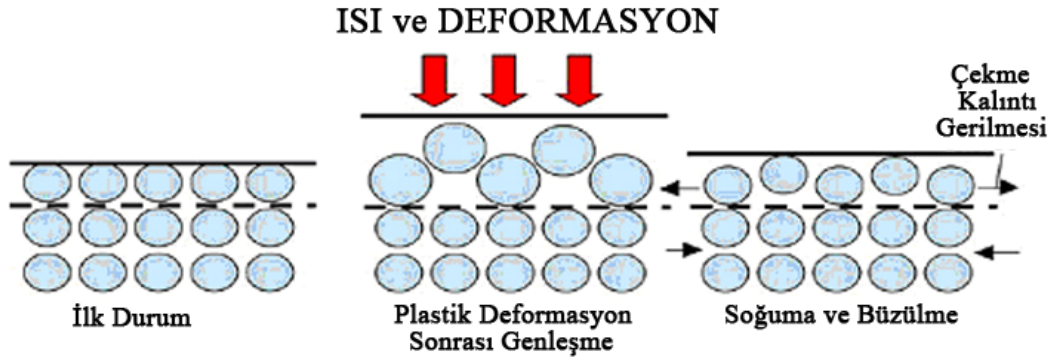


Şekil 4.2. Griffiths’e göre mekaniksel deformasyonun bileşen yüzeyinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [160]

Malzemenin üzerindeki takım ucunun hareketi sonucu olarak burada plastik deformasyon oluşturan (eğer bu katmandaki akma noktası aşılsa) bir gerilme alanı belirir. Plastik olarak deforme olmuş katman işlemeden sonra eski haline dönemeyecek, böylece iş parçasında kalıntı gerilme kaynağı biçimlenecektir [79]

4.2.3. Termoplastik deformasyon

Termal ve plastik deformasyonun neden olduğu kalıntı gerilmeler işleme neticesinde oluşmuş gerilmelerin tarifini verir. İşleme operasyonları bileşenin yüzeyini ısıtır ve bu da genişlemeye neden olur. Bu genişleme plastik akışla hafifletilir, bu da yüzey katmanını daraltır. Isı oradan uzaklaştırıldığı zaman, yüzey katmanı büzülür, Şekil 4.3’de görüldüğü gibi buda iş parçasının yüzeyinde çekme kalıntı gerilmeleri oluşturur [160].



Şekil 4.3. Griffiths’e göre termal ve plastik deformasyonun mekaniksel deformasyonun bileşen yüzeyinde oluşmuş kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [160]

Kalıntı gerilmeler mekaniksel, termal ve metalürjik etkinin sonucu olarak ortaya çıkar. Sertleştirilmiş parçaların tornalanmasında, bu üç etki takımın karakteristikliği ve özellikleriyle (malzeme, kaplama, geometri, aşınma), işleme parametreleriyle ve takım-iş parçası etkileşimiyle kontrol edilir. Sert tornalama nedeniyle iş parçası yüzeyinin özelliklerindeki değişiklikler kısmen kesme basıncına kısmen de kesme sıcaklığına dayandırılmaktadır. Sert tornalamanın neden olduğu değişiklikleri karşılaştırmak için, uygun talaş oluşum mekanizmasını analiz etmek esastır [161,

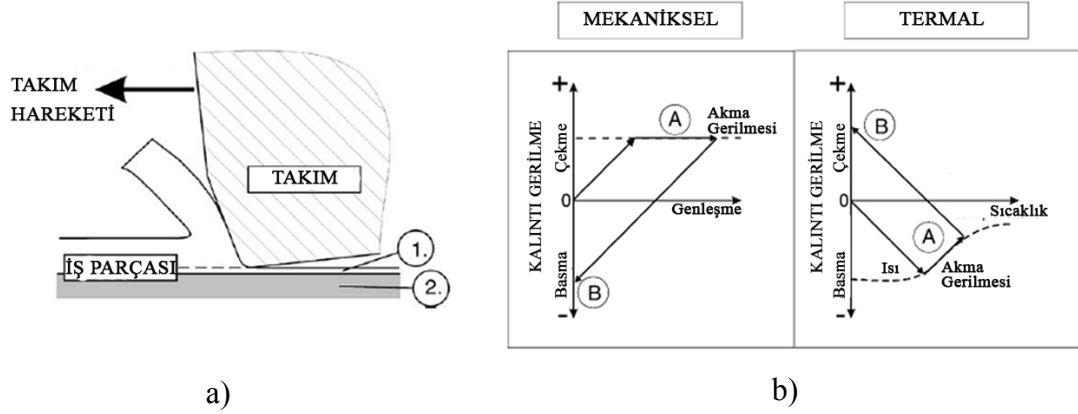
162]. Kesici kenarın ucu civarındaki alanda, basma gerilmesi seviyeleri çok yüksek olmalıdır. Çünkü bu, talaş oluşumunu elde etmek için iş malzemesinin yeterli bir plastiklik derecesine erişmesinin bir yoludur. İş parçasının yüzeyine uygulanan yüksek mekanik gerilme seviyeleri basma kalıntı gerilmelerine neden olacak eğilimler oluşturur [160].

Teknolojik operasyonların bir ürünü olan malzemedeki kalıntı gerilmeler, plastik deformasyonla ve faz değişikliklerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan hacimsel değişikliklerle yapısal bileşenin sürekli yapının bozulmasından kaynaklanır. Bir çok işleme sürecinde sıcaklık faz dönüşüm noktasına erişemez ve böylece faz dönüşümü uzak tutulabilir [153]. Bazı araştırmacılar, faz değişikliği bulunmadığında, işlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilmelerin kaynağı üzerinde mekaniksel yükün daha etkili olduğunu göstermiştir [4, 5, 30]. Bu çalışmalarda termal etkiler henüz dikkate alınmamıştır ve sonuçlar kalıntı gerilmeler üzerindeki termal etkilerin mekanik yük etkilerinden çok daha küçük olduğunu onaylamaktadır [153].

Tornalamanın kalıntı gerilme seviyelerinin oluşumunu nasıl etkilediği, kesici takım iş parçası üzerinden geçtiğinde oluşan gerilme durumlarıyla izah edilebilir (Şekil 4.4). Kesme esnasında mekaniksel olarak oluşmuş kalıntı gerilme mekanizması (A) yüzey katmanındaki plastik deformasyonla (1) ve yüzey katmanının altında elastik deformasyonla (2) açıklanabilir. Kesme işlemi sonrası iş parçası kuvvet dengesini ve geometrik uyumu elde etmek için elastik genişlemeye uğrar ve kalıntı basma gerilmesi içerisinde yüzeye yerleşir (B). Termal kalıntı gerilme mekanizması kesme işleminin ısısından kaynaklanır, burada yüzey katmanı genişler ve basma gerilmesi oluşur (A). Ardından iş parçası soğur (B) ve yüzey katmanında büzülme olur (1), bu da yüzeyde çekme kalıntı gerilmesi meydana getirir. Termal etki iş parçasının daha içerisinde azalır ve bunun temel sonucu olarak çekme gerilmesi yüzeyde olur. Sonuç olarak, kesici kenarın sıcaklığı çekme kalıntı gerilmesinin azaltılması için çok önemlidir [163].

İşleme ile kalıntı gerilme oluşumu mekanik ve termal faktörler arasındaki karmaşık etkileşimden kaynaklanmaktadır. Bu iki zıt olgu parçadaki nihai kalıntı gerilme

bileşenini oluşturmak için birbirleri ile karşılıklı olarak etkileşir. Çizelge 4.1, kesme parametreleri değiştiği zaman kalıntı gerilme oluşumu ile beraber mekanik ve termal oluşumları da özetlemektedir. Ayrıca, Çizelge 4.1’de kalıntı gerilmenin nasıl oluştuğunun genel bir açıklaması da görülebilir [163].



Şekil 4.4. Talaş kaldırma esnasında kalıntı gerilme oluşumu [163]

a) Tornalama ile kalıntı gerilme oluşumu, b) Kalıntı gerilme oluşum mekanizmaları

Çizelge 4.1. Kalıntı gerilme oluşumunun özeti [163]

(S: Yüzeyden derinlik, T: Çekme kalıntı gerilmesi, C: Basma kalıntı gerilmesi, ↑: Artma eğilimi, ↓: Azalma eğilimi)

Parametre	S=0 μ m		
	Termal Oluşum	Mekanik Oluşum	Kalıntı Gerilme Biçimi
Kesme hızı	↑	↓	↑ +T
İlerleme miktarı	↑	↑	↓ -C
Kesme derinliği	-	-	-
Talaş açısı	↑	↑	↓ -C
Uç radyüsü	↑	↑	↑ +T
S=10~50 μ m			
	Termal Oluşum	Mekanik Oluşum	Kalıntı Gerilme
Kesme hızı	-	↓	-
İlerleme	↑	↑	↓ -C
Kesme derinliği	-	-	-
Talaş açısı	↑	↑	↓ -C
Uç radyüsü	↑	↑	↑ +T
S=70~130 μ m			
Sertleştirme etkisi			

Daha yüksek kesme hızları, sıcaklığı (daha fazla ısı oluşumu) arttırarak yüzeyde çekme kalıntı gerilmelerine neden olur. Talaş ısının çoğunu taşıdığından, yüksek sıcaklık iş parçasının çok daha fazla derinlerine ulaşamaz ve bu nedenle yüzey altında termal etkili kalıntı gerilme oluşmaz. Eğer sert tornalamayı bir honlama işlemi izlerse, yüzeydeki çekme kalıntı gerilmesi kaldırılabilir. İkinci olarak, yüzey altındaki basma gerilmesinin seviyesi ilerleme oranının arttırılmasıyla artırılabilir. Bu, daha fazla ilerleme miktarının kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmasından, dolayısıyla da daha fazla plastik deformasyon oluşmasından kaynaklanabilir. Üçüncü olarak, kesme derinliği değiştiği zaman sadece eksenel kuvvet bir parça artar. Bununla birlikte, teğetsel kuvvet kesme derinliği ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle alt yüzey deformasyonuna yardımcı olmaz. Bu nedenle, kalıntı gerilmeler etkilenmez. Dördüncü olarak, daha negatif talaş açısı hem yüzeyde hem de yüzey altında basma kalıntı gerilmesi oluşturur. Daha negatif talaş açısı yüzey altının mekaniksel oluşumunu arttırır, bu da pasif kesme kuvveti artışının neden olduğu daha fazla basma gerilemesi üretir. Daha negatif talaş açısının neden olduğu yüksek sıcaklık gerilme seviyesini etkilemez. Thile ve Melkote benzer ilişkiyi ifade eder [164]. Jacobson, etkili talaş açısının iş parçasında oluşmuş kalıntı gerilme miktarını etkilediğini açıklamıştır [165]. Son olarak, büyük uç radyüsü yüzey ve alt yüzeylerde çok az basma gerilmesi oluşturur. Bu, temas alanının geniş olmasından kaynaklanır ve böylece özgül kesme kuvveti (birim alana düşen kuvvet) düşer. Jacobson, M50 çeliğinde aynı sonucu, daha küçük uç radyüsünün daha fazla basma gerilmesi oluşturduğunu bulmuştur [163].

Kalıntı gerilmeler daima homojen olmayan plastik deformasyonun veya hacim değişiklikleri ile birleşmiş faz dönüşümlerinin bir sonucudur. İşleme esnasında kesici takımdan iş parçası üzerine etkiyen kuvvetler plastik deformasyona neden olur [149]. Buna ilaveten, eğer sıcaklığa bağlı olarak malzemenin akma dayanımı aşılsa, işlenmiş yüzey alanının bölgesel ısınması sonucu da plastik deformasyon oluşabilir [166]. Kesmedeki ısı olayı ile oluşan plastik deformasyon çekme kalıntı gerilmesine neden olurken, kesme esnasındaki mekaniksel olayın neden olduğu plastik deformasyon ise basma kalıntı gerilmelerine neden olmaktadır [167].

İşlenmiş yüzeylerle bütünleşmiş kalıntı gerilmeler üzerine yapılan çalışmalar 50 yıl öncesine dayanır [3,160]. Yakın zamanda yapılan çalışmaların bir çoğu mekanik durumun elde edildiği müteakip analizleri basitleştirme çabasındaki tornalama operasyonları ile ilgilidir. Konu üzerine yaygın gelişme işleme sonrası meydana gelen kalıntı gerilmeleri önceden tahmini esasına dayalı bir sonlu eleman metodu kullanılarak yapılmaktadır. Araştırmacılar simülasyonlarında kesilmemiş talaş kalınlığı kadar peş peşe kesme etkisinin çok daha önemli olduğu fikrini benimsemiştir [29, 168-170].

Kalıntı gerilme mekanizması üzerine yapılmış bir çok araştırma analitik ve deneysel metotlara dayalı olarak mekanik ve termal etkileri vurgulamışlardır. Sadece birkaç sayısal model ortogonal kesmedeki yüzey bütünlüğünü tahmin etmek için sunulmuştur [131].

4.3. İşleme Parametrelerinin Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkisi

Bölüm 4.1 ve 4.2’de talaş kaldırma işleminde kalıntı gerilme oluşum mekanizmaları açıklanmıştır. Bu mekanizmalar talaş kaldırma işlemiyle birlikte bütünleşmiş olarak hareket ederler. Fakat, bu mekanizmalar işleme parametreleri ile kontrol edilebilirler. İşleme parametrelerinin kalıntı gerilme oluşum mekanizmaları üzerindeki etkilerinin bilinmesi kalıntı gerilmelerin istenilen biçimde şekillendirilebilmesine olanak tanır [127].

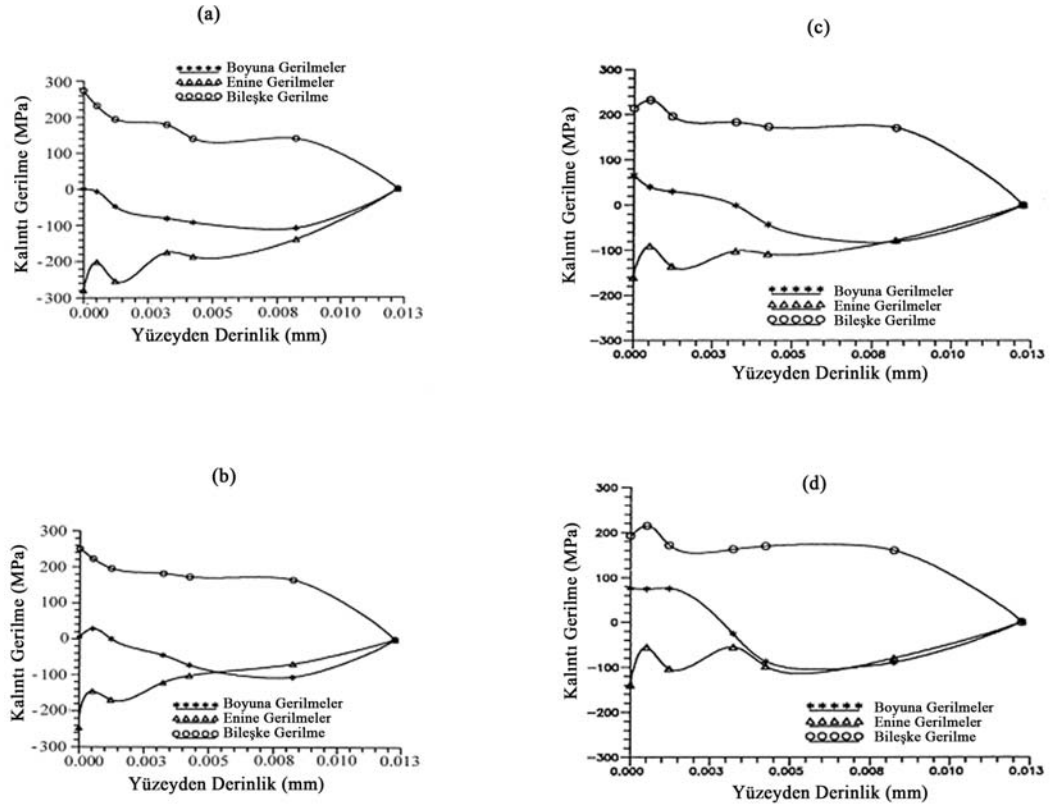
Üç boyutlu kesmede talaş açısı, kesme derinliği, ilerleme oranı ve köşe radyüsü gibi kesme şartları bitirilmiş yüzeyin kalıntı gerilmesini etkiler. Böylece bu faktörlerin birleşmiş etkileri çok karmaşık bir hal alır [28, 29, 130].

Sonuç olarak, kalıntı gerilmeler takım geometrisi ve özelliklerinin, iş parçası malzemesinin türü ve kesme şartlarının bir fonksiyonu olarak gelişir [161].

4.3.1. Takım geometrisi ve özelliklerinin etkisi

Talaş açısının etkisi

Şekil 4.5, dört farklı talaş açısının kalıntı gerilmeler üzerine olan etkisini göstermektedir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bütün şekillerde gerilme profilleri aynıdır. Boyuna gerilmeler, yüzeyde çekme çıkarken yüzey altında ki derinliklerde basma kalıntı gerilmelerine dönüşmüştür. Enine gerilmeler ise yüzeyde basma verirken derinlerde azalarak çekmeye dönüşmüştür [147].



Şekil 4.5. Farklı talaş açılarının (γ) kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi [147]

a) $\gamma=5^\circ$, b) $\gamma=10^\circ$, c) $\gamma=15^\circ$, d) $\gamma=20^\circ$

Grafikteki sonuçlar, kesme doğrultusundaki boyuna gerilmelerin talaş açısı arttıkça iş parçası yüzeyindeki çekme gerilmelerini de arttırdığını gösterir. Zıt olarak kesme doğrultusuna dik yerleşen enine gerilmelerin talaş açısı arttıkça iş parçası yüzeyindeki maksimum basma gerilmelerinin de azaldığını gösterir. Bu çalışmada talaş açısı 5° 'den 20° 'ye çıkarıldığında enine gerilme değeri -280 MPa'dan -140

MPa değerine düşer. Diğer bir değişle talaş açısı arttırıldıkça işlenmiş iş parçasının yorulma dayanımı azalır. Kesme işlemi sonrasında, iş parçası yüzeyindeki bileşke gerilmeler 5° ile 10° 'lik talaş açılarında en yüksek seviyesindedir. Buna karşılık 15° ve 20° 'lik talaş açılarında maksimum eşdeğer gerilme yüzeyin hemen altında oluşur [147].

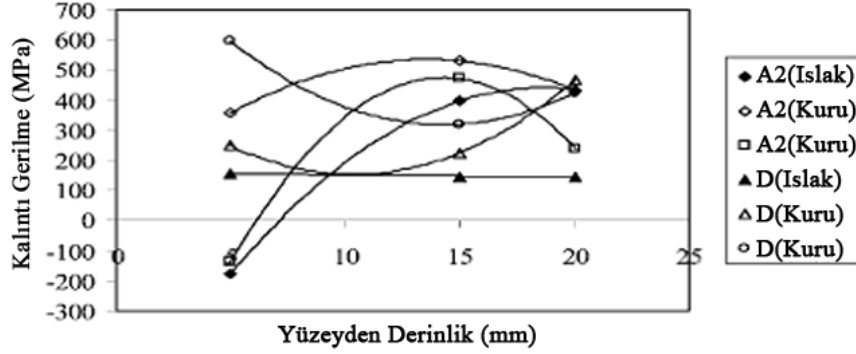
Genelde, farklı talaş açıları için kalıntı gerilmeler yüzeyde çekme çıkmıştır. Kuru tornalamada sıcak talaş kesme bölgesinden düzgün biçimde atılamaz ve en dıştaki yüzey katmanının düzensiz ısınmasına neden olur. Büyük negatif talaş açısı yüzey altında hem daha yüksek basma gerilmesi hem de daha derin etkilenmiş bölge verir [105].

Talaş açıları artarken, toplam gerilme seviyeleri de artar. Maksimum gerilmelerin etkilediği derinliklerde önemli değişiklikler gözlenir. Bu hem maksimum değere hem de etki derinliği değerine göre sert tornalamadaki basma gerilemelerini kontrol etmek için kullanılan farklı talaş açılarının olanaklarını ortaya koyar [164].

Şekil 4.6, Incone 718 malzemenin işlenmesinde pozitif ve negatif talaş açısı tiplerinin kalıntı gerilmeler üzerine etkisini göstermektedir. Genelde, hem kuru hem yaş işlemede benzer eğilimler elde edilmiştir. Girişte negatif açının basma gerilmesi oluşturduğu yerde pozitif açılı uçun çekme kalıntı gerilmesi oluşturduğu gözlemlenmiştir [149].

Negatif kesme açısı basma kalıntı gerilmelerine neden olan daha yüksek kalıntı gerilme dereceleri oluşturduğu halde, kesme süreci devam ederken plastik deformasyon ısı oluşumu nedeniyle git gide artar ve ardından gerilmeler çekme doğrultusuna doğru yer değiştirir [25].

Baskın kalıntı gerilme, kesme doğrultusu yönündeki (eksenel) gerilmelerdir. Pozitif talaş açısı nedeniyle işlenmiş yüzey boyunca yerleşmiş kalıntı gerilmeler çekmedir. Özel durumlarda (sürtünme katsayısı yüksek ya da talaş açısı küçük olduğunda) eksenel gerilme, çok az basma şeklinde veya sıfıra yakın olabilir [148].



Şekil 4.6. Inconel 718’de farklı talaş yüzey biçimlerinin etkisi (A2: Negatif talaş açılı takım, D: Pozitif talaş açılı takım) [149]

Takım-talaş sürtünme ve talaş açısı kalıntı gerilmeler üzerinde lineer olmayan bir etkiye sahiptir. Sürtünme katsayısı düşük değerlere sahip olduğunda ya da takım talaş açısı yüksek değerlere sahip olduğunda, sürtünme katsayısı ve talaş açısı kalıntı gerilmeler üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilir. Yine de, yüksek sürtünme katsayısı ve küçük talaş açısı düşük basma ya da sıfıra yakın olan baskın kalıntı gerilmelere sebep olacaktır [148].

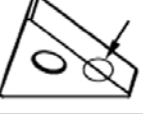
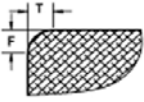
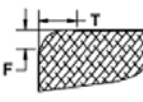
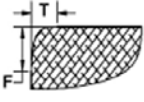
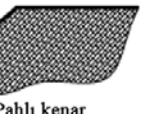
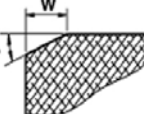
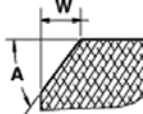
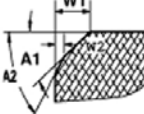
Aşınmış takım ve talaş açısının etkisi kalıntı gerilmelerin dağılımını etkileyebilir. 5° talaş açısına sahip keskin takım aynı talaş açısına sahip aşınmış takım ile oluşturulmuş kalıntı gerilmelere göre çok düşük ve düzgün çekme kalıntı gerilmeleri oluşturur [171].

Yine de, kesme açısı arttığında kesme kuvvetleri azalır ve bu da önemsiz basma gerilmelerine neden olur. Bu, pozitif talaş açılı takım ile çalışıldığında basma mekaniksel etkilerin çok az önemli olduğu anlamına gelir [147].

Kesici kenar biçiminin etkisi

Ticari olarak elde edilebilir uçlarda kesici kenarın hazırlanmasında genelde üç temel tasarım vardır. Kesici kenar tasarımındaki bu farklılıklar Şekil 4.7’de görülmektedir [172].

Matsumoto ve ark., dört farklı kesici kenar tasarımının (keskin, yuvarlatılmış, tek pahlı, çift pahlı) kalıntı gerilmelere etkisini incelemiştir [110]. Yuvarlatılmış ve çift pahlı takımın işlenmiş yüzeydeki daha çok basma gerilmeleri oluşturduğu ve daha derin etkilenmiş bir alt yüzey bölgesi meydana getirdiği sonucuna varmışlardır [110].

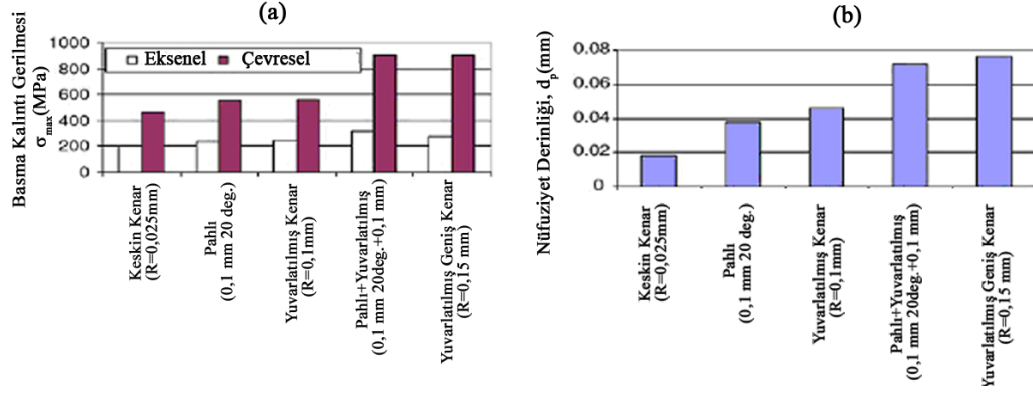
	Kesici Kenar Hazırlamada Üç Temel Tasarım ve Tasarım Farklılıkları		
 Keskin Kenar			
 Yuvarlatılmış kenar	 $T=F$	 $T>F$	 $T<F$
 Pahlı kenar	 W A	 W A	 $W1$ $A1$ $W2$ $A2$

Şekil 4.7. Tipik kesici kenar tasarımları ve farklı biçimleri [172]

Şekil 4.8'den yuvarlatılmış geniş kenarın ve pahlı+yuvarlatılmış kenarın diğerlerinden daha büyük basma kalıntı gerilmeleri verdiği görülmektedir. En büyük etki derinliği yuvarlatılmış geniş kenara sahip takım ile elde edilirken, bunu pahlı+yuvarlatılmış takım izler. Yuvarlatılmış geniş kenarlı takım ve pahlı+yuvarlatılmış takım iş parçası ve kesici takım arasında daha büyük temas alanı oluşturur, böylece deformasyon bölgesindeki sürtünme artar. Sürtünme etkileşimiyle daha güçlü ezme etkisi oluşturulacağından, en yüksek çekme gerilmesi durumu takım arkasında meydana gelebilir. Bu da, yükleme kaldırıldığında alt yüzeyde daha büyük ve derin basma kalıntı gerilmeleri ile sonuçlanır [66].

Yuvarlatılmış geniş kesme kenarlı takım basma gerilmesi üretir. Geniş olarak yuvarlatılmış kesici kenara sahip takımın oluşturduğu kalıntı gerilmeler, tipik olarak

küçük olarak yuvarlatılmış takım ile oluşturulmuş olan gerilmelerden daha çok basma gerilmeleri oluşturur [164, 173].



Şekil 4.8. Kesici kenar biçiminin kalıntı gerilme ve etki derinliği üzerine etkisi (RC= 62, kesme hızı= 120 m/dak., ilerleme oranı= 0,1 mm/dev.) [66]
a) Maksimum kalıntı gerilme; b) Maksimum gerilmenin etki derinliği

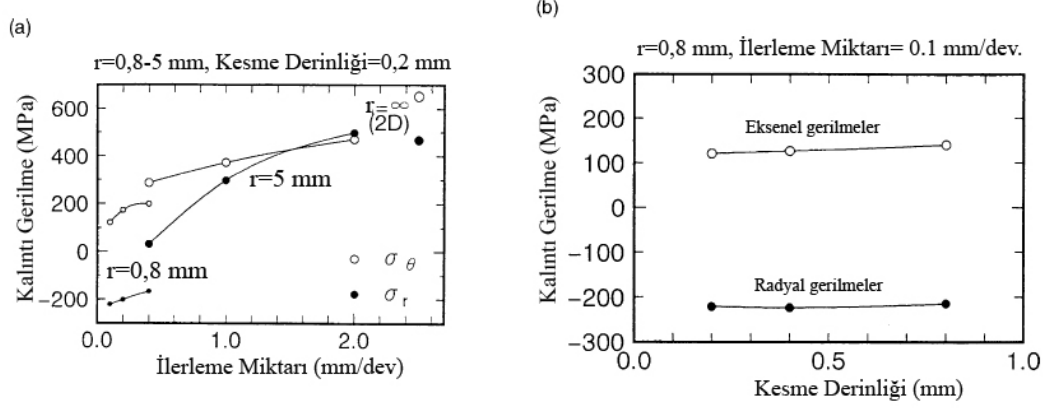
Uç radyüsünün etkisi

Tornalama ve frezeleme gibi operasyonlarda işlenmiş yüzey katmanları takım uç radyüsü etkisiyle talaş oluşum süreci boyunca üç boyutlu olarak deforme olur. Takımın kenarı yuvarlatılmış olabilir ve köşe radyüsü kesme hızına dik doğrultuda deformasyona neden olabilir ve takım köşe radyüsü ve ilerleme oranı kalıntı gerilmeyi etkiler [25, 127].

Şekil 4.9, enine ve radyal yönde ölçülmüş sonuçları göstermektedir. Ortogonal kesmede bütün gerilmeler çekme gerilmesidir. İlerleme miktarı küçülmeye başladığında, çekme bölgesindeki her iki kalıntı gerilme azalma eğilimi gösterir. Buna ilave olarak radyal gerilme küçük uç radyüslü takım kullanıldığında basma gerilmelerine dönüşür [127].

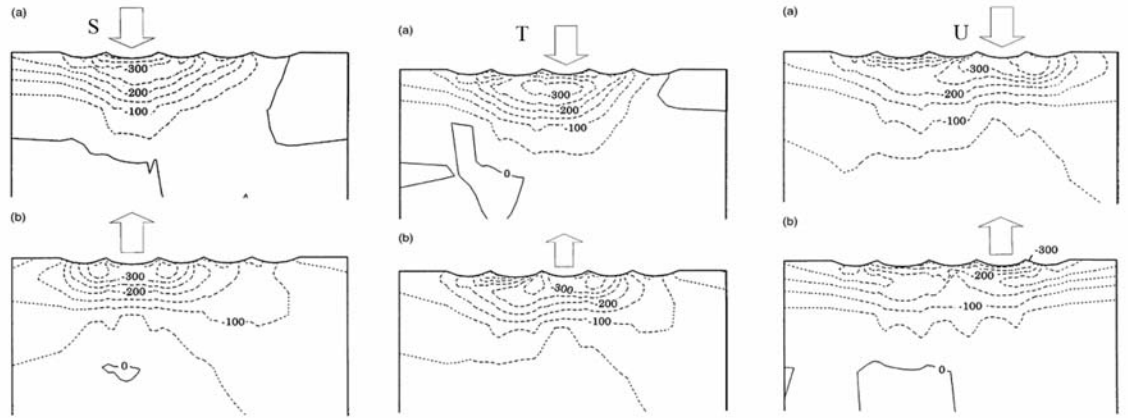
Şekil 4.10'da gösterilen S, T ve U takımın geçtiği noktalardır ve bu noktalarda ki tekrarlanan yükleme ve boşaltma sonrası, Z doğrultusundaki eksenel kalıntı gerilmelerin dağılımını gösterir. Uç radyüsü 0,4 mm ve ilerleme miktarı 0,4 mm'dir. Bütün yükleme operasyonlarında eksenel gerilmeler basma olur ve yük

boşaltıldığında gevşer. Son olarak takım S'den U'ya geçtiğinde bütün yüzey katmanları basma gerilmeleri gösterir [127].



Şekil 4.9. İlerleme miktarının ve kesme derinliğinin işlenmiş parça yüzeyindeki kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [127]

a) İlerleme miktarın etkisi, b) Kesme derinliğinin etkisi



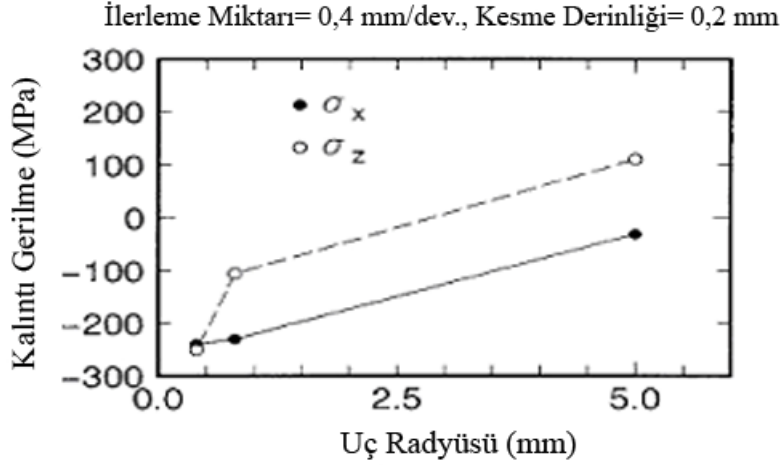
(a) Yüklem (b) Boşaltma

Şekil 4.10. Tornalama esnasında kesici uç radyüsünün eksenel kalıntı gerilme dağılımı üzerine etkisi [127]

S) Takım birinci noktada, T) Takım ikinci noktada, U) Takım üçüncü noktada

Şekil 4.11, uç radyüsündeki değişime karşılık yüzeydeki kalıntı gerilmeleri gösterir. Uç radyüsü küçüldükçe basma kalıntı gerilmeleri artar. uç radyüsü küçüldükçe köşenin bitirilmiş yüzey tarafı dışarı doğru deforme olur ve köşenin altındaki bölge

plastik olarak gerilir. O zaman bölge ana alt katmanlar yardımıyla elastik olarak bastırılır, bu da basma kalıntı gerilmelerine neden olur. İlave olarak, bu etkinin gerçek kesme esnasında işlenmiş yüzey katmanları içerisindeki kalıntı gerilmeye bazı katkılar sağlaması mümkündür [127].

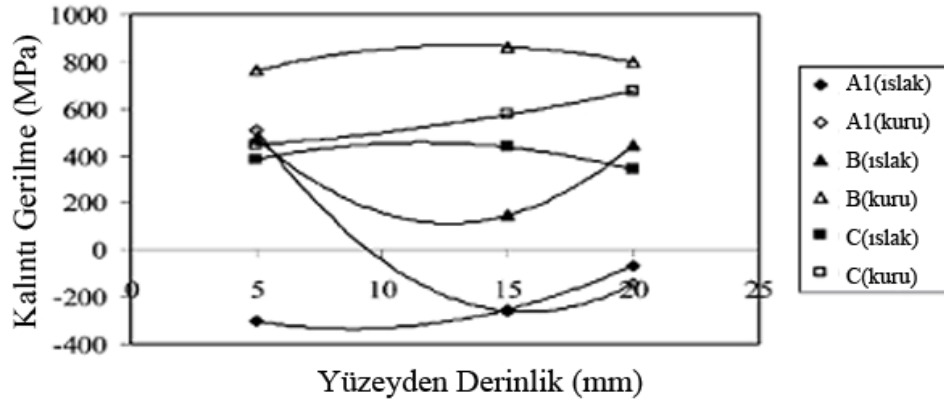


Şekil 4.11. Kesici takım uç radyüsünün yüzeyde neden olduğu kalıntı gerilmeler [127]

Köşe radyüsü kalıntı gerilmeler üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Eğer küçük köşe radyüsüne sahip takım kullanılırsa kesme doğrultusuna dik doğrultuda basma kalıntı gerilmeleri ortaya çıkar. İlerleme miktarı azaldıkça yüzey kalıntı gerilmeleri çekmeden basmaya dönüşür. İşlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilmeler uygun kesme şartları seçilerek (özellikle köşe radyüsü ve ilerleme miktarı) kontrol edilebilir [127].

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere, hem kuru hem de ıslak kesmede, en büyük radyüsler (1,2 ve 1,6 mm) çekme kalıntı gerilmelerine neden olurken, en küçük radyüs (0,8 mm) basma kalıntı gerilmelerine neden olmuştur. 1,2 ve 1,6 mm uç radyüsleri arasında, en yüksek çekme kalıntı gerilme değerini hem ıslak hem de kuru kesmede 1,2 mm radyüs göstermiştir [149]. Genelde, uç radyüslü takım kullanımı yarma etkisi (mekaniksel etki) nedeniyle basma kalıntı gerilmeleri oluştururken [124], sivri uçlu takımla kesme çekme kalıntı gerilmeleri oluşturur. Bu modele göre, en yüksek basma kalıntı gerilme değerini 0,8 mm radyüs verecek yerde 1,6 mm radyüs vermektedir.

Bu durumun akla yakın açıklaması geniş radyüslü takımda temas alanı küçük radyüsününkinden daha geniştir ve böylece kesme operasyonu esnasında daha fazla ısı oluşacaktır. Inconel 718'in kötü ısı iletkenliği nedeniyle ısı etkilili plastik deformasyon küçük radyüslü ucun yarma etkinden daha baskın olacaktır. Bu düşük termal iletkenliğe sahip malzemelerde görülen bir eğilimdir [124].



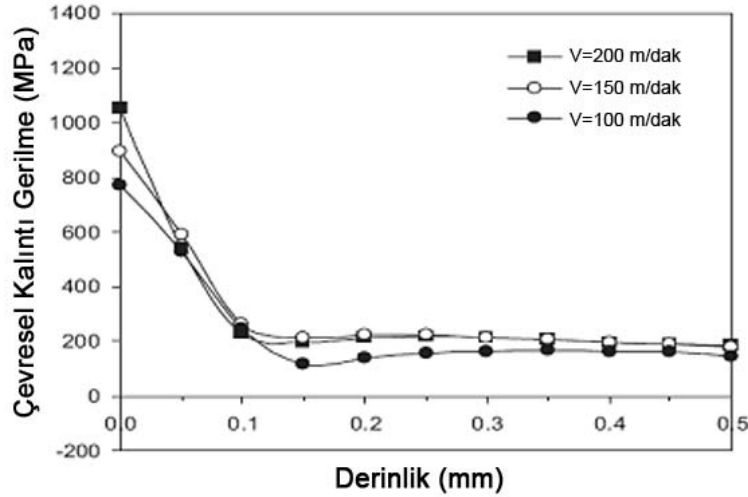
Şekil 4.12. Kalıntı gerilmeler üzerine takım uç radyüsünün etkisi (A1: $r=0,8$ mm- negatif talaş açılı, B: $r=1,2$ mm negatif talaş açılı ve C: $r=1,6$ mm negatif talaş açılı takım) [149]

Kesici takım kaplama tipinin etkisi

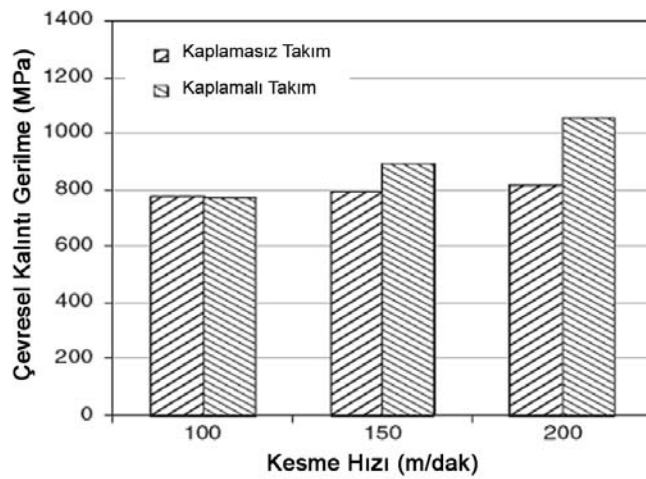
Kaplamasız takım kullanıldığında çevresel gerilmelerin değişen kesme hızlarından etkilenmediği görülür. Oysa Şekil 4.13'de görüldüğü üzere kaplamalı takım kullanıldığında yüzeydeki çevresel gerilmeler kesme hızı ile artar. Yüksek kesme hızları için, hem kaplamalı hem de kaplamasız takım kullanıldığında çekme katmanının kalınlığının azalması görülmüştür [65].

Şekil 4.14, kaplamalı ve kaplamasız takımla üretilmiş kalıntı gerilmeler arasında kesme hızının etkisi dikkate değerdir. En yüksek kesme hızında kaplamalı ve kaplamasız takım arasındaki fark en büyüktür. Sonuç olarak, kaplamasız takımlar kaplamalı takımlarla değiştirildiğinde yüzeysel kalıntı gerilmeler en yüksek kesme hızı kullanıldığında artar. Bu, kaplamanın takıma düşük ısı iletkenlik kazandırmasından kaynaklanır. Yüksek kesme hızlarında artan kesme sıcaklığı nedeniyle takım ısıyı hızla tahliye edemez ve bu ısı yeni oluşturulan parça yüzeyinde

kalır. Böylece, kaplamalı takım ile yüksek kesme hızlarında işleme iş parçasının yüzeyinde ısı etkilenmeden kaynaklanan çekme kalıntı gerilmeleri oluşturur [65].



Şekil 4.13. Kaplamalı takımlarda kesme hızına bağlı çevresel kalıntı gerilmelerin değişimi [65]

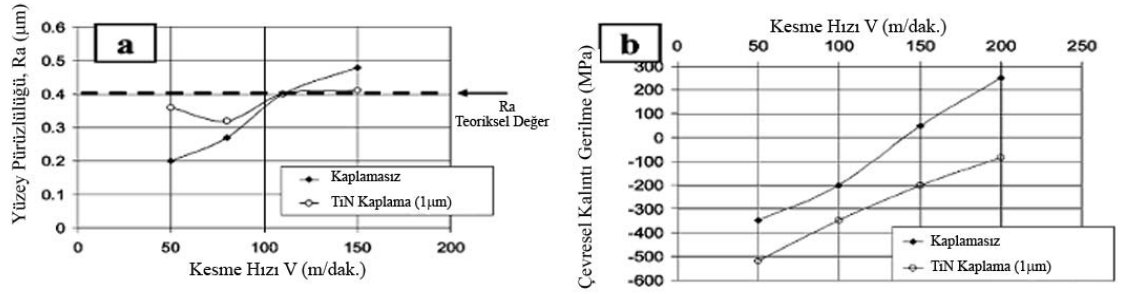


Şekil 4.14. Kaplamalı ve kaplamasız takımlar için yüzeydeki çevresel kalıntı gerilmeler [65]

Tornalamada oluşan kalıntı gerilmeler üzerinde takım ömrü ve yan yüzey aşınmasının etkisi son derece önemlidir. Çünkü aşınma sürtünmeyi artırır ve buna bağlı olarak sıcaklık artar. Sıcaklığın artması termal etkiler arttıracığından çekme kalıntı gerilmeleri ile sonuçlanır. Bu nedenle, kalıntı gerilmeler açısından kaplamalar

hem yüksek takım ömrü vermeli hem de yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmalıdır [174-177].

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi TiN kaplamalı takımda basma kalıntı gerilmeleri daha fazla çıkmıştır [161]. Kaplamanın faydası yüksek kesme hızları için kalıntı gerilmeler hususunda çok önemlidir. Bu iyileşme, takım talaş ara yüzündeki kesme sürtünme enerjisini ve ortalama kesme sıcaklığını azaltan TiN kaplamanın iyi tribolojik davranışlarına dayanmaktadır [110].



Şekil 4.15. Sert tornalamada TiN kaplamanın etkisi (27MnCr5, 850 HV, $a=0,15$ mm, TNGA 160408 S, $f=0,1$ mm/dev) [161]
a) Yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, b) Çevresel kalıntı gerilme üzerine etkisi

Hem kaplamalı hem de kaplamasız takımlar için yüksek sıcaklık seviyeleri kesme bölgesinde oluşmaktadır. İşlenmiş parçalarda belirlenmiş yüksek çekme kalıntı gerilme seviyelerinin çoğu oluşan bu yüksek sıcaklıktan kaynaklanmaktadır. Kaplamalı takımların düşük sürtünme katsayısı sıcaklık yükselmesini sınırlar ve yüzey gerilmelerindeki hafif bir düşüşü ve çekme katmanının kalınlığındaki azalmayı açıklayabilir [9].

Gerçekte, kaplama operasyonları takım ucu bölgesini yuvarlatma eğilimindedir ve takım radyüsünü artırır. Neticede bu, iş parçası ve takım ucu bölgesi arasında daha fazla etkileşime neden olabilir. Bu da kesme kenarının altında derin bir kesme (shearing) etkisini meydana getirebilir ve kesilmeyle etkilenmiş derinliği etkileyebilir [9].

Bu gözlemlerden, kaplamanın neden olduğu artmış takım yuvarlaklığından dolayı mekaniksel etkiler çoğalırken, sürtünmenin neden olduğu termal etkilerin iş parçasının yüzey bölgesi üzerinde temel bir katkıda bulunabileceği sonucu da çıkarılabilir. Bu, alt-yüzey altında çalışma sertleşmesinden sorumludur. İlave olarak takım kaplaması ile ilgili olduğu kadar mekaniksel etkiler de önemli bir rol oynamak için ortaya çıkarlar. TiN kaplanmış takım sürtünmeyi ve böylece iş parçasının sıcaklık seviyesini (800°C'den daha düşük) azaltıyor görünse bile, ciddi olarak gerinmiş bölgenin artan derinliği (%20 artış) ile kalıntı gerilme dağılımı da etkilenir [9].

Inconel 718'in tornalanmasında kullanılan CBN takımların oluşturduğu kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğü, kesme hızına kesme derinliğinden daha fazla duyarlıdır. Seramik takımlar CBN takımdan daha fazla çekme kalıntı gerilmesi oluşturur. Çünkü karma seramik takımlar çok kötü ısı iletkenliğe sahiptir. Seramik takımlarda soğutma sıvısı kullanılmadığından ısı etkilerin baskınlığından kaynaklanan yüksek çekme kalıntı gerilmeleri oluşacaktır. Oysa CBN için termal iletkenlik çok yüksektir ve soğutma sıvısının kullanım imkanı da termal etkileri azaltılır. Bu da düşük kalıntı gerilmelere neden olur. İleri doğru giden takımın önündeki plastik deformasyonla ve lokalize olmuş termal etkiler çekme kalıntı gerilmelerine neden olur [106].

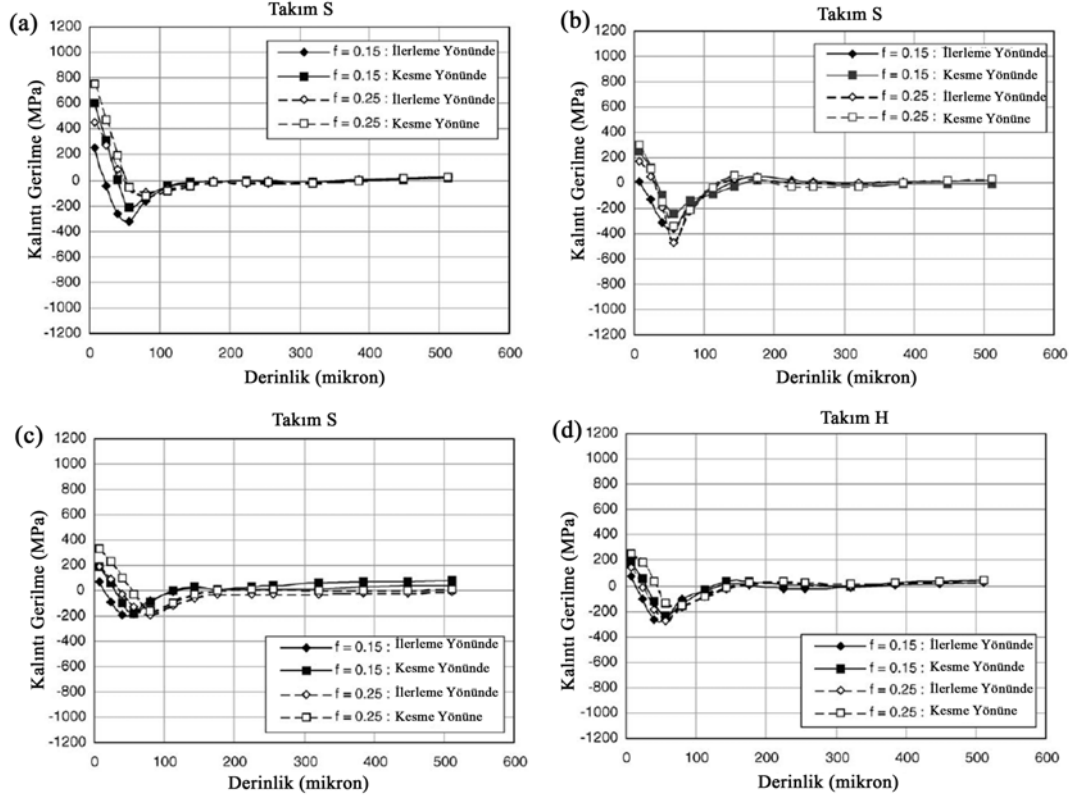
Kaplamalı kesici takımlarla bitirme operasyonları yüksek basma kalıntı gerilme değerleri oluşturmaz. Bu durumda, işleme sonunda parça yüzeyine bilyeleme gibi ilave operasyonlar uygulanarak istenilen basma kalıntı gerilmelerini oluşturmak tercih edilebilir. Aynı operasyon şartlarında, kaplamalı takım yerine kaplamasız tungsten takım kullanıldığında azalmış bir çekme katmanı altında daha derin basma gerilmeleri oluşturulur [107, 149].

Takım aşınmasının etkisi

Takım aşınması, işlenmiş yüzeyin etkilenmesinde önemli bir rol oynar [178]. Tönshoff ve ark., kesme hızının artışıyla çekme kalıntı gerilmelerinin ve beyaz

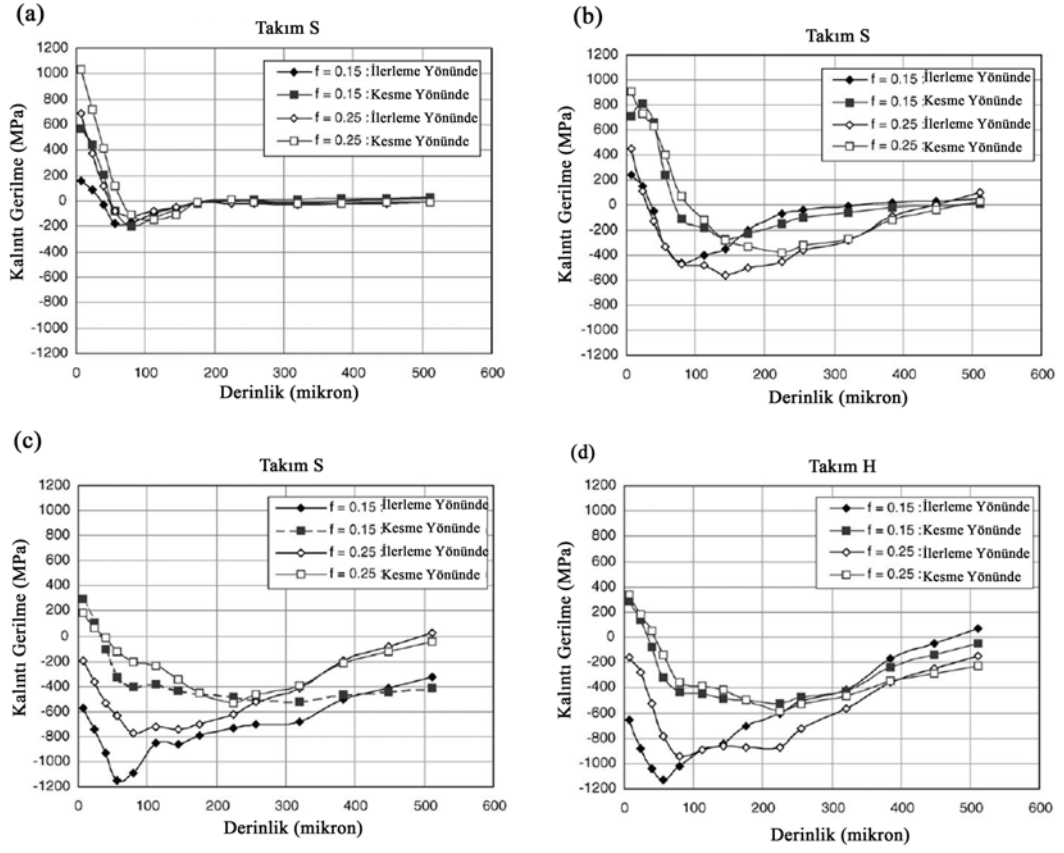
katman kalınlığının arttığını rapor ederken [179], Liu ve Brash, takım aşınmasından kaynaklanan ısınma etkisinin işlenmiş yüzeyin daha derin bölgelerinde kalıntı gerilme nüfuziyetine sebep olacağını tespit etmişlerdir [10].

Takım aşındıkça malzeme yüzeyindeki plastik deformasyonda da bir artışa neden olur ve sürtünme nedeniyle sıcaklık artar. Kör takım kullanıldığında kesme kuvvetleri epeyce artar. Aşınma ve kesme kuvveti artışına paralel olarak gerinim setleşme seviyesi ve deformasyon derinliği de artar. Yeni takım kullanıldığında tane sınırlarının plastik deformasyonu nispeten düşük gerçekleşir ve bütün numuneler yüzeye yakın katmanlarda pekleşir. Şekil 4.16'da keskin takım kullanımının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi gösterilmektedir. Kalıntı gerilmeler yüzeyde çekme gerilmesi şeklindedir ve derinlere inildikçe (50 μm derinlik içerisinde) hızla basma gerilmesine dönüşür ve yüzey altında (200 μm derinliğe kadar) artış devam eder. Aynı operasyon parametrelerinde, kaplamalı takımın oluşturduğu yüzey seramik kaplamanın kullanılmasından dolayı iş parçası yüzeyinde daha fazla ısı girmesine neden olarak daha fazla çekme gerilmesi oluşturur. Kesme hızı arttıkça yüzey kalıntı gerilmeleri düşer oysa ilerleme oranındaki bir artış hem yüzey çekme gerilemesinde hem de basma gerilmeli katmanın derinliğinde küçük bir artışa neden olmaktadır [107].



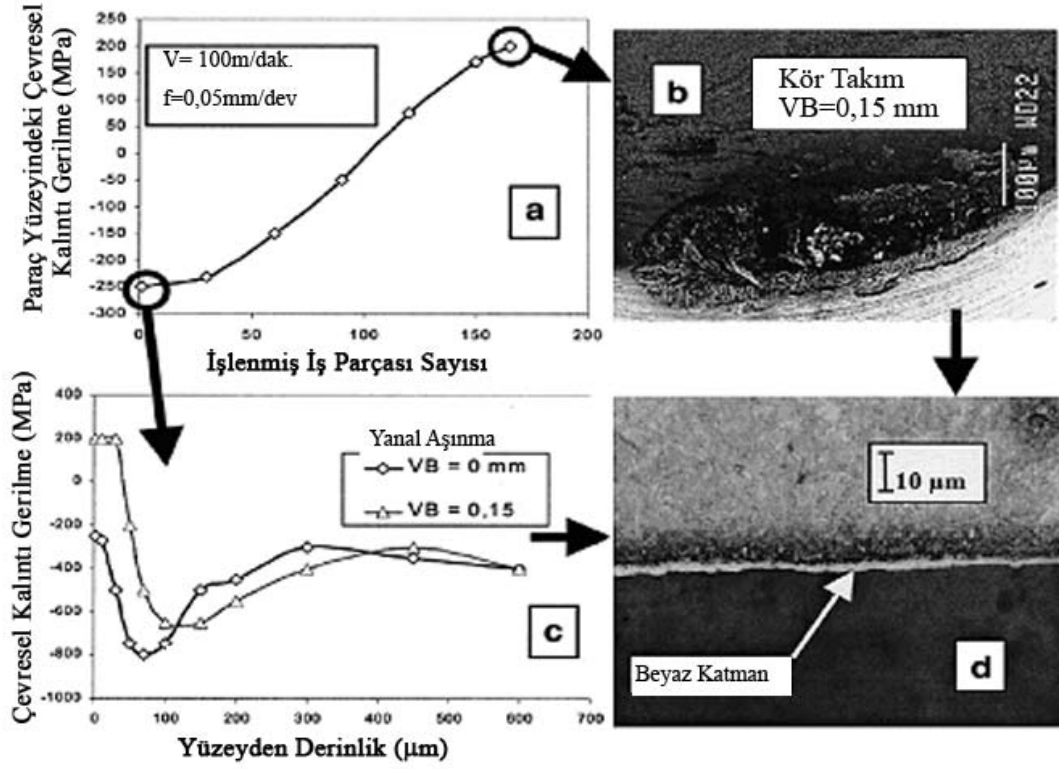
Şekil 4.16. Keskin takım kullanıldığında farklı kesme hızlarının ve ilerleme oranlarının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi; Takım S: $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ kaplamalı, Takım H: kaplamasız [107]
a) $V=40$ m/dak., b) $V=80$ m/dak., c) 120 m/dak., d) 40 m/dak.

Yüzey bütünlüğü üzerine en büyük etkiyi takım aşınması gösterir. Bu etki Şekil 4.17’de görülebilir. Aşınmadaki bir artış mikro yapının daha büyük plastik deformasyonuna, daha yüksek gerinim sertleşmesine ve kalıntı gerilme seviyesinin artmasına neden olur. Kör bir takımla kesme yapıldığında, yüzey çekme kalıntı gerilmeleri artacak peşinden daha büyük ve derin basma gerilmeli katmanlar oluşturacaktır. Bu, plastik deformasyondaki artışa dayandırılır ve sürtünme iş parçası yüzeyinde aşınmış takım yan yüzeyin sürtünmesinden kaynaklanan sıcaklık artışına neden olur. Bu sonuçlar takım aşınma seviyesinin kontrol edilmesinin ciddi tutulması gerektiğini ve uygun yüzey oluşumunu oluşturmak için aşınmanın minimum bir düzeyde tutulması gerektiğini göstermektedir [107].



Şekil 4.17. Kör takım kullanıldığında farklı kesme hızlarının ve ilerleme oranlarının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi; Takım S: $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ kaplamalı, Takım H: kaplamasız [107]
a) $V=40$ m/dak., b) $V=80$ m/dak., c) 120 m/dak., d) 40 m/dak.

Şekil 4.18, kalıntı gerilmeler üzerine yan yüzey aşınmasının etkisini gösterir. Yan yüzey aşınması arttıkça yüzey kalıntı gerilmelerinin de arttığı, aynı zamanda maksimum basma kalıntı gerilmelerinin yüzeyin daha da altında meydana geldiği görülebilir. Yan yüzey aşınması sürtünme enerjisinin seviyesini artırır ve böylece kesme sıcaklıkları artar. Bu, yeni takım kullanıldığında yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri oluştuğuna, oysa kör bir takım kullanıldığında yüzeyde çekme kalıntı gerilmelerinin oluştuğuna işaret eder. Şekil 4.18’de kalıntı gerilmelerin takım aşınmasıyla nasıl değiştiği de görülebilir. Takım aşınmasına bağlı sıcaklık artışı termal etkileri arttırdığından yüzeyde çekme kalıntı gerilmelerini artırır [161].



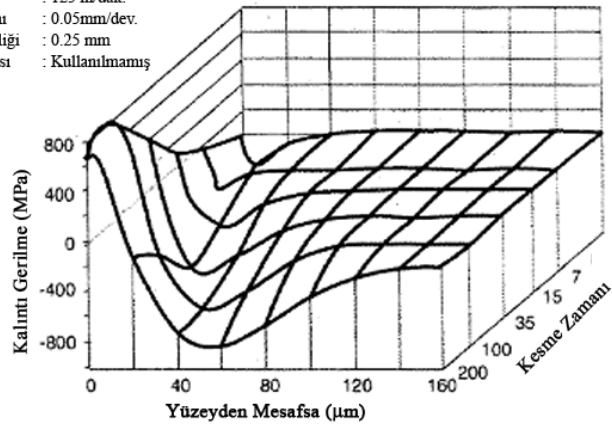
Şekil 4.18. Kalıntı gerilme profili üzerine takım aşınmasının etkisi [161]

a) İş parçasına bağlı çevresel kalıntı gerilme değişimi, b) Takımın yan yüzey aşınma miktarı, c) Tam aşınmasına bağlı çevresel kalıntı gerilme değişimi, d) Beyaz katman kalınlığı

Beyaz katmanlar sürtünme enerjisi ve ısıнын bir araya gelmesiyle ya takım aşınmasına bağlı kesmelerde ya da oldukça yüksek kesme hızlarında oluşur. Özellikle taşlama ve EDM işlemelerinde karşılaşılr. Kalıntı gerilmeleri çekmeye doğru değiştiren yan yüzey aşınmasının etkisi sert tornalamayı sınırlandırır ve beyaz katman oluşumun da artırır [161].

Şekil 4.19, takım aşınması gelişimiyle nüfuziyet derinliğine bağlı kalıntı gerilme değişimlerini göstermektedir. İşlenmiş yüzeydeki çekme kalıntı gerilmeleri takım yan yüzey aşınmasının neden olduğu iş parçası takım sürtünmesinin termal etkilerine dayanmaktadır [131].

İş Parçası Malz : 16MnCr5 E (62 HRC)
 Kesici Takım Malz : PCBN
 Kesme Hızı : 125 m/dak.
 İlerleme Oranı : 0.05mm/dev.
 Kesme Derinliği : 0.25 mm
 Soğutma Sıvısı : Kullanılmamış



Şekil 4.19. Takım ömrüne bağlı kalıntı gerilme ve nüfuziyet derinliğinin değişimi [131]

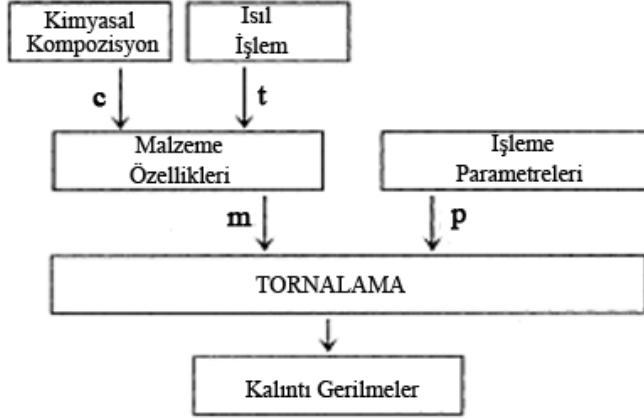
Kesme hızı ve ilerleme miktarı sıcaklık oluşumunu arttırmaktadır. Çünkü aşırı ısınan takımın aşınması da o derece hızlanmaktadır. Takım aşınması parçada sıcaklık artışına da sebep olacağından, aşınan takım parçaya daha çok sürtünecektir, bu da termal nedenli çekme kalıntı gerilmelerini oluşturacaktır. Bu nedenle, takımın üzerindeki girinti çıkıntılar, talaş kırıcılar, talaş-takım temasını azaltarak takım aşınmasını azaltmak ve takımın soğutulmasını kolaylaştırmak için kullanılmaktadır [181].

4.3.2. İş malzemesi türünün etkisi

Kalıntı gerilmeler zaman, sıcaklık, deformasyon ve mikro yapı arasındaki etkileşimlerin bir sonucudur [181]. Prensipde, kalıntı gerilmelerin elasto-plastik doğasından dolayı, genellikle çeliklerin elastik ve plastik doğasını (elastik modül, akma dayanımı, yüzde uzama vb.) karakterize etmek için kullanılmış bütün mekaniksel özellikler $m=m(c,t)$ vektörünün tanımlanmasına yardımcı olmaktadır [182].

Kısaca söylenen, çeliklerin mekaniksel karakteristikleri kimyasal kompozisyona bağlı mikro yapıya ve ısıtma işlem özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, burada c kimyasal

kompozisyon vektörü, t ısıtım işlem vektörünü tanımlar. Şekil 4.20’de iş malzemesi durumuna bağlı olarak kalıntı gerilmeyi etkileyen faktörler verilmiştir [182].



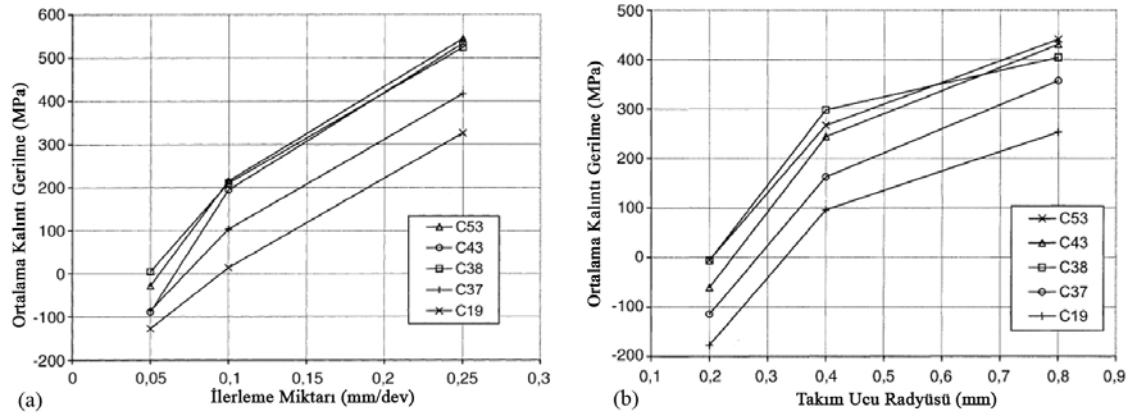
Şekil 4.20. Kalıntı gerilmeleri etkileyen faktörler [182]

Karbonlu çelik

Capello, gerçekleştirdiği çalışmasında farklı çeliklerin karbon oranının kalıntı gerilmeler üzerine etkisini araştırmıştır. Şekil 4.21, ilerleme ve takım ucu radyüsünün bir fonksiyonu olarak karbonlu çeliklerdeki kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiğini göstermektedir. İlerleme oranı arttırıldıkça kalıntı gerilme değeri de artmıştır. Bu artış uç radyüsü içinde böyledir. Kısacası seçilen işleme parametreleriyle, kullanılan tüm karbonlu çelikler için kalıntı gerilme seviyeleri aynı çıkmıştır [182]. Şekil 4.21, dikkatle incelendiğinde kalıntı gerilmeler ve karbon oranı arasında dengesiz bir ilişki olduğu görülmektedir. Kalıntı gerilmelerin ortalama seviyesi ile tek anlamlı ilişkinin bulunduğu kimyasal karakteristik

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4.1)$$

ile tanımlanan eş değer karbon miktarı (C_{eq}) ile ilişkilidir.



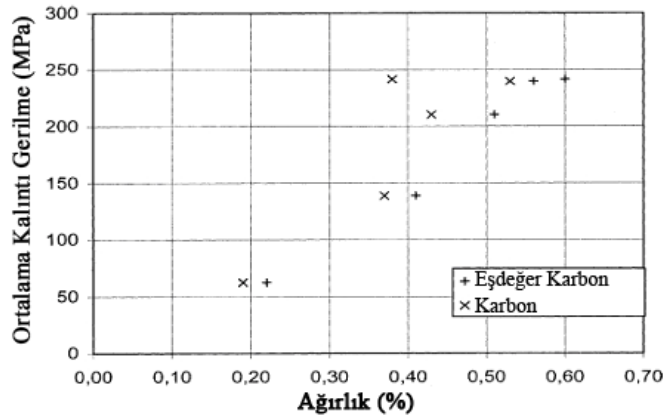
Şekil 4.21. Karbonlu çeliklerde kalıntı gerilmelerin temel etki grafikleri [182]

a) İlerleme miktarının etkisi, b) Uç radyüsünün etkisi

Çizelge 4.2’de çalışmada kullanılan malzemelerin eşdeğer karbon değerleri verilmiştir. Şekil 4.22, karbon oranı ve eşdeğer karbon ile ortalama kalıntı gerilme değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Eşdeğer karbon miktarı ile kalıntı gerilme değerlerinin daha uyumlu olduğu buradan görülebilir. Kalıntı gerilmelerin ortalama düzeyindeki artışa eşdeğer karbon oranı kılavuzluk eder ve bu ilişki hemen hemen lineerdir. Sonuç olarak, eşdeğer karbon miktarına göre karakterize edilebilir kalıntı gerilme seviyeleri tahmin edilebilir [182].

Çizelge 4.2. Karbon çeliklerinin eşdeğer karbon miktarları (C_{eq}) [182]

Çelik	C_{eq}
C19	0,22
C37	0,41
C38	0,60
C43	0,51
C50	0,56



Şekil 4.22. Karbon çeliği için ortalama kalıntı gerilmelerin bir fonksiyonu olarak karbon ve eşdeğer karbon içerikleri [182]

Alaşımlı çelik

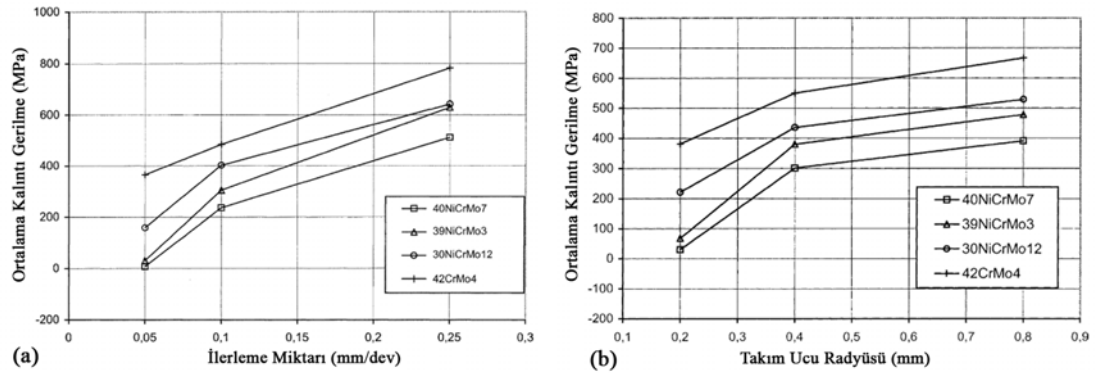
Capello' nun farklı çelik malzemelerde yaptığı çalışmada kullandığı alaşımlı çeliklerin mekanik özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir [182].

Çizelge 4.3. Araştırılan alaşımlı çeliklerin kimyasal ve mekaniksel özellikleri [182]

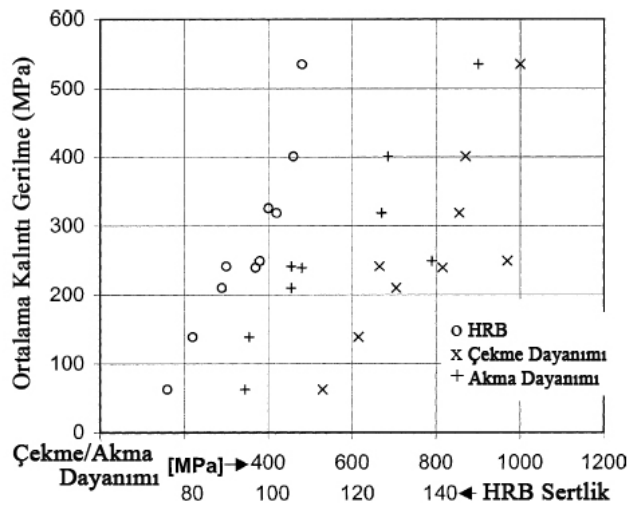
Çelik Türü	Mekanik Özellikler			
	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Uzama	Sertlik (BSD)
39NiCrMo3	855	670	14,7	102
42CrMo4	1000	900	13	107
30NiCrMo12	870	685	15,3	106
40NiCrMo7	970	790	11,1	98

Şekil 4.23, ilerleme miktarı ve uç radyüsü için ortalama etki grafiğini verir. Görüldüğü gibi işleme parametrelerinin etkisi aynı çıkmıştır (ilerleme oranı için 500 MPa, uç radyüsü için 380 MPa) ve işleme parametrelerinin ve malzeme karakteristiklerinin etkisi bir kez daha ayrılabilir[182].

Şekil 4.24'de Çizelge 4.3'de verilen mekaniksel özellikler ile ortalama seviyeler ilişkilendirilmiştir. Ortalama kalıntı gerilme seviyesi ile en iyi uyumun BSD sertlik değeri arasında olduğu bulunmuştur. Bu muhtemelen kalıntı gerilmelerin doğasına benzeyen sertlik değerinin elasto-plastik doğası ile olan ilişkisinden kaynaklanmaktadır [182].



Şekil 4.23. Alaşımli çeliklerde kalıntı gerilmelerin temel etki grafikleri [182]
(a) İlerleme miktarının etkisi (b) Uç radyüsünün etkisi



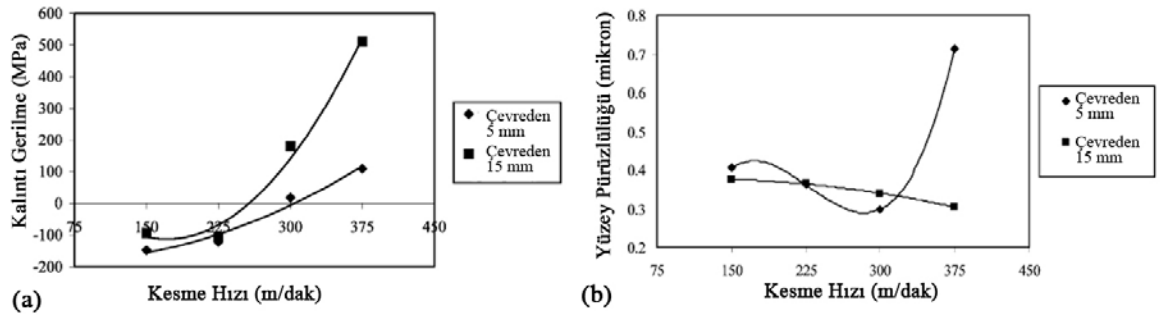
Şekil 4.24. Ortalama kalıntı gerilmenin bir fonksiyonu olarak karbon ve alaşımli çeliklerin mekaniksel karakteristikleri [182]

Sonuç olarak, işlenmiş malzemenin mekaniksel özellikleri kalıntı gerilmelerin seviyesini derinlemesine etkiler. Genellikle söylenen, mekanik özellikler arttığında, kalıntı gerilmelerin seviyesinin de artacağıdır. Çalışma parametrelerinin artmasının sebep olduğu kalıntı gerilmelerdeki artış işlenmiş malzemeyle etkilenmediği görülmektedir. Aynı ısıt işlemlerin uygulandığı karbon çelikleri için kimyasal kompozisyon indeksi (eşdeğer karbon oranı) kalıntı gerilmeler ile doğrudan ilişkilidir. Karakteristik indeks olarak eşdeğer karbon oranının anlamsız olduğu (büyük olmadığı için) alaşımli çelikler için kalıntı gerilmeler ile güçlü ilişkisi olduğu görülen mekaniksek karakteristik malzeme sertliğidir [182].

4.3.3. Kesme parametrelerinin etkisi

Kesme hızının etkisi

Şekil 4.25, CBN takımla Inconel 718 malzemesinin tornalanmasında kesme hızının artmasıyla kalıntı gerilmelerin basmadan çekmeye dönüştüğü görülmektedir. Bu, kesme hızı arttıkça kesmenin daha adyabatik olmaya başlamasından kaynaklanır: kesme bölgesi boyunca malzeme geçişinin çok kısa zaman aralığında gerçekleşmesinden dolayı bu adyabatik bölgedeki ısı oluşumu uzağa taşınamaz ve böylece sıcaklık artışı tane sınır dislokasyonuna yardımcı olarak metali yumuşatır ve kesme kuvvetini azaltır [106].



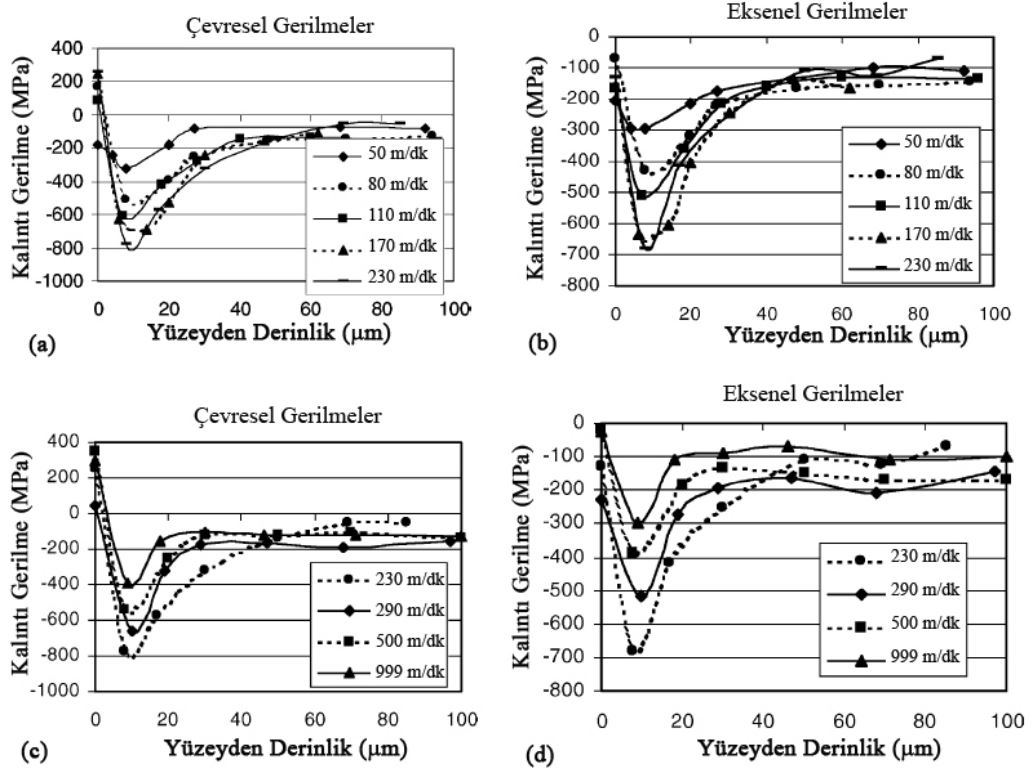
Şekil 4.25. CBN kesici takımın yüzey bütünlüğü üzerine etkisi [106]

a) Kesme hızının kalıntı gerilmeler üzerine etkisi, b) Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi

Kesme hızını değiştirmek çok yaygındır ve tornalama süreçlerinde değişiklikler yapar. Şekil 4.26, AISI 52100 çeliğin kalıntı gerilme grafiklerini göstermektedir. Bu çalışmada, kesme derinliği ve ilerleme sabit olup CBN takımla kesme yapılmış ve her işlemede takım aşınmasını elimine etmek için ayrı bir uç kullanılmıştır. Yüzey oluşumu işleme şartlarına bağlıdır. Bu çalışmada, kesme hızlarının kalıntı gerilmeleri nasıl etkilediği gösterilmiştir. Sonuçların çoğunda beynitik AISI 52100 çeliğin işlenmesinde basma kalıntı gerilmeleri oluşmuştur. Kalıntı gerilme oluşturulduğunda, yüzey ve yüzey altına giren gerilmeler üzerinde hem ısı oluşumu hem de mekaniksel iş etkisi vardır. Kesme hızı arttırıldığında süreç içindeki gerinim oranı da arttırılır, bu da daha fazla mekaniksel iş üretir ve basma gerilmesine neden olur. Kesme hızı daha da arttırıldığında, daha fazla ısı oluşur, bu da yüzeyde çekmelerin oluşum eğilimini

arttırır. Bu, kesme hızının artırılmasındaki etkiyi açıklar. Sonuç olarak, beynitik yapıdaki çelik tornalandığında; derinlik boyunca aynı gerilme profilleri gözlenir, kesme hızı kalıntı gerilmenin miktarını etkiler, kesme hızını daha da arttırmak bu artışı tersine çevirir [183].

Farklı kesme hızları farklı kesme kuvvetleri üretir ve işlenmiş yüzeyin düzgünlüğünü etkiler. Küçük kesme hızları ve büyük kesme kuvvetleri işlenmiş yüzeyde daha belirgin deformasyona neden olan oldukça büyük çekme kuvvetleri ortaya çıkarır. Bu nedenle de yüzeyde basma kalıntı gerilmelerinin oluşumu için daha baskın bir durum ortaya çıkar [184].

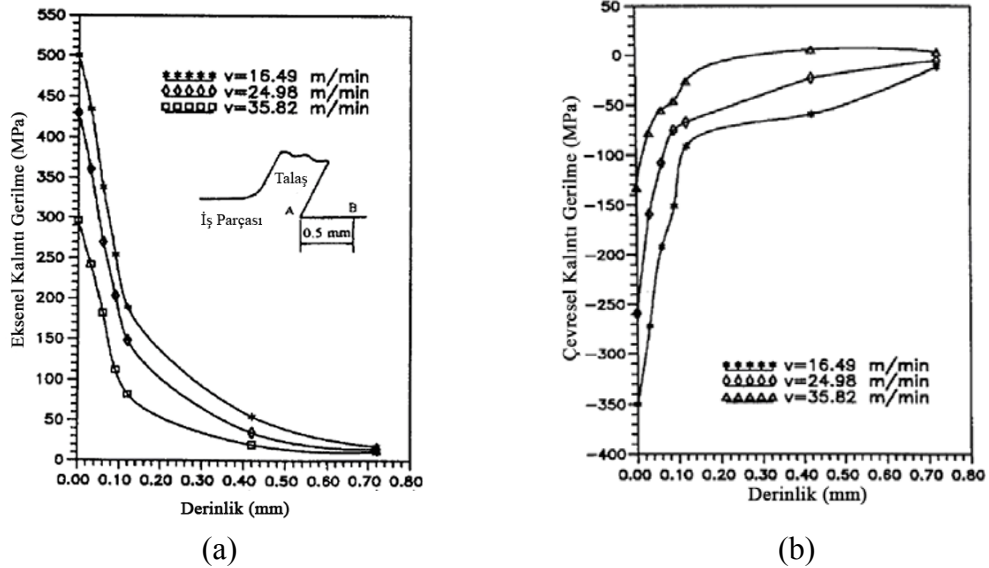


Şekil 4.26. Kesme hızına bağlı kalıntı gerilme değişimleri [183]

- a) Düşük ve orta kesme hızlarında çevresel kalıntı gerilmeler, b) Düşük ve orta kesme hızlarında eksenel kalıntı gerilmeler, c) Yüksek kesme hızlarında çevresel kalıntı gerilmeler, d) Yüksek kesme hızlarında çevresel kalıntı gerilmeler

Şekil 4.27a, işlenmiş yüzey ve yüzey altındaki eksenel gerilmelerin kesme hızına bağlı dağılımını gösterir. Şekilden de görüldüğü gibi kesme hızı arttıkça eksenel gerilmelerinin değeri de azalır. Üç kesme hızı 16,49, 24,98 ve 35,82 m/dak için maksimum değerler sırasıyla 500, 430 ve 295 MPa dır. eksenel gerilmelerinin maksimum değerleri arasındaki fark ilk iki hız için 70 MPa iken en büyük hızda bu fark 135 MPa'dır. Diğer bir değişle, kesme hızının 35,82 m/dak'ya çıkarılması boyuna gerilmelerinin maksimum değerini düşürmekte çok etkilidir [185].

Şekil 4.27b, çevresel kalıntı gerilmelerin kesme hızına bağlı dağılımını gösterir. Şekilde kesme hızı arttıkça çevresel gerimenin maksimum değeri de azalır. Sonuç olarak takım aşınma uzunluğunun aynı olduğu durumlarda yüzeydeki basma kalıntı gerilme değeri düşük kesme hızındakilerden daha büyüktür. Maksimum basma kalıntı gerilmesi 16,49 ve 24,98 m/dak kesme hızları için birbirine daha yakındır; sırasıyla -350 MPa ve -260 MPa. Kesme hızı 35,82 m/dak çıkarıldığında maksimum kalıntı basma gerilmesinin değeri -135 m/dak'ya düşer [185].

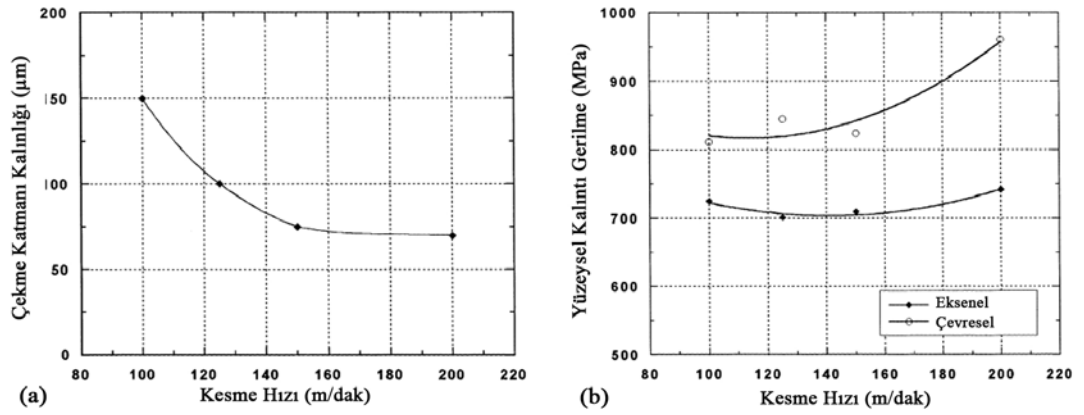


Şekil 4.27. Kesme hızına bağlı kalıntı gerilme dağılımı [185]

a) Eksenel kalıntı gerilmeler, b) Çevresel kalıntı gerilmeler

Şekil 4.28'de AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında farklı kesme hızlarının kalıntı gerilmeler ve çekme katmanını derinliği üzerine etkisi grafiksel olarak görülmektedir AISI 316L paslanmaz çeliğin işlenmesinde kesme hızının arttırılması

yüzey kalıntı gerilmelerinin büyümesine ve çekme katmanının kalınlığının küçülmesine neden olmuştur [9]. Yüksek kesme hızları daha büyük bir ısı çıkışına neden olduğundan, kesme hızıyla beraber artmaya meyilli olan kesme bölgesindeki talaş akış hızı kesme hızının etkisini açıklar. Bunun dışında, iş parçası malzemesinin düşük termal yayılıma sahip olması, sadece küçük miktarda bir ısının takım ve iş parçasına geçtiğini, ısının büyük kısmının ise talaşla dışarı atıldığı anlamına gelir. Bu, artan yüzey gerilmeleriyle söz konusu bölgedeki kesme enerjisinde, sadece iş parçası yüzey bölgesini etkileyecek yeterlilikte, küçük bir artışa neden olur. Bu nedenle, çekme katmanının kalınlığında bir azalmaya neden olur. Bu durum, talaş sıcaklığında büyük bir artışın olduğu bunun yanında takım/iş parçası ara yüzeyinde ise küçük bir artışın varlığını gösteren gözlemler deneysel termal analizlerle uyum içindedir. Bu, iş parçasının ısıl etkilemiş bölgesinde bir azalmaya neden olan ısının büyük bir kısmının talaşla atıldığını vurgular [9].



Şekil 4.28. Kesme hızının kalıntı gerilme bileşenleri üzerine etkisi [9]
a) Çekme katmanı derinliği üzerine etkisi, b) Yüzey kalıntı gerilmeleri üzerine etkisi

İşlenmiş iş parçası kalitesinin temel göstergeleri geometrik yüzey bütünlüğü (yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hassasiyet) ve fiziksel yüzey bütünlüğüdür (mikro yapı, sertlik ve kalıntı gerilmeler). Kesme hızının artmasıyla talaş kalınlığı ve talaş parçasının büyüklüğü azalırken talaş ayrılma frekansı da artar. Aynı zamanda, deforme olmuş talaş parçasının büyüklüğü de azalır. Kesme hızı arttıkça, plastik

deformasyon süreci esnasında termal olarak yumuşayan malzeme daha fazla olur [186].

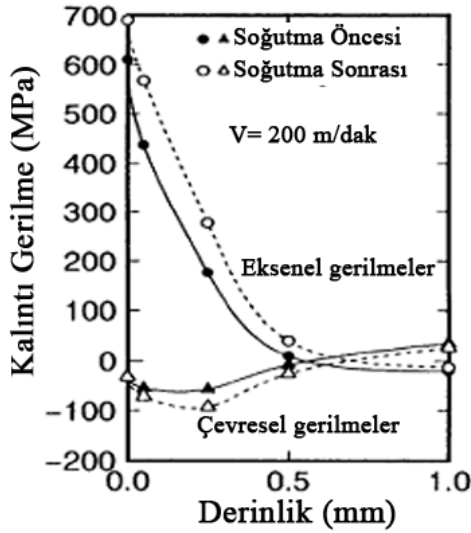
Kesme sıcaklığının etkisi

Takımın daha erken kırılmasına sebep olan yüksek kesme sıcaklığı büyük kapasiteli imalatlar için ilerleme ve kesme hızı artışını genellikle sınırlar. Hassas işlemede, ürünün biçim hassasiyetini ve boyutunu bozan, ayrıca yüzey ve yüzey altında çekme kalıntı gerilmelerinin gelişmesiyle parçanın yüzey bütünlüğünün bozulmasına neden olan temel problem yüksek kesme sıcaklığıdır [181].

Kalıntı gerilmeler yüzey katmanlarının deformasyonundan kaynaklanır. Birincil kesme bölgesinde, malzeme basma hidrostatik basıncı altında kesilir. Kesici kenar yuvarlaklığı ihmal edilirse, bu durum çekme kalıntı gerilmelerine neden olur. Çünkü alt katman deformasyona karşı koyarken, yüzey katmanları sıkıştırılmıştır ve plastik olarak deforme edilmiştir. Kesme sürecinin sebep olduğu kalıntı gerilme bu şekilde simule edilebilir [127].

Şekil 4.29, işlendikten sonra pirinç malzemenin yeni yüzey katmanları içerisindeki kalıntı gerilme dağılımını göstermektedir. Kesme doğrultusu boyunca kalıntı çekme gerilmesi oluşur. Soğuma öncesi durum takım geçtikten hemen sonraki gerilmelerin durumunu gösterirken, soğuma sonrası işlenmiş yüzeyin oda sıcaklığına eriştiği andaki gerilmelerin durumunu gösterir. İş parçası oda sıcaklığına soğutulduğunda, termal büzülme nedeniyle çekme gerilmeleri artar. Kesme doğrultusundaki kalıntı çekme gerilmeleri bu durumda baskındır [127].

Metal kesilirken kesici takım tarafından yapılan toplam iş kesici takım üzerindeki kuvvet bileşenlerinden belirlenebilir. Tahminen bu iş veya enerjinin hepsi talaş, takım veya iş parçası içerisine dağıtılan ısıya dönüştürülür. Takımın aşınması kesme kuvvetleriyle ilişkilidir [187].



Şekil 4.29. Kesme sonrası kalıntı gerilmeler [127]

Kesme hızı arttırılması kesme kuvvetlerinde ve işlenmiş yüzey sıcaklıklarında bir azalmaya neden olur. Sıcaklıktaki bu azalma talaş tarafından daha fazla ısı taşınması ve böylece iş parçası içerisine dağıtılacak ısısının daha düşük olması ile sonuçlanan yüksek metal kaldırma miktarına dayandırılabilir. Kullanılan iş malzemesinin yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasıyla bu düşük sıcaklıklar takım kesici kenarından daha hızlı yok edilebilir [187].

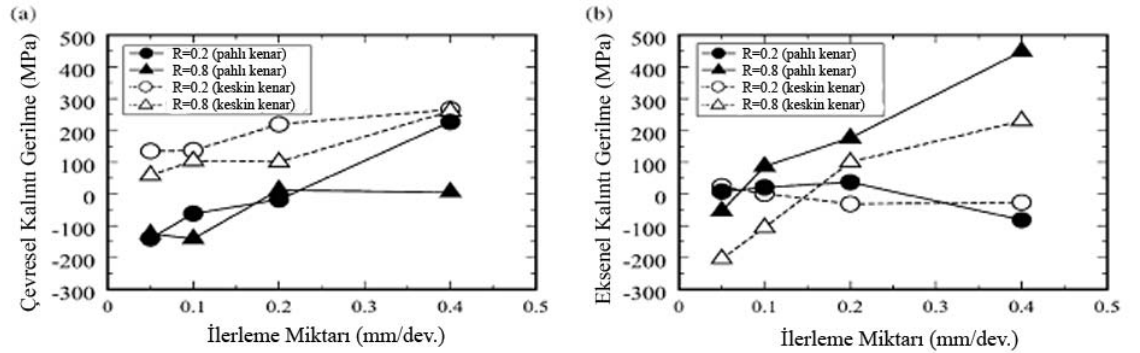
Kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerindeki azalma talaş kalınlığındaki azalmaya dayandırılabilir. Kuvvetlerdeki düşüşün temas alanında azalmaya ve takım iş parçası arasındaki kesme dayanımında bir düşüşe neden olduğu da varsayılmaktadır [188].

İlerleme miktarının etkisi

Şekil 4.30, AISI 4340 çeliğin işlenmiş yüzeyindeki kalıntı gerilme değerlerinin ilerleme miktarına bağlı değişimlerini göstermektedir. Ölçümler eksenel ve çevresel doğrultularda gerçekleştirilmiştir. Eksenel doğrultular boyunca olan kalıntı gerilme milin yorulma ömrünü etkilemektedir [35].

Bu ölçüm sonuçlarından genellikle ilerleme miktarı arttıkça çekme kalıntı gerilmesinin de arttığı görülmektedir. Şekil 4.30a’da pahlı takım ile işlenmiş parçanın çevresel doğrultudaki gerilmesi keskin kenarlı takım ile işlenmiş parçadan daha fazla basma şeklinde olduğunu görülmektedir [35].

Şekil 4.30b’de görüldüğü gibi uç radyüsü arttığında aksel doğrultudaki kalıntı gerilme çevresel doğrultudakinden biraz farklıdır. 0,8 mm lik uç radyüslü takım kullanıldığı zaman kalıntı gerilmenin eğilimi çevresel doğrultudakine benzer. İlerleme miktarı arttıkça çekme kalıntı gerilmesi artar. Diğer taraftan 0,2 mm uç radyüsüne sahip takım kullanıldığında, kalıntı gerilme sıfıra yakın (ya da basma şeklinde) seyrederek ilerleme miktarı arttırılsa bile böyle devam eder. Pahlı veya keskin kenarlı takım ile işlemede elde edilen kalıntı gerilme sonuçları arasında küçük farklar vardır [35].

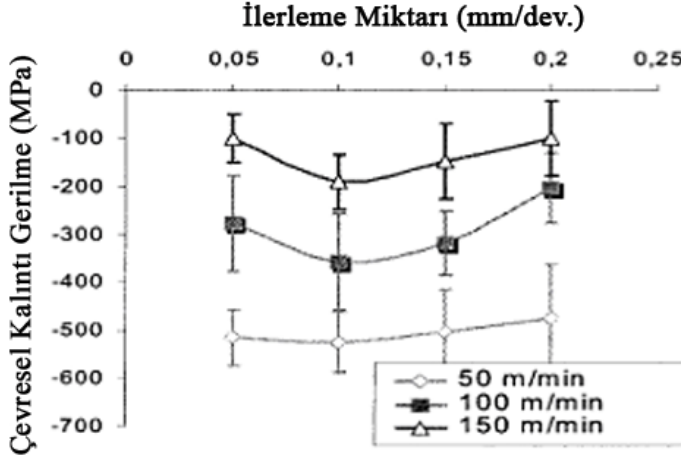


Şekil 4.30. İlerleme miktarının işlenmiş yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [35]

a) Çevresel kalıntı gerilmeler, b) Eksenel Kalıntı gerilmeler

Şekil 4.31, 27MnCr5 çeliğin işlenmesinde çevresel kalıntı gerilmeler üzerine ilerleme miktarının etkisini gösterir. 0,05 ile 0,1 mm/dev. sınırında yüzeye yakın kalıntı gerilmeler ilerleme arttıkça basmaya doğru yer değiştirmiştir. Diğer yandan 0,1 ile 0,2 mm/dev arasında yüzeye yakın kalıntı gerilmeler ilerleme miktarı arttıkça çekmeye doğru yaklaşmıştır. Düşük ilerleme miktarlarında küçük talaş kalınlığı ve kesici kenar radyüsü arasındaki ilişkiyle ilerleme miktarının sınırı açıklanabilir. Buradan, ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü üzerinde ki en önemli parametreyken

kesme hızı kalıntı gerilme seviyesini etkileyen temel parametre olarak ortaya çıkar [161].

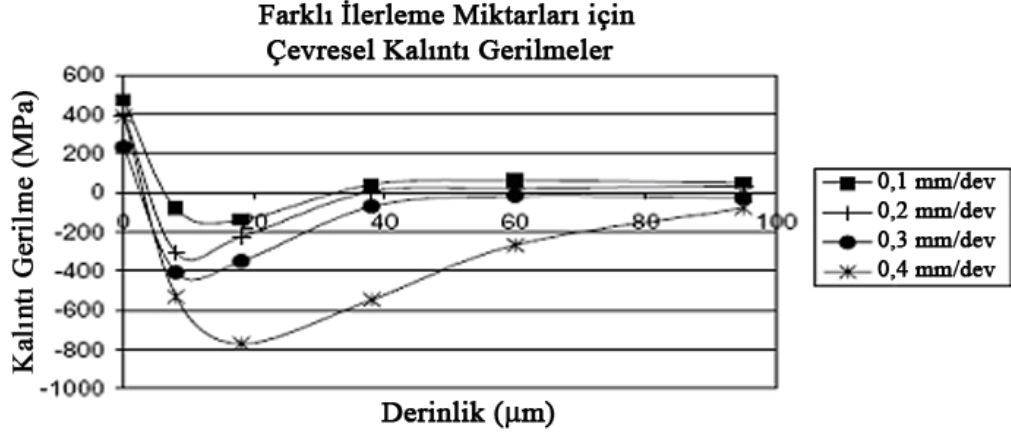


Şekil 4.31. Çevresel kalıntı gerilmeler üzerine ilerleme miktarı ve kesme hızının etkisi [161]

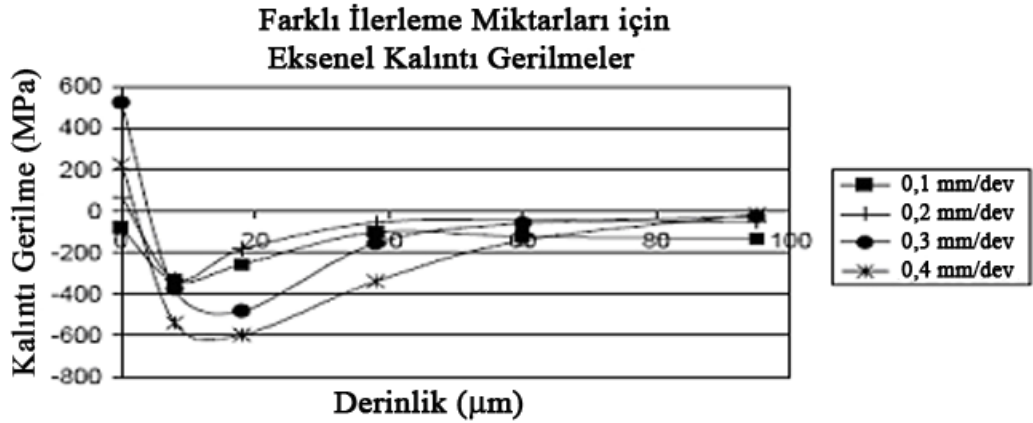
AISI 52100 çeliğin işlenmesinde, kalıntı gerilmeler ve arttırılmış ilerleme miktarını arasında net bir ilişki bulunmuştur. Hız doğrultusundaki (çevresel) gerilme analizi yapıldığında bu ilişki Şekil 4.32'den net olarak görülür. Örneğin ilerleme 0,1 mm/dev için, maksimum gerilme 15 μ m derinlikte meydana gelir. bu $f=0,2$ ve 0,3 mm/dev içinde aynıdır. Buna karşın, 0,5 mm/dev ilerleme için maksimum değer 20 μ m derinliğe erişince ortaya çıkar [174]. Yüzey altındaki basma gerilmelerinin seviyesi yüksek ilerleme miktarıyla sabit olarak artar. Bu, yüksek ilerleme miktarının yüksek kesme kuvvetleri ve böylece daha fazla plastik deformasyon oluşturmasının bir sonucu olabilir [14, 107].

Şekil 4.33'de ilerleme doğrultusunda (eksenel) yüzeyde ölçülmüş gerilme seviyelerinde büyük bir sıçrama vardır. İlerleme miktarı 0,1 mm/dev'den 0,5 mm/dev'e çıktığında yüzeydeki gerilmeler -80 MPa'dan 220 MPa'a çıkmıştır. 0,1 ve 0,2 mm/dev değerleri birbirleriyle çok yakındır. Buna karşın, daha yüksek ilerlemelerle çalışıldığında, yüksek ilerlemelerle maksimum basma gerilmelerinin arttığı yine Şekil 4.33'de net olarak görülebilir [174]. AISI 52100 üzerine yapılmış

çalışmalar ilerleme miktarı arttıkça kalıntı gerilmelerin basmadan çekmeye dönüştüğünü doğrulamaktadır. [11, 164, 174].



Şekil 4.32. Farklı ilerleme miktarlarının çevresel kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [174]

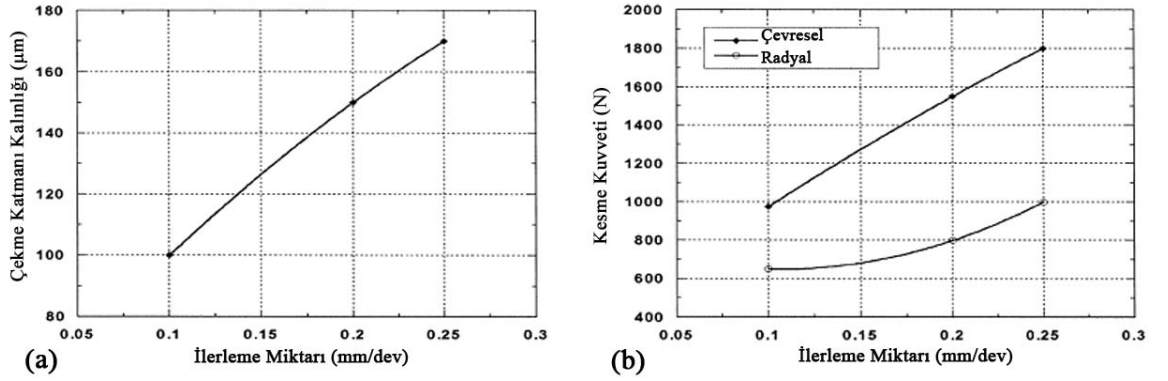


Şekil 4.33. İlerleme miktarlarının eksenel kalıntı gerilmeler üzerine etkisi [174]

Yüzey kalıntı gerilmelerinin oluşumu üzerine ilerleme miktarının etkisi nispeten küçüktür [9]. Yinede, ilerleme miktarı değerlerindeki artışın yüzey altındaki basma gerilmelerini ve çekme katmanının kalınlığını arttırmaya eğilimli olduğunu gösterir. İşleme sonrası daha büyük elastik gevşemenin ortaya çıkması, kesme kenarı altına yerleşmiş iş parçası civarındaki basma bölgesinin büyümesine sebep olan mekaniksel

etki ile açıklanabilir. Basma gerilme değerinin büyümesi bu bölgede yeniden dağılmış gerilmelerle ilgilidir [8].

Şekil 4.34 mekaniksel etkilerin sadece yüzey çekme gerilmelerinde değil yüzey altında da bir rol oynadığını göstermektedir. Termal etkiler daha çok iş parçasının yüzeyinde yer almaktadır [9].



Şekil 4.34. İlerleme miktarının kalıntı gerilme bileşenleri üzerine etkisi [9]
a) Çekme katmanı kalınlığı üzerine etkisi, b) Kesme kuvvetleri üzerine etkisi

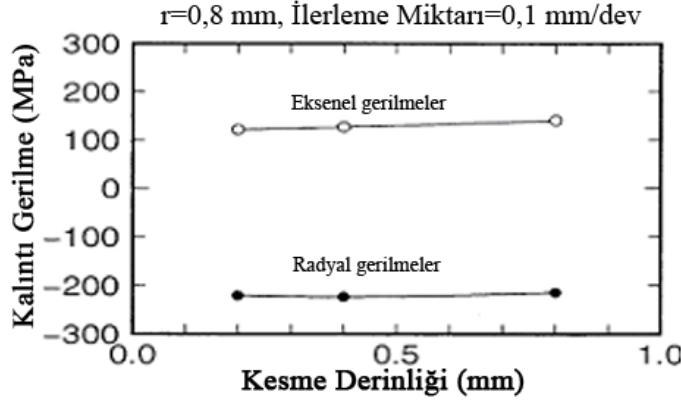
İlerleme miktarı, kalıntı gerilme profilinin biçimi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (sıkıştırılmış noktanın derinliği; kesme etkilenmiş bölge). İlerleme miktarı arttıkça, bu parametre sıcaklık seviyelerini artırır ve talaş oluşumunu pozitif olarak da kontrol eder. Bu durumda mekaniksel ve termal etkiler tamamen bağımsız işler [9].

Talaş derinliğinin etkisi

Şekil 4.35, kesme derinliğinin kalıntı gerilmeler üzerine etkisini göstermektedir. Burada, kesme derinliğinin değişmesi ile kalıntı gerilmelerin değişmediği görülebilir [127].

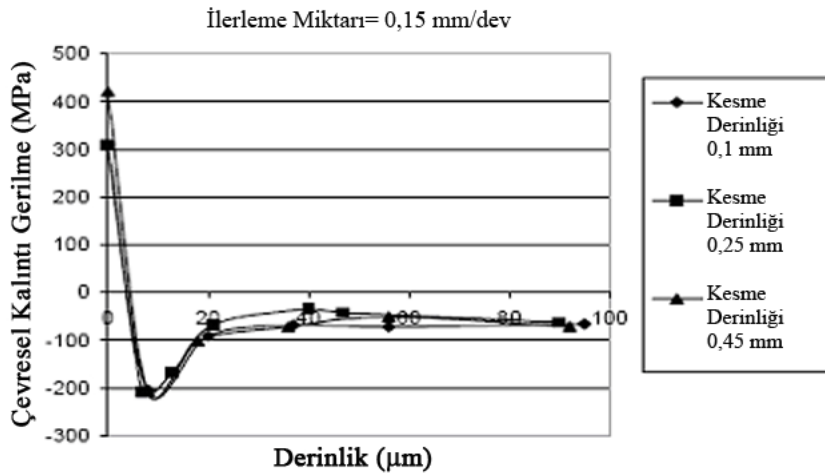
Kesme derinliği değiştiğinde kesme kuvvetleri ve talaş-akış doğrultusunun da değiştiği çok iyi bilinir. Fakat, yeni bitirilmiş yüzeyin oluşturulduğu yerdeki takım ucuna yakın deformasyon durumunun büyük ölçüde etkilenmemiş olduğu varsayılır. Kesme derinliği arttırıldıkça takım ucundan başka kesme alanı da genişlemeye

başlar, fakat bitirilmiş yüzeyin deformasyon durumu aynı kalır. Bu nedenle eğer kesme derinliği değişirse, kalıntı gerilme nerdeyse değişmeden sabit kalır [127].



Şekil 4.35. Alın tornalamada ölçülmüş kalıntı gerilme ($r=0,8$ mm, $f= 0,1$ mm/dev) [127]

Şekil 4.36'da farklı kesme derinliklerindeki kesme (hız) doğrultusundaki çevresel kalıntı gerilme değişimi gösterilmektedir. Hız doğrultusunda ki kalıntı gerilmelerde kesme derinliğine bağlı bir artış görülmemektedir. Farklı kesme derinlikleri kalıntı gerilmeleri etkilememektedir. Kesme derinliği arttığında sadece eksenel kuvvet bir miktar artar. Buna karşılık, teğetsel kuvvet kesme derinliği ile doğrudan uyumludur fakat alt yüzey deformasyonuna yardımcı olmaz. Bu nedenle de, kalıntı gerilmeler etkilenmez [105].

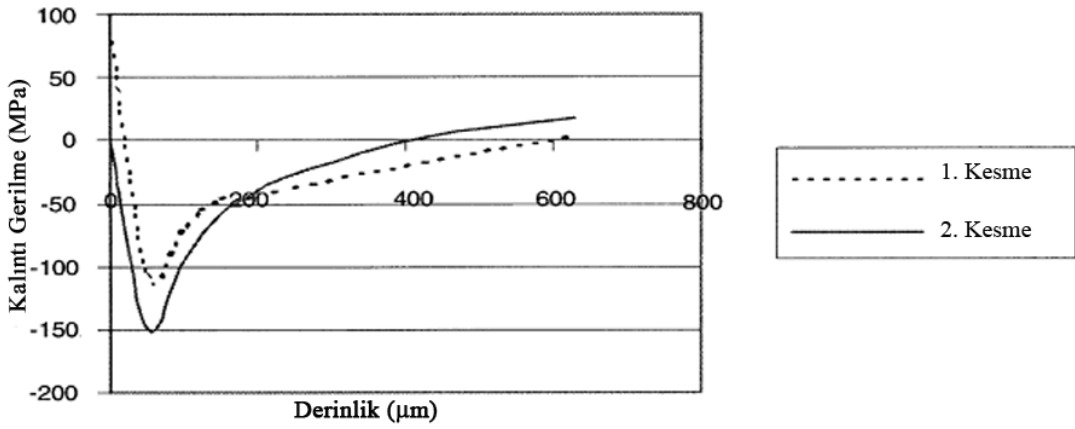


Şekil 4.36. Farklı kesme derinlikleri için çevresel kalıntı gerilmelerdeki değişim [105]

Paso sayısının etkisi

Paso sayısı etkisi kalıntı gerilmeyi etkiler. Tornalama operasyonlarında, bir önceki operasyonla etkilenmiş katman talaşla birlikte kaldırılır. Kaldırılan katman ana malzemeden serttir ve bir kalıntı gerilme seviyesine sahiptir, buda talaş oluşum sürecini etkiler ve kalıntı gerilmelerin değişmesine neden olur. Bu nedenle, kalıntı gerilmeler iş malzemesinin gerilme-gerinim ilişkisine de geniş ölçüde bağlıdır [28, 35].

Liu ve Guo, paso sayısının (kesme sayısının) ve takım-talaş sürtünmesinin kalıntı gerilmeler üzerine etkisini termo-elastik-viskoplastik model kullanarak incelemiştir. İlk paso ile etkilenmiş katman talaş kalınlığını, kesme kuvvetlerini, kalıntı gerinimi ve işlenmiş katmanın sıcaklığını çok az değiştirir, fakat ikinci paso kalıntı gerilme dağılım oluşumunu belirgin bir şekilde etkiler (Şekil 4.37) [29].



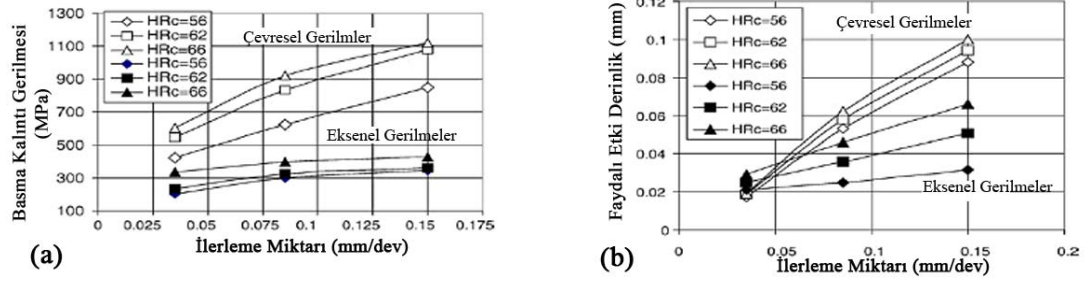
Şekil 4.37. Paso sayısının çevresel kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi [29]

İlave olarak, kaba işlemeden ince işlemeye geçerek peş peşe işleme esnasında, tornalama ve frezeleme gibi işlem operasyonlarında birbirini takip eden kesmeyle etkilenmiş yüzeyler oluşturulur ve bunlar peş peşe kaldırılır [127]. İşlenmiş yüzey katmanlarındaki kalıntı gerilme ya da pekleşmiş katman talaş oluşum sürecini etkiler. Böylece, pekleşmiş katman işlendiğinde, genellikle kesme açısı artar ve kalıntı gerilme azalır [28, 29].

İş malzemesi sertliğinin etkisi

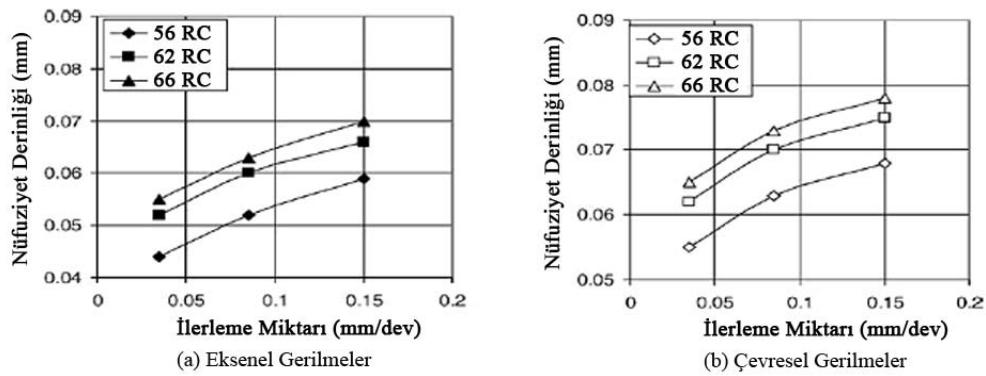
Matsumoto ve ark., uzun yorulma ömrü elde etmek için sert tornalama prosedürlerinin basma kalıntı gerilmeleri oluşturması gerektiği sonucuna varmıştır [110]. Ayrıca onlara göre, ortaya çıkan kalıntı gerilme profilini etkileyen baskın faktörün kesici kenar geometrisi olduğunu da belirlemişlerdir. Benzer olarak, Abrao ve Aspinwall, taşlanmış bileşenlerle karşılaştırıldığında sert tornalanmanın bileşenlerin yorulma ömürlerini geliştirdiğini belirtmişlerdir [189]. Fujimoto ve Ohhata, sert tornalamanın yorulma ömrünün 3~7 kez geliştiğinin rapor etmişlerdir [190]. Sert tornalamanın amacı taşlama operasyonunun yerini alarak yorulma ömrünü geliştirme olanağına sahip olmasıdır [183]. Ayrıca, Sert malzemelerin işlenmesi sertlik, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi önemli malzeme özelliklerini de etkiler [191].

Şekil 4.38a, farklı sertlikteki malzemelerin işlenmesi sonucunda iş parçasının alt yüzeylerinde oluşan maksimum kalıntı gerilmeler üzerine ilerleme miktarının etkisini göstermektedir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi eksenel ve çevresel kalıntı gerilmeler ilerleme miktarındaki artışla daha basma özellikli olmuştur. Diğer bir deyişle ilerleme miktarı arttıkça alt yüzeylerdeki basma kalıntı gerilmeleri de artmıştır. Bunun nedeni, daha büyük ilerleme miktarlarının daha büyük plastik deformasyon meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır. Farklı sertliklerdeki malzemeler için faydalı derinlik (basmadan çekmeye dönüştüğü derinlik) ilerleme miktarıyla artmıştır (Şekil 4.38b). Bu, yüksek ilerleme miktarlarının alt yüzeylerdeki büyük basma kalıntı gerilmeleri oluşturmasındandır. İşleme esnasında ağır basma deformasyonu kesici kenarın önünde ve çevresinde meydana gelir. Diğer bir deyişle kesici kenar geçtiğinde, çekme deformasyonu genellikle kesici kenarın arkasında oluşur. Eğer zorlayıcı çekme deformasyonunun mutlak değeri kesme kenarıyla önceden oluşturulmuş bir basma deformasyonun değerinden büyükse, işlenmiş yüzey/alt yüzey de bir basma kalıntı gerilmesiyle sonuçlanır. En yüksek ilerleme miktarı çok daha derin çekme deformasyonu oluşturacaktır. Böylece, daha yüksek basma kalıntı gerilmesi ve daha büyük faydalı bir derinlik elde edilecektir [66, 192].



Şekil 4.38. Malzeme sertliğinin ilerleme miktarına bağlı olarak kalıntı gerilme bileşenleri üzerine etkisi [66]
a) Basma kalıntı gerilmeleri üzerine etkisi, b) Faydalı derinlik üzerine etkisi

Şekil 4.39, farklı sertlikteki malzemelerin farklı ilerlemelerle tornalanmasında oluşmuş maksimum basma kalıntı gerilmelerinin nüfuziyet derinliğini göstermektedir. Farklı sertlikler için, nüfuziyet derinliği üzerine ilerleme miktarının etkisi belirleyicidir. Hem eksenel hem de çevresel doğrultudaki nüfuziyet derinliği ilerleme ile doğrusal olarak artar. Sertlik 56 RC'den 62 RC'ye çıktığında nüfuziyet derinliğindeki artış, sertlik 62 RC'den 66 RC'ye çıktığındakinden daha büyüktür. Neticede, nüfuziyet derinliğindeki artış düşük sertlikteki artıştan küçük olacaktır. Bunun nedeni, yüksek sertliklerde çalışma sertleşmesinin azalmasından olabilir [66, 192].

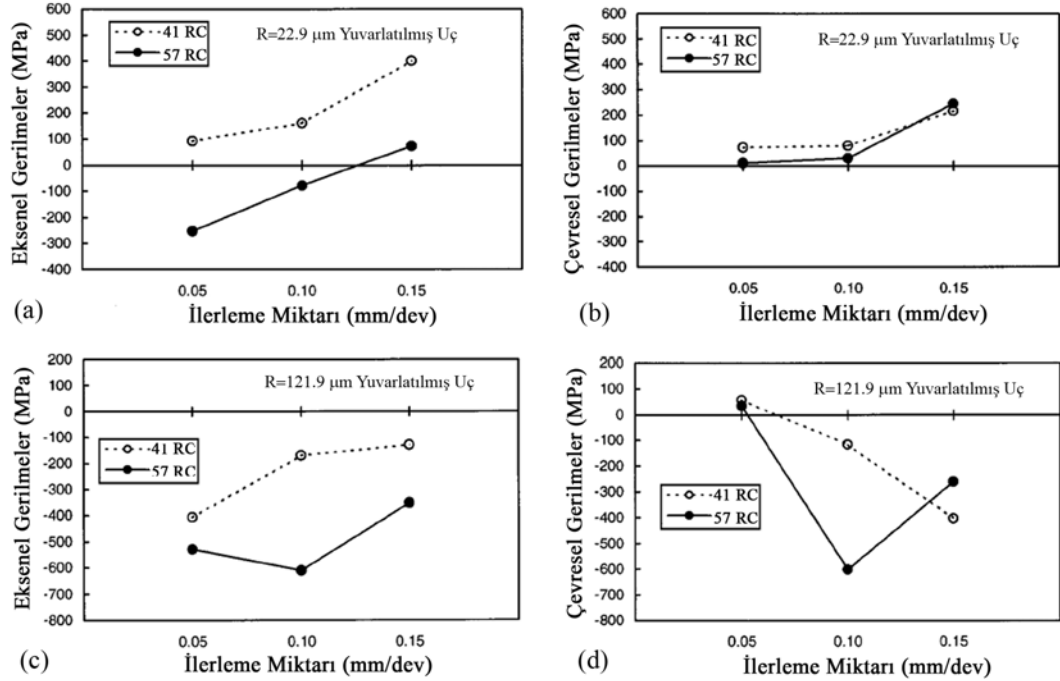


Şekil 4.39. Farklı sertlikteki malzemeler için ilerleme miktarının nüfuziyet derinliği üzerine etkisi [66]
a) Eksenel kalıntı gerilmeler, b) Çevresel kalıntı gerilmeler

Daha yüksek sertliğin neden olduğu basma kalıcı gerilmelerindeki artış Thiele ve Melkote'nin önerdiği mekanizma ile açıklanabilir. Takımın arkasındaki çekme

plastik deformasyonuna neden olan çekme gerilmesi daha sert malzeme kesilirken daha büyük olur. Yüksek sertliğe sahip malzeme kesildiği zaman kesici kenarın önündeki basma plastik deformasyonu daha az sert olan malzemenin kesilmesinden daha küçük olacaktır. Böylece, gerilmelerin kaldırılmasından sonra kuvvetleri yeniden dengelenmesi nedeniyle daha fazla basma kalıntı gerilmeleri oluşturulacaktır [164].

Şekil 4.40, ilerleme ve sertliğin bir fonksiyonu olarak yüzey kalıntı gerilmelerin eksenel ve çevresel bileşenlerini gösterir. Bu grafikler her bir kesici kenar geometrisi için sertlik ve kalıntı gerilmeler arasındaki ilişkiyi ifade eder. Şekiller 57 RC setlikteki iş parçasının eksenel gerilmelerinin 41 RC'den daha basma olduğunu gösterir. Bu durum çevresel gerilmeler için de aynıdır. Küçük kenar radyüslü takım tipik olarak düşük sertliğe (41 RC) sahip çeliklerde kalcı çekmede olan ve yüksek sertlikteki (57 RC) çeliklerde kalıntı basma olan aşırı temperlenmiş yüzey katmanı oluşturur [11].



Şekil 4.40. Farklı kesici kenar geometrileri kullanılarak işlenmiş malzemelerdeki kalıntı gerilmeler üzerine iş parçası sertliğinin ve ilerleme miktarının etkisi [11]

a) Eksenel gerilme, $R=22,9 \mu\text{m}$, b) Çevresel gerilme, $R=22,9 \mu\text{m}$, c) Eksenel gerilme, $R=121,9 \mu\text{m}$, d) Çevresel gerilme, $R=121,9 \mu\text{m}$

Çalışma sertleşmesi ve mikro sertlik değişimleri

Geleneksel talaş kaldırma işlemi, işleme belirli bir geometri ve yüzey oluşturmak için, kama biçimli bir takımla fazla malzemenin kaldırılmasıdır. Yüksek gerilmeler, yüksek gerinim oranı, yüksek sıcaklık ve talaş oluşumu esnasında iş malzemesi ile genellikle kısa etkileşim zamanı ($\sim 0,1$ ms) işlemeyi belirgin bir şekilde karakterize eder. Bu nedenle, işleme yöntemleri iş parçası üzerinde mikroyapı başkalaşmasına, mikrosertlik değişimlerine ve kalıntı gerilmelere neden olur. Yüzey bütünlüğü olarak adlandırılan bu sonuç özellikle parça performansı ile uyumundan dolayı bitirme işlemleri için önemlidir [193].

İşlemede, görsel olarak bütün mekanik enerji ısı biçiminde termal enerjiye dönüştürülür. İş parçası içerisine ısı geçişi bölgesel yüzey sıcaklığını etkili bir biçimde arttırabilir. Isı akısı faz dönüşüm sıcaklığını sağlayacak kadar yüksekse (ferrit+cementit $\rightarrow$ östenit), ana malzeme tarafından kendi kendini hızla hemen soğutmasıyla, yüzey malzemesi martenzite dönüşecektir.

Sıcaklık ve zaman sertleşme mekanizmasında anahtar faktör olduğu için, eğer iş parçası içerisine ısı akışı yüksekse ve temas zamanı yüksek sıcaklık seviyelerine (östenitleşme sıcaklığının üzeri) ulaşacak kadar uzunsa, işleme ile sertleşecek katman derinliğinin artabileceği düşünülebilir. Buna rağmen, işlemedeki etkileşim zamanı (milisaniye seviyesindedir) yumuşak çeliklerin konvansiyonel yüzey sertleşmesindeki su verme zamanından (gaz karbürüzasyon haricinde, saniye seviyesindedir) kısadır. Yumuşak çelikler genellikle ferrit (α demir) ve sementit (Fe_3C) fazdan oluşur, bu da östenitleşme esnasında sementitin östenit içerisinde düzenli çözünmesi için uzun su verme zamanı gerektirir. Sonuç olarak, kısa zamanda östenite dönüşümü dengelemek için işleme sertleşmesinde çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulabilir. Bununla beraber, bu argümana sıcaklık ölçümleri olmaksızın karar verilemez. İşlemeden kaynaklanan birtakım plastik deformasyonun çelikteki sementit fazın tamamen bozulmasına sebep olacağı da bazı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir [194]. Kesici takıma komşu iş malzemesi (birincil deformasyon bölgesi) ciddi bir şekilde plastik olarak deformasyona uğrayacaktır. Bu yüzden,

temel ısınma bölgesine geçmeden önce sementit faz düzenli biçimde dağılmış olabilir ve daha kısa östenitleşme zamanı gerektirebilir. Bundan başka, kesmenin neden olduğu gerilmeler/gerinimler transformasyon termodinamiğini değiştirebilir ve böylece transformasyon kinetiği, faz diyagramında ve transformasyon ürünlerinin morfolojisinde değişikliklere yol açar. Örnek olarak, östenitik paslanmaz çeliklerdeki gerinim içerikli martenzitik dönüşüm verilebilir. Bu yüzden, işleme esnasındaki mekaniksel yükleme karbür çökmesi için gerekli zamanı azaltmak için ve daha düşük faz dönüşüm sıcaklıkları için ekstra itme (harekete geçirme) kuvveti sağlayabilir [196].

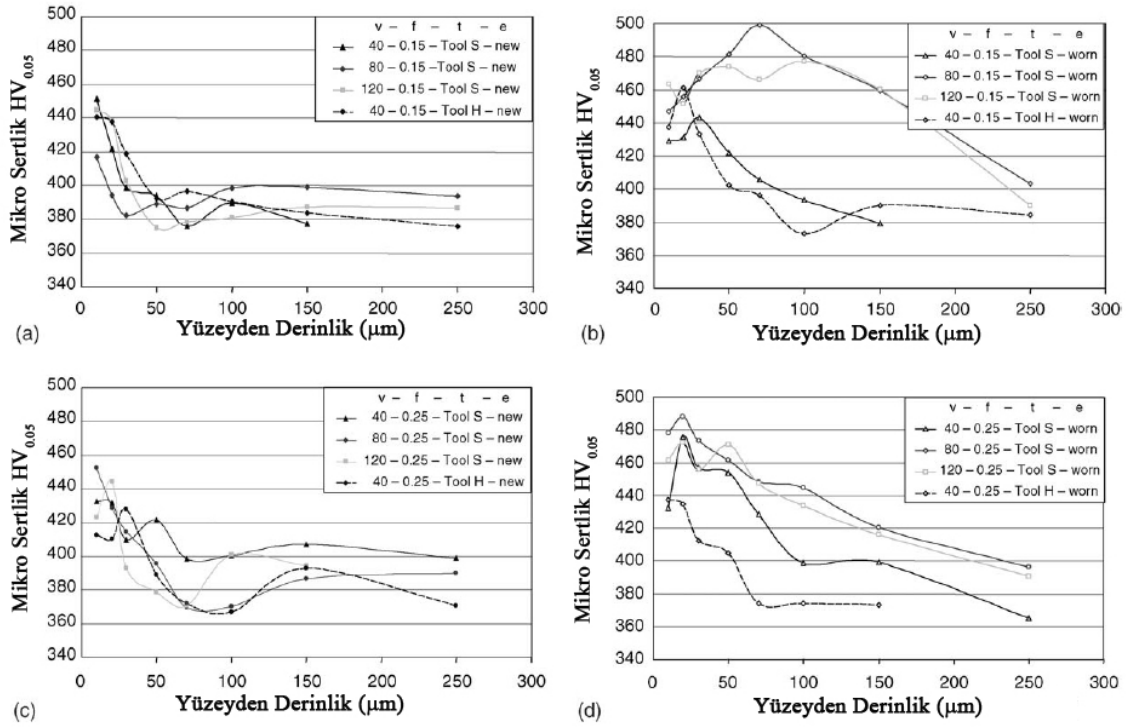
Soğuk biçimlendirilmiş iş parçalarında kalıntı gerilmelerin plastik deformasyon süreci esnasındaki homojen olmayan metal akışından kaynaklandığı bilinmektedir. Eğer iş parçası talaş kaldırılarak biçimlendirilirse, o zaman denge durumu bozulacaktır. Böyle bir durumda iş parçası genellikle deforme olur, çünkü kalıntı gerilmeler iş parçasını yeni denge durumuna zorluyor olacaktır [196-197].

İşleme öncesi uygulanacak ısıl işlem iş parçasının beklenmedik deformasyonundan kaçınmanın bir yoludur. Deformasyonla oluşturulmuş kalıntı gerilmelerin tamamen gevşemesi sadece mikro yapının tamamen dönüşümüyle elde edilebilir [197].

Şekil 4.41’de keskin ve kör takım kullanılarak tornalanmış Inconel 718 numunelerin 50 μm derinlik içerisindeki ana malzeme sertliğine (385 $\text{HV}_{0.05}$) düşmeden önce yüzeye yakın bölgelerinde ortalama 440 $\text{HV}_{0.05}$ seviyesinde gerinim sertleşmesine uğradığı (pekleşme) mikro sertlik grafiklerinden görülebilir. Bütün durumlarda kör takımlarla üretilmiş yüzey yeni takımla üretilmiş yüzeyden daha derin bir nüfuziyetle ($\sim 200 \mu\text{m}$) daha serttir (maksimum 500 $\text{HV}_{0.05}$) [107]. Chou, mekanik deformasyonun ikincil olmak üzere, işlemedeki birincil sertleşme mekanizmasının hızlı ısınma soğuma olduğunu ileri sürmüştür [193]. Örneğin Inconel 718 kör bir takımla kesildiği zaman görülen (Şekil 4.41b ve d) mikro sertlik seviyelerinde düşüşlere, genellikle yüzeye yakın bölgedeki çok yüksek sıcaklıklarından kaynaklanan aşırı yaşlanma neden olabilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıkların bazı gerinim kurtulmaları meydana getirebileceği de beklenir. Önem arz eden sertleşme seviyesine

ilave olarak, kör takımı oluşturulmuş yüzey yüksek tane sınırı deformasyonuna ($\sim 36 \mu\text{m}$ üstü) da sahip olabilir. Takım aşındıkça, takım/iş parçası temas alanındaki bir artışın kılavuzluğuyla takımın yan boşluk açısı düşürülür ve böylece takım iş parçası yüzeyine daha fazla sürtünür. Bu, iş parçası yüzey bölgesinin plastik deformasyonunda bir artışa sebep olur ve sürtünme ile oluşturulmuş sıcaklığı artırır [107].

Takımın uç radyüsünün veya kenar pahının işlenmiş yüzeyin sertliği üzerindeki etkisi önemlidir. Küçük uç radyüsü veya kenar pahı yüzey katmanını içerisindeki plastik deformasyonu oldukça artırırken, ilerleme miktarı yüzey sertliğini o kadar da etkilemez [35, 198].



Şekil 4.41. Inconel 718 malzemenin mikro sertlik profilleri [107]

a) Yeni takım, $f=0,15 \text{ mm/dev.}$, b) Kör takım $f=0,15 \text{ mm/dev.}$, c) Yeni takım, $f=0,25 \text{ mm/dev.}$, d) Kör takım $f=0,25 \text{ mm/dev.}$

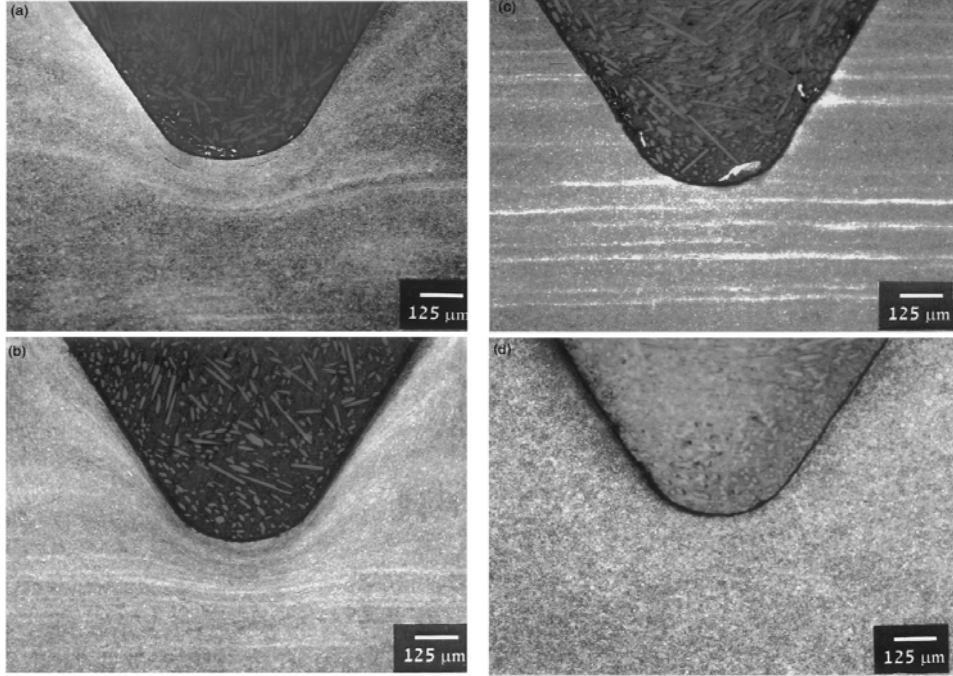
Paslanmaz çeliklerin işlenmesinde malzeme/takım çifti için, güçlü çalışma sertleşmesiyle bütünleşmiş, yüksek çekme kalıntı gerilme değerleri iş parçası

yüzeyinde bulunur. Bu çekme gerilmeleri, takım ucu civarındaki takım/iş parçası temas bölgesinde (900 °C'ye yakın) yüksek sıcaklığa neden olan (özellikle de büyük kesme hızlarında görülen), kesme esnasında oluşan ısıdan ileri gelen bölgesel termal etkilere dayanır. Çekme katmanının kalınlığının kesme hızıyla azaldığı, fakat yüksek ilerleme oranı değerleri için arttığı bulunmuştur. Malzemeye işlenebilirliği arttıracak işlemler uygulandığında, kesme sıcaklıkları düşer (yaklaşık 700 °C'ye) ve sonuç olarak kalıntı gerilme seviyeleri de azalır [9].

708M40T (En 19T) ve 817M40T (En 24T) çeliklere vida açma işleminin gerçekleştirildiği bir çalışmada, vida açılmış yüzeyin yüzey altı sertliği iş parçasının orijinal sertliğinden yaklaşık % 10 daha düşük olduğu bulunmuştur. Yüzey sertliğindeki bu düşüş, vida kesme çevrimi esnasında iş parçası ve takım yüzeyi arasındaki sıcaklık gradyanı ile de bütünleşmiş olabilecek bir temperleme etkisinden meydana gelebilir. Tek-nokta (sivri uç) vida işlemedeki termal çevrim frezeleme gibi fasılalı kesme operasyonlarına benzer. Burada, kesme eylemi esnasında ısınmış ve “boşta” paso esnasında soğumuş olacak iş parçası yüzeyi kadar takım da sırasıyla takım yüzeyinin genişmesine ve büzülmesine maruz kalır. Yüksek ilerleme oranlarında vida açarken takım giriş ve çıkış hızı artar ve diğer kesme işlemi başlamadan önce takım ve iş parçası yüzey sıcaklığını azaltmak için yeterli zaman sağlanamaz. Bu olgu takım ömrünü ters suretle etkileyen bir yüksek sıcaklık gradyanına neden olur [176].

Optik mikroskop gözlemleri bütün durumlarda, özel gerilme konsantrasyon belirtilerinin olmadığı, düzenli mekanik bozulmalar gösterir. Kimyasal aşındırma ile elde edilen her bir civata malzemesinin tipik mikro yapısı Şekil 4.50'de görülmektedir. Haddelenmiş civatalar vida yüzeyi boyunca ki metal akışıyla karakterize edilirler. Isıl işlemi takiben haddelenmiş civatalar sürekli ve yoğun akış hatları sergiler. Diğer taraftan ısıl işlem öncesi haddelenmiş civatalar sadece az miktarda, aralıklı ve de az yoğun, akış hatları sergiler. Bu gözlemlerde ısıl işlemi takiben haddelenmiş civatalarınki ile karşılaştırıldığında ısıl işlem öncesi haddelenmiş civatalarda daha ince bir sertleşmiş yüzey katmanı olduğu görülmüştür. Pratik olarak, haddeleme sonrası ısıl işlem uygulanan grupta bulunan civatalardaki

duruma dikkat edilmelidir. Bulanık görünmesine rağmen ısıtma işlemi soğuk haddeleme esnasında biçimlenmiş bütün akış çizgilerini gizlemez. Optik mikroskop sonuçlarına zıt olarak, talaşlı işlenmiş cıvataların metalografik karakteristikleri üretim proses sırasına kesin bağlılığı göstermemektedir. Şekil 4.50c’de de gözlemlenmiş paralel uzunlamasına akış çizgileri muhtemelen çubuğun dövülmesi esnasında oluşmuştur. Bunların ortaya çıkışı ham malzemenin biçimi ve kimyasal dağılımı durumu ile birlikte her iki yöntemle bağlantılıdır ve kabaca kalite güvence amacı için bir kriter olarak kullanılabilirler [196].



Şekil 4.42. Cıvataların vida bölgelerindeki tipik mikro yapı görüntüleri [196]
a) Isıl işlem öncesi haddeleme, b) Isıl işlem sonrası haddeleme, c) Isıl işlem öncesi talaşlı işleme, d) Isıl işlem sonrası talaşlı işleme

Soğutma sıvısının etkisi

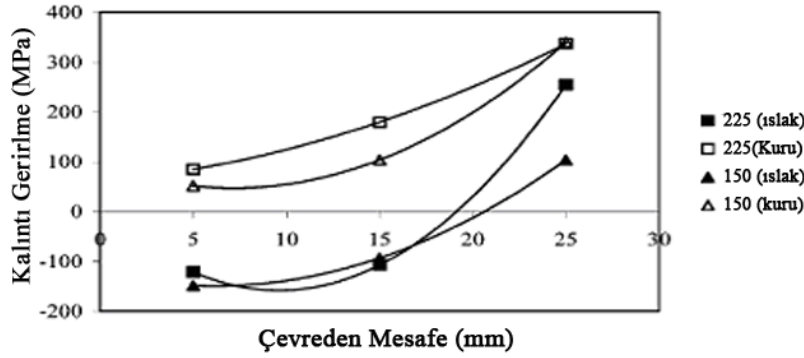
Kesme sıvıları iş parçasının

- yüzey kalıntı gerilmelerinin biçimlenmesinde,
- yüzey mikroyapı ve dayanımı üzerinde,

➤ bileşen dayanımı üzerinde,

etkilidir [199].

Kuru kesme çekme kalıntı gerilmeleri oluşturur. Oysa soğutma sıvısı kullanıldığında ilk önce basma kalıntı gerilmeleri oluşur ve ardından çekme kalıntı gerilmelerine dönüşür. Soğutma sıvısı sürtünmeyi azaltır ve yüzeyden ısı atılışını artırır. Böylece mekaniksel etkiler baskın hale gelir ve basma gerilmeleri elde edilir. Soğutma sıvısı kullanılsa bile basma kalıntı gerilmelerine neden olan süreç Şekil 4.43'den de görüldüğü gibi çekmeye dönüşür. Bu eğilim bütün deneylerde ortaya çıkmıştır. Bütün çaba, basma kalıcı gerilmelerinin elde edilebileceği bitirme operasyonlarının belirlenmesine yöneliktir [106].

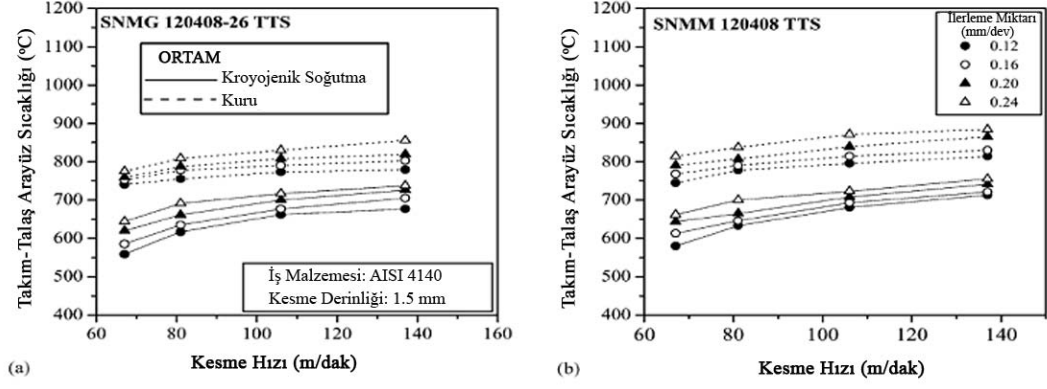


Şekil 4.43. Inconel 718 çeliğin CBN takım kullanılarak tornalanmasında kalıntı gerilmeler üzerine soğutma sıvısının etkisi [106]

Sonuç olarak, kuru kesme her zaman çekme kalıntı gerilmeleri oluştururken, CBN akımlarda soğutma sıvısı kullanımı ya basma gerilmesi oluşturur ya da çekme kalıntı gerilmelerinin değerinin düşürür [5].

Şekil 4.44, farklı kesme hızları, ilerleme ve kesici uçlarla yapılan işlemlerdeki takım talaş ara yüzeyindeki sıcaklığı göstermektedir. Kesici kenarlar boyunca olan oyukların ve talaş yüzeyi üzerindeki çıkıntıların varlığı ve böylece azaltılmış takım-talaş temas uzunluğu soğutucu jetinin talaş-takım ara yüzeyine yakın olmasına da yardımcı olur ve böylece ara yüzeyde etkili bir soğutma gerçekleştirilir. Soğutma etkisi farklı uç geometrileri için farklıdır. Takım aşınmasına neden olan yüksek

sıcaklık oluşumunda en etkili parametre olduğundan, kesme hızı ve ilerleme miktarı değişken olarak seçilmiştir [181].



Şekil 4.44. Kuru ve kroyojenik soğutma altında farklı ilerleme ve kesme hızları altında ortalama takım-talaş ara yüz sıcaklığındaki değişim [181]
a) SNMG uç, b) SNMM uç

Soğutma sıvısı kullanımıyla ısı birikiminin azalmasından dolayı çekme kalıntı gerilmeli de azalır ve böylece mekanik etkilerin meydana getirdiği kalıntı gerilmeler daha çok meydana gelir. Oysa kuru kesme sıcaklık artışını da beraberinde getirdiğinden her zaman çekme kalıntı gerilmelerine neden olur [106, 149].

Soğutmanın en önemli etkisi takım aşınmasını düşürmesi, takım parça arasındaki ıstıyı tahliye etmesidir. Bu da termal mekanizma oluşumunun azaltacağından çekme kalıntı gerilmelerini ortadan kaldıracak ya da azalmasına neden olacaktır [200].

4.4.Teknolojik Analiz

Çekme kalıntı gerilmelerin yorulma ömrü, korozyon ve aşınma direnci gibi bir takım fonksiyonel durumlar için son derece zararlı olduğu çok iyi bilinmektedir, oysa basma kalıntı gerilmeleri bu durumlar üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğundan genellikle basma kalıntı gerilmeleri dikkate alınmaktadır. Mekanik bir bileşende bulunabilecek kalıntı gerilmeler genelde işlemenin son aşamasında şekillenir. Oluşmuş kalıntı gerilme seviyeleri işlenmiş malzemeye ve kullanılmış çalışma parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, işlenmiş parçanın güvenilirliğini ve uzun

ömürlülüğünü arttırmak çalışma parametrelerinin seçimlerinde kalıntı gerilme problemini de dikkate almayı zorunlu kılar. Kalıntı gerilme oluşum mekanizması hala tam olarak net değildir ve kalıntı gerilme ve işleme parametreleri arasındaki ilişki anlaşılamamaktadır. Bu nedenle, kalıntı gerilme problemi dikkate alınmaksızın çalışma parametrelerinin seçimi ne yazık ki henüz gerçekleşmemiştir [201].

Yaklaşık 30 yıl önce “yüzey bütünlüğü” terimi parça işlevselliğini (yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme, mikro yapı vb.) belirtmek için ortaya konulmuştur [99]. Bu karakteristikler arasında, kalıntı gerilme anahtar bir rol oynar. Gerçekte, parçada çekme veya basma kalıntı gerilmeleri varsa yorulma ömrü kadar korozyon ve aşınma direnci de etkili bir biçimde etkilenebilir [25, 202]. Kalıntı gerilmeler genellikle işleme süreçleriyle ve özellikle de son bitirme operasyonu ile oluşur [201].

Bir çok durumda tornalama işlemi millerin üretim çevrimindeki bitirme operasyonu olarak kullanılır. Bu bileşenler genellikle değişken yüklere maruzdur ve bu nedenle yorulma kırılmasına eğilimlidir. Bundan dolayı, millerin tornalanmasındaki kalıntı gerilme problemi yorulma ömrüne göre özellikle kritiktir [201].

Günümüzde, millerin yorulma ömrünü arttırmak için sertleştirilmiş parçaların tornalaması üzerine yoğunlaşmıştır. Kesici takım ve kaplama teknolojisindeki gelişmeler sertleştirilmiş parçaların tornalanmasını olanaklı hale getirmiştir. Sert parçaların tornalanması taşlamadan daha kaliteli yüzey ortaya çıkarmaktadır, bu avantajından dolayı parça imalatında taşlama operasyonu ortadan kaldırılabilir. Bu da, sert parçaların işlenmesini ekonomik hale getirmektedir. Ayrıca, parça sertliğinin basma kalıntı gerilmelerinin oluşturulmasında etkili olması sert tornalanmış parçaların yorulma ömürlerinin de artmasına neden olmaktadır [201].

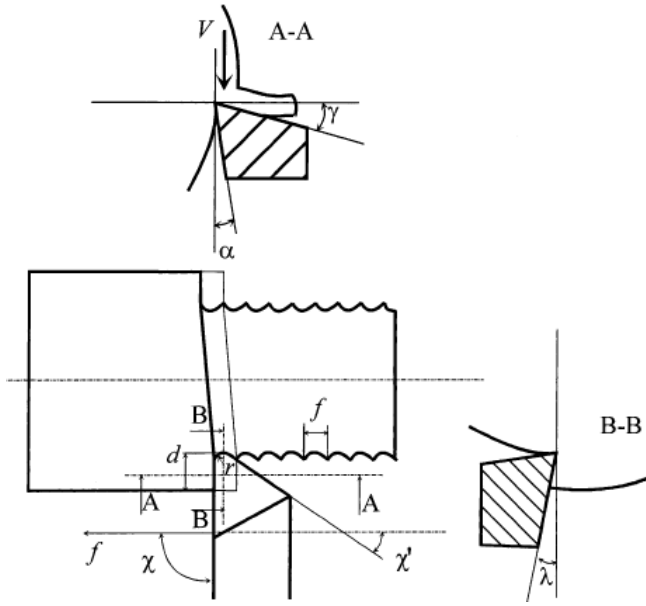
Kalıntı gerilmeler hem işlenecek malzemenin tipine hem de tornalama operasyonlarındaki çalışma parametrelerine bağlı olarak meydana gelir. Eğer kalıntı gerilmeler, çalışma parametreleri ve işlenecek malzeme arasındaki ilişki bilinirse, basma kalıntı gerilmeleri (ya da oldukça düşük çekme gerilmeleri) elde etmek için en

uygun çalışma parametrelerinin ayarlanması gerçekleştirilebilir. Unutulmamalıdır ki, kalıntı gerilme oluşum mekanizmasının yüksek karmaşıklığından dolayı, bu ilişkiler henüz net olarak anlaşılamamıştır. Bu nedenle, nicel olmayan kurallar uygulanır ve tornalama parametreleri genellikle kalıntı gerilme problemi dikkate alınmaksızın seçilir[201].

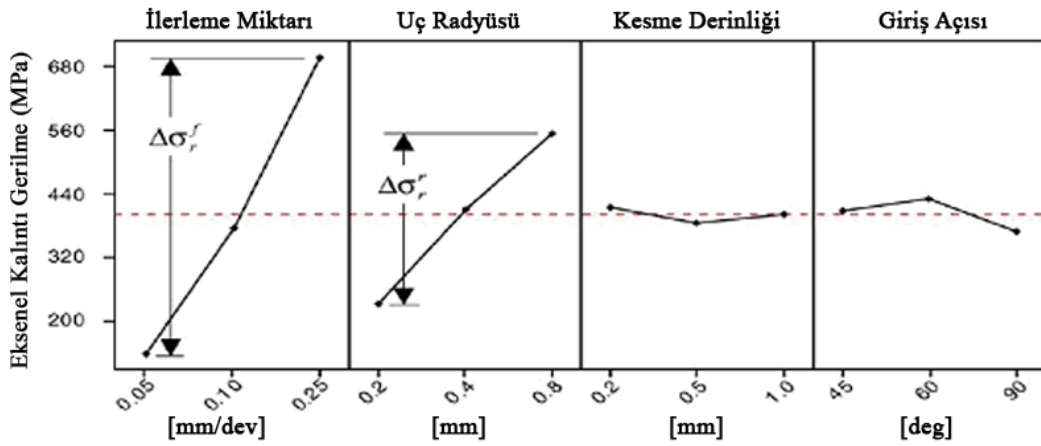
Bilindiği kadar, kalıntı gerilmeler yüzey katmanı ve ana malzeme arasındaki uygunsuzluklarla ilişkilidir. Yinede, yüzey katmanının biçim ve geometrisinde değişiklik oluşturan her hangi bir mekanizma kalıntı gerilmeler oluşturur. Bu değişim üç mekanizmadan kaynaklanabilir: mekaniksel (plastik deformasyon), termal (termal plastik akış) ve fiziksel (özellik hacim değişimi). Bir den fazla mekanizma aynı zamanda orada bulunabilir ve meydana gelen kalıntı gerilme tek bir mekanizma tarafından oluşturulmuş kalıntı gerilmelerin üst üste toplamıdır[201].

Silinirdik tornalamanın temel parametreleri Şekil 4.45’de görülmektedir. İşleme geometrisine ve önceki çalışmalardaki sonuçlara [45] göre, kalıntı gerilmeleri etkileyebilecek parametreler ilerleme miktarı (f), uç radyüsü (r), kesme derinliği (d), esas talaş açısı (γ) ve giriş açısı (χ). Bunların yanında kalıntı gerilmeler üzerinde çıkış açısı (χ'), yan boşluk açısı (λ) ve arka talaş açısı (α) çok düşük önemliliktedir [201].

Şekil 4.46, UNISO 39NniCrMo3 çelik için ölçülmüş kalıntı gerilmelerin temel etkisini gösterir. Görüldüğü gibi araştırılmış bütün durumlarda ortalama değeri 400 MPa civarında olan pozitif (çekme gerilmesi) kalıntı gerilmeler bulunmuştur. Giriş açısı ve kesme derinliğinin düşük seviyedeki etkisine rağmen, ilerleme ve takım ucu kalıntı gerilmeler üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. Özellikle de ilerlemedeki ve uç radyüsündeki artış kalıntı gerilmeleri arttırmıştır. Bu artış ilerleme miktarı için 500MPa ve uç radyüsü için 380 MPa’dır. Artışlardaki bu farklılık kalıntı gerilmeler üzerinde ilerlemenin daha baskın olduğunu göstermektedir [201].



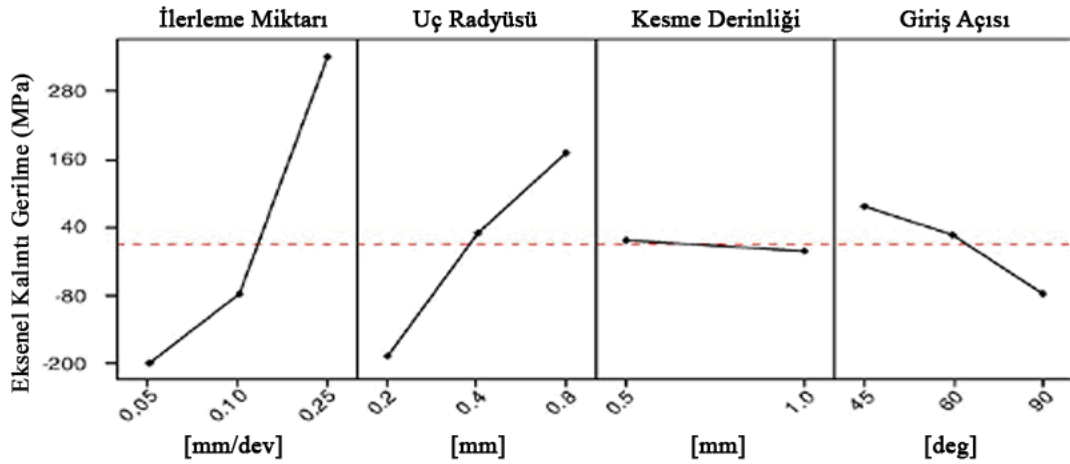
Şekil 4.45. Silindirik tornalama operasyonunun çalışma parametreleri [201]



Şekil 4.46. UNI-ISO 39NiCrMo5 çelik için eksenel kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiği [201]

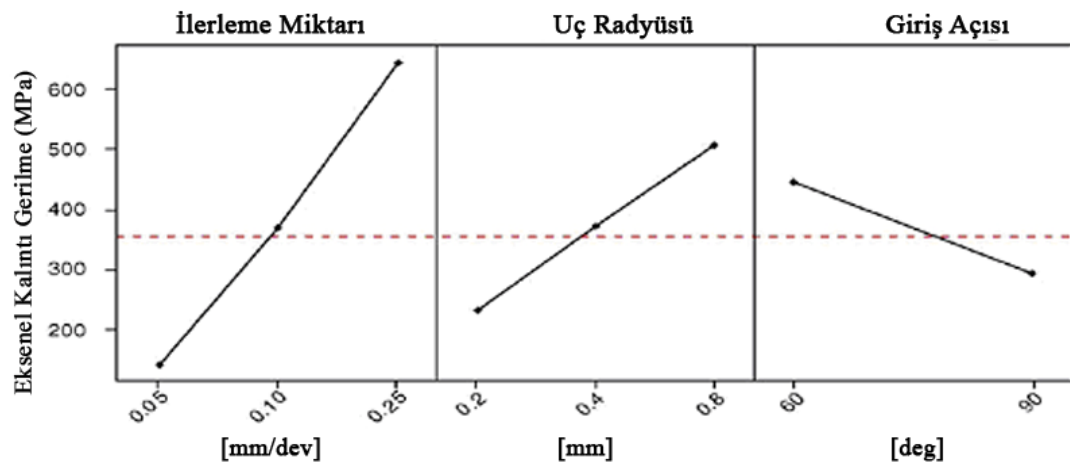
Şekil 4.47, UNI-ISO Fe370 çeliğin ölçülmüş kalıntı gerilme değerleri için ortalama etki grafiğini gösterir. Görüldüğü gibi bu çelikte ilerleme oranındaki ya da uç radyüsündeki bir artış kalıntı gerilmelerin artışına da sebep olur. Kalıntı gerilmenin en büyük ortalama değeri çok azalmıştır (10 MPa) ve kalıntı gerilmeler çalışma parametrelerine bağlı olarak pozitif (çekme gerilmesi) veya negatif (basma gerilmesi) olabilmektedir. Yinede çalışma parametrelerinin neden olduğu kalıntı gerilmelerdeki artış 39NiCrMo3'de elde edilenlerle hemen hemen aynıdır (İlerlemede artış

≈ 500 MPa ve uç radyüsünde artış ≈ 380 MPa). Buna karşılık, giriş açısının etkisinin de arttığı görülmektedir. Buradan; ilerleme, uç radyüsü ve giriş açısı kalıntı gerilmeyi etkileyen parametrelerdir. Kesme derinliği ise etkili değildir [201].



Şekil 4.47. UNI-ISO Fe370 çelik için eksenel kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiği [201]

C45 çelik için çalışma parametrelerinin neden olduğu kalıntı gerilmelerdeki artış diğerleri ile hemen hemen aynı iken ortalama kalıntı gerilme değeri (360 MPa), diğer iki malzemenin arasındadır (Şekil 4.48).



Şekil 4.48. UNI-ISO C45 çelik için eksenel kalıntı gerilmelerin ortalama etki grafiği [201]

Yukarıdaki sonuçlar incelenen üç malzeme için kalıntı gerilme oluşumunun genel mekanizmasının oluşumunu gösterir. İlerleme ve uç radyüsü azaldığı zaman ya da giriş açısı arttırıldığı zaman kalıntı gerilmede bir azalma gözlenebilir. Buna karşılık, ilerleme ve uç radyüsü ile ilişkili gerilme artış oranları işlenmiş malzemelere bağlı olmadığı görülmektedir. Bu, kalıntı gerilme oluşum mekanizması üzerine imalat parametrelerinin rolünde işlenmiş malzemenin etkisizliği hipotezinden olabilir. Malzemeler sadece kalıntı gerilmelerin ortalama seviyesini etkiler [201].

Elde edilen sonuçlar tornalanmış parçanın yüzey bütünlüğünü arttırmak için bazı öneriler vermek için kullanılabilir. Sonuçlar, kalıntı gerilmeyi düşürmek için en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğunu gösterir, fakat diğer bir yandan, ilerleme oranı yüzey pürüzlülüğünü,

$$R_a = \frac{1000}{32} \frac{f^2}{r} \quad (4.2)$$

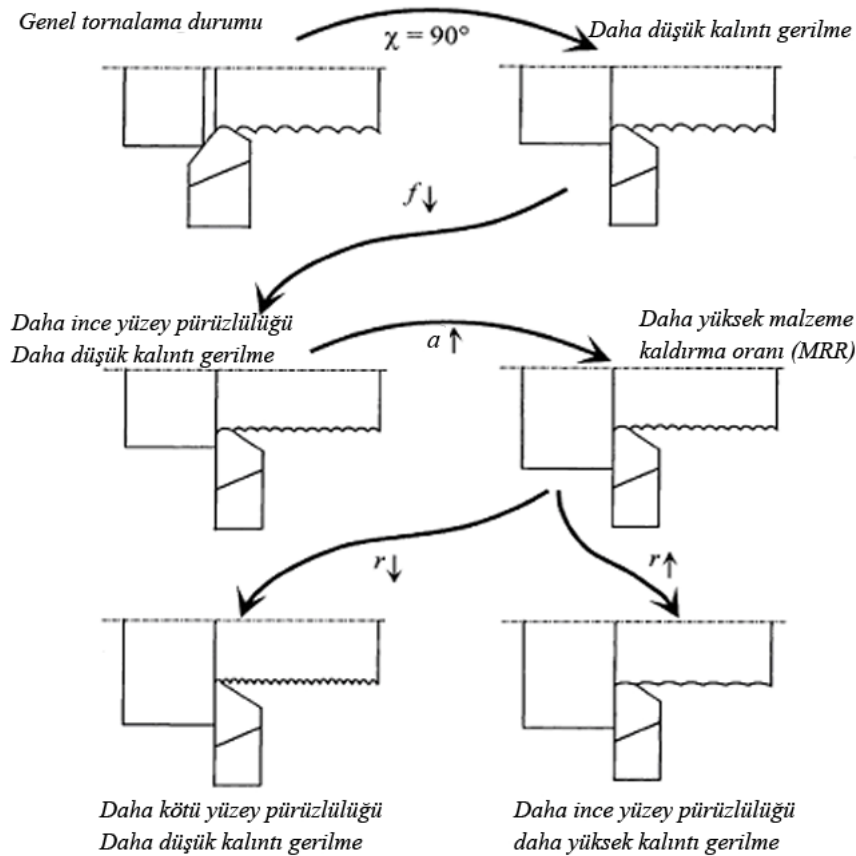
bağıntısından da çok net bilindiği üzere, etkiler [203]. Buna karşılık, ilerleme miktarı malzeme kaldırma miktarını ($MRR=V \cdot f \cdot d$) da etkiler. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünü ve kalıntı gerilmeleri azaltmak için küçük ilerleme oranlarının kullanılması gerektiği önerilebilir. MRR in azalmasının telafi etmek için büyük kesme derinliği kabul edilebilir, çünkü hem yüzey pürüzlülüğü hem de kalıntı gerilmeler üzerine bir etkisi yoktur. Uç radyüsü kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğü arasında bir uyum oluşturacak şekilde seçilmelidir. Çünkü uç radyüsündeki bir artış yüzey pürüzlülüğünü azaltır, fakat kalıntı gerilme değerini de artırır veya tam tersi durumu etkiler. İşleme kararlılığı için küçük bir giriş açının seçilmesi gerekse bile, giriş açısı 90° ye yakın seçilmelidir. Bu basit kurallar sentezlenmiş biçimde Şekil 4.49'da görülmektedir [201].

Tornalamada, eksenel doğrultudaki yüzey kalıntı gerilmeleri çalışma parametrelerine ve işlenmiş malzemenin karakteristiğine bağlı olarak çekme veya basma gerilmeleri şeklinde olabilir. Yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzeme daha geniş kalıntı gerilmeler (daha çok çekme) oluşturacaktır [201].

En uygun parametreler ve kalıntı gerilmeler arasındaki ilişki, araştırılan tüm malzemeler için aynıdır. Bu gerçek malzemenin mekaniksel özelliklerine bağlı olmadan kalıntı gerilmenin gerçek oluşum mekanizmasının açıklamasını ortaya koyar. Malzeme sadece kalıntı gerilmelerin ortalama seviyesini etkiler [201].

Endüstriyel değişim sınırları dikkate alındığında, kalıntı gerilmeler üzerine işleme parametrelerinin etkisi aşağıdaki gibidir:

- İlerleme miktarı, takım uç radyüsü ve az miktarda da giriş açısı kalıntı gerilmeleri etkiler.
- Zıt olarak, kalıntı gerilmeler üzerinde kesme derinliğinin etkisi görülmemektedir.



Şekil 4.49. Tornalanmış bir parçanın yüzey bütünlüğünü arttırmak için parametre seçim kuralları [201]

Deneysel analizden basit sonuçlar çıkarılabilir ve bunlar millerin tornalanması için kullanılabilir. Bu kurallar malzeme kaldırma miktarı , yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeler üzerine etkileri dikkate alınan tornalama parametrelerinin en uygun seçimini sağlar. Elde edilen kurallar düşük kalıntı gerilmeler elde etmek için düşük ilerleme oranı ile birlikte 90°'lik giriş açılı takım kullanılması gerektiğini önerir. Düşük ilerlemenin neden olduğu malzeme kaldırma miktarındaki azalma kesme derinliğini arttırmakla giderilebilir. En uygun uç radyüsü, kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğü arasında uyum olacak şekilde seçilmelidir [201].

İstenmeyen çekme kalıntı gerilmeleri yüksek kesme hızları ve yüksek kesme derinlikleri ile en aza indirilebilir [204]. Ayrıca, İşleme esnasındaki titreşim kötü yüzey görünümüne sebep olur, ayrıca sertleşme sonuçlarını etkileyen düzensiz iş parçası-aşınma yeri sürtünmesine de sebep olur [193].

5. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma, talaşlı imalatla üretilen vidaların dış dibinde meydana gelen kalıntı gerilmelerin, düz tornalanmış ve kanal açılmış parçalarda meydana gelen kalıntı gerilmelerle karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Bu bölümde talaş kaldırma yöntemi ile vida açma işlemlerinde kullanılmış ekipmanlar, malzeme ve takımlar, yöntemler ve teknikler tanımlanmaktadır. Vida işleme ve diğer tornalama deneylerinin amacı kesme şartlarının, kesme biçiminin ve diğer ilgili parametrelerin (iş malzemesi, kesici takım kaplaması vb.) kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır.

5.1. Kesme Deneyleri

Deneyler talaş kaldırarak vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemleri neticesinde meydana gelen kalıntı gerilmelerin anlaşılmasını ve karşılaştırılmasını sağlamak için yürütülmüştür. Deneyler;

- Metrik vida açma işlemi,
- Yuvarlak kanal açma işlemi,
- Düz tornalama işlemi,

olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır.

Her deney grubu için tam faktoriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Her grup için kalıntı gerilme oluşumunu etkilediği bilinen kesme hızı, kesici takımın ısı iletim katsayısı ve iş malzemesi sertliği değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu üç parametreye ilaveten vida açma operasyonlarında paso sayısı, kanal açma ve düz tornalama operasyonları için ilerleme miktarı dikkate alınarak her bir grupta toplam dört parametrenin etkisi incelenmiştir.

5.1.1. İş parçası malzemeleri

Bu çalışmada, AISI 4000 serisi (AISI 4140 ve AISI 4340) düşük alaşımlı yüksek dayanımlı iki çelik tipi kullanılmıştır. Bu malzemeler hem havacılık hem de otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmalarından dolayı tercih edilmiştir. Bu çelikler teknik olarak düşük alaşımlı yüksek dayanımlı (DAYD) çelikler olarak sınıftandır ve sertleştirilmek suretiyle oldukça yüksek dayanımın gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çelikler mükemmel derin sertleşebilirlik işleminden geçirilir ve böylece yüksek dayanım gerektiren ince kesitlerde kullanılırlar.

Çalışmada seçilen AISI 4140 çeliğin temel alaşım elemanı krom-molibden, AISI 4340 çeliğinki ise krom-molibden-nikeldir. Bu iki çeliğin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.1’de görülmektedir. Çizelge 5.2’de ise bu çeliklerin fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 5.1. AISI 4140 ve AISI 4340 çeliğin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	Bileşen (% Ağırlık)								
	C	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	P (Max)	S (Max)	Si
AISI 4140	0,38-0,43	0,8-1,1	96,78-97,84	0,7-1	0,15-0,25	-	0,035	Max 0,04	0,15-0,3
AISI 4340	0,37-0,43	0,7-0,9	96	0,7	0,2-0,3	1,83	0,035	Max 0,04	0,23

Çizelge 5.2. AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerin fiziksel özellikleri

Mekanik özellikler	AISI 4140	AISI 4340
Maksimum Çekme Dayanımı	772 MPa	855 MPa
Akma Dayanımı	580 MPa	731 MPa
Yüzde Kopma Uzaması	23,2 %	21,7 %
Kesit Daralması	64,9 %	63%
Elastikiyet Modülü	205 GPa	205 GPa
Kayma (Bulk) Modülü	140 GPa	140 GPa
Poisson Oranı	0,29	0,29
İşlenebilirlik	65%	50%
Kesme Modülü	80 GPa	80 GPa
Termal Özellikler		
Isıl Genleşme Katsayısı (20°C)	12,2 µm/m-°C	11,4 µm/m-°C
Isıl Genleşme Katsayısı (250°C)	13,7 µm/m-°C	13,1 µm/m-°C
Isıl Genleşme Katsayısı (500°C)	14,6 µm/m-°C	13,9 µm/m-°C
Termal İletkenlik (100°C)	42,6 W/m-K	44,5 W/m-K

AISI 4140 çeliği, krom-molibdenli, orta derecede sertleştirilebilir, yüksek dayanımlı bir çeliktir. Genel olarak sertleştirilmiş ve temperlenmiş halde çekme dayanımı 860-1130 MPa, sertliği ise 265-330 BSD (RC 28-36) imalatçıya sunulur. İyi işlenebilirliğe sahip yüksek dayanımı ve iyi bir çarpma özelliğiyle karakterize edilir, fakat kaynak edilebilirliği düşüktür. AISI 4140 endüstride genellikle rulman, yatak, silindir, dişli, taşıyıcı makara, hidrolik şaft, içi boş şaft ve parçalar, cıvata ve yüksük yapımında sıkça kullanılır. AISI 4140 sertleştirilmiş ve temperlenmiş durumda oldukça iyi işlenebilirliğe sahiptir.

AISI 4340 çeliği, nikel-krom-molibdenli, yüksek derecede sertleştirilebilir, dayanımı yüksek bir çeliktir. Genellikle sertleştirilmiş ve temperlenmiş olarak 930-1080 MPa çekme dayanımında, 265-330 BSD (RC 28-36) imalatçıya sunulur. Yüksek dayanımı ve tokluğu ile karakterize edilir. Yüksek çekme ve akma dayanımı gerektiren endüstriyel uygulamalar için bir çok endüstri sektöründe AISI 4340, AISI 4140 çelikten daha çok tercih edilir. Tipik uygulamalar arasında ağır iş şaftları, dişliler, kaplinler ve pimler sayılabilir. Piyasaya sertleştirilmiş ve temperlenmiş olarak sunulan AISI 4340 kolayca işlenebilen malzeme gözü ile bakılır fakat içeriğinde nikel olması nedeniyle işlenme esnasında talaş yapışma problemi ile karşılaşılabilir.

İş malzemeleri Ø100*Ø70*150 mm ebatlarındaki boru biçimli malzemelerden kesilmiştir. İş parçası malzemelerine gaz atmosferli fırınlarda ıslah işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısı işlem şartları ve elde edilen sertlik değerleri Çizelge 5.3'de görülebilir. Malzemenin sertlik değerleri, kalıntı gerilme deney sonuçları üzerine malzemenin etkisini değerlendirmek üzere kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. Isıl işlem şartları ve elde edilen sertlik değerleri

Malzeme	Isıl İşlem Şartları	Soğutma Ortamı	Temperleme Şartları	Sertlik (BSD)
AISI 4140	840-870 °C (1,5 saat)	Yağda	560 °C (1,5 saat)	342
AISI 4340	840-870 °C (1,5 saat)	Yağda	620 °C (1,5 saat)	314

5.1.2. Kesici takımlar ve takım tutucular

Vida açma operasyonları için kullanılan takımlar, Kennametal patentli KC 5025 (ISO P20-30, M20-30) kalite kaplamalı kesici uç düşük bağlayıcı içerikli alaşımsız WC/Co ince taneli alt yapıdan meydana gelir ve üzeri PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmıştır. Bu kaplama tipi çelikten titanyum alaşımlarına kadar geniş bir malzeme grubunun, düşükten ortaya değişen kesme hızlarında ve darbeli kesme ile yüksek ilerleme değerlerindeki işleme operasyonları için geliştirilmiştir. Vida açma operasyonlarında kullanılan diğer takım Iscar patentli IC250 (ISO P15-35, M20-40) kalite kaplamalı kesici uç WC/Co altyapıdan oluşur ve üzeri PVD yöntemi ile TiN kaplamaya sahiptir. Bu kaplama kalitesi yüksek kesme yükleri altında orta ile yüksek arasındaki kesme hızlarındaki işlemler için kullanılmaktadır.

Kanal açma operasyonları için kullanılan takımlar, Kennametal patentli KC 5010 (ISO P20-30, M20-30) kalite kaplamalı kesici uç, düşük bağlayıcı içerikli, alaşımsız WC/Co ince taneli alt yapıdan oluşur ve üzeri PVD yöntemiyle TiAlN ile kaplanmıştır. Yüksek hızlarda bir çok malzemenin son bitirme ve genel amaçlı işleme aralığındaki talaşlı imalat işlemleri için idealdir. Kanal açma operasyonlarında kullanılan diğer takım Iscar patentli IC635 (ISO P30-50, M20-40) kalite kaplamalı kesici uç WC/Co altyapı üzerine CVD yöntemi ile TiN+TiCN+TiN ile kaplanmıştır. Bu kaplama kalitesi yüksek ilerleme oranlarında ve düşük kesme hızlarındaki işlemler için uygundur.

Düz tornalama operasyonları için kullanılan takımlar, Kennametal patentli KC 9110 (ISO P10-25, K15-20) kalite kaplamalı kesici uç özel olarak tasarlanmış kobaltı zenginleştirilmiş WC/Co altyapıdan meydana gelir. Bu karbür, ilk önce patentli K-MTCVD yöntemiyle TiCN ile kaplandıktan sonra PVD yöntemiyle üzeri kontrollü tane yapılı Al_2O_3 ve TiN ile kaplanmıştır. Bu çok katmanlı kaplama, takıma çok iyi kenar aşınma direnci, kenar yığılmasına engel ve mükemmel bitirme işleme olanağı sağlar. Düz tornalama işlemlerinde kullanılan diğer takım, Iscar patentli IC3028 (ISO P25-45, M15-35) kalite kaplamalı kesici uç WC/Co altyapı üzerine PVD yöntemi ile TiCN ile kaplıdır. Bu kaplama kalitesi oldukça yüksek bir tokluğa sahiptir. Genel

amaçlı olarak çeliklerin düşük ve orta kesme hızlarında işlenmeleri için geliştirilmiştir. Ayrıca bu takım darbeli kesmelerde ve ağır işleme şartları için de kullanılmaktadır.

Deneysel çalışmada kullanılan ve yukarıda detayları açıklanan kesici ve takım kodları Çizelge 5.4 ve 5.5’de liste halinde verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deneysel kesme çalışmasında kullanılan kesici uçlar

İşlem Türü	Firma	Kesici Uç	Uç Kalitesi	Kaplama
Metrik Vida Açma	Kennametal	LT22ER50ISO	KC5025	TiAlN-PVD
	Iscar	22ER5.00 ISO	IC250	TiN-PVD
Kanal Açma	Kennametal	A4R0305M03U00GMN	KC5025	TiAlN-PVD
	Iscar	GRIP 3015Y	IC635	TiN+TiC+TiN-CVD
Düz Tornalama	Kennametal	TNMG160408FW	KC9110	TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN-PVD
	Iscar	TNMG160408-TF	IC3028	TiCN-PVD

Çizelge 5.5. Kesicilere ait Takım Tutucular

İşleme Türü	Kesici Uç	Takım Tutucu
Metrik Vida Açma	LT22ER50ISO	LSASR 2525 M22 (*SMYE altlıkla)
	22ER5.00 ISO	
Kanal Açma	A4R0305M03U00GMN	A4SMR2525M0317
	GRIP 3015Y	HELIR 2525-3T20
Düz Tornalama	TNMG160408FW	MTENN 2525 M16
	TNMG160408-TF	

* Vida takımına vida helis açısına uygun eğimi vermek için kullanılmıştır

Kesici takımların kaplama özellikleri birbirinden farklıdır. Bu da, takımların farklı kesme performansı (takım aşınması, kesme sıcaklığı vb.) sergilemesine neden olmaktadır. Bu performans farkı, yüzey oluşumunu etkilemektedir. Çizelge 5.6, bu kesici takımlarda kullanılan kaplamaların performans kabiliyetinin ifadesi olarak kullanılacak ısı iletim katsayılarını göstermektedir. Bu ısı iletim katsayıları kalıntı gerilme deney sonuçları üzerine kesici uç kaplama tipinin etkisini değerlendirmek üzere kullanılmıştır.

Çizelge 5.6. Kaplamaların ısı iletim katsayıları [205-208]

Kaplama Tipi	Kaplama Yötemi	Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
TiAlN	PVD	50(20-800 °C) 10(810 °C) 7,5 (1000 °C) 5(1250 °C) 4(1500 °C)
TiN	PVD	70 (600 °C)
Al ₂ O ₃	PVD	36(20 °C) 6,1 (1000 °C)
TiCN	CVD	31(723 °C)
TiN	CVD	25(723 °C) 20(20 °C) 27(1000 °C)
TiC	CVD	28 (723 °C)

5.1.3. İşleme parametreleri

Bu çalışmada, işleme parametreleri olarak kesme hızı ve paso sayısı/ilerleme miktarı kesici uç kaplamasının ısı iletim katsayısı ve malzeme sertliği de işleme parametreleri olarak seçilmiştir. Çalışmada vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Vida açmada paso sayısı dikkate alınırken, kanal açma ve düz tornalama için ilerleme miktarı dikkate alınmıştır. Çizelge 5.7’de kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri görülmektedir.

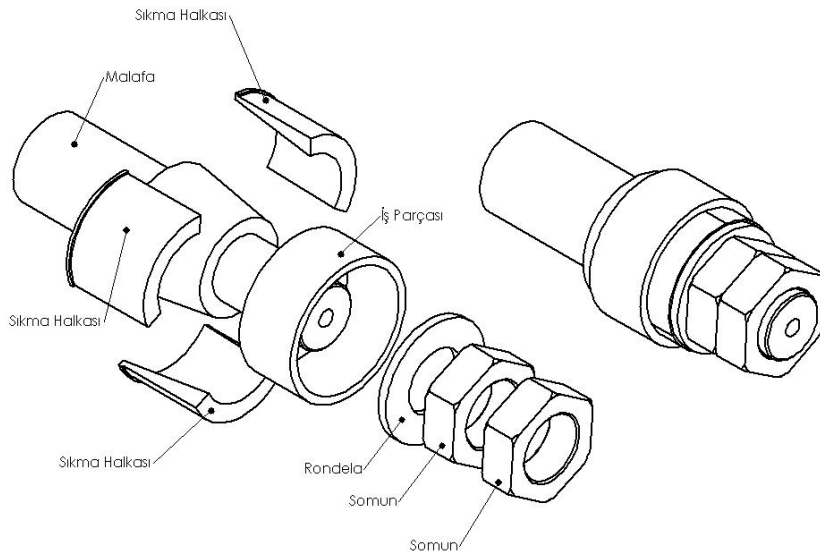
Çizelge 5.7. Kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri

İşleme Tipi	İşleme Parametreleri					
	V	PS	f	a	MS	IIK
	Kesme Hızı (m/dak)	Paso Sayısı (paso)	İlerleme (mm/dev)	Talaş Derinliği (mm)	Sertlik (BSD)	Isıl İletim Katsayısı (W/m-K)
Metrik Vida Açma	50 100 150	12 18 24		Değişken (Paso sayısına bağlı)	342 (AISI 4140)	10 (TiAlN) 70 (TiN)
Kanal Açma	50 100 150	-	01 0,15 0,25	-	314 (AISI 4340)	10 (TiAlN) 27 (TiN+TiC+TiN)
Düz Tornalama	100 200 300	-	0,12 0,2 0,28	1,5		25 (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiCN+TiN) 31 (TiCN)

5.1.4. Deney parçalarının hazırlanması

Vida açma, kanal açma ve düz tornalama deneylerinin yapılacağı parçalar $\varnothing 100 \times \varnothing 70 \times 150$ mm boyutlarında ısıtıl işlem görmüş iş malzemesinden 35 mm genişliğinde halkalar kesilerek hazırlanmıştır.

Bütün operasyonlar CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deney parçaları halka biçiminde üretildiğinden tornalama işlemlerinin tamamında, halka biçimindeki bu parçaları içten sıkacak şekilde, özel olarak tasarlanmış bir malafa kullanılmıştır. Malafa, üzerindeki konik yüzeyde hareket eden üç adet sıkma halkasının iş parçasını içten sıkmasıyla bağlama işlemini gerçekleştirmektedir. Bu malafa metrik vida, yuvarlak kanal açma ve düz tornalama işlemlerinin tamamında bağlama aparatı olarak kullanılmıştır. Numunelerin eşit biçimde sıkılmasını sağlamak için sıkma esnasında bir tork anahtarı kullanılmıştır. Her bir numunenin malafaya bağlanmasında 300 Nm'lik sıkma torku uygulanmıştır. Tüm tornalama işlemleri için kullanılan bu malafa Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Tornalama operasyonlarında deney numunelerini bağlamak için kullanılan sıkma halkalı malafanın detay resmi

35 mm genişliğinde kesilen halkalara, asıl tornalama işlemi başlamadan önce yüzeydeki bozuklukları (haddelemeden ve ısıtıl işleminden kalan bozukluklar)

kaldırmak için, bir ön tornalama işlemi uygulanmıştır. Çizelge 5.8, her bir tornalama işleminin işlem sırasını özetlemektedir.

Çizelge 5.8. Tornalama işlemlerine ait işlem sıraları

İŞLEM	İŞLEM SIRASI		
	1. işlem	2. işlem	3. işlem
Vida Açma İşlemi	Ön tornalama	Vida açma	Vida tepelerinin tıraşlanması
Kanal Açma İşlemi	Ön tornalama	Kanal açma	
Düz Tornalama İşlemi	Ön tornalama	Düz tornalama	

Vida açma işleminde, ön tornalama işlemini takiben parça üzerine 5 mm adımlı metrik vida açılmıştır. Kanal açma işleminde, ön tornalama işlemini takiben parça üzerine 1,5 mm uç radyüsüne sahip kanal takımı ile 1,5 mm derinliğinde ve 5 mm aralıklarla kanallar açılmıştır. Düz tornalama işlemi ise, SCMT formunda kesici uçla ön tornalama işlemi gerçekleştirildikten sonra TNMG formundaki asıl kesici uç 60°'lik yanaşma açısı sağlayacak takım tutucu kullanılarak, 1,5 mm'lik sabit talaş derinliğinde 3 paso uygulanarak düz tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.1.5. Takım tezgahı

Vida açma, kanal açma ve düz tornalama operasyonlarına ait deney numunelerinin hazırlanmasında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Anabilim Dalı, CNC laboratuvarında bulunan JOHNFORD T35 CNC Torna Tezgahı kullanılmıştır. Bu tezgaha ait bazı özellikler Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. JOHNFORD T35 CNC torna tezgahının özellikleri

X eksen (mm)	250
Z eksen (mm)	600
Tezgah Gücü (kW)	10
Devir sayısı (rpm)	4000
Hidrolik ayna çapı (mm)	250
Hassasiyet (mm)	0,001
Takım taşıma kapasitesi (adet)	12

5.1.6. Kesme deneylerinin yapılışı

Deney tasarımı, Çizelge 5.7’de de gösterilen işleme parametrelerine ait seviyelerin kombinasyonu şeklinde oluşturulmuştur. V; Kesme hızı, PS; paso sayısı, f; ilerleme oranı, MS; iş malzemesi sertliği, IİK; kesici takım kaplamasının ısıl iletim katsayısı parametreleri için dikkate alınan seviye sayılarının çarpımı, her bir tornalama işlemi için gerçekleştirilecek deney sayısını verir. Vida açma deneylerinde paso sayıları dikkate alınırken, düz tornalama ve kanal açma işlemlerinde ilerleme miktarları dikkate alınmıştır. Bu durumda her bir tornalama işlemi için gerekli numune sayısı $V*(PS*f)*MS*IİK=3*3*2*2=36$ ’dır. Bütün kesme operasyonları, yarı sentetik su esaslı (Q8oils - Q8 Beethoven VHD) soğutma sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir aynı zamanda her bir numune için yeni bir kesici uç kullanılmıştır.

Çalışmada, en yaygın vida açma yöntemi olan radyal ilerleme tipi kullanılmıştır. Bu yöntemde, her pasoda vida derinliği arttıkça takım yan yüzeylerine düşen talaş kesiti de artar. Bu artış takımın gittikçe artan kuvvetlere maruz kalmasına neden olur. Bu kuvvet artışı her pasoda sabit talaş alanı sağlayarak önlenabilir. Sabit talaş alanı sağlamak için azaltılmış seri olarak adlandırılan paso miktarları kullanılır. Bu durum dış profilinin derinliğine bağlı olarak nispeten büyük bir başlangıç değeri olan 0,2-0,35 mm’lik değeri içerir. Değerler giderek azalır ve 0,09-0,02 mm seviyesine iner.

Vida açma işleminde her pasoda sabit talaş alanı sağlayacak talaş miktarını belirlemek için,

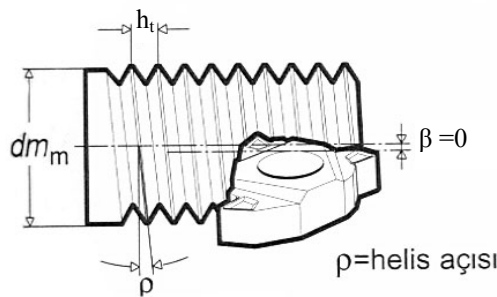
$$\Delta_{apx} = \frac{a_p}{\sqrt{n_{ap}-1}} \times \sqrt{\varphi} \quad (5.1)$$

eşitliği kullanılmıştır. Burada: Δ_{apx} ; radyal ilerleme miktarı, a_p ; toplam dış derinliği, n_{ap} ; toplam paso sayısı, φ ; 1. paso için= 0,3; 2.paso için= 1; 3.ve daha sonraki pasolar için = x-1 dir, x; gerçek paso sayısıdır. Ayrıca, vida açma işlemlerinde profil biçimlendirme işlemi olarak son iki paso tekrarlanmıştır. Bu vida açma işlemlerinde vidanın tam profilinin sağlanması için uygulanan bir işlemdir [209].

Vida takımlarında serbest yüzeylerin önemi büyüktür. Serbest yüzeylerin birinde takım ömrünü kısaltacak istenmeyen yıpranmayı önlemek için vidanın helis açısı mümkün olduğunca kesici ucun eğim açısına denk gelmelidir (Şekil 5.2). Bunu sağlamak için kesici uçlarda vidanın helis açısına uygun altlıklar kullanılır. Kesici uca verilecek eğim açısı kesici uç kataloglarından veya,

$$\tan \beta = \frac{h_t \times n_z}{d_2 \times \pi} \quad (5.2)$$

eşitliği kullanılarak belirlenebilir. Burada: h_t , hatve; n_z , ağız sayısı; d_2 , dişin etkin çapı (bölüm dairesi çapı), β , eğim açısı'dır.



Şekil 5.2. Vida helis açısı ve vida takımı eğim açısı arasındaki ilişki [209]

Kanal açma operasyonunda kesici takım parça eksenine dik bir biçimde (radyal yönde) ilerleyerek talaş kaldırır. Bu yönüyle kanal açma işlemindeki talaş oluşumu vida açma ve düz tornalama işleminden farklıdır. Bu farklılık, malzeme deformasyonunun takımın radyal yönde ilerlemesiyle, takım önünde gerçekleşmesinden kaynaklanır.

Düz tornalama operasyonlarında kullanılan takım tutucu ile 60°'lik bir yanaşma açısı oluşturulmuştur. Böylelikle, vida takımının simetrik kenarlarından birine benzer bir davranış sergilemesi sağlanmıştır. Düz tornalama işlemlerinde kalıntı gerilmeler üzerinde oldukça düşük bir etkiye sahip olduğundan talaş derinliği sabit alınmıştır. Ayrıca, bu derinlik kesicinin uç radyüsünden (0,8 mm) büyük olduğundan vida ucunun, simetrik kenarlarından birinin, vida açma esnasındaki davranışının düz

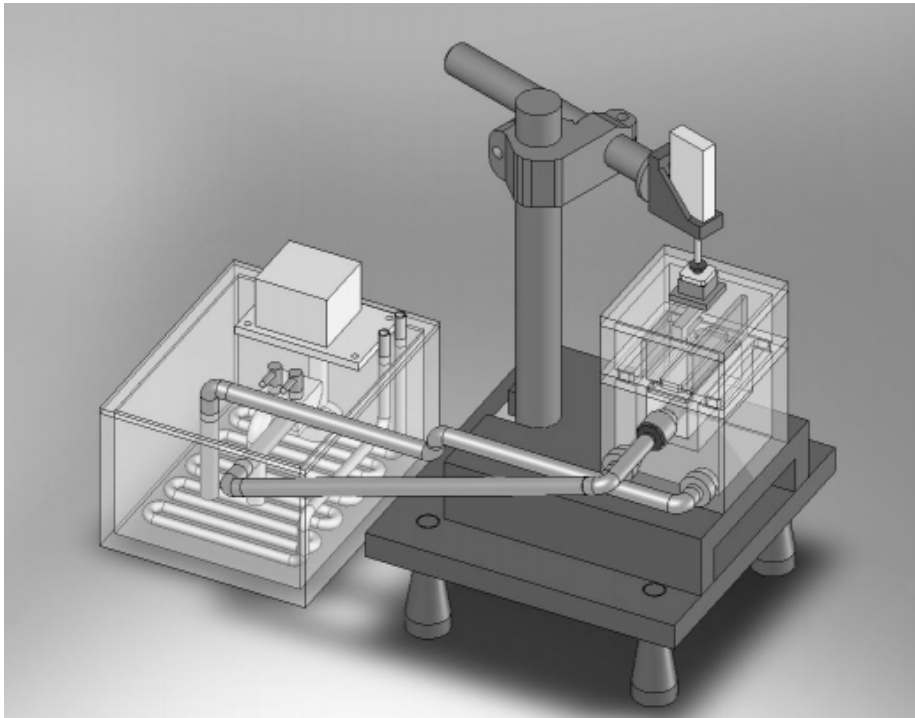
tornalamaya yansımış şekli olarak düşünülebilir. Düz tornalama için seçilmiş ilerleme miktarları ise vida takımının yan yüzeyinin vida açma esnasındaki ortalama talaş kalınlığına karşılık gelecek şekilde belirlenmiştir.

Kanal açma ve düz tornalama operasyonlarında dikkate alınan bu hususlar, çalışmanın ana amacı olan vida açılmış numunelerdeki kalıntı gerilmelerin bu iki farklı tornalama işlemi ile doğru bir biçimde karşılaştırılmasının yapılması içindir.

5.2. Ölçüm Deneyleri

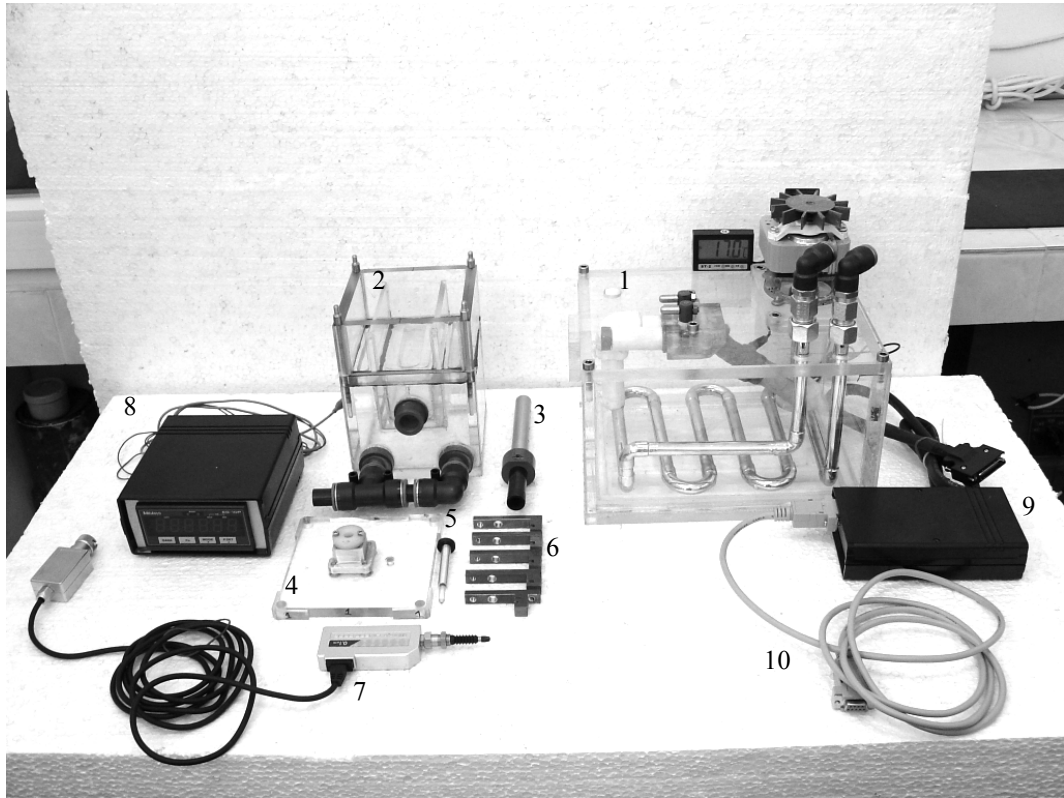
5.2.1. Elektro kimyasal katman kaldırma cihazı

Kalıntı gerilme ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için Şekil 5.3’de görülen bir sistem tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sistem tamamıyla aside dayanıklı olan polikarbonat ve PVC malzeme kullanılarak imal edilmiştir. Sistemde elektrolit akışını sağlayan bir pompa ve elektrolitin depolanmasını sağlayan bir hazne yer almaktadır.

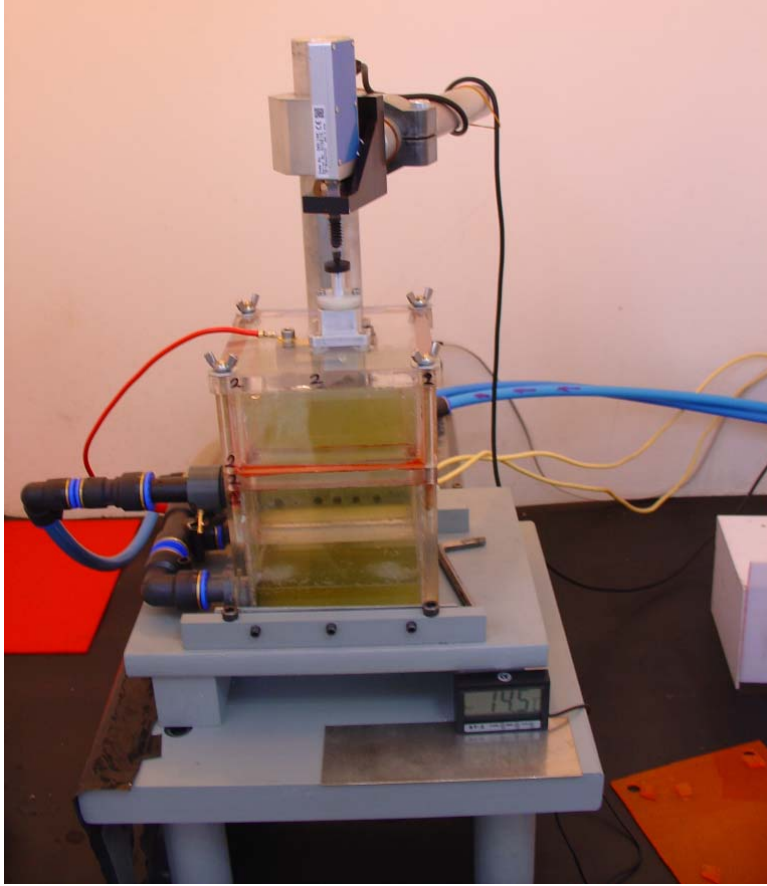


Şekil 5.3. Elektro kimyasal katman kaldırma düzeneği

Şekil 5.3’de tasarımı görülen cihaza ait diğer donanımlar Şekil 5.4’de fotoğraflanmıştır. Bu sistem on adet ana elemandan oluşmaktadır: (1) elektroliti taşıyan ve üzerinde devir daim pompası ve soğutma sistemi bulunan ana depo; (2) elektrolitin içerisinde dolaştığı ve deney numunesini üzerinde taşıyan elektro kimyasal işleme kutusu; (3) katot; (4) kapak; (5) ölçme çubuğu (6) anot görevini yapan ve üzerinden ölçüm alınan numuneleri bağlamak için özel olarak tasarlanmış numune bağlama ayakları; (7) 0,1 μm hassasiyetindeki doğrusal ölçüm aygıtı; (8) doğrusal ölçüm aygıtına ait gösterge paneli; (9) gösterge panelinden gelen veriyi dijital sinyale dönüştüren kart; (10) verilerin bilgisayara aktarılmasını sağlayan RS 232 ara bağlantı kablosu. Şekil 5.5’de ise detayları açıklanan bu sistemin çalışma durumu görülmektedir.



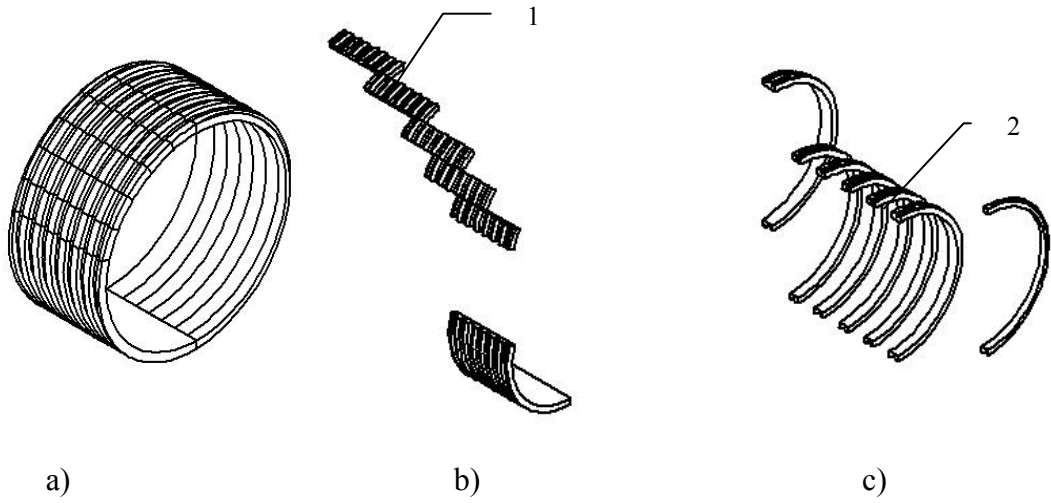
Şekil 5.4. Elektro kimyasal katman kaldırma sistemine ait parçalar



Şekil 5.5. Elektro kimyasal katman kaldırma sistemi

5.2.2. Ölçüm numunelerinin biçimi

Kalıntı gerilmelerin belirlenebilmesi için elektro kimyasal aşındırma deneylerinde kullanılacak numuneler tel erezyon tezgahında Şekil 5.6’da gösterilen biçimlerde kesilerek hazırlanmıştır. Elektro kimyasal aşındırma deneylerinde kullanılmak üzere tornalama işlemi tamamlanmış halka şeklindeki parçalardan iki tip numune kesilerek çıkarılmıştır. 1 numaralı numune, parça eksenine boyunca (kesici hareket yönünde veya işleme doğrultusunda) kesilerek çıkarılmıştır. Bu numune ile parça eksenine boyunca oluşmuş olan aksiyel yönlü gerilmeler belirlenmiştir. 2 numaralı numune parça eksenine dik olarak kesilerek çıkarılmıştır. Bu numune ise işlemenin çevre boyunca oluşturduğu çevresel yönlü kalıntı gerilmeleri belirlemek için kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Deneylerde kullanılan numunelerin biçimi ve hazırlanması

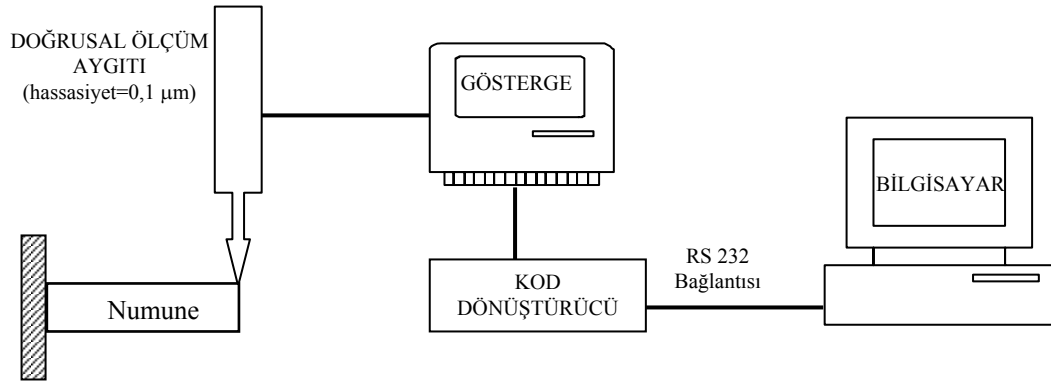
a) Kesme deneyleriyle hazırlanmış numune, b) Eksenel yönlü kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için hazırlanmış (1) numuneler, c) Çevresel yönlü kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için hazırlanmış (2) numuneler

5.2.3. Ölçümlerin yapılışı

Kalıntı gerilmelerin belirlenmesinde elektro kimyasal katman kaldırma metodu kullanılmıştır. Bu metotla kalıntı gerilmelerin belirlenmesi deformasyon esasına dayanmaktadır. Numuneden katmanlar kaldırıldıkça, gerilmelerin yeni denge durumu oluşturması neticesinde numune deformasyona uğrar. Bu deformasyon değeri ölçülerek kaldırılan katman derinliğine karşılık gelen kalıntı gerilme değerleri hesaplanabilir. Ölçüm öncesi kalibrasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. Çünkü deformasyon ölçümü $0,1 \mu\text{m}$ hassasiyette değişim değerlerini gösterebilme kabiliyetine sahip bir doğrusal ölçüm aygıtı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numuneden aşındırılan katman kalınlığının ölçümü ağırlık kaybı esasına göre, her bir deney numunesi için, yapılmıştır.

Şekil 5.7’de gösterilen deney düzeneği ile numunede katmanların kaldırılması esnasında meydana gelen deformasyon değerinin ölçüm şeması gösterilmektedir. Burada, elektrolit içerisindeki numuneden katmanların kaldırılması ile oluşan deformasyon $0,1 \mu\text{m}$ hassasiyete sahip doğrusal ölçüm aygıtı ile algılanmaktadır. Aygıtın algıladığı değer bir gösterge panelinde görüntülenmektedir. Bu gösterge panelinin çıktısı BCD (Binary Code Decimal) şeklindedir ve bu verilerin bilgisayara

aktarılması için kodun bilgisayarın anlayacağı veri düzenine dönüştürülmesi gerekmektedir. Kod dönüştürücü bu görevi yerine getirmektedir. Bilgisayarın veri formatına dönüştürülen bu kodlar RS-232 bağlantısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Böylece ölçüm aygıtından alınan ve gösterge panelinde görüntülenen değerler bilgisayara aktarılabilmektedir. Bilgisayara aktarılan veriler DELPHI yazılımında yazılan bir program sayesinde bilgisayarın sabit diskine yazılmaktadır. Ayrıca bu program sayesinde veri aktarma zaman aralığı seçilebilmekte ve verilerin yazılacağı dosya yeri ve adı belirlenebilmektedir. Program, aktarılan verileri *txt* formatında kayıt ederek sabit diskte saklamaktadır.



Şekil 5.7. Deformasyon değerinin belirlenmesi için hazırlanan deney düzeneği

5.3. Verilerin Değerlendirilmesi

5.3.1. Verilerin analizi ve düzenlenmesi

Şekil 5.16'daki deney düzeneği sayesinde *txt* formatında kaydedilen dosyalardaki deformasyon verileri ve deney sonunda ağırlık kaybı esasına göre belirlenen aşınma miktarları kalıntı gerilme değerlerinin hesaplanması için kullanılmıştır.

Bu verilerin düzenlenmesinde ve analizinde EXCEL, SAS-JMP 6.0, MINITAB 14 ve MATLAB yazılımları koordineli bir biçimde kullanılmıştır.

Verilerin ilk düzenlenmesi ve organizasyonu EXCEL yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Burada, aşındırılan her bir katmana karşılık gelen ölçülmüş deformasyon değerleri

tabloları dökülmüştür. Ayrıca, bu dosyalar her bir numune içerisinde hesaplama için gerekli tüm bilgileri içerecek şekilde düzenlenmiş ve kaydedilmiştir.

İkinci aşamada, aşınma verileri arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Hesaplama açısından bu değerlerin birbirlerine eşit olmaları gerekmektedir. Ancak, elektro kimyasal aşındırma doğasından dolayı her numunede bu aşınmalar farklı olmaktadır. Bu nedenle istatistiki açıdan bu değerlerin anlamlı farklılıklar içirip içermediğini araştırmak için JMP yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca JMP yazılımı yardımıyla, deformasyon verilerinin yeni aşınma değerlerine karşılık gelecek şekilde düzenlenmesi, eğri denklemlerinin çıkarılması, orijinal verilerle eğri denklemlerinden elde edilen değerlerin uyumunu gösteren korelasyon katsayılarının hesaplanması ve eğri denklemlerinden her bir noktaya karşılık gelen eğimlerinin (türev alınması) belirlenme işlemlerinin yapılmasında da bu yazılımdan faydalanılmıştır. İkinci aşamada yapılan tüm istatistiki analizlerden, aşınmalar arasında anlamlı bir fark bulunmadığı ve orijinal veriler ile elde edilen polinom türü denklemler arasındaki uyumu gösteren yüksek korelasyon ilişkisi tespit edilmiştir.

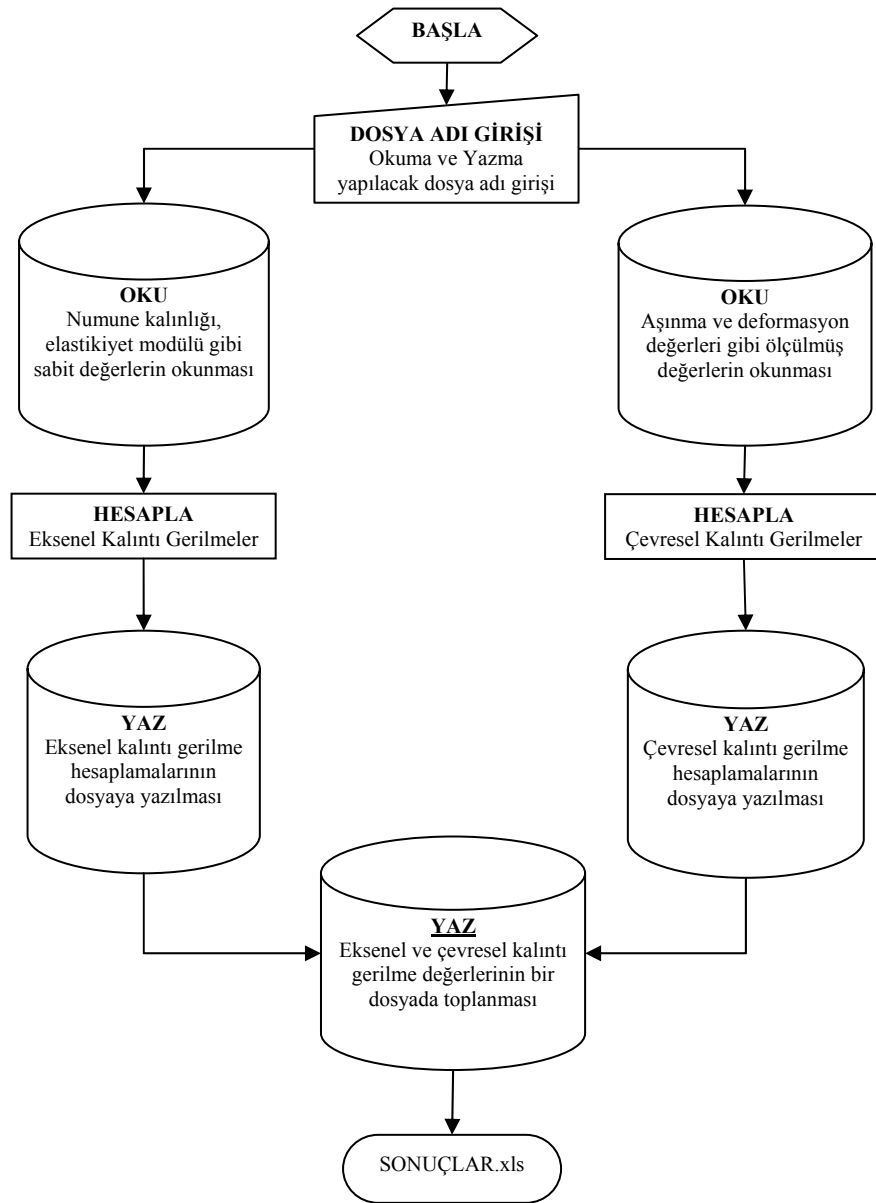
5.3.2. Kalıntı gerilme bileşenlerinin hesaplanması

Katman kaldırma metoduyla kalıntı gerilme hesaplamasının temel prensibi, kalıntı gerilme ölçüm metotları kısmında açıklanmıştır. Bu çalışmada, vida ve kanallardaki eksenel ve çevresel kalıntı gerilmelerin hesaplanmasında, Podzey tarafından yivli parçalar için geliştirilmiş eşitlikler kullanılmıştır [210].

EXCEL ve JMP yazılımları yardımıyla düzenlenen ve organize edilen işlenmeye hazır veriler MATLAB yazılımında yazılan kalıntı gerilme hesaplama programı tarafından kullanılmıştır.

Kalıntı gerilmelerin hesaplanması oldukça karmaşıktır ve dikkat gerektiren titiz bir çalışmayı gerektirmektedir. Bu çalışmada, her bir numuneye ait eksenel ve çevresel kalıntı gerilme değerlerinin hesaplanması için MATLAB yazılımından

faydalanılmıştır. MATLAB yazılımı ile yazılan program sayesinde gerçekleştirilen hesaplama işleminin akış şeması Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Hesaplama prosedürü akış şeması

Hesaplama prosedürüne göre, ham verilerden hazırlanan veriler ayrı ayrı her bir numune için bir EXCEL dosyasında toplanmıştır. Bu dosyada ayrıca hesaplamada kullanılacak sabit ve ölçülmüş diğer veriler de yer almaktadır. MATLAB’da yazılan program, EXCEL dosyalarındaki verileri okumakta, gerekli hesaplamaları yapmakta ve yine bu dosyalara hesaplama ile ilgili bütün sonuçları yazmaktadır. Bunun

yanında, hesaplanan eksenel ve çevresel kalıntı gerilme değerleri değerlendirmede kullanmak üzere ayrı bir dosyaya ayrıca yeniden yazdırılmaktadır. Bu işlemlerin hepsi, yazılan hesaplama programı sayesinde, eş zamanlı olarak tek seferde yapılmaktadır.

5.3.3. Kalıntı gerilme bileşenlerinin analizi

Kalıntı gerilmeleri hesaplanan ve ilgili sonuç dosyasına yazılan veriler daha sonra yeniden JMP ve MINITAB yazılımları kullanılarak işlenmekte, grafiklere dökülmekte, karşılaştırmada kullanılacak veri grupları çıkarılmaktadır. Kalıntı gerilme profillerini gösteren grafiklerden parametre etkilerini değerlendirmek zordur. Kalıntı gerilme grafikleri gerilme profilleri hakkında detaylı bilgi sağlarken, değişik parametrelerle işlenmiş numuneler arasındaki farklılıkları göstermesi açısından yetersizdir. Bu nedenle, kalıntı gerilmeler üzerinde işleme parametrelerinin etkisini görmek için numune üzerindeki kalıntı gerilmeleri tarif eden temel sınır değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir numunedeki kalıntı gerilmeleri tarif eden temel sınır değerleri;

- a. σ_y ; yüzeydeki kalıntı gerilme değeri,
- b. $\sigma_{\max}$; maksimum kalıntı gerilme değeri,
- c. $\sigma_{\min}$; minimum kalıntı gerilme değeri,
- d. $a_{\max}$; maksimum kalıntı gerilme etki derinliği,
- e. $a_{\min}$; minimum kalıntı gerilme etki derinliği,
- f. a_0 ; faydalı gerilme nüfuziyet derinliği,

şeklindedir. Bu gerilme sınır değerleri her bir numune için JMP yazılımı yardımıyla hesaplanan verilerden elde edilmiştir.

Bu temel gerilme sınır değerleri her bir numunenin işlenmesi esnasında dikkate alınan,

- a. Kesme hızı (V),
- b. Paso sayısı (PS) / ilerleme miktarı (f)
- c. İş malzemesi sertliği (MS),
- d. Kesici takım kaplamasının ısı iletim katsayısı (IİK),

parametrelerine karşılık gelecek şekilde oluşturulmuştur.

Numune işleme parametrelerine göre temel gerilme değerleri çıkarılan deney gruplarına MINITAP yazılımı kullanılarak ANOVA testi (varyans analizi) uygulanmıştır. ANOVA tabloları temel gerilme değerleri üzerinde her bir işleme parametresinin etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. ANOVA tablolarına ek olarak çıkarılan ana etki ve etkileşim grafikleri her bir parametre grubundaki seviye etkilerinin belirlenmesinde ve birbiri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında yardımcı olmaktadır. ANOVA testleri özellikle deneysel sonuçların doğru bir şekilde yorumlanmasında yardımcı olmuştur.

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm, kalıntı gerilme ölçüm sonuçları ve işleme parametrelerin kalıntı gerilmeler üzerine etkileri olmak üzere iki başlık altında ele alınmıştır. Kalıntı gerilme ölçüm sonuçlarının ele alındığı kısımda, işleme şartlarına bağlı olarak kalıntı gerilmelerin derinliğe göre değişim profilleri verilmiştir. Bu kalıntı gerilme profilleri hem AISI 4140 hem de AISI 4340 malzeme gruplarını içermektedir. Ayrıca, kalıntı gerilmelerin maksimum ve minimum düzeyleri ile bunların etki derinliklerini tarif eden kalıntı gerilme sınırları bu grafiklerden elde edilmiştir. Kalıntı gerilme profilleri üzerinden elde edilen bu kalıntı gerilme sınır değerleri işleme parametrelerinin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. İşleme parametrelerinin kalıntı gerilmeler üzerine etkisi başlıklı kısımda kalıntı gerilme grafiklerinden elde edilen sınır değerlerinin varyans analizi yapılarak işleme şartlarının kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Kalıntı gerilme sınırlarının işleme parametrelerinin seviyelerine göre değişimini araştırmak içinse etki grafiklerinden faydalanılmıştır.

6.1. Kalıntı Gerilme Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Malzeme gruplarına göre her bir numuneye ait eksenel ve çevresel kalıntı gerilme profillerinin grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler kalıntı gerilmelerin derinliğe bağlı olan değişimini göstermektedir.

Bu bölümde, sırasıyla vida açılmış, kanal açılmış ve düz tornalanmış numunelerden elde edilmiş eksenel ve çevresel kalıntı gerilme verilerin malzeme gruplarına göre sınıflandırılmış sonuçları verilmiştir. Deney numarası ile birlikte her bir numune için uygulanan işleme şartı grafik üzerinde gösterilmiştir.

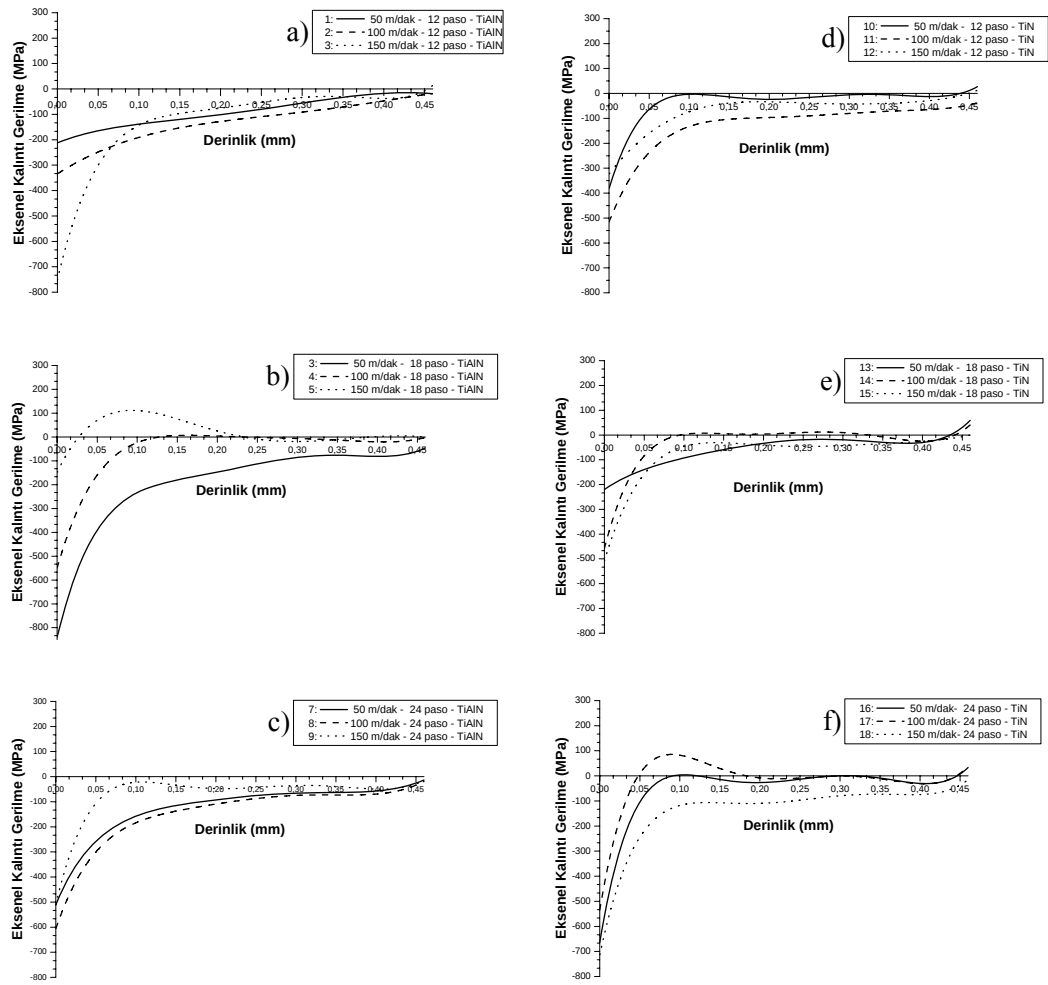
Bütün deneylerde her numune için yeni bir kesici uç kullanılmıştır. Vida açma işlemlerinin tamamı soğutma sıvısı uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Vida açma işlemine ait sonuçlar

Şekil 6.1-6.4, vida açma işlemi neticesinde vida diş bibinde meydana gelmiş derinliğe bağlı, eksenel ve çevresel yönlü kalıntı gerilme değişim profillerini göstermektedir.

Eksenel yönlü kalıntı gerilmeler

Şekil 6.1a-c TiAlN kaplamalı takımla, Şekil 6.1d-f ise TiN kaplamalı takımla AISI 4140 malzemeye metrik vida açılması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. TiAlN takımla işlenmiş numunelerin hepsinde eksenel kalıntı gerilmeler yüzeyde basma çıkmıştır ve ölçüm yapılan derinlik boyunca basma özelliğini korumuştur. -840 MPa değeriyle en yüksek yüzey basma gerilmesi 50 m/dak kesme hızı ve 18 pasonun kullanıldığı 4 numaralı deneyde bulunmuştur. TiAlN takımın kullanılarak vida açıldığı 50 ve 100 m/dak'lık kesme hızları daha istikrarlı değerler verilmiştir. 50 ve 100 m/dak'lık kesme hızlarında mekanik etkili kalıntı gerilmeler baskındır. 150 m/dak'lık kesme hızı 12 pasoda talaş yükünün fazla olmasından kaynaklanan kesme kuvvetinin artışı nedeniyle yüksek yüzey basma kalıntı gerilmesi oluşturmuştur. Fakat, 18 ve 24 paso sayılarında 150 m/dak kesme hızı düşük yüzey basma kalıntı gerilmesi vermiştir. Bu değer çok hızlı düşmekte ve 18 pasoda yaklaşık 0,025 mm derinlikte çekme kalıntı gerilmesine dönüşmektedir. TiAlN takım düşük ısıl iletim katsayısına sahip olmasına rağmen, düşük sürtünme katsayısı nedeniyle aşınma direnci yüksektir. TiN takımla işlenmiş numunelerdeki gerilme profilleri TiAlN ile işlenmiş numunelerle karşılaştırıldığında yüzey basma kalıntı gerilmelerinin daha hızlı azaldığı görülmektedir. -713 MPa değerindeki en yüksek yüzey basma gerilmesi TiN kaplamalı takımla 150 m/dak ve 24 pasonun kullanıldığı 18 numaralı deneyde bulunmuş, 0,10 mm derinlik civarında-120 MPa değerine düşmüş ve ölçüm derinliği boyunca da bu değerini hemen hemen korumuştur. TiN kaplamalı takımın ısıl iletkenliği yüksektir ve bu yüksek ısıl iletkenlik yan yüzey aşınmasını artırır. Yüksek pasolarda basma gerilmelerinin hızla düşmesine hatta çekme gerilmelerinin oluşmasına yan yüzey aşınmasının neden olduğu düşünülmektedir.



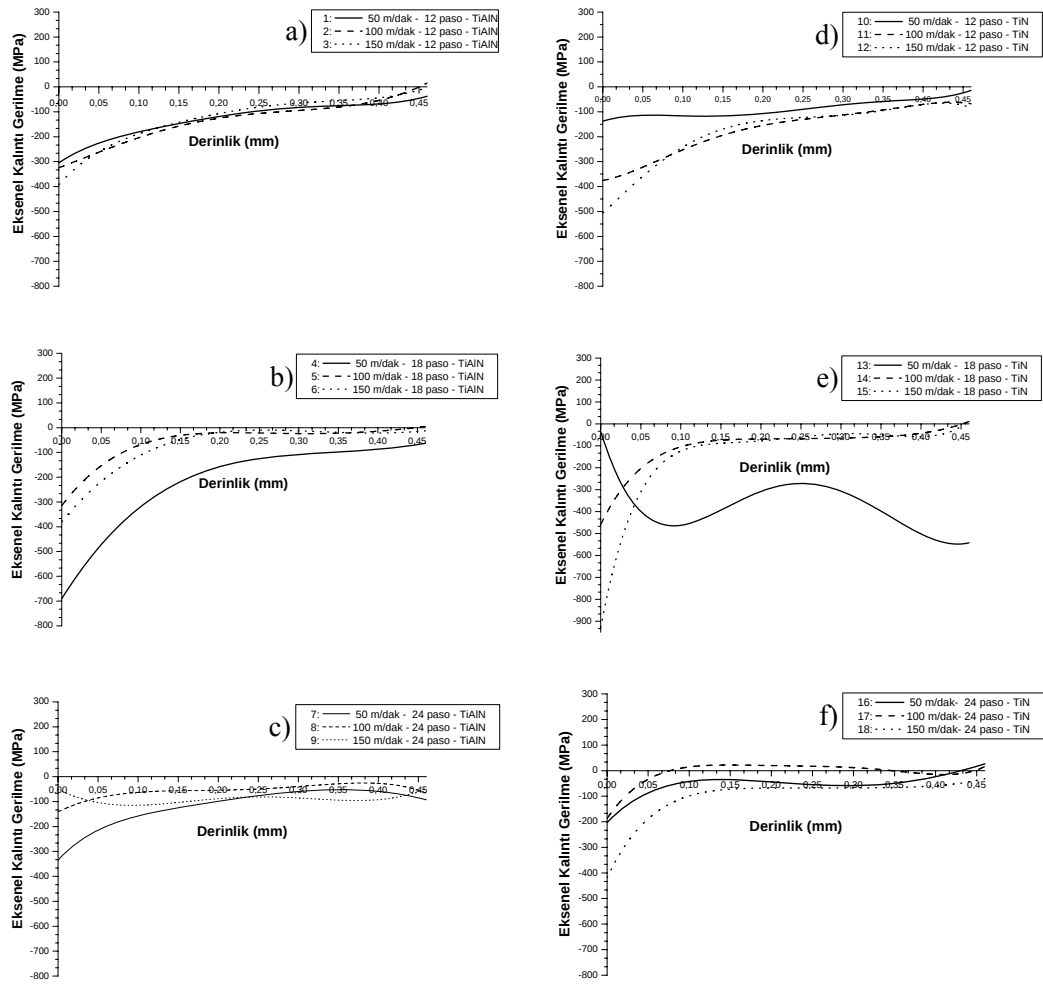
Şekil 6.1. Metrik vida açılmış AISI 4140 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım

Şekil 6.2a-c TiAlN kaplamalı takımla, Şekil 6.2d-f ise TiN kaplamalı takımla AISI 4340 malzemeye metrik vida açılması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. 12 pasoda TiAlN takımının kullanıldığı deneyde bütün kesme hızlarında profiller birbirine benzemektedir. Yine de en yüksek yüzey basma gerilmesi 150 m/dak'lık kesme hızında görülmüştür. 18 ve 24 paso sayısı kullanıldığında 50 m/dak'lık kesme hızında yüzey basma gerilmelerinin de arttığı görülmektedir. TiN kaplanmış takımın kullanıldığı durumlarda da paso sayısına bağlı olarak yüzey basma kalıntı gerilmeleri değişmiştir. 18 pasoda en yüksek değerler elde edilirken, 24 pasoda bu değerler düşmüştür. Tüm gerilme

profilleri ölçüm derinliği boyunca basma özelliğini korumuştur. TiAlN takımın kullanıldığı deneylerde -690 MPa değeriyle 50 m/dak ve 18 pasonun kullanıldığı 4 numaralı deneyde elde edilmiştir. TiN takımın kullanıldığı deneyde en yüksek yüzey basma gerilmesi -930 MPa değerindedir ve 150 m/dak kesme hızının ve 18 pasonun kullanıldığı 15 numaralı deneyde elde edilmiştir.

Vida açma işleminde eksenel yönlü yüzey kalıntı gerilmeleri üzerinde paso sayısı daha baskın özellikler göstermiştir. Vida açma işleminde paso sayısı yanal ilerleme oranını belirlemektedir. Paso sayısı arttıkça yanal ilerleme miktarı düşer ve bu basma kalıntı gerilmelerine neden olur. Paso sayısının çok arttırılması bu yanal ilerleme miktarlarını daha da düşürür. Takım iş parçasına daha fazla sürtünür ve ortaya çıkan ısı etkisi nedeniyle basma gerilmelerinin değerleri düşer.

Düşük kesme hızlarında TiAlN takım en iyi performansı gösterirken TiN yüksek kesme hızlarında daha iyidir. Kesici uç kaplamanın ısı iletkenlik katsayısı yüzeyde oluşacak basma gerilmeleri üzerinde etkilidir. Isıl iletim katsayısı yükseldikçe parçadan uzaklaştırılacak ısı miktarı artar. Bir yandan da takım fazla ısıya maruz kaldığı için yan yüzey aşınması daha fazla olur [65, 161, 174-177]. TiN kaplamalı takım özellikle yüksek pasolu işlemede yüzey altında çekme kalıntı gerilmelerini bu nedenle oluşturmıştır. Ayrıca, AISI 4340 çelikteki eksenel yönlü kalıntı gerilme değerlerinin düşük çıkmasında malzeme sertliğinin etkisi vardır. AISI 4140 (342 BSD) çelik AISI 4340 (314 BSD) çelikten daha serttir. Daha sert malzemelerde talaş kaldırma işlemi daha yoğun mekanik deformasyon altında gerçekleşir [65]. Bu basma kalıntı gerilmelerin büyüklüğünü etkiler. Fakat ilerleme miktarının daha fazla azaltılması sürtünmeyi arttıracığından takım aşınmasını hızlandırır. Takımın beklenenden önce aşınması ise hem çekme kalıntı gerilmelerinin değerini yükseltir hem de yüzeyde veya yüzeye yakın yerlerde meydana gelmesine neden olur [107, 131, 161].



Şekil 6.2. Metrik vida açılmış AISI 4340 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım

Hem AISI 4140 hem de 4340 malzeme için 18 paso her iki kaplama tipi için en yüksek yüzey basma kalıntı gerilmeleri vermiştir. Bu durum, kalıntı gerilmeler üzerinde talaş derinliğinin etkisinden ziyade yanal ilerleme miktarındaki değişimin bir sonucudur.

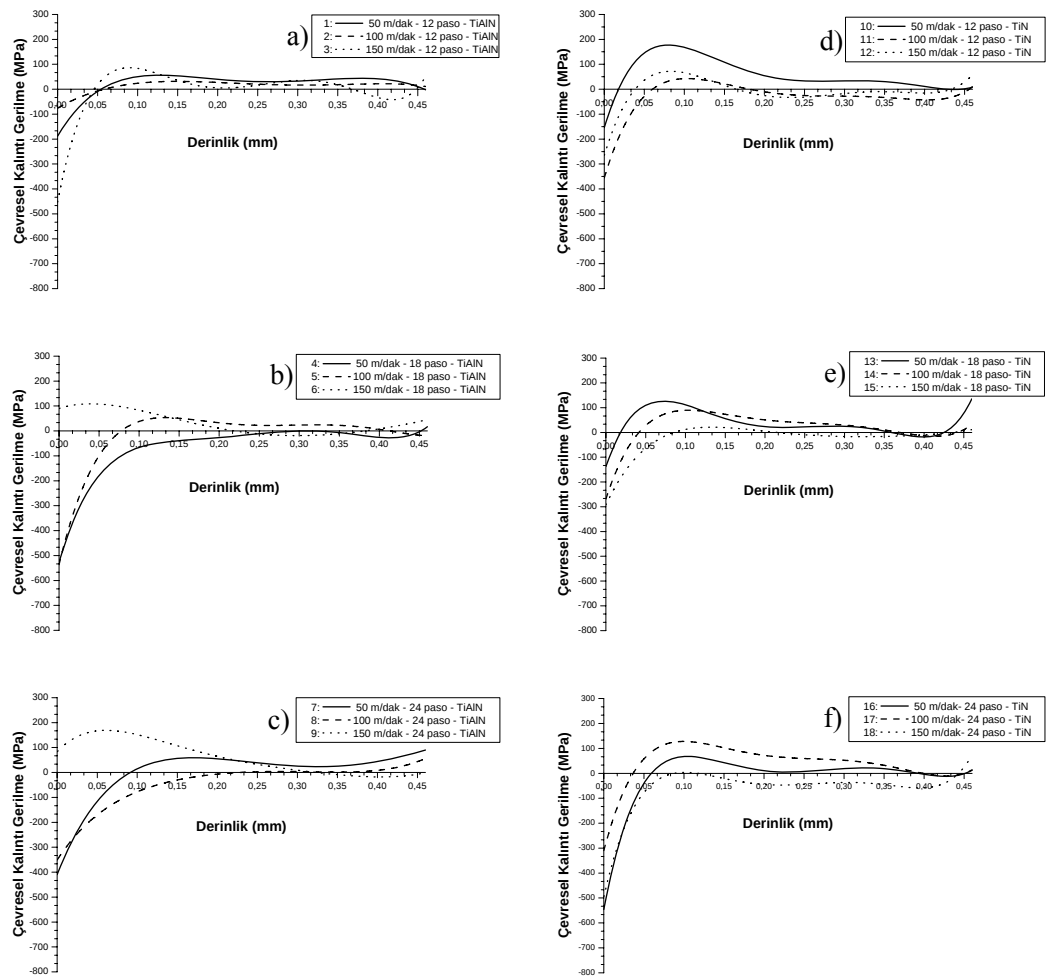
Vida açma işleminde paso sayısı eksenel yönlü yüzey kalıntı gerilmelerinin üzerinde etkili olmuştur. Vida açma işlemlerinde paso sayısının daha fazla artırılması vida takımının kesici kenarının daha fazla aşınmasına neden olur. Bu sürtünmeyi artırır ve sonuçta oluşan ısı basma gerilmelerinin seviyesini düşürür [107, 161].

Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler

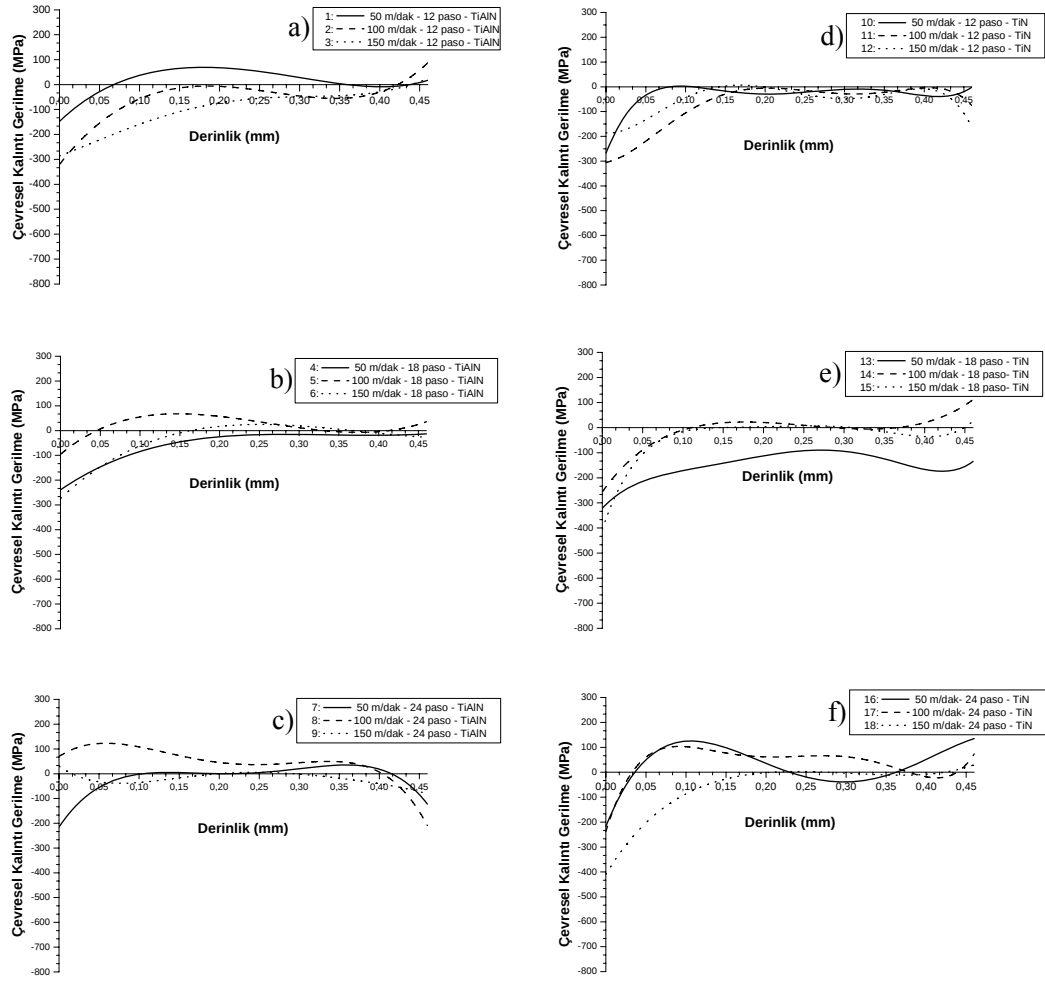
Şekil 6.3a-c TiAlN kaplamalı takımla, Şekil 6.3d-f ise TiN kaplamalı takımla AISI 4140 malzemeye metrik vida açılması neticesinde meydana gelen çevresel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. AISI 4140 malzemenin TiAlN kaplamalı takımla işlenmesi neticesinde yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri görülmüştür. En yüksek değer -536 MPa ile 5 numaralı numunede oluşmuştur. Gözlemler yüzeydeki bu basma kalıntı gerilmelerinin etki derinliğinin düşük olduğunu göstermiştir. Bu, kesme esnasında oluşan ısının parçaya aktarılmasından kaynaklanmaktadır. TiAlN takımla işlenmiş numunelerde basma gerilmeleri yaklaşık 0,05~0,25 mm derinlikler arasında çekmeye dönüşmüştür. Bu da, çevresel kalıntı gerilmeler üzerinde ısı kaynağının daha etkili olduğunu gösterir. TiN takımla işlenmiş numunelerdeki kalıntı gerilme profillerinin basmadan çekmeye geçtiği etki derinliğinin düşük olmasının yan yüzey aşınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üstelik TiN kaplamalı takım yüksek çekme kalıntı gerilmelerine de neden olmuştur. Çevresel kalıntı gerilmelerde AISI 4140 çelikte çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri AISI 4340 çelikten daha yüksek çıkmıştır. Buna AISI 4140 çeliğin (342 BSD) AISI 4340 (314 BSD) çelikten daha sert olması neden olmuştur. AISI 4140 çeliğin TiAlN kaplamalı takımla düşük kesme hızlarında işlenmesi yüksek çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri verirken, TiN kaplamalı takım yüksek kesme hızlarında yüksek çevresel kalıntı gerilmeler vermiştir. TiAlN kaplama düşük ısıl iletim katsayısına sahip olmasına rağmen sürtünme katsayısının düşüklüğü ve yüksek aşınma direnci nedeniyle düşük ve orta kesme hızlarında iyi performans göstermiştir. AISI 4140 çeliğin TiN kaplamalı takımla işlenmesinde çevresel kalıntı gerilme etki derinliği daha düşüktür ve 0,02~0,10 mm civarındaki derinliklerde çekme kalıntı gerilmelerine dönüşmüştür. Buna, TiN kaplamanın yüksek ısıl iletkenliğinden kaynaklanan yan yüzey aşınmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.4a-c TiAlN kaplamalı takımla, Şekil 6.4d-f ise TiN kaplamalı takımla AISI 4340 malzemeye metrik vida açılması neticesinde meydana gelen çevresel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. AISI 4140 çeliğin kalıntı gerilme profilleri ile benzerlik göstermesine rağmen kalıntı gerilme değerleri düşüktür. AISI

4340 çelik, AISI 4140 çelikten daha yumuşaktır. Takımın arkasındaki çekme plastik deformasyonuna neden olan çekme gerilmesi, daha sert malzeme kesilirken daha büyük olur. Yüksek sertliğe sahip malzeme kesildiği zaman kesici kenarın önündeki basma plastik deformasyonu yumuşak olan malzemenin kesilmesinden daha küçük olacaktır. Takımın oluşturduğu gerilmelerin kalkmasıyla parça üzerindeki kuvvetler yeniden dengelenecek ve daha fazla basma kalıntı gerilmeleri oluşturulacaktır [66, 164].



Şekil 6.3. Metrik vida açılmış AISI 4140 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım



Şekil 6.4. Metrik vida açılmış AISI 4340 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN kaplamalı takım

6.1.2. Kanal açma işlemine ait sonuçlar

Şekil 6.5-6.8, kanal açma işlemi neticesinde meydana gelmiş derinliğe bağlı, eksenel ve çevresel yönlü kalıntı gerilme değişim profillerini göstermektedir.

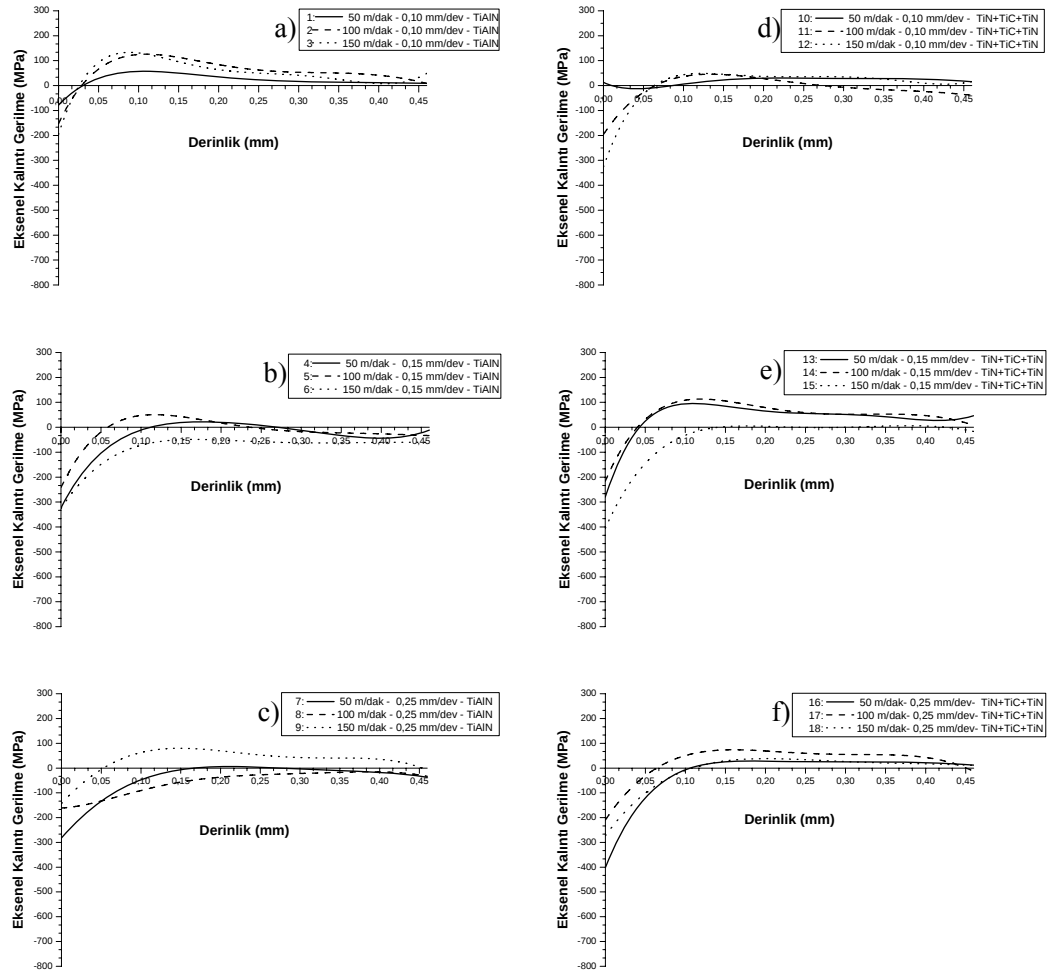
Kanal açmada vida açmada kullanılan paso sayısı yerine ilerleme miktarı kullanılmıştır. Kanal açmada takım, vida açmada ve düz tornalamadan farklı olarak radyal ilerleme yönünde ilerleyerek talaş kaldırır. Bu yönüyle vida açma ve düz tornalamadan farklıdır.

Eksenel yönlü kalıntı gerilmeler

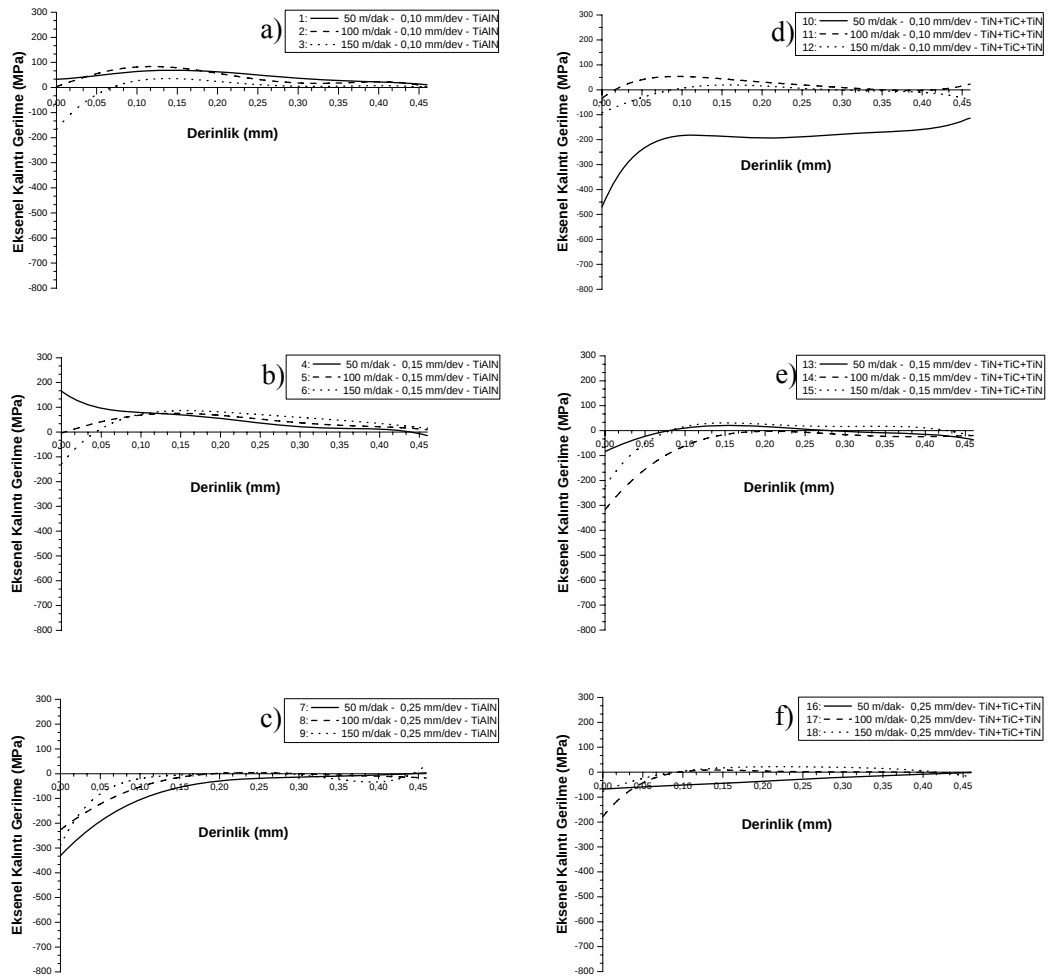
Şekil 6.5a-c TiAlN kaplamalı takım, Şekil 6.5d-f ise TiN+TiC+TiN kaplamalı takım, AISI 4140 malzemeye yuvarlak kanal açılması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. TiAlN takımın kullanıldığı uygulamada en yüksek basma kalıntı gerilmesi -325 MPa değeri ile 6 numaralı deney şartlarında oluşurken, TiN+TiC+TiN takımın kullanıldığı uygulamada en yüksek basma kalıntı gerilmesi 15 numaralı uygulamada -405 MPa olarak bulunmuştur. 6 ve 15 numaralı deneylerde 150 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarı kullanılmıştır. Grafiklerde kalıntı gerilmelerin kesme hızından ziyade ilerleme miktarı ile değiştiği görülmektedir. Etki derinliğinin ilerleme oranı artışıyla arttığı görülmektedir. İlerleme miktarı artışıyla takım önünde ezilen malzeme miktarı da artar. Takım ucu tarafından ezilen malzeme miktarının artması malzeme yüzeyine daha fazla baskı anlamına gelir. Kesici takım yeni oluşmuş yüzeyden ayrıldığı zaman ezilmiş yüzeydeki basma gerilmeleri soğuma nedeniyle gevşeyerek düşük değerler alır ve derinlerde çekme gerilmelerine dönüşür [8, 164].

Şekil 6.6a-c TiAlN kaplamalı takım, Şekil 6.6d-f ise TiN+TiC+TiN kaplamalı takım, AISI 4340 malzemeye yuvarlak kanal açılması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. TiAlN takımın kullanıldığı uygulamalarda yüzey gerilmeleri genelde düşük seviyeli çekme ve basma kalıntı gerilmelerinden oluşmuştur. Ama 0,25 mm/dev ilerleme miktarıyla basma gerilmeleri oluşmuştur. En yüksek yüzey basma kalıntı gerilme değeri 50 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/dev ilerleme miktarının kullanıldığı 7 numaralı uygulamada yaklaşık -330 MPa civarında gerçekleşmiştir. TiN+TiC+TiN kaplamalı takım en yüksek yüzey basma kalıntı gerilmesi 50 m/dak kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme miktarının kullanıldığı 10 numaralı numunede görülmektedir. Bu değerlerin AISI 4140 malzemedan oldukça düşük gerçekleşmesi tamamen malzeme sertliği ile ilişkilidir. Ayrıca, TiAlN kaplamalı takım düşük ısı iletkenliğine rağmen yüksek ilerleme oranlarında daha iyi sonuç vermiştir. TiN+TiC+TiN kaplamalı takım ise yüksek ısı iletkenliğe rağmen düşük ilerleme miktarı ile etkili çıkmıştır. Bunun tamamen kaplamaların aşınma direnci ile ilgili olduğu düşünülmektedir. İlerleme

miktarı artışı takıma gelen yükü arttırmaktadır. Bu da kesme kenarının beklenenden daha erken özelliğini yitirmesine neden olur [107]. Kesme özelliği zayıflamış takım kesme sıcaklığını arttıracığından, malzemede her zaman çekme yönünde kalıntı gerilmeler vermekte ve çekme katmanının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 6.5. Kanal açılmış AISI 4140 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım

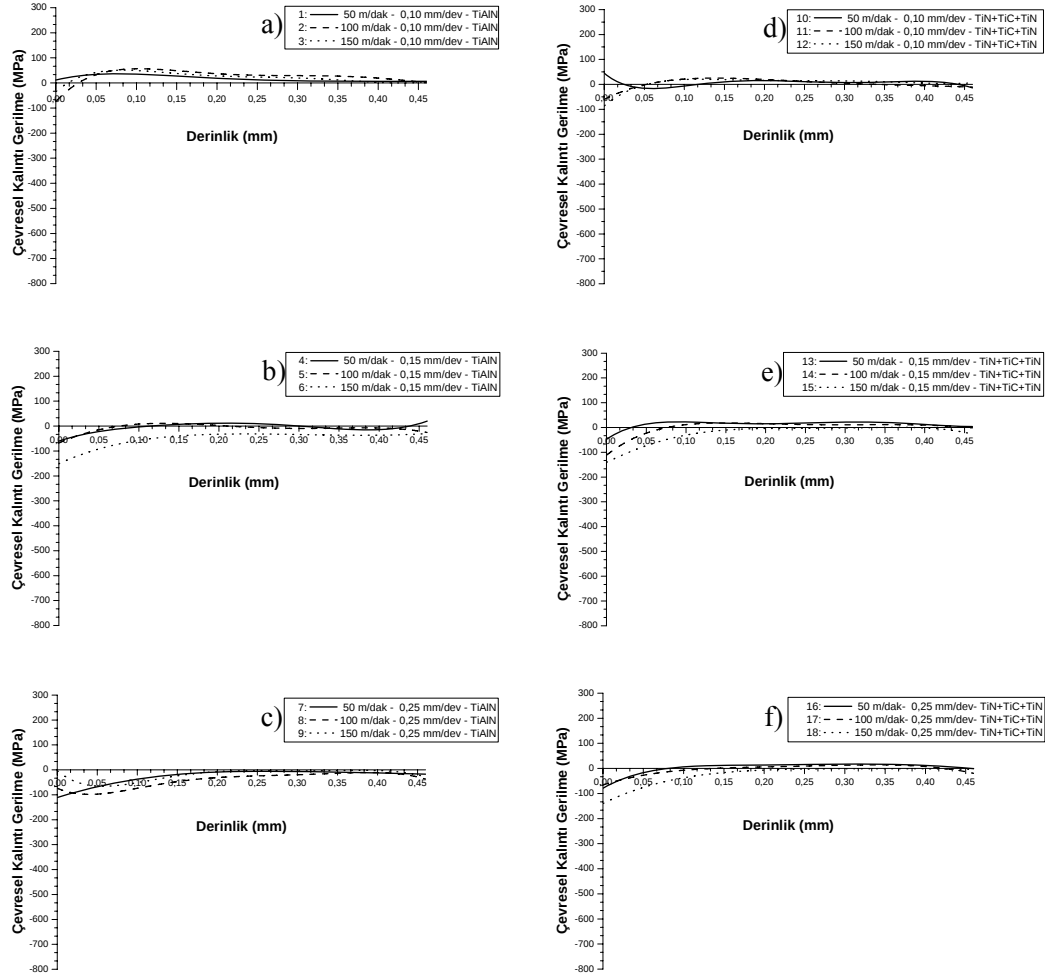


Şekil 6.6. Kanal açılmış AISI 4340 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım

Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler

Şekil 6.7a-c TiAlN kaplamalı takımla, Şekil 6.7d-f ise TiN+TiC+TiN kaplamalı takımla AISI 4140 malzemeye yuvarlak kanal açılması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. Bütün işleme şartlarında çok düşük seviyede yüzey basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmeler yüzey altında neredeyse sıfırlanarak derinlik boyunca devam etmiştir. Bu durum çevresel gerilmeleri meydana getiren kesme kuvvetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

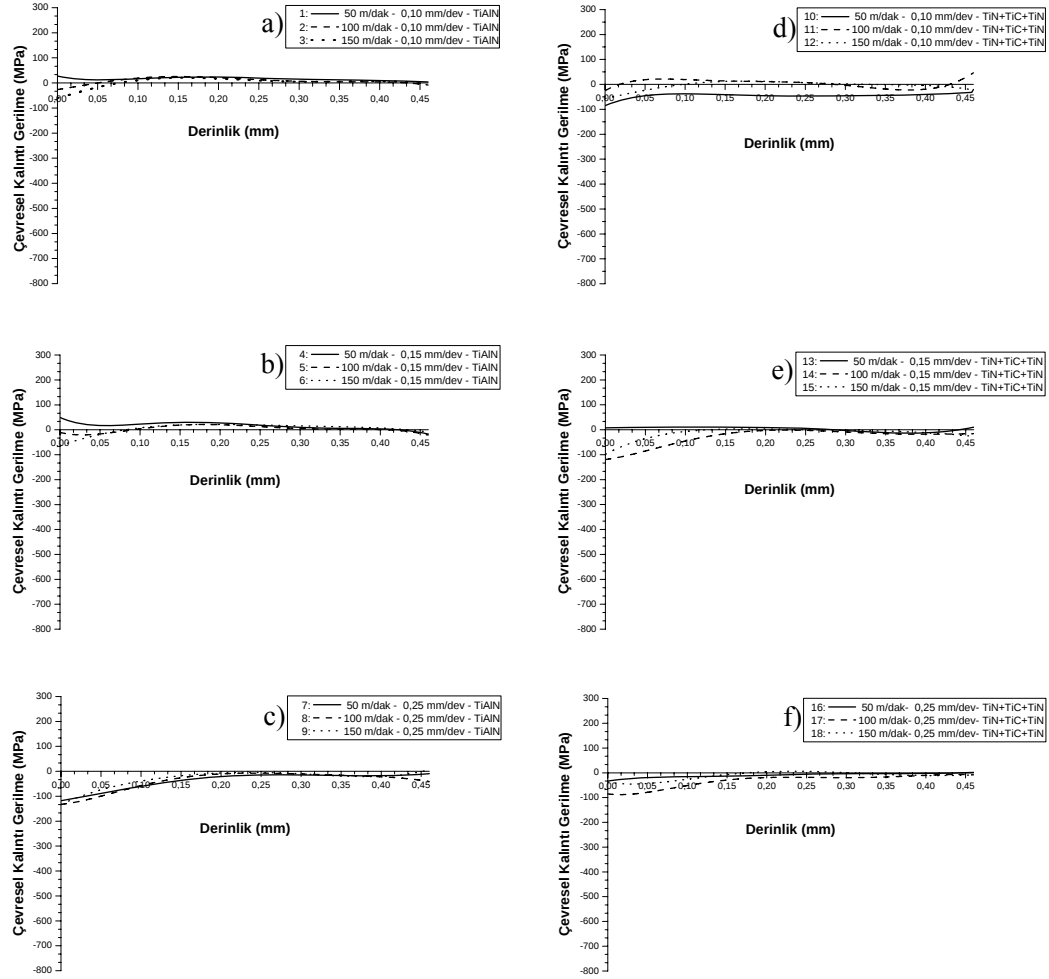
Çünkü, burada takımın ilerleme yönündeki radyal kuvvetin kesme kuvvetinden daha baskın olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.7. Kanal açılmış AISI 4140 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım

Şekil 6.8a-c TiAlN kaplamalı takımla, Şekil 6.8d-f ise TiN+TiC+TiN kaplamalı takımla AISI 4340 malzemeye yuvarlak kanal açılması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir. Bütün işleme şartlarında çok düşük seviyede yüzey basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmeler yüzey altında neredeyse sıfırlanarak derinlik boyunca devam etmiştir. AISI 4140 ile AISI 4340 çeliğe ait çevresel kalıntı gerilme profilleri birbirine çok benzer. AISI 4140 çeliğe ait

kalıntı gerilme değerlerinin çok az da olsa büyük çıkması tamamen AISI 4340'a göre AISI 4140'ın sert olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.8. Kanal açılmış AISI 4340 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiAlN kaplamalı takım, d-f) TiN+TiC+TiN kaplamalı takım

6.1.3. Düz Tornalama işlemine ait sonuçlar

Şekil 6.9-6.12, düz tornalama işlemi neticesinde meydana gelmiş derinliğe bağlı, eksenel ve çevresel yönlü kalıntı gerilme değişim profillerini göstermektedir.

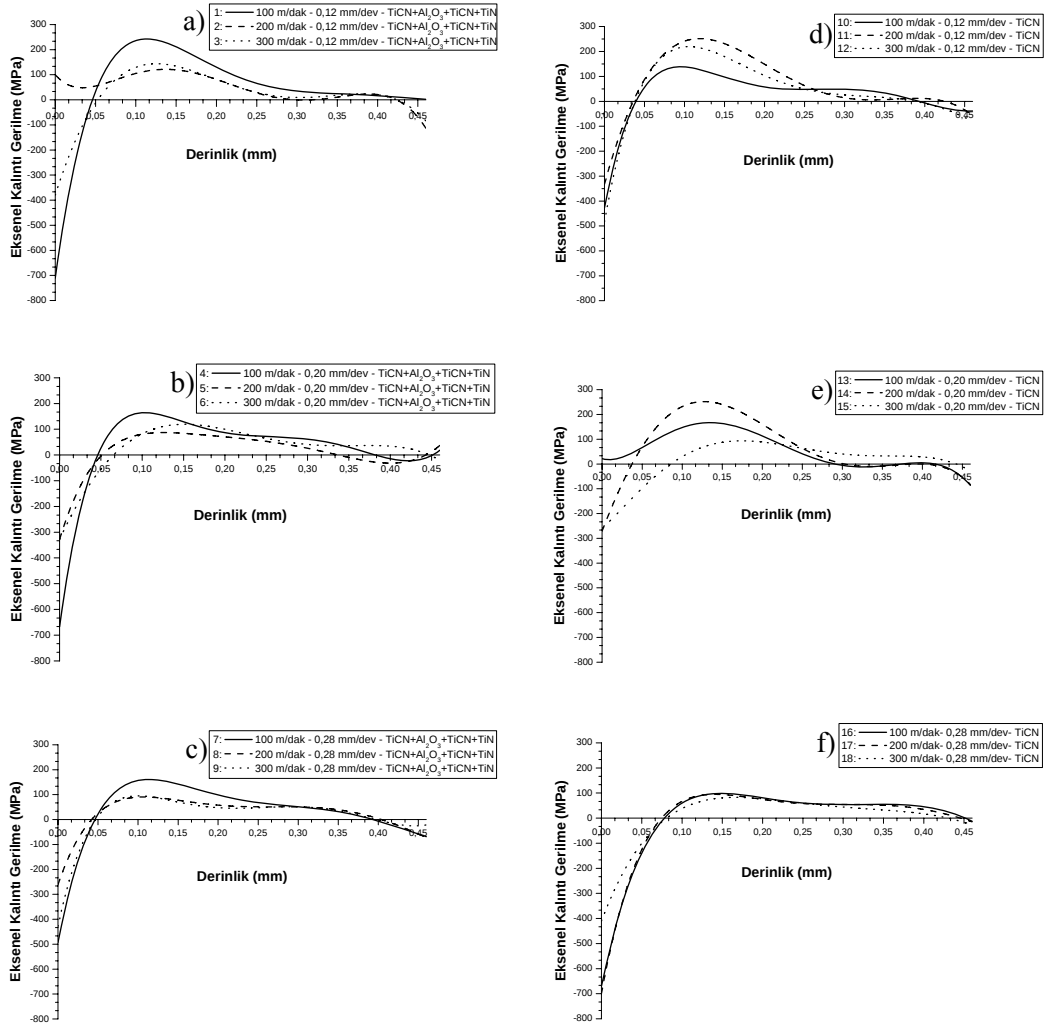
Eksenel yönlü kalıntı gerilmeler:

Şekil 6.9a-c TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takımla, Şekil 6.9d-f ise TiCN kaplamalı takımla AISI 4140 malzemenin düz tornalanması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir.

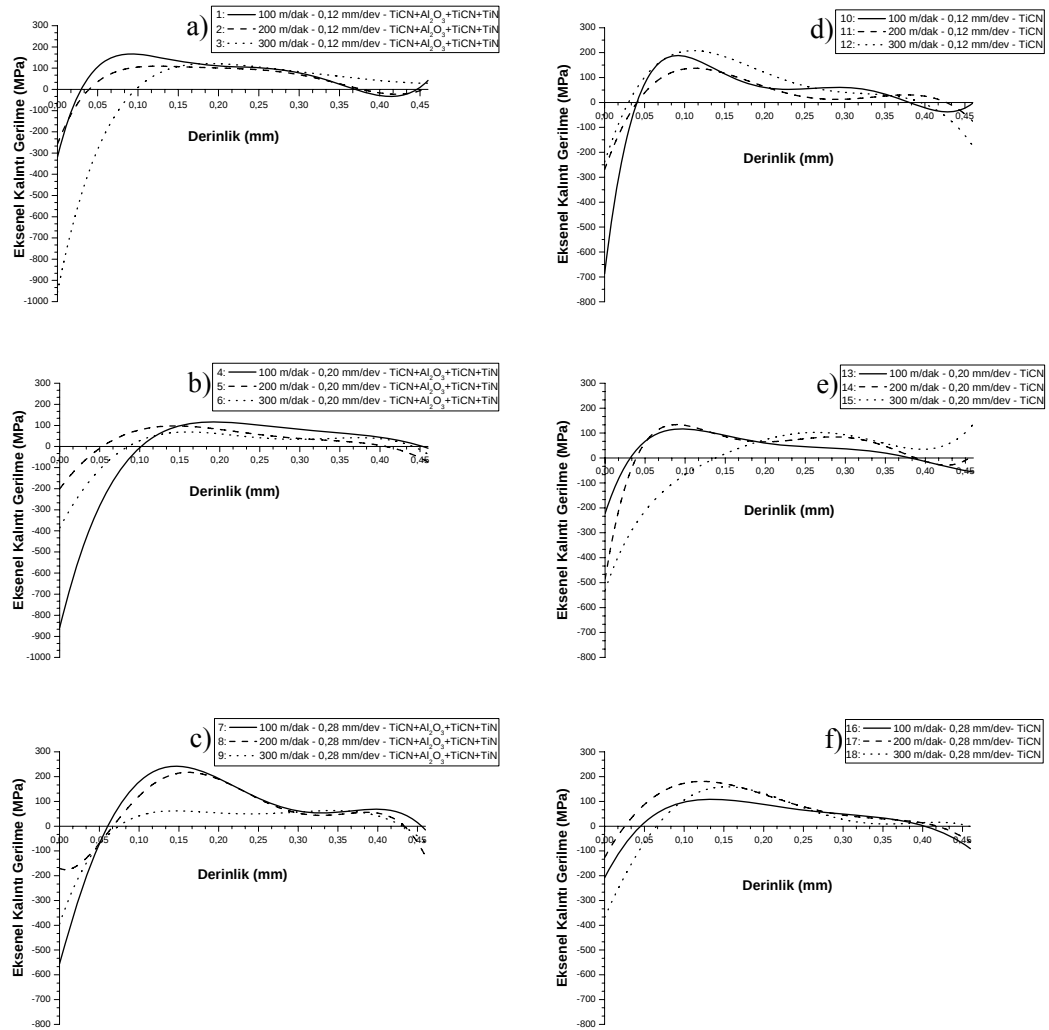
TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takımın kullanıldığı AISI 4140 malzemede en yüksek yüzey basma gerilmesi -710 MPa değeriyle 1 numaralı numunede görülmüştür. Ayrıca, aynı numunede yaklaşık 0,11 mm derinlikte 240 MPa değerinde en büyük çekme gerilmesi meydana gelmiştir. TiCN kaplamalı takımın kullanıldığı 16 ve 17 numaralı numunelerde yaklaşık -670 MPa civarında en yüksek yüzey basma gerilmesi elde edilmiştir. Basma gerilmelerinin etki derinliği 0,08 mm derinliğe kadar devam etmiş ve 0,14 mm derinlikte 98 MPa'lık çekme gerilmesi oluşmuştur.

Şekil 6.10a-c TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takımla, Şekil 6.10d-f ise TiCN kaplamalı takımla AISI 4340 malzemenin düz tornalanması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme değişimleri incelendiğinde en yüksek yüzey basma gerilmesinin TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takımın kullanıldığı 3 numaralı numunede -950 MPa civarında gerçekleştiği görülmüştür. Etki derinliğinin ilerleme oranıyla artması, mekanik etkinin ısı etkiden daha baskın olmasıyla açıklanabilir. TiCN'ün kullanıldığı uygulamalarda en yüksek yüzey basma gerilmesi -687 MPa ile 10 numaralı numunede elde edilmiştir. Bu numunede basma gerilmeleri yaklaşık 0,04 mm derinliğe kadar etkilidir. Bu derinlikten sonra çekme kalıntı gerilmelerine dönüşmüştür ve 0,092 mm derinlikte 188 MPa değerine ulaşmıştır.

Her iki kaplama tipinde kalıntı gerilme gelişimi, kaplamaların ısıl iletkenlik katsayılarının düşük olmasından dolayı malzemenin daha fazla ısıl etkilerle karşı karşıya kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, faydalı derinlikler çok düşüktür. Ayrıca, AISI 4340 çeliğin kalıntı gerilme değerleri genel olarak AISI 4140 malzemeninkinden düşük çıkması da tamamen malzeme sertliğinden kaynaklanmaktadır. Daha yumuşak olan AISI 4340 çelikte kalıntı gerilme değerleri düşüktür.



Şekil 6.9. Düz tormalanmış AISI 4140 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takım,
d-f) TiCN kaplamalı takım

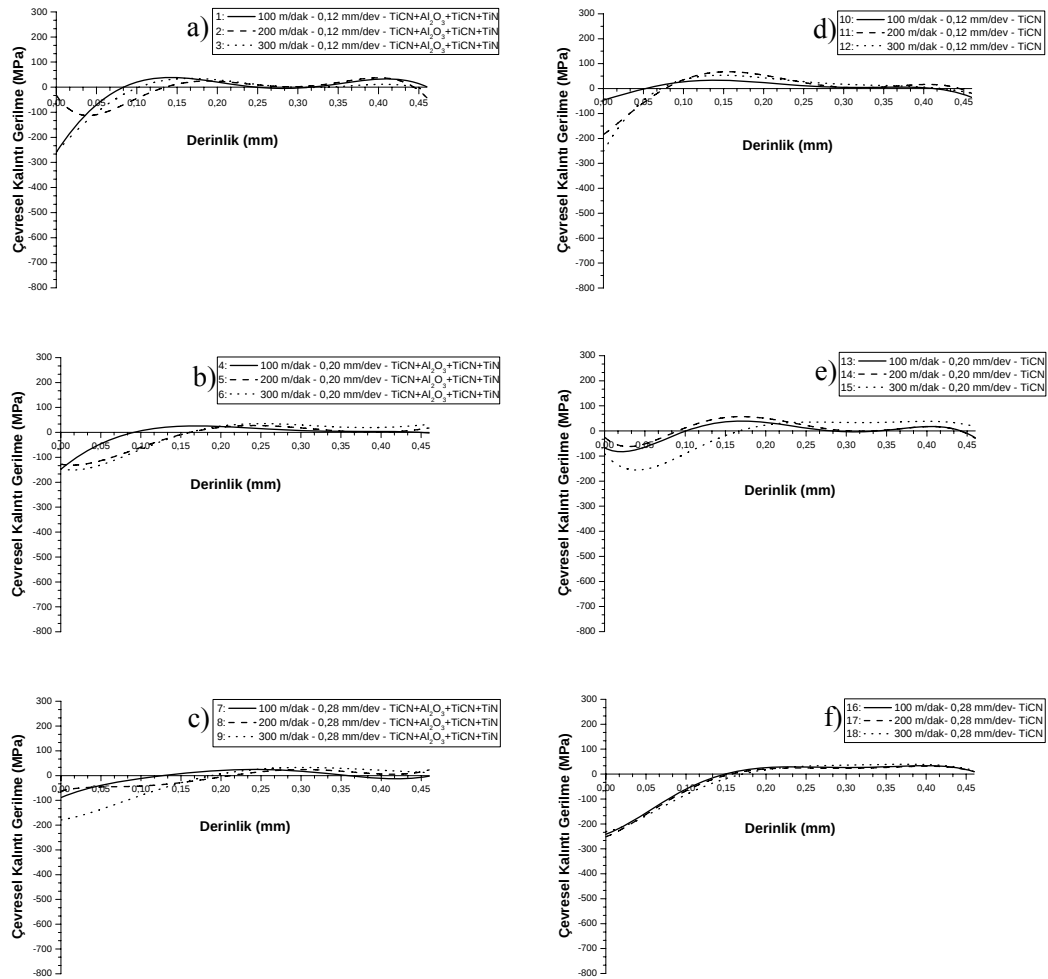


Şekil 6.10. Düz tornalanmış AISI 4340 malzemeye ait eksenel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takım,
d-f) TiCN kaplamalı takım

Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler

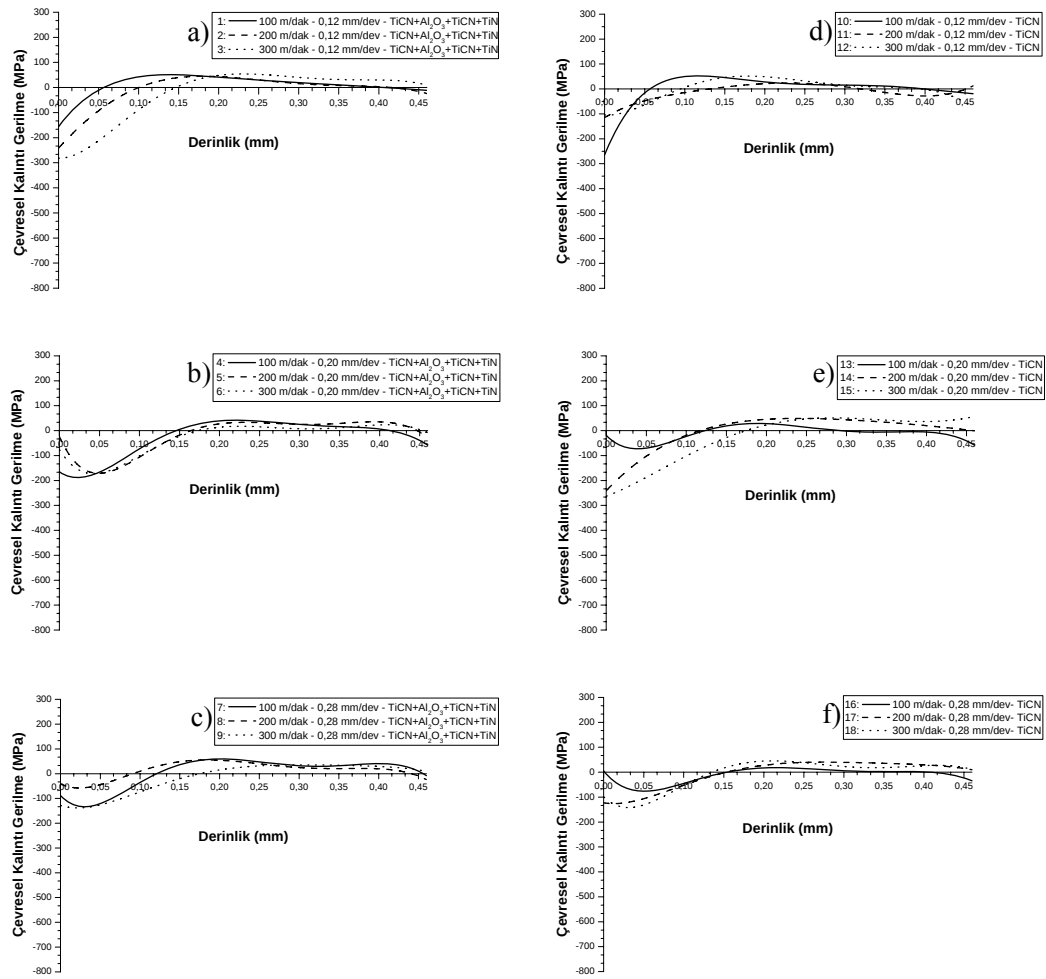
Şekil 6.11a-c TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takım, Şekil 6.11d-f ise TiCN kaplamalı takım ile AISI 4140 malzemenin düz tornalanması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir.

Şekil 6.12a-c TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takımla, Şekil 6.12d-f ise TiCN kaplamalı takımla AISI 4340 malzemenin düz tornalanması neticesinde meydana gelen eksenel yönlü kalıntı gerilme profillerini göstermektedir.



Şekil 6.11. Düz tornalanmış AISI 4140 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takım,
d-f) TiCN kaplamalı takım

Grafikler genel olarak incelendiğinde çevresel yönlü yüzey kalıntı gerilmelerinin eksenel yönlü yüzey kalıntı gerilmelerine göre düşük değerlerde (-100~275 MPa civarında) olduğu görülmektedir. Etki derinliklerinin neredeyse bütün şartlarda ilerleme miktarının artmasıyla artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.12. Düz tornalanmış AISI 4340 malzemeye ait çevresel yönlü kalıntı gerilme profilleri
a-c) TiCN+Al₂O₃+TiCN+TiN kaplamalı takım,
d-f) TiCN kaplamalı takım

6.2. İşleme Parametrelerinin Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkileri

Deney planı, kalıntı gerilme sınırları üzerine kesme hızı (V), paso sayısı (PS), ilerleme miktarı (f), kesici uç kaplamasının ısı iletim katsayısı (IİK) ve malzeme sertliğinin (MS) etkilerinin değerlendirilmesi için geliştirilmiştir.

Kalıntı gerilme sınırlarının etkileyen parametreleri tanımlamak için, deney verileri varyans analizi (ANOVA) ile incelenmiştir. Varyans analizleri, ele alınan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etki düzeylerini ifade eder. Bu analizler

% 90 güvenilirlik düzeyi için $\alpha=0,10$ anlamlılık seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Tablolardaki P-değeri, yani gerçekleşen anlamlılık düzeyi, her bir varyasyon kaynağı için F-değeri ile bütünleşir. 0,10'dan küçük P-değerine sahip kaynaklar istatistiksel olarak önemli paya sahiptir. Aynı zamanda, varyans tablosunda yer alan Sd; serbestlik derecesini, Kt; kareler toplamını ifade ederken, sonuçlar üzerine her bir varyasyonun toplam varyasyona olan etki derecesi yüzde katkı oranı %KO ile tanımlanmaktadır. Burada, işleme parametrelerin etki düzeylerini tanımlamak için %KO kullanılmıştır.

Sonuçların değerlendirmesinde dikkate alınan kalıntı gerilme sınırları;

σ_y : numune yüzeyinde oluşmuş çekme (+) veya basma (-) kalıntı gerilme değerini ifade eden yüzeyde oluşmuş kalıntı gerilme değeri,

σ_{min} : basma (-) kalıntı gerilmelerini ifade eden minimum kalıntı gerilme değeri,

σ_{max} : çekme (+) kalıntı gerilmelerini ifade eden maksimum kalıntı gerilme değeri,

ve bu kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri;

a_{min} : minimum kalıntı gerilmenin meydana geldiği etki derinliği,

a_{max} : maksimum kalıntı gerilmenin meydana geldiği etki derinliği

a_0 : kalıntı gerilmenin basmadan çekmeye veya çekmeden basmaya dönüştüğü derinlik olan faydalı etki derinliği,

şeklindedir.

6.2.1. Vida açma parametrelerinin etkisi

Eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları

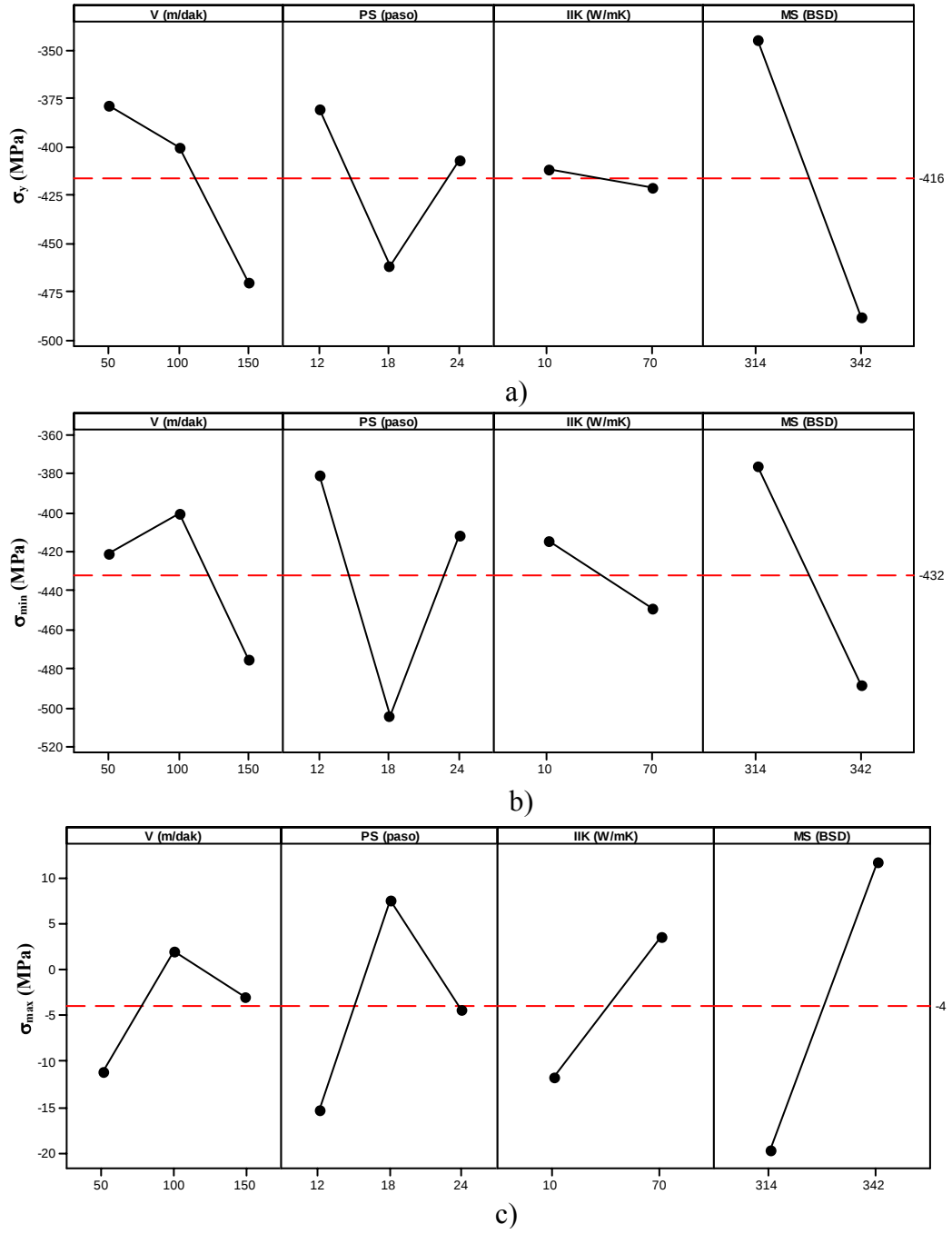
Çizelge 6.1, vida açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerine işleme parametrelerinin varyans analizini göstermektedir. İstatistiki açıdan bakıldığında malzeme sertliğinin (MS) σ_y ve σ_{max} sınırları üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğu görülmektedir. Malzeme sertliğinin (MS) σ_y üzerine olan katkı oranı %11,46 iken, σ_{max} üzerine olan etkisi %16,31'dir. Özellikle σ_y üzerine parametrelerin etkileri büyük olmuştur. Kesme hızı (V)-ısıtım katsayısı (IİK) etkileşimi %15,14 paso sayısı (PS)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %14,53 katkı oranı ile σ_y üzerinde etkilidir. Fakat %27,52 katkı oranıyla kesme hızı (V)-paso sayısı (PS)-ısıtım katsayısı (IİK) etkileşimi σ_y üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Malzeme sertliği (MS)-paso sayısı (PS) etkileşimi σ_{min} üzerinde etkili olmuştur.

Vida açma parametre seviyelerinin gerilme sınırlarını hangi yönde etkilediğini Şekil 6.13'de verilen etki grafikleri göstermektedir. Bu grafikler ilgili parametrelerin meydana getirdiği kalıntı gerilmelerin ortalamasını göstermektedir. Buna göre σ_y , σ_{min} ve σ_{max} sınırları sırasıyla -416, -432 ve -4 MPa ortalama kalıntı gerilme değerlerine sahiptir. Kesme hızındaki (V) artış σ_y sınırını basma yönünde artmasına neden olmuştur. Bu artış kesme hızı (V) 100 m/dak'dan 150 m/dak'ya çıktığında daha fazla olmuştur. Kesme hızındaki bu etki (100 m/dak'dan 150 m/dak'ya çıkıldığında) σ_{min} ve σ_{max} sınırları içinde aynıdır. Kesme hızı arttırıldığında gerinim oranının artması daha fazla mekaniksel iş üretir ve basma gerilmelerine neden olur [183].

Paso sayısı için, orta seviyedeki paso (18 paso) sayısının σ_y ve σ_{max} sınırları üzerinde basma gerilmelerinin artmasına neden olurken, σ_{min} sınırında sürtünme artışından kaynaklanan ısıdan dolayı oldukça düşük (8 MPa civarında) çekme gerilmesine neden olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.1. Vida açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
σ_y						
V (m/dak)	2	54556	27278	2,37	0,209	3,34
PS (paso)	2	40980	20490	1,78	0,28	2,51
IIK (W/mK)	1	845	845	0,07	0,8	0,05
MS (BSD)	1	187200	187200	16,28	0,016	11,46
V (m/dak)*PS (paso)	4	70114	17528	1,52	0,346	4,29
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	247326	123663	10,76	0,025	15,14
V (m/dak)*MS (BSD)	2	43225	21612	1,88	0,266	2,65
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	34607	17304	1,5	0,326	2,12
PS (paso)*MS (BSD)	2	237298	118649	10,32	0,026	14,53
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	5979	5979	0,52	0,511	0,37
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	449444	112361	9,77	0,024	27,52
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	107956	26989	2,35	0,214	6,61
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	100703	50352	4,38	0,098	6,17
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	7191	3595	0,31	0,748	0,44
Hata	4	45992	11498			2,82
Toplam	35	1633417				100,00
σ_{min}						
V (m/dak)	2	35789	17894	0,69	0,552	2,46
PS (paso)	2	98912	49456	1,91	0,261	6,79
IIK (W/mK)	1	10711	10711	0,41	0,555	0,74
MS (BSD)	1	113455	113455	4,39	0,104	7,79
V (m/dak)*PS (paso)	4	120577	30144	1,17	0,443	8,28
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	140862	70431	2,72	0,179	9,68
V (m/dak)*MS (BSD)	2	40681	20341	0,79	0,515	2,79
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	14180	7090	0,27	0,773	0,97
PS (paso)*MS (BSD)	2	316834	158417	6,13	0,061	21,76
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	23030	23030	0,89	0,399	1,58
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	289404	72351	2,8	0,171	19,88
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	62014	15504	0,6	0,684	4,26
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	40459	20229	0,78	0,517	2,78
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	45471	22736	0,88	0,482	3,12
Hata	4	103420	25855			7,10
Toplam	35	1455799				100,00
σ_{max}						
V (m/dak)	2	1045	523	0,4	0,697	1,90
PS (paso)	2	3137	1569	1,19	0,394	5,70
IIK (W/mK)	1	2129	2129	1,61	0,273	3,87
MS (BSD)	1	8981	8981	6,79	0,06	16,31
V (m/dak)*PS (paso)	4	8859	2215	1,67	0,315	16,09
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	8795	4397	3,32	0,141	15,97
V (m/dak)*MS (BSD)	2	1190	595	0,45	0,666	2,16
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	6263	3132	2,37	0,21	11,38
PS (paso)*MS (BSD)	2	538	269	0,2	0,824	0,98
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	381	381	0,29	0,62	0,69
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	3561	890	0,67	0,645	6,47
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	1368	342	0,26	0,891	2,48
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	2291	1146	0,87	0,487	4,16
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	1228	614	0,46	0,659	2,23
Hata	4	5292	1323			9,61
Toplam	35	55059				100,00



Şekil 6.13. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ;
c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}

Isıl iletim katsayısının (IIK) etkisi çok düşüktür. Isıl iletim katsayısı (IIK) artışı σ_{min} sınırını az da olsa basma yönünde etkilemektedir. Basma gerilmesindeki bu küçük

artış tamamen oluşan ısının daha çabuk uzaklaştırılmasından kaynaklanıyor olsa da, σ_{min} üzerindeki ters etki takım aşınmasına işaret eder. Isıl iletim katsayısı düşük olan TiAlN kaplamalı takım sürtünme katsayısının düşük, aşınma direncinin yüksek olması nedeniyle σ_{min} sınırını basma gerilmesi alanında tutabilmiştir. Isıl iletim katsayısı yüksek olan TiN kaplama aşınma direncinin düşüklüğü nedeniyle yan yüzey aşınmasına hassastır [174, 175]. Bu, düşük de olsa takım aşınmasına bağlı çekme kalıntı gerilmesine neden olmuştur.

Malzeme sertliğinin (MS) σ_y ve σ_{min} sınırlarını hemen hemen aynı düzeyde etkilediği görülmektedir. Buradan minimum kalıntı gerilmelerin (basma gerilmelerinin) yüzeyde meydana geldiği söylenebilir.

Malzeme sertleştikçe plastik deformasyon güçleşir. Bu işleme esnasında plastik deformasyon etkilerinin daha yoğun olmasına neden olur. σ_{max} sınırında ise çok düşük çekme kalıntı gerilmeleri oluşturmuştur. Bu, sert malzemenin kesilmesinde oluşan ısıdan kaynaklanır.

Çizelge 6.2’de vida açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü gerilmelerin etki derinliği sınırları üzerindeki etkisini açıklayan varyans analiz tablosu görülmektedir.

Varyans analizi vida açmadaki işleme parametrelerinin özellikle a_{max} ve a_0 etki derinlikleri üzerinde istatistiki olarak anlam taşıdığını göstermektedir. Ana parametrelerden paso sayısı (PS) a_{max} üzerinde %11,11 katkı oranına, a_0 üzerinde ise %9,97 katkı oranına sahiptir. Bu da paso sayısının (PS) en çok a_{max} değerini etkilediğini gösterir. Ayrıca, a_{max} üzerinde kesme hızı (V)-paso sayısı (PS) etkileşimi %13,86 oranında katkıda bulunurken, en kuvvetli katkıyı %30,02 oranıyla kesme hızı (V)-paso sayısı (PS)-ısıl iletim katsayısı (IIK) etkileşimi sağlamıştır. a_0 sınırı üzerinde en kuvvetli katkıyı %15,29 oranla paso sayısı (PS)-ısıl iletim katsayısı (IIK) etkileşimi göstermiştir. Oranları düşüğe olsa a_0 sınırı üzerinde ana parametrelerden %8,82 oranıyla kesme hızının (V), %9,01 oranıyla malzeme sertliğinin (MS) etkisi söz konusudur.

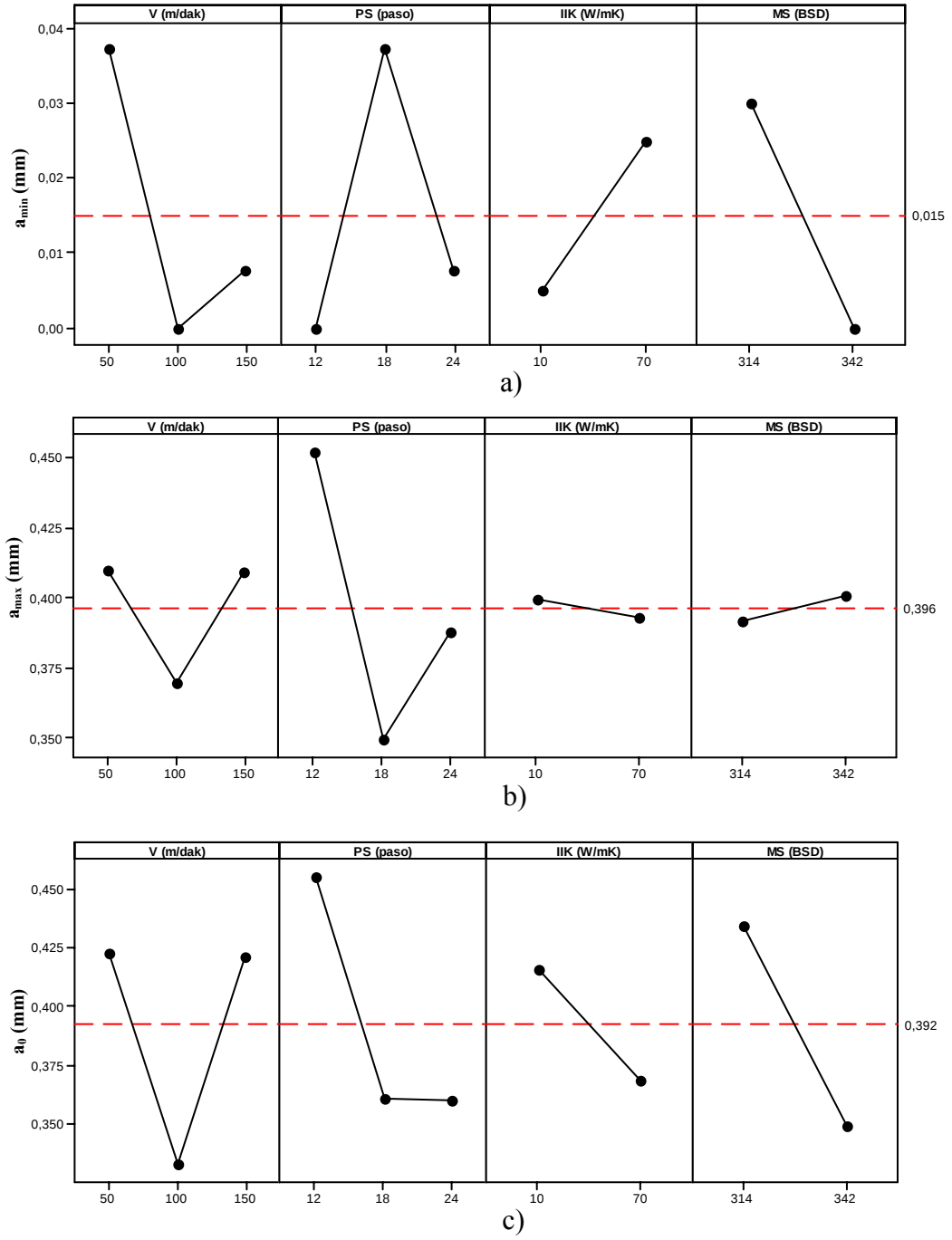
Şekil 6.14, ana parametrelerin etki derinlikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafiklere göre a_{min} , a_{max} ve a_0 etki derinlikleri sırasıyla 0,015, 0,396 ve 0,392 mm ortalama değerleri almıştır. Bu en büyük basma kalıntı gerilmelerin yüzey ve yüzeye çok yakın bölgelerde meydana geldiğini ve değerinin azalarak yaklaşık 0,392 mm derinliğe kadar basma özelliğini koruduğunu gösterir.

Kesme hızının (V) 50 m/dak'dan 100 m/dak'ya çıkması etki derinliğini düşürmüştür. 100 m/dak'dan 150 m/dak'ya çıkıldığında etki derinliği yine artmıştır. İş parçası malzemesinin düşük termal yayılıma sahip olması, sadece küçük miktarda bir ısının takım ve iş parçasına geçtiğini, ısının büyük kısmının ise talaşla dışarı atıldığı anlamına gelir [9].

Paso sayısı minimum gerilme derinliği üzerinde çok etkili gibi görünse de ortalama değerler incelendiğinde yüzeye oldukça yakın meydan geldiği görülür. Bu etkiyi varyans analiz sonuçları da destekler. Paso sayısı (PS) 12'den 18'e çıktığında etki derinliği ortalama %22 civarında azalmıştır. Vida açmada paso sayısının artırılması düşük yanal ilerleme miktarı şeklinde düşünülebilir. Bu nedenle düşük paso sayısı yüzey altındaki basma gerilmelerini ve çekme katmanının kalınlığını arttırmaya eğilimli olduğunu gösterir [8].

Çizelge 6.2. Vida açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
a_{min}						
V (m/dak)	2	0,0092	0,0046	0,89	0,479	4,64
PS (paso)	2	0,0092	0,0046	0,89	0,479	4,64
IIK (W/mK)	1	0,0035	0,0035	0,67	0,459	1,75
MS (BSD)	1	0,0080	0,0080	1,55	0,281	4,03
V (m/dak)*PS (paso)	4	0,0253	0,0063	1,22	0,426	12,70
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	0,0138	0,0069	1,33	0,361	6,92
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0092	0,0046	0,89	0,479	4,64
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	0,0138	0,0069	1,33	0,361	6,92
PS (paso)*MS (BSD)	2	0,0092	0,0046	0,89	0,479	4,64
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0035	0,0035	0,67	0,459	1,75
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	0,0208	0,0052	1	0,5	10,42
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	0,0253	0,0063	1,22	0,426	12,70
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0138	0,0069	1,33	0,361	6,92
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0138	0,0069	1,33	0,361	6,92
Hata	4	0,0208	0,0052			10,42
Toplam	35	0,1993				100,00
a_{max}						
V (m/dak)	2	0,0127	0,0064	2,18	0,228	2,18
PS (paso)	2	0,0650	0,0325	11,14	0,023	11,11
IIK (W/mK)	1	0,0004	0,0004	0,13	0,739	0,06
MS (BSD)	1	0,0007	0,0007	0,23	0,655	0,12
V (m/dak)*PS (paso)	4	0,0812	0,0203	6,95	0,043	13,86
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	0,0410	0,0205	7,02	0,049	7,00
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0300	0,0150	5,13	0,079	5,12
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	0,0341	0,0170	5,84	0,065	5,82
PS (paso)*MS (BSD)	2	0,0008	0,0004	0,13	0,882	0,13
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0164	0,0164	5,61	0,077	2,80
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	0,1757	0,0439	15,06	0,011	30,02
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	0,0540	0,0135	4,63	0,084	9,22
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0021	0,0010	0,35	0,723	0,35
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0598	0,0299	10,25	0,027	10,22
Hata	4	0,0117	0,0029			1,99
Toplam	35	0,5854				100,00
a_0						
V (m/dak)	2	0,0640	0,0320	4,98	0,082	8,82
PS (paso)	2	0,0723	0,0362	5,63	0,069	9,97
IIK (W/mK)	1	0,0197	0,0197	3,06	0,155	2,71
MS (BSD)	1	0,0654	0,0654	10,17	0,033	9,01
V (m/dak)*PS (paso)	4	0,0766	0,0191	2,98	0,158	10,55
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	0,0674	0,0337	5,24	0,076	9,28
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0044	0,0022	0,34	0,728	0,61
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	0,1109	0,0555	8,63	0,035	15,29
PS (paso)*MS (BSD)	2	0,0532	0,0266	4,14	0,106	7,33
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0000	0,0000	0	0,959	0,00
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	0,0463	0,0116	1,8	0,291	6,39
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	0,0677	0,0169	2,63	0,186	9,33
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0287	0,0143	2,23	0,224	3,95
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0233	0,0116	1,81	0,275	3,21
Hata	4	0,0257	0,0064			3,54
Toplam	35	0,7255				100,00



Şekil 6.14. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{min} ; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{max} ; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0

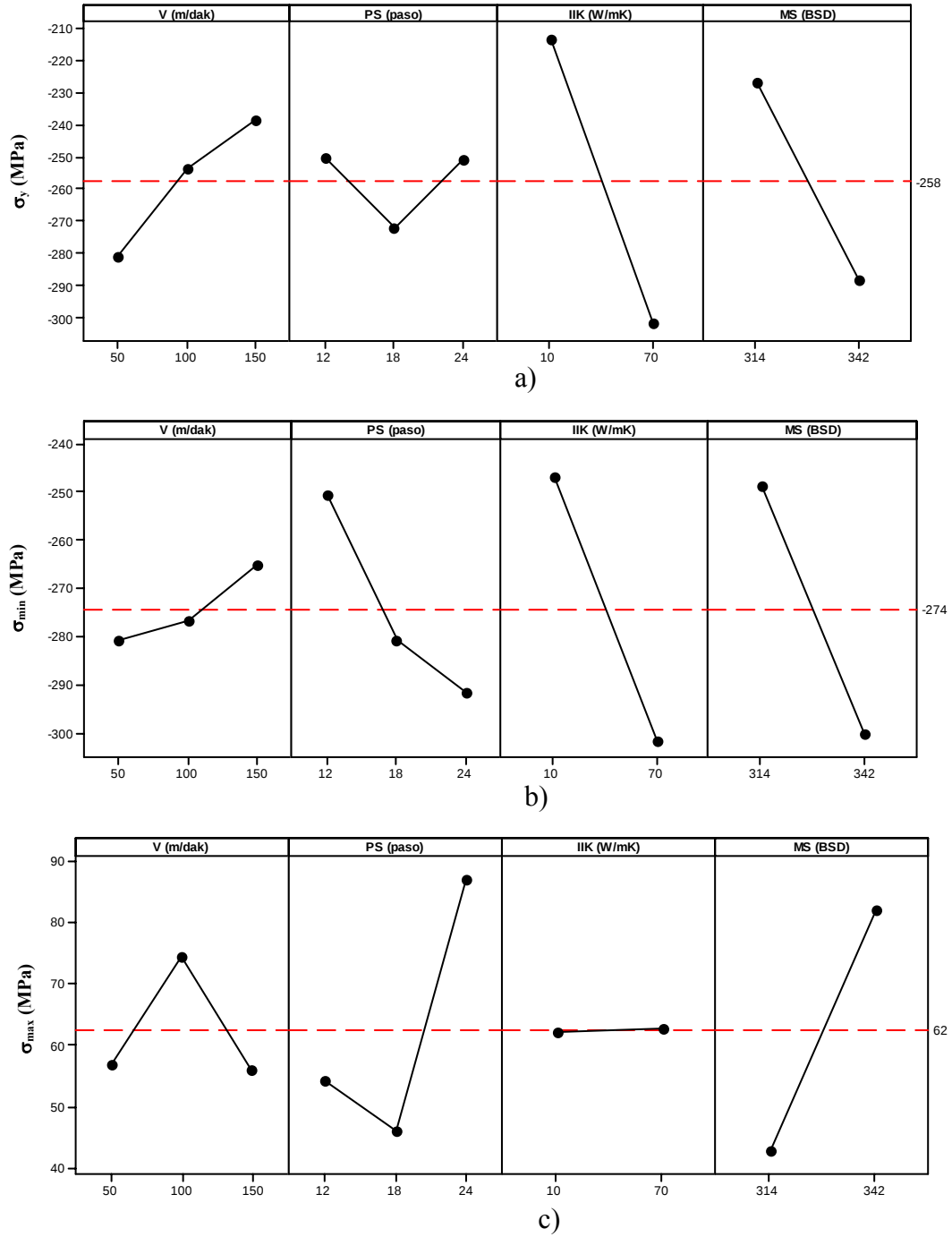
Çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları

Çizelge 6.3’de vida açma neticesinde meydana gelen çevresel kalıntı gerilme sınırları üzerinde işleme parametrelerinin etkisini gösteren varyans analiz tablosu görülmektedir. İstatistiki olarak anlamlı bir ilişkiyi (P-değeri, $\alpha=0,1$) ifade eden hiçbir parametre ve parametre etkileşimi görülmemektedir. Bu çevresel kalıntı gerilmelerin (Şekil 6.3 ve 6.4) genel olarak birbirine çok benzer profiller sergilemesinden kaynaklanıyor olabilir. Yinede varyans analizinden ısıl iletim katsayısının (IİK) σ_y sınır değeri üzerinde %7,23 oranında, σ_{min} üzerinde %3,98 oranında katkıda bulunduğu ve σ_{max} üzerinde malzeme sertliğinin (MS) %13,20 oranında, paso sayısının (PS) %10,70 oranında katkıda bulunduğu söylenebilir.

Şekil 6.15, ana parametre seviyelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri görülebilir. Çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için ortalama gerilme değeri sırasıyla -258 MPa, -274 MPa ve 62MPa çıkmıştır. Varyans tablosundan edinilen bilgiler doğrultusunda ısıl iletim katsayısının (IİK) σ_y ve σ_{min} sınırları üzerinde en etkili parametre olduğu görülmektedir. Isıl iletim katsayısı yükseldikçe kesme esnasında oluşan ısının daha çabuk tahliyesi sağlanır ve iş parçası üzerindeki ısıl etkiler azalır. Bu, basma gerilmelerine neden olur [174]. Isıl iletim katsayısı (IİK) büyüdükçe σ_y ve σ_{min} sınır değerleri daha yüksek basma gerilmeleri göstermiştir. Malzeme sertliği (MS) arttıkça σ_{max} gerilmelerinin çekme özelliği artmıştır. Ayrıca, paso sayısı da (PS) 18’den 24’e çıktığında çekme kalıntı gerilmeleri artmıştır. Paso sayısının artışı yanal ilerleme miktarını düşürür. Düşük ilerlemede plastik deformasyon oranı azalırken sürtünme nedeniyle ısı etkisi artar. Malzeme sertliği ve paso sayısı artışı çekme gerilmelerinin seviyesini arttırır. Bu, daha büyük paso sayısının (daha düşük yanal ilerleme miktarı) daha küçük plastik deformasyon meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır [66, 192].

Çizelge 6.3. Vida açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
σ_y						
V (m/dak)	2	11049	5524	0,19	0,834	1,14
PS (paso)	2	3653	1827	0,06	0,94	0,38
IIK (W/mK)	1	69820	69820	2,41	0,196	7,23
MS (BSD)	1	33875	33875	1,17	0,341	3,51
V (m/dak)*PS (paso)	4	85887	21472	0,74	0,611	8,89
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	74638	37319	1,29	0,371	7,73
V (m/dak)*MS (BSD)	2	41951	20976	0,72	0,54	4,34
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	100211	50106	1,73	0,288	10,37
PS (paso)*MS (BSD)	2	57931	28966	1	0,445	6,00
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	12421	12421	0,43	0,549	1,29
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	169092	42273	1,46	0,362	17,50
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	131773	32943	1,13	0,453	13,64
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	34480	17240	0,59	0,594	3,57
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	23223	11611	0,4	0,694	2,40
Hata	4	116107	29027			12,02
Toplam	35	966111				100,00
$\sigma_{\min}$						
V (m/dak)	2	1557	779	0,04	0,96	0,23
PS (paso)	2	10926	5463	0,29	0,762	1,61
IIK (W/mK)	1	26956	26956	1,43	0,297	3,98
MS (BSD)	1	23699	23699	1,26	0,324	3,50
V (m/dak)*PS (paso)	4	50038	12509	0,67	0,649	7,40
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	46244	23122	1,23	0,384	6,84
V (m/dak)*MS (BSD)	2	21209	10604	0,56	0,609	3,13
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	45709	22854	1,22	0,387	6,76
PS (paso)*MS (BSD)	2	27084	13542	0,72	0,541	4,00
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	6640	6640	0,35	0,584	0,98
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	154929	38732	2,06	0,251	22,90
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	121159	30290	1,61	0,328	17,91
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	20144	10072	0,54	0,622	2,98
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	45026	22513	1,2	0,391	6,66
Hata	4	75240	18810			11,12
Toplam	35	676560				100,00
$\sigma_{\max}$						
V (m/dak)	2	2530	1265	0,41	0,688	2,42
PS (paso)	2	11177	5588	1,82	0,274	10,70
IIK (W/mK)	1	5	5	0	0,97	0,00
MS (BSD)	1	13790	13790	4,49	0,102	13,20
V (m/dak)*PS (paso)	4	11398	2850	0,93	0,528	10,91
V (m/dak)*IIK (W/mK)	2	6584	3292	1,07	0,424	6,30
V (m/dak)*MS (BSD)	2	13018	6509	2,12	0,236	12,46
PS (paso)*IIK (W/mK)	2	479	239	0,08	0,926	0,46
PS (paso)*MS (BSD)	2	1453	727	0,24	0,8	1,39
IIK (W/mK)*MS (BSD)	1	1990	1990	0,65	0,466	1,91
V (m/dak)*PS (paso)*IIK (W/mK)	4	3913	978	0,32	0,853	3,75
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	9238	2309	0,75	0,606	8,84
V (m/dak)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	9258	4629	1,51	0,325	8,86
PS (paso)*IIK (W/mK)*MS (BSD)	2	7323	3662	1,19	0,393	7,01
Hata	4	12297	3074			11,77
Toplam	35	104452				100,00



Şekil 6.15. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri

a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ;

c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}

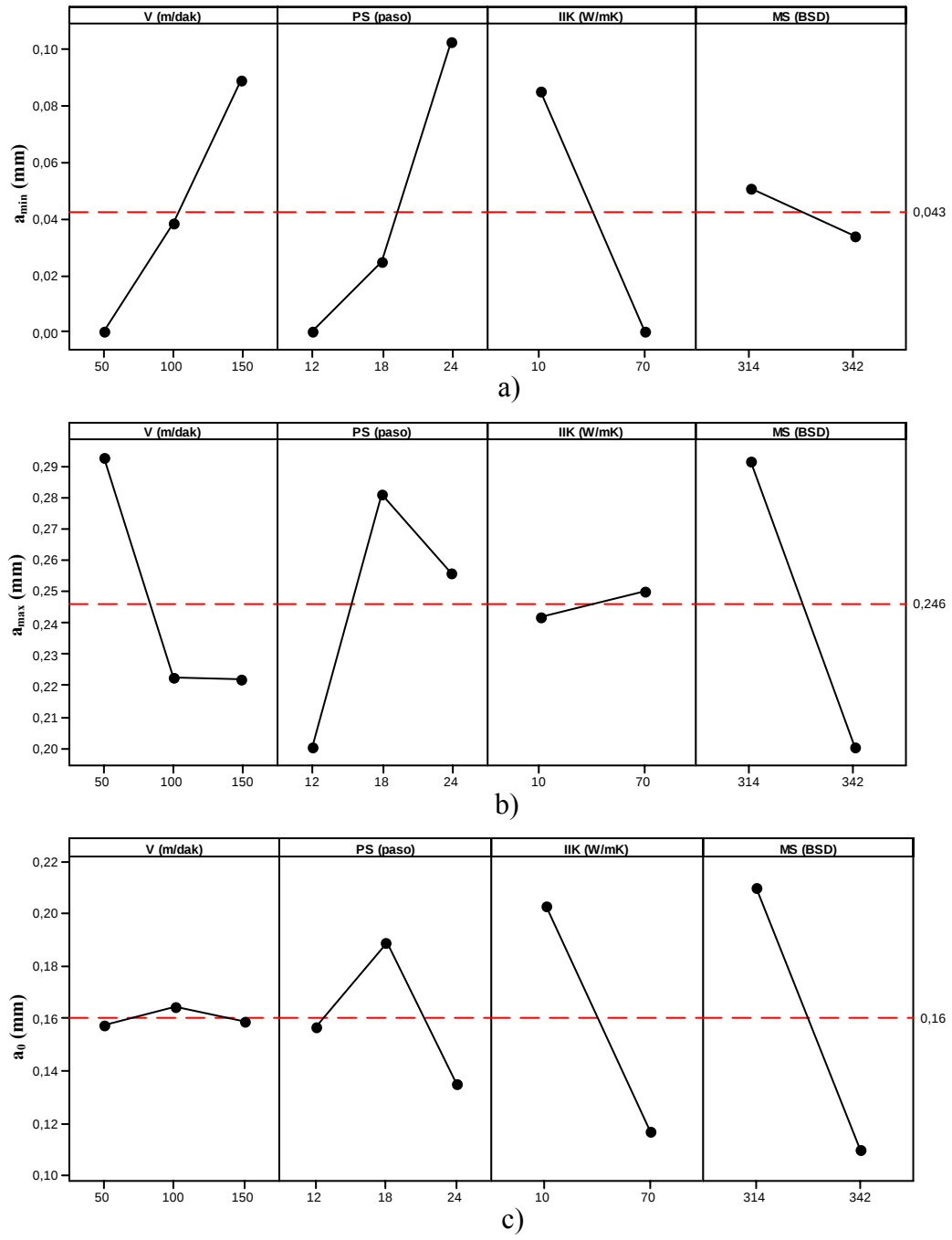
Çizelge 6.4, çevresel yönlü kalıntı gerilmelerin etki derinliğine ait varyans analiz tablosunu göstermektedir. Ana parametrelerden malzeme sertliği (MS) $a_{\max}$ ve a_0 üzerinde sırasıyla %7,2 ve %10,68 oranında istatistiki olarak katkıda bulunmuştur. Malzeme sertliğinin $a_{\min}$ üzerinde oldukça düşüktür. Buna karşın istatistiki açıdan $a_{\min}$ üzerinde paso sayısı (PS) % 12,69, ısıl iletim katsayısı (IİK) %11,96 ve paso sayısı (PS)-ısıl iletim katsayısı (IİK) etkileşimi %12,69 oranından katkıda bulunmuştur. Paso sayısı (PS)-ısıl iletim katsayısı (IİK) etkileşimi a_0 üzerinde istatistiki bir anlam ifade etmemesine rağmen faydalı derinliğin oluşumunda %31,25 oranında etkilidir.

Şekil 6.16, ana parametre seviyelerinin çevresel kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerine olan etkisini göstermektedir. $a_{\min}$, $a_{\max}$ ve a_0 etki derinlikleri sırasıyla 0,043 mm, 0,246 mm ve 0,16 mm ortalama değerlerini almıştır. En büyük basma gerilmeleri yüzeye yakın bölgede meydana gelmiştir. Gerilmeler, 0,16 mm ortalama derinliğe kadar basma özelliğini korumuş ve 0,246 mm ortalama derinliğinde en yüksek çekme gerilmesi değerine ulaşmıştır.

Minimum gerilmelerin oluştuğu derinlik olan $a_{\min}$ paso sayısı (PS) arttıkça artmıştır. Yani, minimum basma gerilmeleri paso sayısı (PS) arttıkça yüzey altında meydana gelmiştir. Bu düşük paso sayısının (büyük ilerleme miktarı) alt yüzde oluşturduğu plastik deformasyondan kaynaklanmaktadır [66, 192]. Isıl iletim katsayısı (IİK) yükseldikçe oluşan ısı çabucak uzaklaştırıldığından minimum basma kalıntı gerilmeleri yüzeyde meydana gelmiştir. $a_{\max}$ ve a_0 üzerinde en etkili parametre olan malzeme sertliği (MS) arttıkça maksimum gerilmelerin yüzeye yakın bölgelerde meydana geldiği görülür. Bu durum, malzeme sertliği arttıkça malzemenin çalışma sertleşmesine verdiği tepkinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [192]. Paso sayısı (PS) 12'den 18'e çıktığında $a_{\max}$ değeri artmıştır. Bu mekaniksel etkilerin sadece yüzey çekme gerilmelerinde değil yüzey altında bir rol oynamasından kaynaklanır [9].

Çizelge 6.4. Vida açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
a_{min}						
V (m/dak)	2	0,0484	0,0242	3,8	0,119	8,85
PS (paso)	2	0,0693	0,0347	5,44	0,072	12,69
IİK (W/mK)	1	0,0654	0,0654	10,26	0,033	11,96
MS (BSD)	1	0,0026	0,0026	0,41	0,558	0,48
V (m/dak)*PS (paso)	4	0,0425	0,0106	1,67	0,316	7,79
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,0484	0,0242	3,8	0,119	8,85
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0170	0,0085	1,34	0,36	3,11
PS (paso)*IİK (W/mK)	2	0,0693	0,0347	5,44	0,072	12,69
PS (paso)*MS (BSD)	2	0,0352	0,0176	2,76	0,176	6,44
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0026	0,0026	0,41	0,558	0,48
V (m/dak)*PS (paso)*IİK (W/mK)	4	0,0425	0,0106	1,67	0,316	7,79
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	0,0255	0,0064	1	0,5	4,66
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0170	0,0085	1,34	0,36	3,11
PS (paso)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0352	0,0176	2,76	0,176	6,44
Hata	4	0,0255	0,0064			4,66
Toplam	35	0,5465				100,00
a_{max}						
V (m/dak)	2	0,0398	0,0199	1,99	0,251	3,83
PS (paso)	2	0,0416	0,0208	2,08	0,24	4,01
IİK (W/mK)	1	0,0006	0,0006	0,06	0,822	0,06
MS (BSD)	1	0,0747	0,0747	7,48	0,052	7,2
V (m/dak)*PS (paso)	4	0,1729	0,0432	4,33	0,092	16,66
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,0907	0,0453	4,54	0,093	8,74
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0264	0,0132	1,32	0,363	2,54
PS (paso)*IİK (W/mK)	2	0,0424	0,0212	2,12	0,235	4,09
PS (paso)*MS (BSD)	2	0,0798	0,0399	4	0,111	7,69
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0200	0,0200	2	0,23	1,93
V (m/dak)*PS (paso)*IİK (W/mK)	4	0,1742	0,0436	4,36	0,091	16,79
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	0,1406	0,0352	3,52	0,125	13,56
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0292	0,0146	1,46	0,334	2,82
PS (paso)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0647	0,0324	3,24	0,146	6,24
Hata	4	0,0399	0,0100			3,85
Toplam	35	1,0374				100,00
a_0						
V (m/dak)	2	0,0003	0,0002	0,01	0,992	0,04
PS (paso)	2	0,0180	0,0090	0,47	0,656	2,12
IİK (W/mK)	1	0,0669	0,0669	3,5	0,135	7,90
MS (BSD)	1	0,0904	0,0904	4,73	0,095	10,68
V (m/dak)*PS (paso)	4	0,2647	0,0662	3,46	0,128	31,25
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,0002	0,0001	0,01	0,995	0,02
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0193	0,0096	0,5	0,638	2,28
PS (paso)*IİK (W/mK)	2	0,0075	0,0038	0,2	0,829	0,89
PS (paso)*MS (BSD)	2	0,0777	0,0388	2,03	0,246	9,17
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0120	0,0120	0,63	0,473	1,41
V (m/dak)*PS (paso)*IİK (W/mK)	4	0,0838	0,0210	1,1	0,466	9,90
V (m/dak)*PS (paso)*MS (BSD)	4	0,0891	0,0223	1,16	0,443	10,52
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0103	0,0052	0,27	0,777	1,22
PS (paso)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0303	0,0151	0,79	0,514	3,57
Hata	4	0,0765	0,0191			9,03
Toplam	35	0,8468				100,00



Şekil 6.16. Vida açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{min} ; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{max} ; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0

6.2.2. Kanal açma parametrelerinin etkisi

Eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları

Çizelge 6.5, kanal açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerine işleme parametrelerinin varyans analizlerini göstermektedir.

İstatistiki açıdan σ_y üzerinde malzeme sertliği (MS) %11,86 oranında etkilidir. Bunun yanında istatistik açıdan olmasa da σ_y üzerinde kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşiminin %17,82 oranında, ilerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) etkileşiminin %14,96 oranında etkisi söz konusudur.

σ_{min} üzerinde ana parametrelerin istatistiki açıdan anlamlı bir etkisine rastlanmamış olmasına rağmen malzeme sertliği (MS) %11,45 katkı oranıyla en büyük etkiyi göstermiştir. σ_{min} üzerinde kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %17,51 oranında, ilerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %14,74 oranında etkiye sahiptir. σ_y ve σ_{min} sonuçları arasındaki yakınlık en büyük basma gerilmelerinin parça yüzeyinde meydana geldiğini gösterir.

σ_{max} sınırı üzerinde ana parametrelerden ısıl iletim katsayısı (IİK) %5,53 katkı oranına sahiptir. En büyük etkiyi ise % 17,21 oranıyla kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f) ve %12,47 katkı oranıyla ilerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) etkileşimleri göstermiştir. Bunun yanında %9,91oranıyla ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) ve %9,76 oranıyla ilerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK) etkileşimleri etkili olmuştur.

Ana parametrelerden ziyade parametre etkileşimleri kanal açmada eksenel gerilme sınırları üzerinde etkili olmuştur. σ_y üzerinde malzeme sertliğinin etkisi yüzeyde plastik deformasyonun yoğunluğuna işaret eder. σ_{max} üzerinde ısıl iletim katsayısının etkisi ise ısıl oluşumların varlığını göstermektedir. Bu plastik deformasyonun basma

kalıntı gerilmeleri oluşturmaları, ısı oluşumunun çekme kalıntı gerilmeleri oluşturmaları gerçeğini desteklemektedir [131, 147, 160].

Çizelge 6.5. Kanal açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları

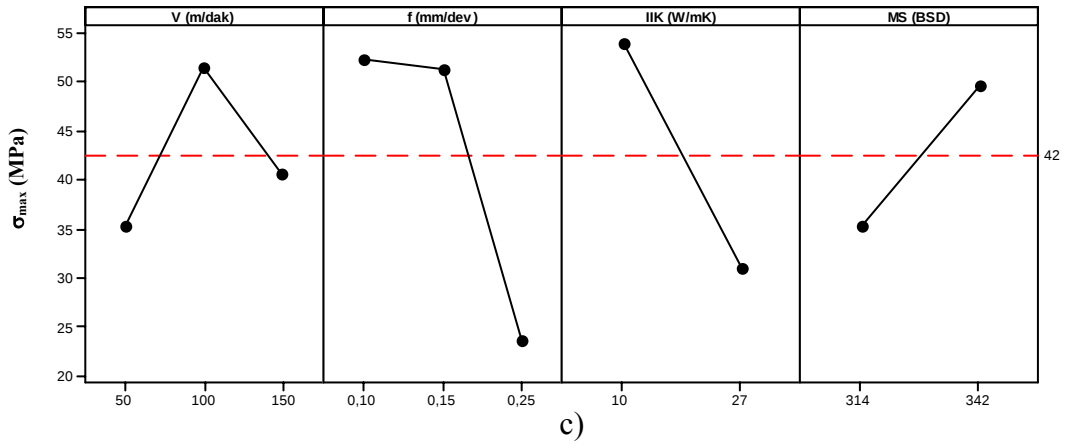
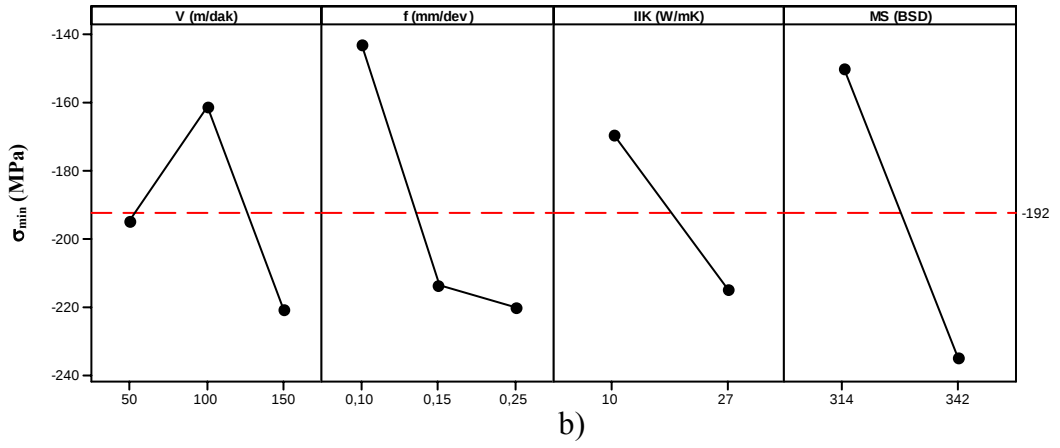
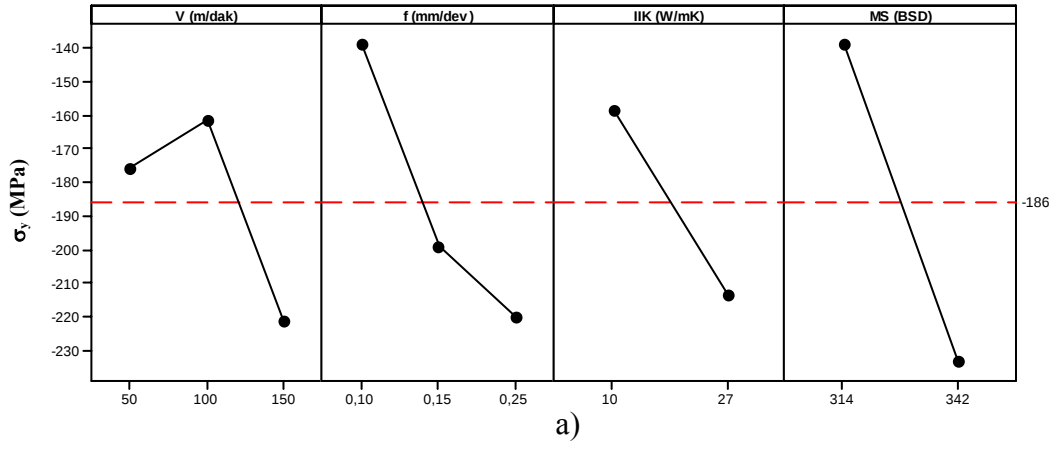
Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
σ_y						
V (m/dak)	2	23186	11593	0,71	0,545	3,40
f (mm/dev)	2	42775	21387	1,31	0,366	6,27
IİK (W/mK)	1	27213	27213	1,66	0,267	3,99
MS (BSD)	1	80918	80918	4,95	0,09	11,86
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	52974	13244	0,81	0,579	7,77
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	4624	2312	0,14	0,872	0,68
V (m/dak)*MS (BSD)	2	3156	1578	0,1	0,91	0,46
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	39251	19626	1,2	0,391	5,75
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	50119	25060	1,53	0,321	7,35
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	1216	1216	0,07	0,799	0,18
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	19314	4828	0,3	0,868	2,83
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	121523	30381	1,86	0,282	17,82
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	48323	24162	1,48	0,331	7,08
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	102062	51031	3,12	0,153	14,96
Hata	4	65429	16357			9,59
Toplam	35	682082				100,00
σ_{min}						
V (m/dak)	2	21289	10645	0,64	0,575	3,75
f (mm/dev)	2	44287	22144	1,32	0,362	7,80
IİK (W/mK)	1	18330	18330	1,1	0,354	3,23
MS (BSD)	1	64967	64967	3,89	0,12	11,45
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	34667	8667	0,52	0,73	6,11
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	2148	1074	0,06	0,939	0,38
V (m/dak)*MS (BSD)	2	4061	2030	0,12	0,889	0,72
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	31043	15521	0,93	0,466	5,47
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	32858	16429	0,98	0,45	5,79
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	10	10	0	0,981	0,00
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	29244	7311	0,44	0,779	5,15
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	99345	24836	1,49	0,355	17,51
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	34664	17332	1,04	0,434	6,11
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	83662	41831	2,5	0,197	14,74
Hata	4	66875	16719			11,79
Toplam	35	567450				100,00
σ_{max}						
V (m/dak)	2	1615,9	808	0,99	0,447	1,90
f (mm/dev)	2	6360	3180	3,9	0,115	7,50
IİK (W/mK)	1	4688,9	4688,9	5,75	0,074	5,53
MS (BSD)	1	1802,3	1802,3	2,21	0,211	2,12
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	14600,4	3650,1	4,48	0,088	17,21
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	1541,2	770,6	0,95	0,461	1,82
V (m/dak)*MS (BSD)	2	956,2	478,1	0,59	0,598	1,13
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	8274,9	4137,5	5,08	0,08	9,76
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	6767,3	3383,6	4,15	0,106	7,98
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	8402,4	8402,4	10,31	0,033	9,91
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	2591,8	647,9	0,8	0,585	3,06
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	8323,1	2080,8	2,55	0,193	9,81
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	5066,1	2533	3,11	0,153	5,97
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	10575,8	5287,9	6,49	0,055	12,47
Hata	4	3259,2	814,8			3,84
Toplam	35	84825,5				100,00

Şekil 6.17, kanal açma işleminde ana parametre seviyelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkisini göstermektedir. Kanal açma işlemi neticesinde σ_y , $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ sırasıyla -186 MPa, -192 MPa ve 42 MPa ortalama değerlerini almıştır. σ_y ve $\sigma_{\min}$ arasındaki grafiklerin benzerliği minimum gerilmelerin yüzeyde geldiğinin kanıtıdır. Kesme hızının (V) özellikle 100 m/dak'dan 150 m/dak'ya çıkması basma gerilmesini arttırmıştır. Bunun yanında ilerleme miktarının artışı basma gerilmesini arttırmıştır. Literatüre göre ilerleme oranının artışı parça yüzeyinde çekme gerilmesi oluşturmaktadır [11, 35, 164, 174]. Fakat kanal açmada talaş kaldırma işlemi radyal yönde gerçekleşir. Yani talaş sürekli olarak kesici takım önünde sıkıştırılarak oluşmaktadır ve takımın parça yüzeyine sürekli bir basıncı söz konusudur. Bu kanal açmada plastik deformasyonun fazla olmasına neden olur. Bu yüzeyde basma gerilmeleri ile sonuçlanır. Ayrıca, soğutma sıvısının kullanılması oluşabilecek ısıyı ortamdan uzaklaştırdığı için de basma gerilmelerinin oluşumu kolaylaştırmıştır [5, 106, 181, 198, 200].

maksimum kalıntı gerilmesini ifade eden $\sigma_{\max}$ için de ilerleme oranı arttıkça çekme kalıntı gerilmeleri değerlerinde azalma gözlenmiştir. Söz konusu etki burada da kendini göstermiş ve çekme kalıntı gerilmelerini azaltmıştır.

Malzeme sertliği (MS) artışı σ_y ve $\sigma_{\min}$ üzerinde basma gerilmeleri yönünde artışa neden olur. Bu tamamen sertliğin plastik deformasyonu arttırmasıyla ilişkilidir [66].

$\sigma_{\max}$ üzerinde kesme hızı (V) ve ısı iletim katsayısı (IİK) beraberce dikkate alındığında artan kesme hızı ve düşük ısı iletim katsayısı oluşan ısıdan kaynaklanan gerilmelerin artmasına neden olur. Oluşan ısı ve bu ısının kesici takım tarafından uzaklaştırılamaması neticesinde ısı iş parçasına geçer ve gerilmeleri çekme yönünde etkiler [127, 181, 187, 188].



Şekil 6.17. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri

a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ;

c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}

Çizelge 6.6, kanal açma işleminde eksenel yönlü gerilmelerin etki derinliklerine ait varyans analizi göstermektedir.

En büyük basma gerilemesinin oluştuğu derinliği tanımlayan a_{min} için ana işleme parametrelerinde ısıl iletim katsayısı (IİK) ve malzeme sertliği (MS) %8,59 katkı oranıyla etki ederken bu iki parametrenin etkileşimi a_{min} üzerinde %9,65 katkı oranıyla etkilidir. Bu etkiler istatistiki açıdan anlamlıdır.

a_{max} üzerine ilerleme miktarı (f) %27,29 katkı oranıyla istatistiki açıdan en kuvvetli etkiyi oluşturmuştur. İlerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK) etkileşimi a_{max} üzerinde % 10,14'lük bir katkı oranına sahipken, malzeme sertliği (MS) a_{max} 'ı %5,53 oranında etkilemiştir. İstatistiksel olarak bir anlam ifade etmese de kesme hızı(V)-ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşiminin %13,27 oranındaki katkısı dikkat çekicidir.

a_0 üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki söz konusu değildir. Bunun yanında, a_0 üzerinde kesme hızı (V)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %19,14 oranında ve kesme hızı(V)-ilerleme miktarı(f)-ısıl iletim katsayısı(IİK) etkileşimi ise %16,44 oranında etkili olduğu söylenebilir.

Şekil 6.18, kanal açma işleminde ana parametre seviyelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilmelerin etki derinliklerini göstermektedir. Kanal açma işlemi neticesinde a_{min} , a_{max} ve a_0 sırasıyla 0,039 mm, 0,171 mm ve 0,190 mm ortalama değerlerini almıştır.

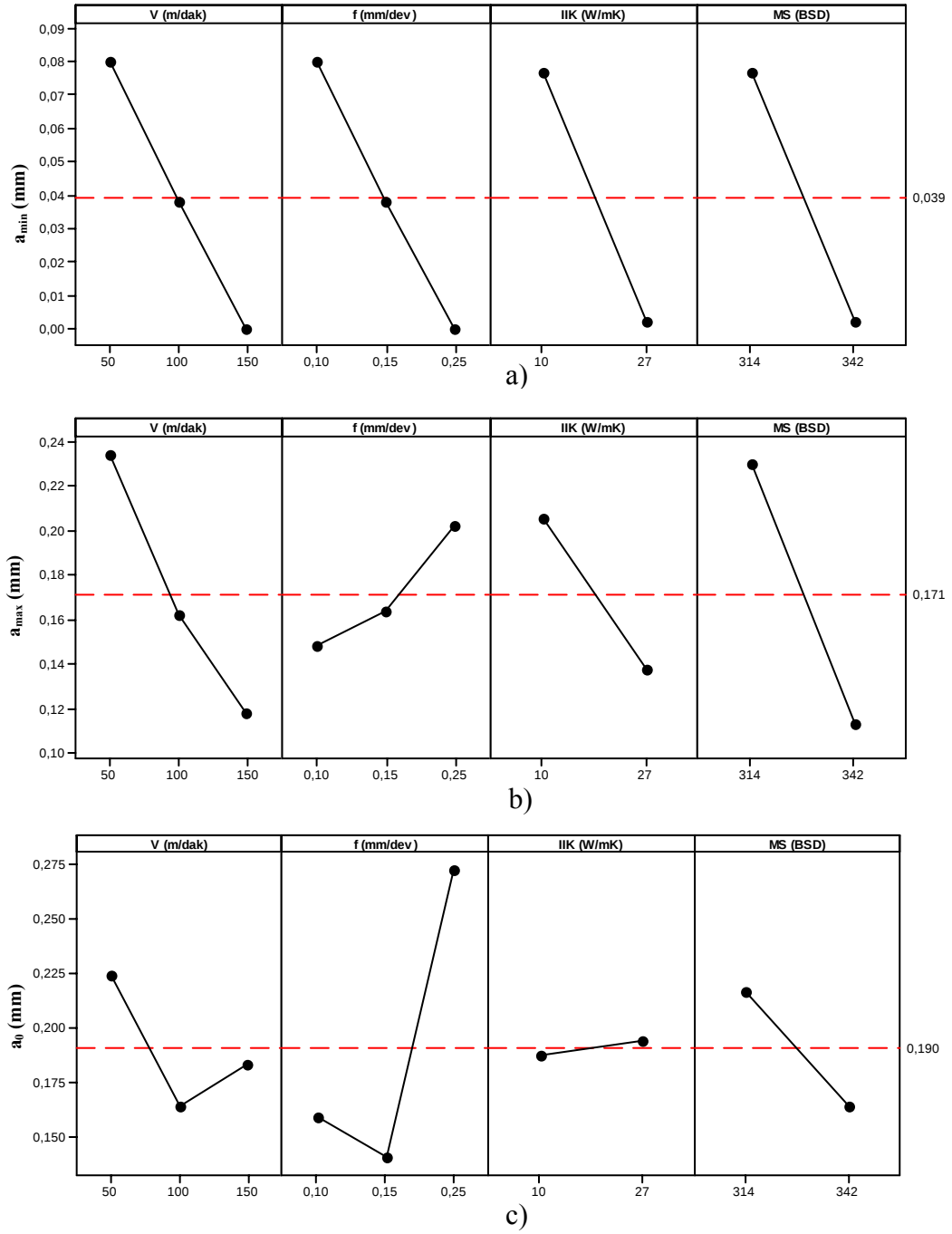
Malzeme sertliğinin (MS) ve ısıl iletim katsayısının (IİK) artması, a_{min} değerini düşürerek en büyük basma gerilmesinin yüzeyde oluşmasına sebep olmuştur. Kesme hızı (V) ve ilerleme miktarının (f) artması da aynı etkiyi gösterir. Bu, kanal açma işleminde işlenen yüzeyin termoplastik etkiye maruz kaldığının göstergesidir.

İlerleme miktarı (f) artışı a_{max} değerini arttırmıştır. Malzeme sertliğindeki (MS) artış malzemenin pekleşme kabiliyetini düşürür, dolayısıyla sert malzemede çekme gerilmeleri daha düşük derinliklerde meydana gelir [66, 192]. Malzeme sertliği için

söylenenler, a_0 için de aynıdır. Ayrıca, ilerleme artışı çekme gerilmelerini düşürürken etki derinliğini arttırmıştır.

Çizelge 6.6. Kanal açma işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
a_{min}						
V (m/dak)	2	0,038422	0,019211	2,17	0,23	6,62
f (mm/dev)	2	0,038422	0,019211	2,17	0,23	6,62
IİK (W/mK)	1	0,049878	0,049878	5,63	0,077	8,59
MS (BSD)	1	0,049878	0,049878	5,63	0,077	8,59
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,035444	0,008861	1	0,5	6,11
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,032289	0,016144	1,82	0,274	5,56
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,032289	0,016144	1,82	0,274	5,56
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,032289	0,016144	1,82	0,274	5,56
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,032289	0,016144	1,82	0,274	5,56
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,056011	0,056011	6,32	0,066	9,65
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,035444	0,008861	1	0,5	6,11
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,035444	0,008861	1	0,5	6,11
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,038422	0,019211	2,17	0,23	6,62
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,038422	0,019211	2,17	0,23	6,62
Hata	4	0,035444	0,008861			6,11
Toplam	35	0,580389				100,00
a_{max}						
V (m/dak)	2	0,022763	0,011381	2,96	0,163	5,04
f (mm/dev)	2	0,12325	0,061625	16,01	0,012	27,29
IİK (W/mK)	1	0,000348	0,000348	0,09	0,779	0,08
MS (BSD)	1	0,024964	0,024964	6,48	0,064	5,53
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,038426	0,009607	2,5	0,199	8,51
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,026611	0,013305	3,46	0,134	5,89
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,024305	0,012152	3,16	0,15	5,38
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,045804	0,022902	5,95	0,063	10,14
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,023822	0,011911	3,09	0,154	5,28
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,001995	0,001995	0,52	0,511	0,44
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,012614	0,003154	0,82	0,574	2,79
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,059923	0,014981	3,89	0,108	13,27
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,02485	0,012425	3,23	0,146	5,50
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0065	0,00325	0,84	0,494	1,44
Hata	4	0,015401	0,00385			3,41
Toplam	35	0,451577				100,00
a_0						
V (m/dak)	2	0,08197	0,04098	1,18	0,395	7,90
f (mm/dev)	2	0,01839	0,00919	0,27	0,78	1,77
IİK (W/mK)	1	0,04141	0,04141	1,19	0,336	3,99
MS (BSD)	1	0,12168	0,12168	3,51	0,134	11,73
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,05179	0,01295	0,37	0,818	4,99
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,00243	0,00122	0,04	0,966	0,23
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,19862	0,09931	2,87	0,169	19,14
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,00408	0,00204	0,06	0,944	0,39
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,05237	0,02619	0,76	0,527	5,05
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,00226	0,00226	0,07	0,811	0,22
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,17051	0,04263	1,23	0,423	16,44
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,09778	0,02444	0,71	0,628	9,42
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,01062	0,00531	0,15	0,863	1,02
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,04494	0,02247	0,65	0,57	4,33
Hata	4	0,13863	0,03466			13,36
Toplam	35	1,03748				100,00



Şekil 6.18. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0

Çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları

Çizelge 6.7, kanal açmada işleme parametrelerin çevresel yönlü σ_y , σ_{min} ve σ_{max} sınırları için varyans analizlerini göstermektedir.

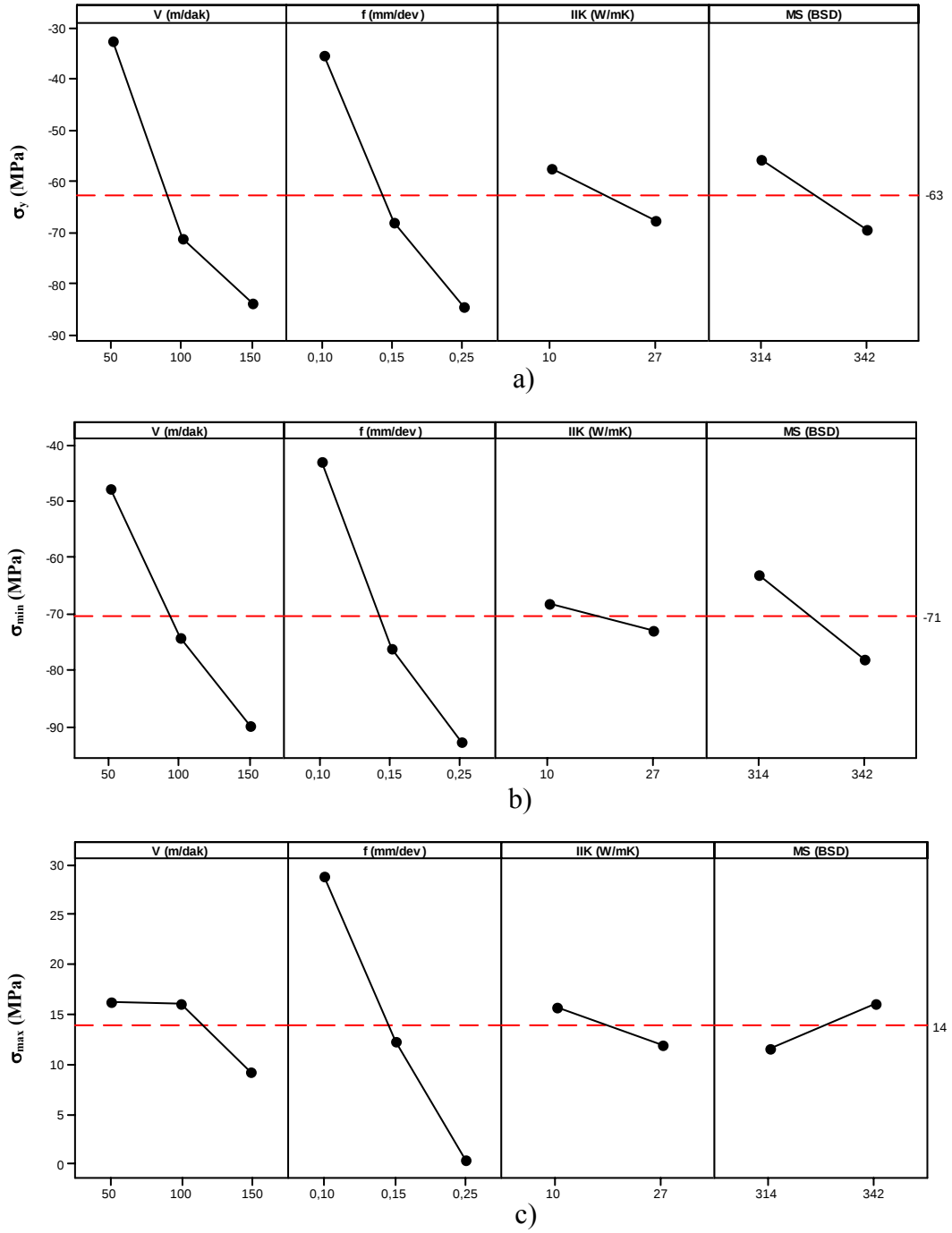
Yüzeydeki kalıntı gerilme oluşumunu ifade eden σ_y sınırı üzerinde kesme hızının (V) %17,19 katkı oranıyla en etkili parametre olduğu görülmektedir. İlerleme oranı (f) ise %15,09 katkı oranıyla anlamlı bir etki oluşturmuştur. Parametre etkileşimlerinden sadece ilerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi kuvvetli bir etkiye sahiptir ve %11,99 katkı oranına sahiptir. σ_{min} üzerinde kesme hızı (V) ve ilerleme miktarı (f) en anlamlı parametrelerdir. Kesme hızı (V) %16,50 katkı oranına sahipken, %23,24 katkı oranına sahip ilerleme miktarı (f) en kuvvetli etkiyi oluşturmuştur. İlerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK) etkileşimi %16,66 oranında etkilidir. σ_{max} en büyük çekme gerilmelerini ifade eder. Kanal açma işleminde çevresel gerilme sınırlarından σ_{max} üzerinde en anlamlı etkiyi %33,95 katkı oranıyla ilerleme miktarı (f) göstermiştir.

Şekil 6.19, kanal açma işleminde parametre seviyelerinin çevresel kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri görülmektedir. Kanal açma işlemi neticesinde çevresel yönlü σ_y , σ_{min} ve σ_{max} sınır değerleri sırasıyla -63 MPa, -71 MPa ve 14 MPa ortalama değerlerini almıştır. Kesme hızının (V) artışı σ_y ve σ_{min} sınırlarının basma gerilmelerini arttırırken, σ_{max} sınırında çekme gerilmelerinin değerini düşürmüştür. Bu, takımın radyal yönde ilerlemesi söz konusu olduğundan, kesme hızı arttıkça oluşan deformasyon miktarının artışından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, çevresel gerilmeler üzerine kesme hızı vektörünün etkili olması kanal açma işleminde kesme hızını (V) öne çıkarmıştır. İlerleme miktarı (f) artışı da tıpkı kesme hızı gibi σ_y ve σ_{min} değerlerinde basma özelliğini arttırırken, σ_{max} sınırında çekme gerilmelerinin değerini düşürmüştür. Bunun, yüksek ilerleme oranının yüksek kesme kuvvetleri ve böylece daha fazla plastik deformasyon oluşturmalarının bir sonucu olduğu düşünülmektedir [105, 174]. Isıl iletim katsayısının (IİK) etkisi çok düşük olmakla birlikte bütün kalıntı gerilme sınırları üzerinde eşit ve benzer bir eğilim sergilemiştir.

İlerleme miktarı (f) ve kesme hızına (V) göre malzeme sertliği (MS) etkisi oldukça düşüktür.

Çizelge 6.7. Kanal açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , σ_{min} ve σ_{max} için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
σ_y						
V (m/dak)	2	16906	8453	7,76	0,042	17,16
f (mm/dev)	2	14865	7433	6,83	0,051	15,09
IİK (W/mK)	1	942	942	0,87	0,405	0,96
MS (BSD)	1	1738	1738	1,6	0,275	1,76
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	11985	2996	2,75	0,175	12,17
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	673	337	0,31	0,75	0,68
V (m/dak)*MS (BSD)	2	120	60	0,06	0,947	0,12
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	5079	2539	2,33	0,213	5,16
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	8577	4289	3,94	0,113	8,71
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	99	99	0,09	0,778	0,10
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	6283	1571	1,44	0,366	6,38
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	8286	2071	1,9	0,274	8,41
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	6790	3395	3,12	0,153	6,89
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	11808	5904	5,42	0,073	11,99
Hata	4	4355	1089			4,42
Toplam	35	98507				100,00
σ_{min}						
V (m/dak)	2	10863	5431,5	8,25	0,038	16,50
f (mm/dev)	2	15302,7	7651,3	11,62	0,022	23,24
IİK (W/mK)	1	204,1	204,1	0,31	0,607	0,31
MS (BSD)	1	2048	2048	3,11	0,153	3,11
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	4764,7	1191,2	1,81	0,29	7,24
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	325,4	162,7	0,25	0,792	0,49
V (m/dak)*MS (BSD)	2	633,6	316,8	0,48	0,65	0,96
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	7017,4	3508,7	5,33	0,074	10,66
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	3039,5	1519,7	2,31	0,216	4,62
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	261,2	261,2	0,4	0,563	0,40
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	6474,7	1618,7	2,46	0,202	9,83
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	4707,2	1176,8	1,79	0,294	7,15
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	2523,2	1261,6	1,92	0,261	3,83
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	5045,2	2522,6	3,83	0,118	7,66
Hata	4	2633,6	658,4			4,00
Toplam	35	65843,5				100,00
σ_{max}						
V (m/dak)	2	381,7	190,9	0,66	0,564	2,63
f (mm/dev)	2	4932,6	2466,3	8,58	0,036	33,95
IİK (W/mK)	1	118,7	118,7	0,41	0,556	0,82
MS (BSD)	1	185,6	185,6	0,65	0,467	1,28
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	1679,3	419,8	1,46	0,361	11,56
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	67,8	33,9	0,12	0,892	0,47
V (m/dak)*MS (BSD)	2	501,6	250,8	0,87	0,485	3,45
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	951	475,5	1,65	0,3	6,54
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	1427,5	713,8	2,48	0,199	9,82
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	532,1	532,1	1,85	0,245	3,66
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	516,5	129,1	0,45	0,771	3,55
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	728,3	182,1	0,63	0,666	5,01
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	534,1	267	0,93	0,466	3,68
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	823,7	411,8	1,43	0,339	5,67
Hata	4	1149,9	287,5			7,91
Toplam	35	14530,5				100,00



Şekil 6.19. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ;
c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}

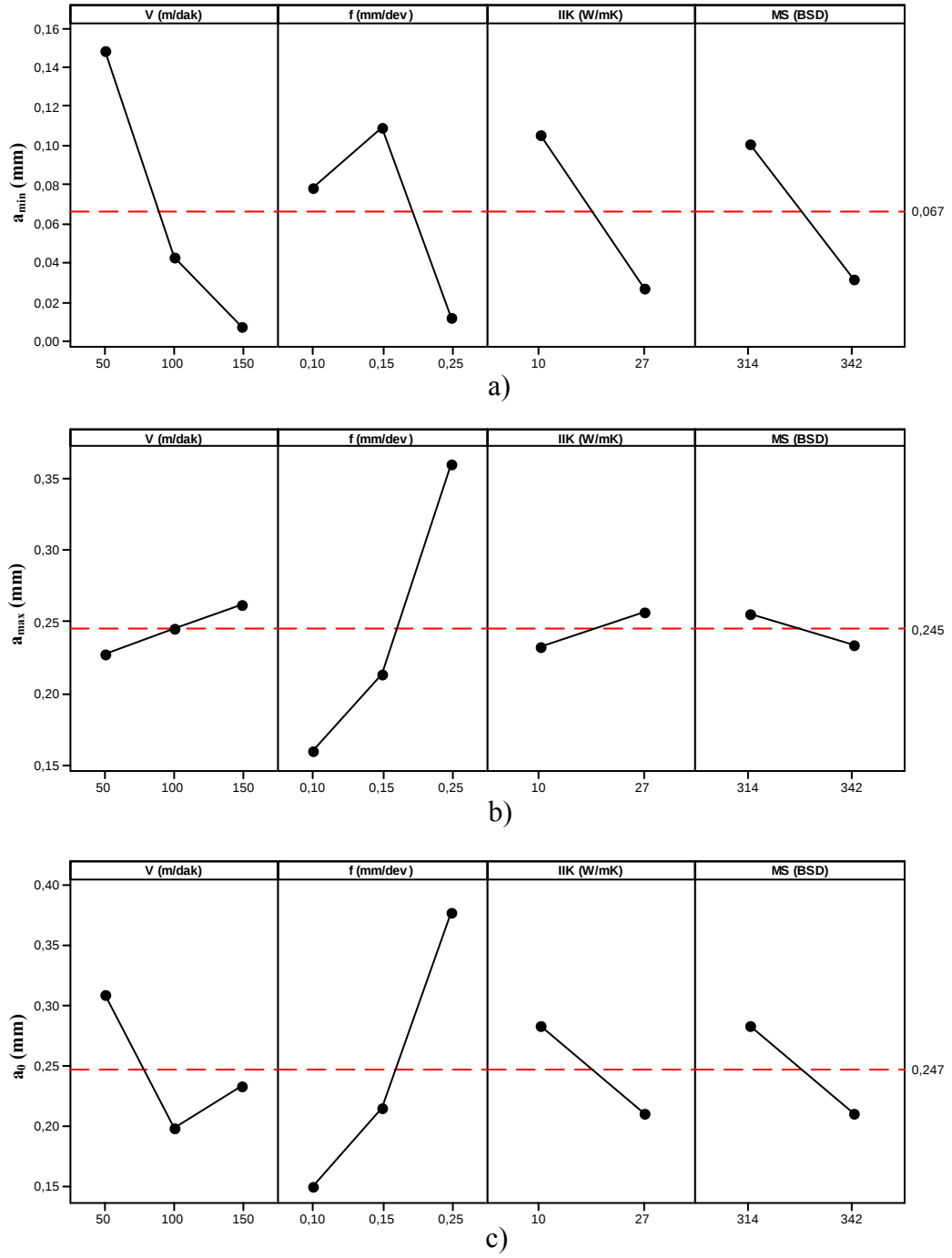
Çizelge 6.8’de kanal açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinliklerine ait varyans analiz tablosu görülmektedir.

En büyük basma gerilmelerinin oluştuğu derinliği ifade eden a_{min} üzerinde kesme hızı (V) %15,95 oranında, ilerleme miktarı (f) %7,23 oranında, ısıtım katsayısı (IİK) % 6,7 oranında, malzeme sertliği (MS) %5,28 oranında etkilidir. Fakat kesme hızından (V) sonra en büyük etkiyi kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f)-ısıtım katsayısı (IİK) etkileşimi %13,66 katkı oranıyla göstermiştir. Kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f) etkileşiminin %13,33 katkı oranı ve ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşiminin %12,31 katkı oranı söz konusudur. Parametrelerin ve etkileşimlerin en büyük basma gerilmelerinin oluştuğu derinliği ifade eden a_{min} değeri üzerinde daha etkili olduğunu gösterir. a_{max} üzerinde en anlamlı etkiyi %31,77 oranıyla ilerleme miktarı (f) göstermektedir. Bunu %13,72 katkı oranıyla ilerleme miktarı(f)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi ve %6,83 katkı oranıyla ısıtım katsayısı (IİK)-malzeme sertliği etkileşimi takip eder. Faydalı gerilmelerin oluştuğu derinliği ifade eden a_0 üzerinde ilerleme miktarı (f) %25,70 en büyük katkı payına sahiptir. Kesme hızı (V)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi ise a_0 üzerinde %15,73 katkı oranına sahiptir.

Şekil 6.20, çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerinde parametre seviyelerinin etkisini göstermektedir. a_{min} , a_{max} ve a_0 sırasıyla 0,067 mm, 0,245 mm ve 0,247 mm ortalama değerlerini almıştır. En büyük katkı oranına sahip parametreler incelendiğinde, kesme hızı (V) artışı a_{min} değerini sıfıra yaklaştırmıştır, yani basma gerilmeleri kesme hızı artışıyla yüzeye yerleşmiştir. Bu tamamen kesme hızı artışıyla azalan plastik sertleşmeye olan tepkinin azalmasından kaynaklanır [192]. Aynı şekilde, a_{max} dikkate alındığında ilerleme miktarı (f) artışı çekme gerilmelerinin derinliğini artırır. Faydalı derinliğinin a_0 ortalama değeri a_{max} ortalamasına çok yakındır ve a_0 ilerleme oranı artışıyla hızla artar. Bu, işleme sonrası daha büyük elastik gevşemenin ortaya çıkması nedeniyle kesme kenarı altına yerleşmiş iş parçası civarındaki basma bölgesinin büyümesine sebep olan mekaniksel etki ile açıklanabilir [8].

Çizelge 6.8. Kanal açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri $a_{\min}$, $a_{\max}$ ve a_0 için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
$a_{\min}$						
V (m/dak)	2	0,128758	0,064379	11,18	0,023	15,95
f (mm/dev)	2	0,058347	0,029173	5,06	0,08	7,23
IİK (W/mK)	1	0,0546	0,0546	9,48	0,037	6,77
MS (BSD)	1	0,042573	0,042573	7,39	0,053	5,28
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,107574	0,026893	4,67	0,082	13,33
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,031283	0,015641	2,72	0,18	3,88
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,030456	0,015228	2,64	0,185	3,77
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,025038	0,012519	2,17	0,23	3,10
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,099358	0,049679	8,62	0,035	12,31
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,006779	0,006779	1,18	0,339	0,84
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,1102	0,02755	4,78	0,079	13,66
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,058974	0,014743	2,56	0,192	7,31
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,010198	0,005099	0,89	0,481	1,26
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,01984	0,00992	1,72	0,289	2,46
Hata	4	0,02304	0,00576			2,85
Toplam	35	0,807017				100,00
$a_{\max}$						
V (m/dak)	2	0,00721	0,00361	0,31	0,751	0,89
f (mm/dev)	2	0,25844	0,12922	1,05	0,023	31,77
IİK (W/mK)	1	0,00573	0,00573	0,49	0,523	0,70
MS (BSD)	1	0,00449	0,00449	0,38	0,569	0,55
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,05349	0,01337	1,14	0,45	6,58
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,03246	0,01623	1,39	0,349	3,99
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,03107	0,01554	1,33	0,361	3,82
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,05166	0,02583	2,21	0,226	6,35
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,1116	0,0558	4,77	0,087	13,72
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,05554	0,05554	4,75	0,095	6,83
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,01848	0,00462	0,39	0,805	2,27
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,05557	0,01389	1,19	0,436	6,83
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,05238	0,02619	2,24	0,223	6,44
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0285	0,01425	1,22	0,386	3,50
Hata	4	0,04679	0,0117			5,75
Toplam	35	0,81341				100,00
a_0						
V (m/dak)	2	0,07771	0,03886	1,78	0,28	6,11
f (mm/dev)	2	0,32683	0,16341	7,5	0,044	25,70
IİK (W/mK)	1	0,04723	0,04723	2,17	0,215	3,71
MS (BSD)	1	0,04694	0,04694	2,15	0,216	3,69
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,18058	0,04515	2,07	0,249	14,20
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,05212	0,02606	1,2	0,392	4,10
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,20003	0,10001	4,59	0,092	15,73
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,04785	0,02392	1,1	0,417	3,76
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,00125	0,00062	0,03	0,972	0,10
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,04382	0,04382	2,01	0,229	3,45
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,03325	0,00831	0,38	0,813	2,61
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,08889	0,02222	1,02	0,493	6,99
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,03755	0,01878	0,86	0,489	2,95
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,00054	0,00027	0,01	0,988	0,04
Hata	4	0,08719	0,0218			6,86
Toplam	35	1,27179				100,00



Şekil 6.20. Kanal açma işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0

6.2.3. Düz tornalama parametrelerinin etkisi

Eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları

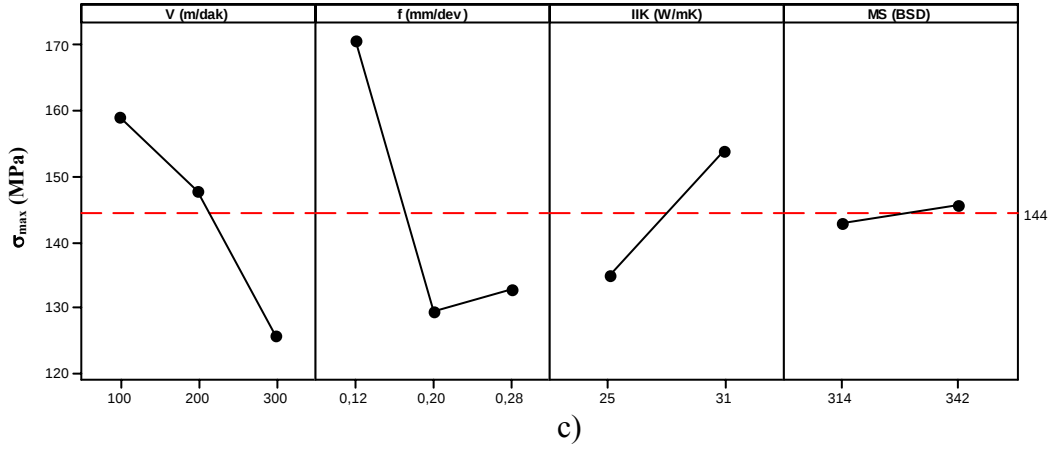
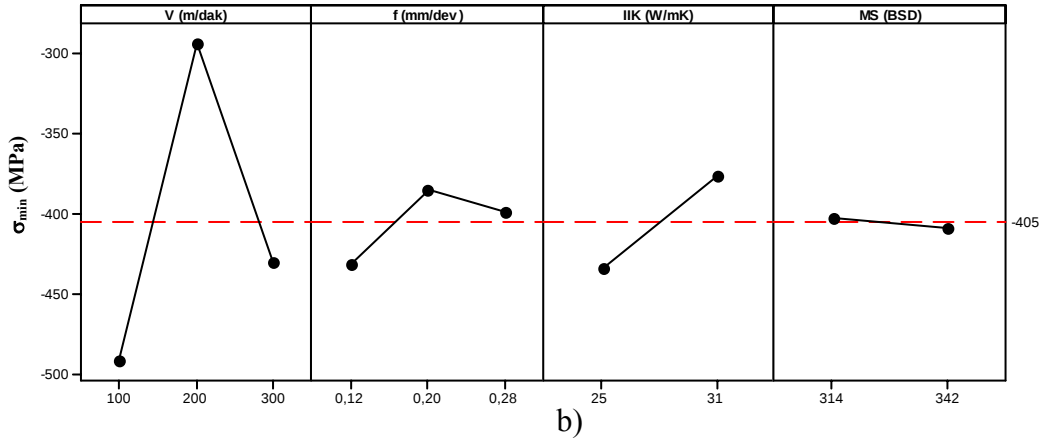
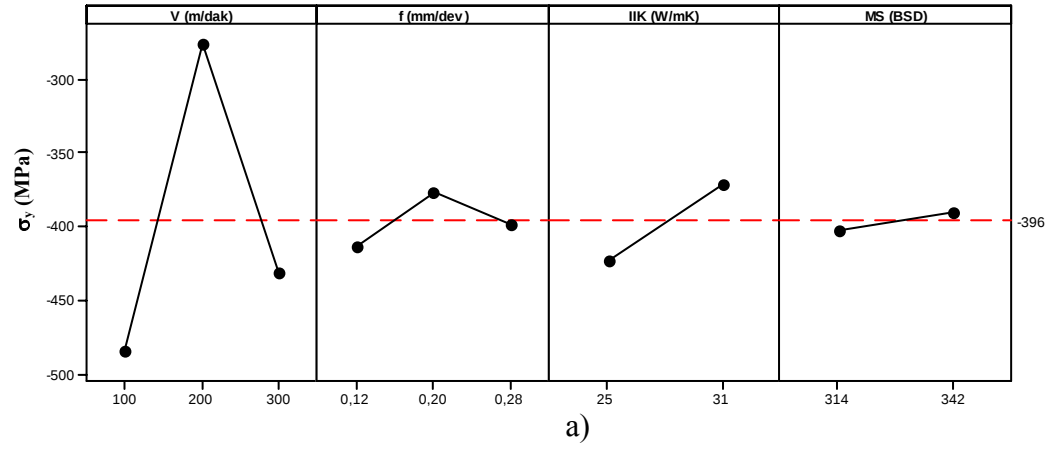
Çizelge 6.9, düz tornalama işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerine işleme parametrelerinin varyans analizlerini göstermektedir.

Varyans tablosundan istatistiki açıdan tek anlamlı etkiyi $\sigma_{\max}$ üzerinde %16,35 oranında ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi göstermiştir. σ_y üzerinde sadece kesme hızının (V) %15,57 oranında etkisi söz konusudur. $\sigma_{\min}$ üzerinde ise kesme hızının (V) katkısı %16'dır. σ_y ve $\sigma_{\min}$ üzerinde sırasıyla %16,1 ve %16,79 katkı oranlarıyla en büyük katkıyı kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f)-ısıtım katsayısı (IIK) etkileşimi göstermiştir. $\sigma_{\max}$ üzerinde en büyük katkı %18,44 ile kesme hızı (V)-ısıtım katsayısı (IIK) etkileşimine aittir.

Şekil 6.21, düz tornalama işleminde parametre seviyelerinin σ_y , $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ değerleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. İşleme parametrelerinin σ_y , $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ sınırları üzerinde sırasıyla -396 MPa, -405 MPa ve 144 MPa ortalama gerilme seviyelerini oluşturduğu görülmektedir. Kesme hızı (V) arttıkça σ_y ve $\sigma_{\min}$ sınırlarına ait basma gerilmelerinin azaldığı görülmüştür. Farklı kesme hızları farklı kesme kuvvetleri üretir ve işlenmiş yüzeyin düzgünlüğünü etkiler. Küçük kesme hızları ve büyük kesme kuvvetleri, işlenmiş yüzeyde daha belirgin deformasyona neden olan oldukça büyük çekme kuvvetleri ortaya çıkarır. Bu nedenle de yüzeyde basma kalıntı gerilmelerinin oluşumu için daha baskın bir durum ortaya çıkar [184]. $\sigma_{\max}$ sınırında ise ilerleme miktarı (f) en baskın ana parametredir. İlerleme miktarının (f) artması çekme kalıntı gerilmelerinin azalmasına neden olmuştur. Çekme gerilmelerinin ilerleme miktarı artışıyla azalması, yüksek ilerleme oranının yüksek kesme kuvvetleri ve böylece daha fazla plastik deformasyon oluşturmalarının sonucu olabilir [105, 174]. Düz tornalama işleminde σ_y ve $\sigma_{\min}$ üzerinde kesme hızı baskındır. Bu, kesme hızının parça yüzeyinde daha belirgin deformasyona neden olmasından kaynaklanmaktadır [184].

Çizelge 6.9. Düz tornalama işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Varyans	F-değeri	P-değeri	% KO
σ_y						
V (m/dak)	2	280663	140332	1,82	0,274	15,57
f (mm/dev)	2	8426	4213	0,05	0,947	0,47
IİK (W/mK)	1	23890	23890	0,31	0,607	1,33
MS (BSD)	1	1226	1226	0,02	0,906	0,07
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	100745	25186	0,33	0,848	5,59
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	264453	132227	1,72	0,289	14,67
V (m/dak)*MS (BSD)	2	34740	17370	0,23	0,808	1,93
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	66486	33243	0,43	0,676	3,69
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	187531	93765	1,22	0,386	10,40
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	27641	27641	0,36	0,581	1,53
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	290294	72574	0,94	0,522	16,10
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	57730	14433	0,19	0,933	3,20
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	33126	16563	0,22	0,815	1,84
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	117715	58858	0,76	0,523	6,53
Hata	4	307912	76978			17,08
Toplam	35	1802580				100,00
$\sigma_{\min}$						
V (m/dak)	2	248446	124223	1,58	0,312	16,00
f (mm/dev)	2	13344	6672	0,08	0,92	0,86
IİK (W/mK)	1	29943	29943	0,38	0,571	1,93
MS (BSD)	1	308	308	0	0,953	0,02
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	58165	14541	0,18	0,935	3,75
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	199212	99606	1,27	0,375	12,83
V (m/dak)*MS (BSD)	2	51651	25826	0,33	0,738	3,33
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	49682	24841	0,32	0,746	3,20
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	159206	79603	1,01	0,441	10,25
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	22389	22389	0,28	0,622	1,44
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	260737	65184	0,83	0,57	16,79
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	27591	6898	0,09	0,982	1,78
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	20282	10141	0,13	0,883	1,31
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	96823	48411	0,62	0,585	6,24
Hata	4	314787	78697			20,28
Toplam	35	1552567				100,00
$\sigma_{\max}$						
V (m/dak)	2	6880	3440	1,93	0,259	6,72
f (mm/dev)	2	12610	6305	3,54	0,131	12,31
IİK (W/mK)	1	3233	3233	1,81	0,249	3,16
MS (BSD)	1	73	73	0,04	0,849	0,07
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	5146	1286	0,72	0,62	5,02
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	18893	9447	5,3	0,075	18,44
V (m/dak)*MS (BSD)	2	56	28	0,02	0,985	0,05
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	8290	4145	2,32	0,214	8,09
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	16752	8376	4,7	0,089	16,35
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	1	1	0	0,98	0,00
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	6276	1569	0,88	0,548	6,13
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	6792	1698	0,95	0,518	6,63
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	10087	5043	2,83	0,172	9,85
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	209	105	0,06	0,944	0,20
Hata	4	7132	1783			6,96
Toplam	35	102431				100,00



Şekil 6.21. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri
a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ;
c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}

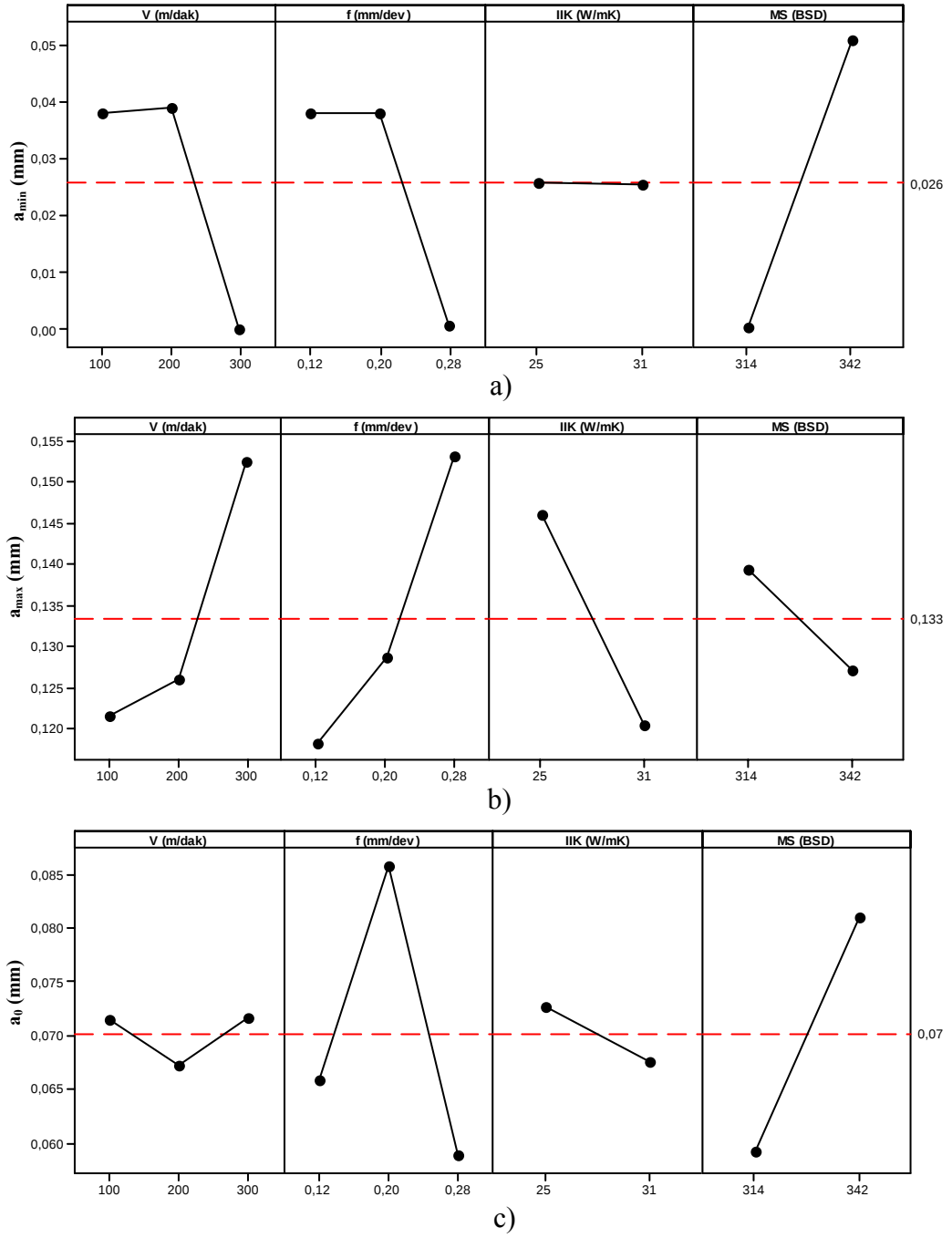
Çizelge 6.10'da düz tornalama işlemi neticesinde oluşan eksenel yönlü gerilmelere ait etki derinliklerinin varyans tablosu yer almaktadır.

Tablo istatistiki açıdan incelendiğinde anlamlı etkilerin sadece en büyük çekme gerilmesinin derinliğini ifade eden a_{max} üzerinde olduğu görülmektedir. a_{max} üzerinde ilerleme miktarı (f) %9,76 katkı oranıyla ana parametrelerin en etkili olarak karşımıza çıkmıştır. Kesme hızının (V) katkısı %8,49 iken ısıl iletim katsayısı %7,55 katkı payına sahiptir. Bu üç parametrenin yani kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f)-ısıl iletim katsayısı (IİK) etkileşimi a_{max} üzerinde %18,90 katkı payı ile en yüksek etkiyi oluşturmuştur. a_{min} üzerinde kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f) etkileşimi %14,67 katkı sağlarken, kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f) -malzeme sertliği (MS) %14,77 katkı oranına sahiptir. a_0 üzerinde ise kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f) etkileşiminin %15,88 oranıyla en büyük katkıyı sağladığı görülmektedir.

Şekil 6.22, düz tornalama işleminde işleme parametre seviyelerinin etkileri görülmektedir. a_{min} , a_{max} ve a_0 sınırlarına ait ortalama etki derinlikleri sırasıyla 0,026 mm, 0,133 mm ve 0,07 mm değerlerini almıştır. Faydalı gerilmelerin yüzeye yakın bir yerde toplanması dikkat çekicidir. Bu ısıl etkilenmenin fazlalığına işaret eder. Kesme hızı (V) ve ilerleme miktarı (f) a_{min} üzerinde aynı etkiyi göstermiştir. Her iki parametre seviyesindeki artış en büyük basma gerilmelerinin yüzeye yakın meydana gelmesine neden olmuştur. Bu, kesme hızı ve ilerleme miktarı artışıyla yüzeyin daha fazla ısınması soğutma sıvısı ile engellendiğinden basma gerilmelerinin yüzeyde oluşmasına neden olmuştur [106, 199]. Bunun aksine artan kesme hızı (V) ve ilerleme miktarı (f) seviyeleri a_{max} değerini arttırmıştır. Her iki parametre artışı kesme sıcaklığını arttırmaktadır, buna bağlı olarak oluşan ısı miktarındaki artış soğutma sıvısı yardımıyla yüzeyden uzaklaştırılabilmektedir. Düşük ısıl iletim katsayısına sahip kesici takım da parçaya ısı geçişini kolaylaştırır. Bu iki olay birleştiğinde oluşan ısı soğutma sıvısı ile yüzeyden uzaklaştırılmasına rağmen parçaya geçen ısı faydalı derinliğin düşmesine, çekme gerilmelerinin ise yüzeye yakın oluşmasına neden olmuştur [65, 106].

Çizelge 6.10. Düz tornalama işleminde eksenel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Ko	F-değeri	P-değeri	% KO
a_{min}						
V (m/dak)	2	0,011964	0,005982	0,67	0,562	3,00
f (mm/dev)	2	0,01135	0,005675	0,63	0,577	2,84
IİK (W/mK)	1	0,000002	0,000002	0	0,989	0,00
MS (BSD)	1	0,023104	0,023104	2,58	0,184	5,79
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,05858	0,014645	1,63	0,323	14,67
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,035884	0,017942	2	0,25	8,99
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,011555	0,005777	0,64	0,572	2,89
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,03527	0,017635	1,97	0,254	8,83
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,012168	0,006084	0,68	0,558	3,05
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,000002	0,000002	0	0,989	0,00
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,03466	0,008665	0,97	0,513	8,68
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,058989	0,014747	1,64	0,321	14,77
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,034657	0,017328	1,93	0,259	8,68
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,03527	0,017635	1,97	0,254	8,83
Hata	4	0,035887	0,008972			8,99
Toplam	35	0,399342				100,00
a_{max}						
V (m/dak)	2	0,0066107	0,0033053	4,49	0,095	8,49
f (mm/dev)	2	0,0076027	0,0038013	5,16	0,078	9,76
IİK (W/mK)	1	0,0058778	0,0058778	7,98	0,048	7,55
MS (BSD)	1	0,0013444	0,0013444	1,82	0,248	1,73
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,0048867	0,0012217	1,66	0,318	6,27
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,0031796	0,0015898	2,16	0,231	4,08
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0015182	0,0007591	1,03	0,436	1,95
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,0004276	0,0002138	0,29	0,763	0,55
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,0062462	0,0031231	4,24	0,103	8,02
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0147218	0,0147218	19,98	0,011	18,90
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,0009151	0,0002288	0,31	0,858	1,18
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,0106111	0,0026528	3,6	0,121	13,62
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0053129	0,0026564	3,61	0,127	6,82
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0056782	0,0028391	3,85	0,117	7,29
Hata	4	0,0029471	0,0007368			3,78
Toplam	35	0,07788				100,00
a_0						
V (m/dak)	2	0,000145	0,000072	0,01	0,986	0,11
f (mm/dev)	2	0,004712	0,002356	0,46	0,663	3,67
IİK (W/mK)	1	0,000225	0,000225	0,04	0,845	0,18
MS (BSD)	1	0,004225	0,004225	0,82	0,417	3,29
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,020391	0,005098	0,99	0,504	15,88
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,010765	0,005382	1,04	0,432	8,38
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,008125	0,004062	0,79	0,515	6,33
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,013579	0,006789	1,32	0,364	10,57
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,001803	0,000901	0,17	0,846	1,40
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,001369	0,001369	0,27	0,634	1,07
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,004081	0,00102	0,2	0,927	3,18
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,014609	0,003652	0,71	0,627	11,37
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,011894	0,005947	1,15	0,402	9,26
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,011891	0,005945	1,15	0,402	9,26
Hata	4	0,020623	0,005156			16,06
Toplam	35	0,128435				100,00



Şekil 6.22. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{min} ; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, a_{max} ; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0

Çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları

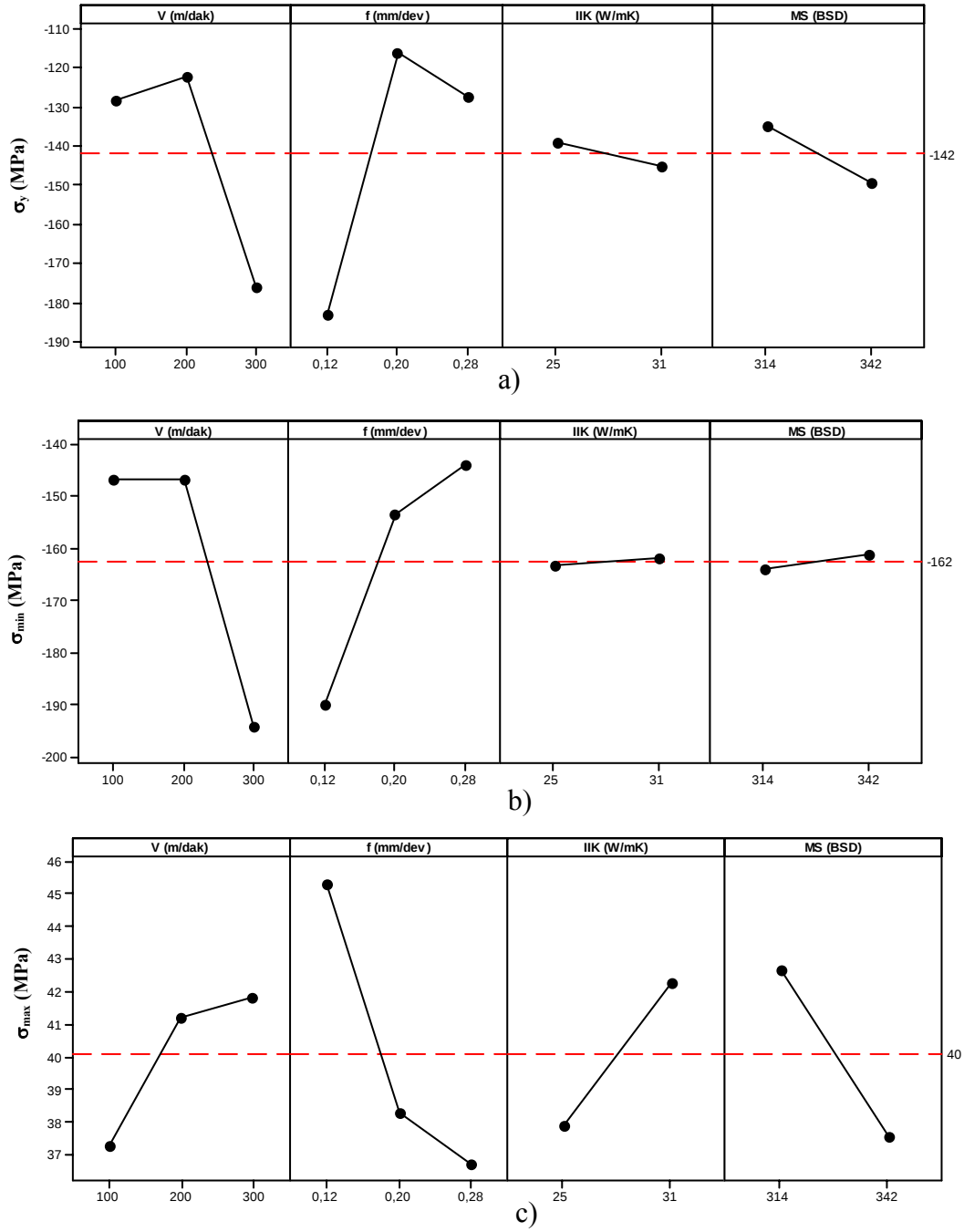
Çizelge 6.11, düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin σ_y , σ_{min} ve σ_{max} sınırları üzerindeki etkisini ifade eden varyans analizi sonuçlarını göstermektedir. İşleme parametrelerinin hiç birinin istatistiksel olarak anlamlı bir düzeyde etki sağlayamamıştır. Çizelgeden işleme parametrelerin sadece katkı payları incelenerek etki düzeyleri hakkında bilgi verilebilir. σ_y üzerinde ilerleme miktarı (f) %11,54 katkı oranıyla en fazla etkiyi sağlamışken, kesme hızının (V) katkısı sadece %7,70'dir. σ_{min} sınırında ise kesme hızının (V) katkısı %10,13 değerindeyken, ilerleme miktarı %7,91 katkı oranına sahiptir. σ_{max} üzerinde ise %9,61 katkı oranıyla ilerleme miktarı etkili olmuştur. Ayrıca, σ_{max} üzerinde katkı oranları düşük olsa da malzeme sertliği (MS), ısıl iletim katsayısı (IİK) ve kesme hızının (V) etkisi de söz konusudur.

Şekil 6.23, düz tornalama işleminde ana parametre seviyelerinin σ_y , σ_{min} ve σ_{max} sınırları üzerindeki etkileri görülmektedir. İşleme parametrelerinin σ_y , σ_{min} ve σ_{max} sınırları üzerinde sırasıyla -142 MPa, -162 MPa ve 40 MPa ortalama gerilme seviyelerini oluşturduğu görülmektedir. Çevresel gerilmelerden σ_y ve σ_{min} sınırları üzerinde ısıl iletim katsayısı (IİK) ve malzeme sertliğinin bir etkisi söz konusu değildir. Fakat σ_y ve σ_{min} üzerinde, kesme hızı (V) ve ilerleme miktarı (f) etkileri birbirine benzer. Kesme hızı (V) arttıkça, σ_y ve σ_{min} sınırları üzerinde daha basma özellikli gerilmeler oluşturmuştur. σ_{max} üzerinde, kesme hızı (V) artışı oluşan çekme gerilmelerinin değerini arttırmıştır. Bunun tersine, ilerleme miktarındaki (f) artış ise çekme gerilmelerinin düşmesine neden olmuştur.

Bu bilgilere bir açıklama getirmek zor olsa da bu etkiler üzerinde soğutma sıvısının etkisinin büyük olduğu ve ana parametrelerden ziyade parametrelerin birbiriyle etkileşiminin daha baskın etkiler oluşturduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6.11. Düz tornalama işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları σ_y , $\sigma_{\min}$ ve $\sigma_{\max}$ için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Ko	F-değeri	P-değeri	% KO
σ_y						
V (m/dak)	2	20639	10319	0,54	0,618	7,70
f (mm/dev)	2	30953	15476	0,82	0,504	11,54
IİK (W/mK)	1	334	334	0,02	0,901	0,12
MS (BSD)	1	1920	1920	0,1	0,766	0,72
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	3897	974	0,05	0,993	1,45
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	20198	10099	0,53	0,623	7,53
V (m/dak)*MS (BSD)	2	4644	2322	0,12	0,888	1,73
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	15792	7896	0,42	0,685	5,89
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	30371	15185	0,8	0,51	11,33
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	117	117	0,01	0,941	0,04
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK(W/mK)	4	15158	3790	0,2	0,926	5,65
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	10494	2623	0,14	0,959	3,91
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	276	138	0,01	0,993	0,10
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	37594	18797	0,99	0,447	14,02
Hata	4	75782	18946			28,26
Toplam	35	268169				100,00
$\sigma_{\min}$						
V (m/dak)	2	18104	9052	0,75	0,528	10,13
f (mm/dev)	2	14135	7068	0,59	0,597	7,91
IİK (W/mK)	1	11	11	0	0,977	0,01
MS (BSD)	1	68	68	0,01	0,944	0,04
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	2598	649	0,05	0,992	1,45
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	6554	3277	0,27	0,774	3,67
V (m/dak)*MS (BSD)	2	3091	1545	0,13	0,883	1,73
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	24312	12156	1,01	0,441	13,60
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	24133	12067	1	0,443	13,50
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	1737	1737	0,14	0,723	0,97
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK(W/mK)	4	11175	2794	0,23	0,907	6,25
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	9193	2298	0,19	0,931	5,14
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	2722	1361	0,11	0,896	1,52
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	12897	6448	0,54	0,622	7,21
Hata	4	48073	12018			26,89
Toplam	35	178804				100,00
$\sigma_{\max}$						
V (m/dak)	2	143,3	71,7	0,39	0,703	2,76
f (mm/dev)	2	498,1	249	1,34	0,358	9,61
IİK (W/mK)	1	169,4	169,4	0,91	0,393	3,27
MS (BSD)	1	235	235	1,27	0,323	4,53
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	103,4	25,9	0,14	0,959	1,99
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	498,7	249,3	1,34	0,358	9,62
V (m/dak)*MS (BSD)	2	112,7	56,4	0,3	0,754	2,17
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	458,1	229	1,23	0,382	8,83
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	172,4	86,2	0,46	0,659	3,32
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	613,8	613,8	3,31	0,143	11,84
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	115,6	28,9	0,16	0,95	2,23
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	657,2	164,3	0,89	0,546	12,67
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	492,3	246,2	1,33	0,361	9,49
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	172,6	86,3	0,47	0,658	3,33
Hata	4	742,4	185,6			14,32
Toplam	35	5185,1				100,00



Şekil 6.23. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerindeki etkileri

a) Yüzey kalıntı gerilmesi, σ_y ; b) Minimum kalıntı gerilme, σ_{min} ;

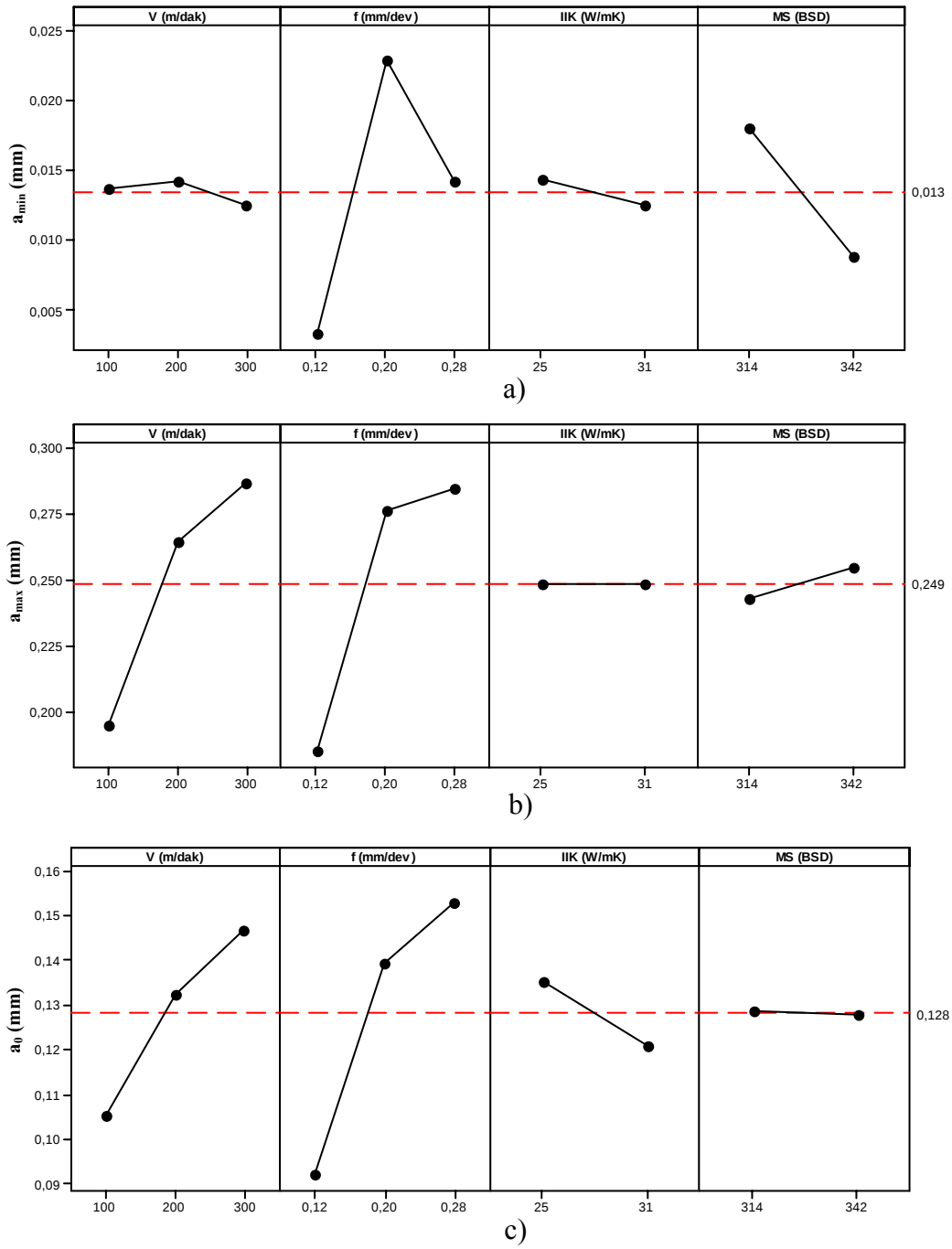
c) Maksimum kalıntı gerilme, σ_{max}

Çizelge 6.12, düz tornalama işleminde çevresel yönlü gerilmelerin etki derinliklerine ait vanyas analizini göstermektedir. Çizelge dikkatle incelendiğinde istatistik olarak işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırları üzerinde bir etkisi söz konusu olmazken, etki derinlikleri üzerinde büyük etkiler oluşturduğu görülmektedir. a_{min} , a_{max} ve a_0 üzerinde özellikle ilerleme miktarı istatistiki açıdan en büyük etkiyi yaratmıştır. İlerleme miktarı (f) a_{min} üzerinde %21,93 oranıyla en büyük etki düzeyine sahipken, ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %18,10 katkı oranıyla etkide bulunmuştur. a_{max} üzerinde ilerleme miktarı (f) katkısı %21,91 değerini alırken, kesme hız (V) %16,42 katkı oranı sağlamıştır. Bunun yanında, a_{max} üzerinde kesme hızı (V)-ilerleme miktarı (f) etkileşimi %14,48 düzeyinde, ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %16,43 düzeyinde katkı oranına sahiptir. a_0 üzerindeki etkiler daha güçlüdür. a_0 üzerinde ilerleme miktarının (f) etkisi %41,72 değeri ile en büyük katkı oranı ile etki göstermiştir. Kesme hızı (V) %17,83 düzeyinde ve ısıl iletim katsayısı (IİK) %3,22 düzeyinde etkide bulunurken, ilerleme miktarı (f)-malzeme sertliği etkileşimi %6,86 katkı oranına sahiptir. Bunu sırasıyla kesme hızı (V)-ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi %6,30 oranıyla ve ısıl iletim katsayısı (IİK)-malzeme sertliği (MS) etkileşimi ise %1,75 oranıyla katkıda bulunmuştur.

Şekil 6.24, parametre seviyelerinin a_{min} , a_{max} ve a_0 üzerindeki etkileri görülmektedir. İlerleme oranı (f) artışı, özellikle a_{max} ve a_0 değerlerinin artışında etkili olmuştur. İlerleme oranı (f) arttıkça kesme kuvvetleri artar buna bağlı sürtünme kuvvetleri de artarak ısının yükselmesine neden olur. Oluşan ısı soğutma sıvısı tarafından uzaklaştırılır. Artan kesme kuvveti sayesinde faydalı gerilme derinliği a_0 artar. Bunun neticesinde en büyük çekme gerilmeleri daha derinlerde oluşur. Kesme hızının artışı özellikle a_{max} üzerinde etkili olmuştur. Bu, kesme hızı artışının neden olduğu ısı artışından ve derinlere inildikçe plastik deformasyon etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6.12. Düz tornalama işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri a_{min} , a_{max} ve a_0 için varyans tabloları

Kaynak	Sd	Kt	Ko	F-değeri	P-değeri	% KO
a_{min}						
V (m/dak)	2	0,0000176	0,0000088	0,04	0,958	0,17
f (mm/dev)	2	0,0022909	0,0011454	5,6	0,069	21,93
IİK (W/mK)	1	0,0000284	0,0000284	0,14	0,728	0,27
MS (BSD)	1	0,0007471	0,0007471	3,65	0,129	7,15
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,0005144	0,0001286	0,63	0,668	4,92
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,0008909	0,0004454	2,18	0,229	8,53
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0006002	0,0003001	1,47	0,333	5,75
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,0001402	0,0000701	0,34	0,729	1,34
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,0018909	0,0009454	4,62	0,091	18,10
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,0001778	0,0001778	0,87	0,404	1,70
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,0002544	0,0000636	0,31	0,858	2,44
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,0002598	0,0000649	0,32	0,854	2,49
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0002442	0,0001221	0,6	0,593	2,34
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0015696	0,0007848	3,84	0,117	15,03
Hata	4	0,0008184	0,0002046			7,84
Toplam	35	0,0104449				100,00
a_{max}						
V (m/dak)	2	0,054318	0,027159	11,03	0,024	16,42
f (mm/dev)	2	0,072474	0,036237	14,72	0,014	21,91
IİK (W/mK)	1	0	0	0		0,00
MS (BSD)	1	0,001156	0,001156	0,47	0,531	0,35
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,047911	0,011978	4,86	0,077	14,48
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,006385	0,003192	1,3	0,368	1,93
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,005521	0,00276	1,12	0,411	1,67
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,017246	0,008623	3,5	0,132	5,21
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,054353	0,027176	11,04	0,024	16,43
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,002434	0,002434	0,99	0,376	0,74
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,026477	0,006619	2,69	0,181	8,00
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,006303	0,001576	0,64	0,662	1,91
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,011768	0,005884	2,39	0,208	3,56
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,014602	0,007301	2,97	0,162	4,41
Hata	4	0,009848	0,002462			2,98
Toplam	35	0,330794				100,00
a_0						
V (m/dak)	2	0,0104069	0,0052034	23,25	0,006	17,83
f (mm/dev)	2	0,0243496	0,0121748	54,39	0,001	41,72
IİK (W/mK)	1	0,0018778	0,0018778	8,39	0,044	3,22
MS (BSD)	1	0,0000071	0,0000071	0,03	0,867	0,01
V (m/dak)*f (mm/dev)	4	0,0026491	0,0006623	2,96	0,159	4,54
V (m/dak)*IİK (W/mK)	2	0,0011722	0,0005861	2,62	0,188	2,01
V (m/dak)*MS (BSD)	2	0,0007536	0,0003768	1,68	0,295	1,29
f (mm/dev)*IİK (W/mK)	2	0,0010869	0,0005434	2,43	0,204	1,86
f (mm/dev)*MS (BSD)	2	0,0040029	0,0020014	8,94	0,033	6,86
IİK (W/mK)*MS (BSD)	1	0,001024	0,001024	4,57	0,099	1,75
V (m/dak)*f (mm/dev)*IİK (W/mK)	4	0,0031771	0,0007943	3,55	0,124	5,44
V (m/dak)*f (mm/dev)*MS (BSD)	4	0,0024864	0,0006216	2,78	0,173	4,26
V (m/dak)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,003678	0,001839	8,22	0,038	6,30
f (mm/dev)*IİK (W/mK)*MS (BSD)	2	0,0008007	0,0004003	1,79	0,279	1,37
Hata	4	0,0008953	0,0002238			1,53
Toplam	35	0,0583676				100,00



Şekil 6.24. Düz tornalama işleminde işleme parametrelerinin çevresel yönlü kalıntı gerilme sınırlarının etki derinlikleri üzerindeki etkileri
a) Minimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\min}$; b) Maksimum kalıntı gerilme etki derinliği, $a_{\max}$; c) Faydalı gerilme etki derinliği, a_0

6.3. Tornalama İşlemleri ve Kalıntı Gerilmeler Arasındaki İlişki

İncelenen tornalama işlemlerinin karşılaştırılması neticesinde şunlar söylenebilir:

- Vida açma işleminde kesme işlemi simetrik kesici kenarlarla gerçekleştirilmektedir. Kesici kenarların eş zamanlı olarak talaş kaldırması nedeniyle talaşlar birbiriyle çakışmaktadır. Birbiriyle çakışan talaşlar akmaya karşı bir direnç göstermekte ve deformasyonu zorlaştırmaktadır. Vida açma işleminde yoğun bir plastik deformasyon ve deformasyon yoğunluğundan kaynaklanan ısı etki söz konusudur. Bu yüzden vida açma işlemi termoplastik bir olaydır.
- Vida açmada takım vida yolu üzerinde sürekli hareket halindedir. Takımın geçişi çok hızlı olmaktadır. Kesilen yüzeyin ani ısınma ve soğuma etkisi altında kalması nedeniyle kesilen yüzey sertleşmektedir. Bu etki, vida açma işlemi tamamlana kadar bu şekilde devam eder. Her seferinde ısınma-soğuma etkisi nedeniyle sertleşmiş bölgeler kaldırılmaktadır.
- Vida açma işleminde sertleşmiş bu bölgelerin kaldırılması yüzeyde plastik deformasyon etkisini arttırmaktadır. Bunun neticesinde yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri oluşmakta ve yüzey altında azalarak derinlik boyunca basma özelliğini korumaktadır.
- Vida açma işleminde, sürekli sertleşmiş katmanların kaldırılması nedeniyle, yüksek pasolar takım aşınmasına bağlı kalıntı gerilme oluşumları sergilemektedir.
- Kanal açma işleminde takım radyal yönde ilerleyerek ve sürekli olarak parçaya aynı noktadan temas ederek kesme yapmaktadır. Takımın kanal yüzeyine baskısı söz konusudur. Takımla parça arasına sıkışan talaş yüksek ısı ve plastik deformasyon meydana gelmesine neden olmaktadır. Takımın geri çekilmesi neticesinde yüzeydeki baskı kalkmakta ve yüzey soğumaya başlamaktadır. Gerilmeler kendini dengelemek için gevşeyerek eksenel yönlü yüzey basma kalıntı gerilme değerlerini düşürmekte ve yüzey altında çekme kalıntı gerilmelerine neden olmaktadır.

- Kanal açmada, yüksek ilerlemelerde yüksek ısıdan kaynaklanan kalıntı gerilme özellikleri izlenmektedir.
- Düz tornalama işleminde vida açma işlemi gibi yüksek yüzey basma gerilmeleri oluşmasına rağmen yüzey altında yüksek çekme kalıntı gerilmeleri oluşmuştur. Vida açma işleminde ısı etkilenmiş bölge her seferinde kaldırılmış ve talaş daha yoğun bir plastik deformasyon neticesinde oluşmuştur. Düz tornalama işleminde, takım ucu tarafından sıkıştırılan malzeme takım geçtikten sonra geri esnemektedir. Geri esneme neticesinde gerilmelerin yeniden dengelenme ihtiyacı yüzey altında yüksek çekme gerilmelerine neden olmaktadır.
- Bütün tornalama işlemlerinde soğutma sıvısı ve yeni takım kullanılmasının etkisi görülmektedir.
- Vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemleri neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler arasındaki farklar; bu işlemlerde kullanılan takımların kesme özellikleri ve talaş oluşumları arasındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Bu çalışmada; farklı iki tip iş parçası malzemesinde, farklı kaplamalara sahip kesici takımlar kullanılarak, vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemleri neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler araştırılmıştır. Kalıntı gerilmeleri belirlemek için katman kaldırma metodu kullanılmıştır. Katman kaldırma işlemi elektro kimyasal yöntemle gerçekleştirilmiştir. Parça yüzeyinden olan derinliğe bağlı olarak kalıntı gerilme profilleri her bir numune için oluşturulmuştur. İşleme parametrelerinin kalıntı gerilme sınırları üzerine olan etkilerini belirlemek için varyans analizi uygulanmıştır.

Çalışma neticesinde elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

➤ Vida açma işleminde hem eksenel hem de çevresel yüzey kalıntı gerilmeleri basma şeklinde çıkmıştır. Eksenel yönlü basma kalıntı gerilmeleri derinlik arttıkça azalmış, bazı durumlarda çekme kalıntı gerilmelerine dönüşmüştür. Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri şeklinde ortaya çıkmıştır. Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler eksenel yönlü kalıntı gerilmelerden düşüktür. Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler yüzeyden belirli bir derinlikte çekme kalıntı derinliklerine dönüşmüştür. AISI 4140 (342 BSD) çelik AISI 4340 çelikten (314 BSD) daha serttir. Bu nedenle, AISI 4140 çelikte yüzey kalıntı gerilmeleri AISI 4340 çelikten daha yüksek çıkmıştır.

➤ Vida açma işlemi için en önemli parametreler sırasıyla malzeme sertliği, paso sayısı ve kesme hızı şeklinde sıralanmaktadır. Mekanik deformasyon vida dış dibinin yüzeyinde oldukça etkili olmuştur. Bu yüzeyde basma kalıntı gerilmelerine neden olmuştur. Isıl etki nedeniyle de, yüzeydeki bu basma kalıntı gerilmeleri hızla değer kaybetmiştir. Vida açma işleminde kesici takımın bir çok defa vida yolu üzerinden geçmesi, kesici takım yan yüzey aşınmasından kaynaklanan kalıntı gerilme profillerine neden olmuştur. Kesici takım kaplamasının ısıl iletim katsayısı özellikle çevresel kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olmuştur. Yüksek ısıl iletim katsayısı

çevresel yönlü yüzey basma kalıntı gerilmelerini ve etki derinliğini arttırmıştır. Vida açma işleminde TiAlN kaplamalı takım daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olmasına rağmen, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci nedeniyle vida açmada TiN kaplamalı takımdan daha iyi sonuç vermiştir.

➤ Kanal açma işleminde eksenel yüzey basma gerilmelerinin değerleri düşmüş ve yüzeye yakın yerlerde çekme kalıntı gerilmelerine dönüşmüştür. Malzeme sertliği yüzeyde basma kalıntı gerilmelerini etkiler. Malzeme sertleştikçe yüzey basma kalıntı gerilmeleri artar. Bu nedenle kanal açmada yumuşak olan AISI 4340 çelikte yüzey kalıntı gerilmeleri düşük seviyede basma ya da çekme gerilmeleri şeklinde oluşmuştur. Kanal açma işleminde kalıntı gerilmeler üzerinde radyal ilerleme yönündeki kuvvetler etkilidir. Kanal açma işleminde çevresel yönlü kalıntı gerilmeler her iki malzeme tipi için neredeyse sıfır çıkmıştır.

➤ Kanal açma işlemi için en önemli parametreler sırasıyla malzeme sertliği, ilerleme miktarı ve kesici takım kaplamasının ısı iletim katsayısı şeklinde sıralanabilir. Malzeme sertliği, ilerleme miktarı ve ısı iletim katsayısı artışı yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri meydana getirmiştir. Kesme hızı artışı en büyük çekme gerilmesinin etki derinliğini azaltarak çekme gerilmelerinin yüzeye yakın meydana gelmesine neden olmuştur. İlerleme miktarı ve kesme hızı çevresel yönlü kalıntı gerilmelerin oluşumu üzerinde daha yüksek etkide bulunmuştur. Her iki parametrenin artışı çevresel yönlü basma yüzey kalıntı gerilmelerinin değerini arttırmıştır. İlerleme miktarının artışı aynı zamanda yüzey altında çevresel yönlü çekme kalıntı gerilmelerin oluşmasında da etkili olmuştur. İlerleme miktarının artışı faydalı gerilmelerin etki derinliğini arttırmıştır. Kesme hızı artışı çevresel yönlü basma gerilmelerinin yüzeyde oluşmasına neden olurken, ilerleme miktarının artışı en büyük çekme gerilmesinin oluşma derinliğini arttırmıştır. Kanal açma işleminde TiN+TiC+TiN kaplamalı takım, yüksek ısı iletim katsayısı nedeniyle, kalıntı gerilme ve etki derinlikleri üzerinde olumlu etkiler oluşturmıştır.

➤ Düz tornalama işleminde eksenel yönlü yüzey kalıntı gerilmeleri basma şeklindedir. Yüzey basma kalıntı gerilmeleri derinlikle hızla düşerek çekme kalıntı

gerilmelerine dönüşmüştür. En yüksek çekme gerilmeleri düz tornalama işleminde oluşmuştur. Çevresel yönlü yüzey kalıntı gerilmeleri daha düşük seviyededir. Fakat, biraz daha fazla derinlikte çekme gerilmelerine dönüşmüştür. AISI 4140 çelik ile AISI 4340 çelik arasında ciddi farklar yoktur. Çevresel yönlü kalıntı gerilmeler, çok düşük yüzey basma kalıntı gerilmeleri şeklinde oluşmuş ve yüzey altında oldukça düşük çekme kalıntı gerilmeleri şeklini almıştır.

➤ Düz tornalama işleminde kesme hızı en etkili parametredir. Kesme hızı artışı yüzeydeki basma kalıntı gerilme değerlerini düşürmüş, aynı zamanda en büyük basma kalıntı gerilmelerinin yüzeyde oluşmasına neden olmuştur. İlerleme miktarı yüzey altında oluşan çekme kalıntı gerilmeleri üzerinde etkili olmuştur. İlerleme miktarı artışı çekme kalıntı gerilmelerinin değerini bir miktar düşürmüştür. Kesme hızı ve ilerleme miktarındaki artış en büyük çekme kalıntı gerilmelerinin oluşma derinliğini arttırmıştır. Düz tornalamada kullanılan $TiCN+Al_2O_3+TiCN+TiN$ ve $TiCN$ kaplamalı takımlar kalıntı gerilmeler oluşumu üzerinde ciddi farklılıklar oluşturmamıştır.

7.2. Öneriler

Vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemlerinde oluşan kalıntı gerilmelerin incelendiği bu çalışmayla ilgili olarak bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması bakımından aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- Vida açma işleminde kalıntı gerilmeler üzerine talaş oluşumu ve takım özelliklerinin etkisi araştırılabilir.
- Sertleştirilmiş parçalara vida açma işleminin kalıntı gerilmelere etkileri incelenebilir.
- Farklı profillere ve uç radyüslerine sahip vidalar incelenerek, vida özelliklerinin kalıntı gerilmeler ve kalıntı gerilmelerin yorulma davranışları üzerine etkileri araştırılabilir.

- Değişik profillere sahip kanal açma işlemleri neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler ve yorulma davranışları incelenebilir.
- Farklı soğutma ve yağlama sıvılarının ve onların farklı uygulama tekniklerinin talaş kaldırma işlemleri üzerine etkileri incelenebilir.
- Talaş kaldırma işlemi üzerine kesici takım aşınma mekanizmalarının kalıntı gerilmeler üzerine etkileri incelenebilir.
- Özellikle sertleştirilmiş malzemelerin işlenmesinde yeni nesil kaplama ve yüksek hızla işlemenin kalıntı gerilmeler üzerine etkileri araştırılabilir.
- İş parçasının tezgaha bağlanma yöntemlerinin ve biçimlerinin kalıntı gerilmeler üzerine olan etkileri araştırılabilir.
- Deneysel kalıntı gerilme verileri kullanılarak sonlu eleman modelleri geliştirilebilir. Yapay sinir ağları uygulamaları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Jacobus, J. K., "Modelling Of The In-Plane Biaxial Residual Stress From Machining", PhD Thesis, **University Of Illinois**, Urbana-Champaign, A.B.D., 1-23 (1999).
2. Outeiro, J. C., Dias, A. M., Lebrun, J. L. And Astakhov, V. P., "Machining Residual Stresses In AISI 316L Steel And Their Correlation With The Cutting Parameters", **Machining Science And Technology**, 6 (2): 251-270 (2002).
3. Henriksen, E. K., "Residual Stresses In Machined Surfaces" **Transactions of the ASME**, 73: 69-76 (1951).
4. Liu, C. R. And Barash, M. M., "The Mechanical State Of The Sublayer of A Surface Generated By Chip-Removal Process. Part I: Cutting With A Sharp Tool", **Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME**, 98: 1193-1201 (1976).
5. Liu, C. R. And Barash, M. M., "The Mechanical State Of The Sublayer Of A Surface Generated By Chip-Removal Process. Part II: Cutting With A Tool With Flank Wear", **Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME**, 98: 1202-1208 (1976).
6. Bayoumi, A. E., Xie, Q. And Hamdan, M. N., "Effect Of Cutting Conditions On Dynamic Properties And Surface Integrity Of Work Material", **Wear**, 146 (2): 301-312 (1991).
7. Jang, D. V., Watkins, T. R., Kozaczek, K. J., Hubbard, C. R., And Cavin, O. B., "Surface Residual Stresses In Machined Austenitic Stainless Steel", **Wear**, 194 (1-2): 168-173 (1996).
8. Wiesner, C., "Residual Stresses After Orthogonal Machining Of AISI 304: Numerical Calculation Of The Thermal Component And Comparison With Experimental Results", **Metallurgical Transactions A**, 23A: 989-996 (1992).
9. M'saoubia, R., Outeiro, J. C., Changeux, B., Lebrun, J. L. And Morão Dias, A., "Residual Stress Analysis In Orthogonal Machining Of Standard And Resulfurized AISI 316L Steels", **Journal Of Materials Processing Technology**, 96: 225-233 (1999).
10. Liu C. R., Barash M. M., "Variables Governing Patterns Of Mechanical Residual Stress In A Machined Surface", **Journal of Engineering Industry**, 104: 257-264 (1982).
11. Thiele, J. D., Melkote, S. N., Peascoe, R. A. And Watkins, T. R., "Effect Of Cutting-Edge Geometry And Workpiece Hardness On Surface Residual Stresses In Finish Hard Turning Of AISI 52100 Steel", **ASME Journal Of Manufacturing Science And Engineering**, 122: 642-649 (2000).

12. Scholtes, B., "Residual Stresses Introduced By Machining. In Advance In Surface Treatments, Technology-Applications-Effects" International Guidebook On Residual Stresses; (Hauk, V., Hougardy, H. P., Tietz, H. D., Eds.); **Pergamon Pres**, Oxford, 59-71 (1987).
13. Torbaty, S., Moisan, A., Lebrun, J. L. And Maeder, G., "Evolution Of Residual Stress During Turning And Cylindrical Grinding Of A Carbon Steel, **CIRP Annals**, 31 (1): 441-445 (1982).
14. Matsumoto, Y., Barash, M. M. And Liu, C. R., "Effect Of Hardness On The Surface Integrity Of AISI 4340 Steel", **J. Engineering Industry**, 108 (3): 169-175 (1986).
15. Matsumoto, Y., Magda, D., Hoepfner, D. W. And Kim, T. Y., "Effect Of Machining Processes On The Fatigue Strength Of Hardened AISI 4340 Steel", **J. Engineering Industry**, 113:154-159 (1991).
16. Schreiber, E. And Schlient, H., "Residual Stresses After Turning Of Hardened Components", **Residual Stresses Sci. Technol.**, 2: 853-860 (1987).
17. El-Wardany, T. I., Kishawy, H. A. And Elbestawi, M. A., "Surface Integrity Of Die Material In High Speed Hard Machining, Part 2: Microhardness Variations And Residual Stresses", **ASME J. Manuf. Sci. Eng.**, 122: 632-641(2000).
18. El-Wardany, T. I., Kishawy, H. A. And Elbestawi, M. A., "Surface Integrity Of Die Material In High Speed Hard Machining, Part 1: Micrographical Analysis", **ASME J. Manuf. Sci. Eng.**, 122: 620-631(2000).
19. Kishawy, H. A. And Elbestawi, M. A., "Effect Of Edge Preparation And Cutting Speed On Surface Integrity Of Die Material In High Speed Machining", **International Mechanical Engineering Congress And Exposition**, ASME-Winter Annual Meeting, California, 269-276, Nov.14-19 (1998).
20. Bailey, J. A., Jeelani, S. And Becker, S. E., "Surface Integrity In Machining AISI 4340 Steel", **Trans. Asme, Ser. B**, 98 (3): 999-1007 (1976).
21. Smith, G. M. And Riley, J. F., "Residual Stresses In Austenitic Generator End-Rings", **2nd International Conference On Residual Stresses (Icrs2)**, (Beck, G., Denis, S., Simon, A., Eds.), **Elsevier Applied Science**, Nancy, France, 690-695 (1989).
22. Nakagawa, Y., Usami, K., Minato, A. And Tamamura, T., "Effects Of Surface Finish On Residual Stress Distribution And Stress Corrosion Cracking Susceptibility Of Type 304 Austenitic Stainless Steel In A Boiling 42% MgCl₂ Solution", **In ICM 3**, Cambridge, England, 2: 603-610 (1979).
23. M'Saoubi, R., Outeiro, J. C., Inal, K., Lebrun, J. L. And Dias, A. M., "Residual Stress And Texture Analysis In Machined Surfaces Of AISI 316L Steels", **Fifth International Conference On Residual Stresses (ICRS 5)**, (Ericsson, T., Ode'N, M., Andersson, A., Eds.), Institute Of Technology, Linko Ping University, Sweden, 1: 349-354 (1997).

24. Leskovar, P. And Peklenik, J., "Influences Affecting Surface Integrity In The Cutting Process", *Annals of the CIRP*, 31: 447-450 (1982).
25. Brinksmeier, E., Cammett, J. T., Konig, W., Leskovar, P., Peters, J. And Tonshoff, H. K., "Residual Stresses - Measurement And Causes In Machining Processes", *Annals of the CIRP*, 31 (2): 491-510 (1982).
26. Okushima, K. and Kakino, Y., "The Residual Stress Distributions Produced By Metal Cutting", *Annals of the CIRP*, 20(1): 13-14 (1971).
27. Wu, D. W. And Matsumoto, Y., "Effect Of Hardness On Residual Stresses In Orthogonal Machining Of AISI 4340 Steel", *Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME*, 112 (3): 245-252 (1990).
28. Sasahara, H., Obikawa, T. And Shirakashi T., "FEM Analysis of Cutting Sequence Effect On Mechanical Characteristics In Machined Layer", *Int. J. Mat. Process. Technology*, 62: 448-453 (1996).
29. Liu, C. R. And Guo Y. B., "Finite Element Analysis of The Effect Of Sequential Cuts And Tool-Chip Friction On Residual Stresses In A Machined Layer", *Int. J. Mechanics Science*, 42 (6): 1069-1086 (2000).
30. Lin, Z. C. And Lin, Y. Y., "Effect Of Thermal Load And Mechanical Load On The Residual Stress Of A Machined Workpiece", *Int. J. Mechanics Science*, 33 (4): 263-280 (1991).
31. Jacobus, K., Devor, R. E., And Kapoor, S. G., "Machining-Induced Residual Stress: Experimentation And Modelling", *Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng.*, 122: 20-30 (2000).
32. Shih, A. J., "Finite Element Simulation Of Orthogonal Metal Cutting". *Trans. ASME Ser. B*, 117 (1): 84-93 (1995).
33. Obikawa, T., Sasahara, H., Shirakashi, T. And Usui, E., "Application Of Computational Machining Method To Discontinuous Chip Formation", *J. Manuf. Science. Engineering*, 119 (4b): 667-674 (1997).
34. Mishra, A. And Prasad, T., "Residual Stresses Due To A Moving Heat Source", *Int. J. Mechanics. Science*, 27 (9): 571-581 (1985).
35. Sasahara H., "The Effect On Fatigue Life Of Residual Stress And Surface Hardness Resulting From Different Cutting Conditions Of 0.45%C Steel", *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 45: 131-136 (2005).
36. Lin, Z. C., Lin, Y. Y. And Liu, C. R., "Effect Of Thermal Load On The Residual Stress Of A Machined Workpiece", *International Journal of Mechanical Sciences*, 33 (4): 263-278 (1991).

37. Jeelani, S. And Bailey, J. A., "Residual Stress Distribution In Machining Annealed 18 Percent Nickel Maraging Steel", ***Journal of Engineering Materials and Technology***, 108: 93-98 (1986).
38. Barash, M. M. And Schoech, W. J., "A Semi-Analytical Model Of The Residual Stress Zone In Orthogonal Machining", ***11th International MTDR Conference***, 603-613, (1970).
39. Natarajan, R. And Jeelani, S., "Residual Stresses In Machining Using Finite Element Method", ***19th International Computers in Engineering Conference and Exhibition, ASME***, 3: 79-80 (1983).
40. Liu, C. R., "An Investigation Of The Surface Condition In A Steel Component Machined By Chip Removal Process", PhD thesis, ***Purdue University***, A.B.D. 5-15 (1973).
41. Sasahara, H., Obikawa, T. And Shirakashi, T., "Analytical Prediction Of The Characteristics Within Machined Surface Layer (Part 3): The Thermal And Mechanical Effects On Machined Surface Characteristics", ***Journal of the Japan Society of Precision Engineering/Seimitsu Kogaku Takeshi***, 60 (12):1801-1805 (1994).
42. Shih A. J. And Yang H. T. Y., "Experimental And Finite Element Predictions Of Residual Stresses Due To Orthogonal Metal Cutting", ***International Journal For Numerical Methods In Engineering***, 36 (9): 1487-1507 (1993).
43. Jang, D. Y. And Seireg, A., "A Model For Predicting Residual Stresses In Metal Cutting", ***Japan International Tribology Conference***, Nagoya, 182-187 (1990).
44. Mittal, S., Liu, C. R., "A Method Of Modeling Residual Stresses In Superfinish Hard Turning", ***Wear***, 218: 21-33 (1998).
45. Capello, E., Davoli, P., Bisi, A. And Bassanini, G., "Residual Stresses And Surface Roughness In Turning", ***Trans. Asme, J. Eng. Mater. Tech.***, 121: 346-351 (1999).
46. Kishawy, H. A. And Elbestawi, M. A., "Effects Of Process Parameters On Material Side Flow During Hard Turning", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 39: 1017-1030 (1999).
47. Hodgson, T. And Trendler, P. H. "Turning Hardened Tool Steel With Cubic Born Nitride Inserts", ***Annals of the CIRP***, 30: 63-66 (1981).
48. Bresseler, B., El-Wardany, T. I. And Elbestawi, M. A., "Material Side Flow In High Speed Finish Boring Of Case Hardened Steel", ***1st French and German Conference on High Speed Machining***, 196-206, (1997).

49. Chae, J., Park, S. S. And Freiheit, T., "Investigation Of Micro-Cutting Operations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 313-332 (2006).
50. Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. And Ehman, K.F., "The Mechanics Of Machining At The Micro Scale: Assessment Of The Current State Of The Science", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126: 666-678 (2004).
51. Liu, X., Jun, M. B., DeVor, R. E. And Kappor, S. G., "Cutting Mechanisms And Their Influence On Dynamic Forces, Vibrations And Stability In Micro-End Milling Proceedings", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Anaheim, California, 13-20, (2004).
52. Kim, B., Schmittiel, M. C., Degertekin, F. L. And Kurfess, T. R., "Scanning Grating Micro Interferometer For MEMS Metrology", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126: 807-812 (2004).
53. Yao, Y., Fang, X. D. And Amdt G., "Comprehensive Tool Wear Estimation In Finish-Machining Via Multivariate Time-Series Analysis Of 3-D Cutting Forces", *Annals of CIRP*, 39: 57-60 (1990).
54. Kountanya, R. K. And Endres, W. J., "Flank Wear Of Edge-Radiused Cutting Tools Under Ideal Straight-Edged Orthogonal Conditions", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126: 496-505 (2004).
55. Byrne G., Dornfeld D. And Denkena B., "Advancing Cutting Technology", *Annals of CIRP*, 52 (2):483-503 (2003).
56. Suzuki T., Ariura Y. And Umezaki, Y., "Basic Study On Cutting Forces In Gear Cutting", *JSME Intenational Journal, Series C*, 36 (4): 543-548(1993).
57. Makino, A., "Measurement Of Residual Stresses Using The Holographic Hole Drilling Technique", PhD Thesis, *Stanford University*, A.B.D., 1-80 (1994).
58. Orowan, E., "Classification And Nomenclature Of Internal Stresses", *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys*, London, 47-59 (1947).
59. Orowan, E., "Causes And Effects Of Internal Stresses", *Internal Stresses And Fatigue In Metals*, (Rassweiler, G. M., Grube, W.L., eds.), *Elsevier*, Amsterdam, 59-80 (1959).
60. Heyn, E., "Internal Strains In Cold-Wrought Metals And Some Troubles Caused Thereby", *J.Inst.Metallurgy.*, 12:3-37 (1914).
61. Baldwin, W. M., "Residual Stresses In Metals" 23rd Edgar Marburg Lecture, *ProcASTM*, 49: 539-583 (1949).

62. Masubuchi, K., "Analysis of Welded Structures", **Pergamon Press**, New York, 15-80 (1980).
63. Bainbridge, A. T., "Residual Stresses Arising from Machining and Fabrication", **Symposium on the Engineering Practice to Avoid Stress Corrosion Cracking**, Istanbul, Turkey, 53:1-21, (1969).
64. Parlane, A. J. A., "The Determination of Residual Stresses: A Review of Contemporary Techniques", **Residual Stresses in Welded Construction and their Effects. Int. Conf.**, London, 63-78, (1977).
65. Outeiroa, J. C., Umbrello, D. And M'Saoubi, R., "Experimental And Numerical Modelling Of The Residual Stresses Induced In Orthogonal Cutting Of AISI 316L Steel", **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**, 46 (14): 1786-1794 (2006).
66. Hua, J., Umbrello, D. And Shivpuri, R., "Investigation Of Cutting Conditions And Cutting Edge Preparations For Enhanced Compressive Subsurface Residual Stress In The Hard Turning Of Bearing Steel", **Journal Of Materials Processing Technology**, 171: 180-187 (2006).
67. Wagner, L., "Mechanical Surface Treatments On Titanium, Aluminum And Magnesium Alloys", **Materials Science and Engineering**, A263: 210-216 (1999).
68. Novovic D., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., Voice, W. And Bowen, P., "The Effect Of Machined Topography And Integrity On Fatigue Life", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 44: 125-134 (2004).
69. Guechichi H. And Castex, L., "Fatigue Limits Prediction Of Surface Treated Materials", **Journal of Materials Processing Technology**, 172 (3): 381-387 (2006).
70. Wagner L., "Surface Performance of Titanium Alloys", (J.K. Gregory, H.J. Rack, D. Eylon Eds.), **TMS**, City, 199-224 (1997).
71. Withers, P. J. And Bhadeshia, H. K. D. H., "Residual Stresses: Part 1- Measurement Techniques", **Materials Science and Technology**, 17: 355-365 (2001).
72. Lu, J., "Handbook of Measurement Of Residual Stresses", Society For Experimental Mechanics, **The Fairmont Press Inc.**, 1-232 (1996).
73. Withers, P. J., Stobbs, W. M, And Pedersen, O. B., "The Application Of The Eshelby Method Of Internal Stress Determination To Short Fibre Metal Matrix Composites", **Acta Metallurgy**, 37: 3061-3084 (1989).

74. Malhotra, S. G., Rek, Z. U., Yalisove, S. M., And Bilello, J. C., "Analysis Of Thin Film Stress Measurement Techniques", *Thin Solid Films*, 301: 45-54 (1997).
75. Eijpe M. P. I. M. And Powell, P. C., "Residual Stress Evaluation In Composites Using A Modified Layer Removal Method", *J. Thermoplastic Composite Materials*, 10: 334-352 (1997).
76. Gill, S. C. And Clyne, T. W., "Investigation Of Residual Stress Generation During Thermal Spraying By Continuous Curvature Measurement", *Thin Solid Films*, 250: 172-180 (1994).
77. Vijgen, R. O. E. And Dautzenberg, J. H., "Mechanical Measurement Of The Residual Stress In Thin PVD Films", *Thin Solid Films*, 270: 264-269 (1995).
78. Sasaki, K., Kishida, M. And Itoh, T., "The Accuracy Of Residual Stress Measurement By The Hole-Drilling Method", *Experimental. Mechanics*, 37: 250-257 (1997).
79. Schajer, G. And Tootoonian, M., "A New Rosette Design For More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements", *Experimental Mechanics*, 37: 299-306 (1997).
80. Li, K. Y., "Application Of Interferometric Strain Rosette To Residual Stress Measurements", *Optics and Lasers in Engineering*, 27:125-136 (1997).
81. Nelson, D. V., Makino, A. And Fuchs, E. A., "The Holographic-Hole Drilling Method For Residual Stress Determination", *Optics and Lasers in Engineering*, 27: 3-23 (1997).
82. Faure, F. And Leggatt, R. H., "Residual Stresses In Austenitic Stainless Steel Primary Coolant Pipes And Welds Of Pressurized Water Reactors", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 65: 265-275 (1996).
83. Wang, Y. Y. And Chiang, F. P., "Experimental Study Of Three-Dimensional Residual Stresses In Rails By Moiré Interferometry And Dissecting Methods", *Optics And Lasers In Engineering*, 27: 89-100 (1997).
84. Kovac, K., "A Method For Residual Stress Measurement In Welded Seams", *Journal Of Materials Processing Technology*, 52: 503-514 (1995).
85. Li, X. And Hayashi, K., "Alternate method for the analysis of residual strain in the arterial wall", *Biorheology*, 33: 439-449 (1996).
86. Pickard, S. M., Miracle, D. B., Majumdar, B. S., Kendig, K. L., Rothenflue, L., And D. Coker, "An Experimental Study Of Residual Fiber Strains In Ti-15-3 Continuous Fiber Composites", *Acta Metallurgica et Materialia*, 43 (8): 3105-3112 (1995).

87. Krawitz, A. D., Winholtz, R. A., And Weisbrook C. M., "Relation Of Elastic Strain Distributions Determined By Diffraction To Corresponding Stress Distributions", *Materials Science and Engineering: A*, 206: 176-182 (1996).
88. Clausen, B., Lorentzen, T. And Leffers, T., "Self-Consistent Modelling Of The Plastic Deformation Of F.C.C. Polycrystals And Its Implications For Diffraction Measurements Of Internal Stresses", *Acta Materialia*, 46: 3087-3098 (1998).
89. Ecob, R. C., Ricks, R. A., And Porter, A. J., "The Measurement Of Precipitate/Matrix Lattice Mismatch In Nickel-Base Superalloys", *Scripta Metallurgica*, 31: 1085-1088 (1982).
90. Fahrman, M., Wolf, J. G., And Pollock, T. M., "The Influence Of Microstructure On The Measurement Of γ - γ' Lattice Mismatch In Single-Crystal Ni-Base Superalloys", *Materials Science and Engineering-A*, A210: 8-15 (1996).
91. P. J. Withers, M. W. Johnson, And J. S. Wright, "Neutron Strain Scanning Using A Radially Collimated Diffracted Beam", *Physica B: Phys. Condens. Matter*, 292: 273-285 (2000).
92. Yang, X. And Young, R. J., "Model Ceramic Fibre-Reinforced Glass Composites: Residual Thermal Stresses", *Composites*, 25: 488-493 (1994).
93. Qing, M. A. And Clarke, D. R., "Measurement Of Residual Stresses In Sapphire Fiber Composites Using Optical Fluorescence", *Acta Metallurgica et Materialia*, 41: 1817-1823 (1993).
94. Bowles, J. S. And Morton, A. J., "The Shape Strain In The (225)_F Martensite Transformation", *Acta Metallurgica*, 12: 629-673 (1964).
95. Morton, A. J. And Wayman, C. M., "Theoretical And Experimental Aspects Of The (225)_F Austenite-Martensite Transformation In Iron Alloys", *Acta Metallurgica*, 14: 1567-1581 (1966).
96. Dunne, D. P. And Bowles, J. S., "Measurement Of The Shape Strain For The (225) And (259) Martensitic Transformations", *Acta Metallurgica*, 17: 201-212 (1969).
97. Watson, J. D. And McDougall, P. G., "The Crystallography Of Widmanstätten Ferrite", *Acta Metallurgica*, 21 (7): 961-973 (1973).
98. Tsuchida, K., Kawada, Y., and Kodama, S., "A Study Of The Residual Stress Distributions By Turning", *Bulletin of the Japan Society of Metals*, 18 (116): 123-130 (1975).
99. Field, M. and Kahles, J. F., "Review Of Surface Integrity Of Machined Components", *Annals of the CIRP*, 20(1): 107-108 (1971).

100. Prevey, S. and Field, M., "Variation In Surface Stress Due To Metal Removal", *Annals of the CIRP*, 24: 497-501 (1975).
101. Jeelani, S., "Study of Surface Integrity In Machining 18% Nickel Maraging Steel", PhD thesis, *North Carolina State University at Raleigh*, 10-35 (1975).
102. Zopey, A. G., "Determination Of Residual Stresses In Machining 18% Nickel Maraging Steel" Master thesis, *North Carolina State University at Raleigh*, 18-107 (1976).
103. Azargoon, G. A., "Surface Integrity In Machining of Titanium Alloy Ti - 6% Al-2% Sn-4% Zr-2% Mo", PhD thesis, *North Carolina State University at Raleigh*, 1-37 (1976).
104. Jeelani, S. And Bailey, J. A., "Residual Stress Distribution In Machining Annealed 18 Percent Nickel Maraging Steel", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 108: 93-98 (1986).
105. Dahlman, P., Gunnberg, F. And Jacobson, M., "The Influence Of Rake Angle, Cutting Feed And Cutting Depth On Residual Stresses In Hard Turning", *Journal of Materials Processing Technology*, 147: 181-184 (2004).
106. Arunachalam, R. M., Mannan, M. A. And Spowage, A. C., "Residual Stress And Surface Roughness When Facing Age Hardened Inconel 718 With CBN And Ceramic Cutting Tools", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44: 879-887 (2004).
107. Sharman, A. R. C., Hughes, J. I. And Ridgway, K., "An Analysis Of The Residual Stresses Generated In Inconel 718 When Turning", *Journal of Materials Processing Technology*, 173: 359-367 (2006).
108. Kishawy, H. A. And Elbestawi, M. A., "Tool Wear And Surface Integrity During High-Speed Turning Of Hardened Steel With Polycrystalline Cubic Boron Nitride Tools", *Journal of Engineering Manufacturing*, 215: 755-767 (2001).
109. Matsumoto, Y., "Review Of Current Hard Turning Technology", *Abrasives Magazine*, Oct./Nov: 16-34 (1996).
110. Matsumoto, Y., Hashimoto, F. And Lahoti, G., "Surface Integrity Generated By Precision Hard Turning", *Annals of the CIRP*, 48 (1): 59-62 (1999).
111. Matsumoto, Y., Barash, M. M. And Liu, C. R., "Effect Of Hardness On The Surface Integrity Of AISI 4340 Steel", *Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME*, 108: 169-175 (1986).
112. Merwin, J. E. And Johnson, K. L. "An Analysis Of Plastic Deformation In Rolling Contact", *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, 177 (25): 676-690 (1963).

113. Jeelani, S., Biswas, S., And Natarajan, R., "Effect Of Cutting Speed And Tool Rake Angle On Residual Stress Distribution In Machining 2024-T351 Aluminum Alloy Unlubricated Conditions", *Journal of Materials Science*, 21: 2705-2710 (1986).
114. Schreiber, E. And Schlicht, H., "Residual Stresses After Turning Of Hardened Components", *Residual Stresses in Science and Technology*, (E. Macherauch and V. Hauk. eds.), 2: 853-860 (1987).
115. Brinksmeier, E., "Residual Stresses In Hard Metal Cutting", *Residual Stresses in Science and Technology*, (E. Macherauch and V. Hauk. eds.), 2: 839-846 (1987).
116. Sadat, A. B. And Bailey, J. A., "Residual Stresses In Turned AISI 4340 Steel", *Experimental Mechanics*, 27 (1): 80-85 (1987).
117. Sadat, A. B., "Surface Region Damage Of Machined Inconel 718 Nickel-Base Superalloy Using Natural And Controlled-Contact Length Tools", *Wear*, 119 (2): 225-235 (1987).
118. Sadat, A. B., "Effect Of High Cutting Speed On Surface Integrity Of AISI 4340 Steel During Turning", *Materials Science and Technology*, 6 (4): 371-375 (1990).
119. El-Khabeery, M. M. And Fattouh, M., "Residual Stress Distribution Caused By Milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 29 (3): 391-401 (1989).
120. Xie, Q., Bayoumi, A. E., Kendall, L. A. And Sheldon, G. L., "A Study On The Residual Stresses And Tool Wear Induced By Machining Processes", *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute, NAMRC*, 17: 170-174 (1989).
121. Wu, D. W. And Matsumoto, Y., "Effect Of Hardness On Residual Stresses In Orthogonal Machining Of AISI 4340 Steel", *Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME*, 112 (3): 245-252 (1990).
122. Matsumoto, V. And Hsu, D. C., "Workpiece Temperature Rise During The Cutting Of AISI 4340 Steel", *Wear*, 116 (3): 309-317 (1987).
123. Sadat, A. B. And Reddy, M. Y., "Surface Integrity Of Inconel 718 Nickel-Base Superalloy Using Controlled And Natural Contact Length Tools, Part 1. Lubricated", *Experimental Mechanics*, 32 (3): 282-288 (1992).
124. Jang, D. Y., Liou, J. And Cho, U., "Study Of Residual Stress Distribution In The Machined Stainless Steel Components", *Tribology Transactions*, 37 (3): 594-600 (1994).

125. Fuh, K. H. And Wu, C. F., "A Residual-Stress Model For The Milling Of Aluminum Alloy (2014-T6)", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 51 (1-4): 87-105 (1995).
126. Fuh, K. H. And Wu C. F., "Proposed Statistical Model For Surface Quality Prediction In End-Milling Of Al Alloy", ***International Journal Of Machine Tools And Manufacture***, 35 (8): 1187-1200 (1995).
127. Sasahara, H., Obikawa, T. And Shirakashi T., "Prediction Model Of Surface Residual Stress Within A Machined Surface By Combining Two Orthogonal Plane Models", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture*** 44:815-822 (2004).
128. Sasahara, H., Obikawa, T. And Shirakashi T., "The Prediction Of Effects Of Cutting Condition On Mechanical Characteristics In Machined Layer", *Advancement of Intelligent Production*, (E. Usui, Ed.), **Elsevier**, 473-478 (1994).
129. Sasahara, H., Obikawa, T., Shirakashi T. And Usui, E., "Application Of Computational Machining Method To Discontinuous Chip Formation", ***Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng.***, 119: 667-674 (1997).
130. Sasahara, H., Obikawa, T. And Shirakashi T., "Finite Element Modeling Of Residual Stress Control On Machined Surface", ***Trans. NAMRI/SME***, 25: 213-218 (1997).
131. Yen, Y. C., "Modeling Of Metal Cutting And Ball Burnishing Prediction Of Tool Wear And Surface Properties", PhD thesis, ***The Ohio State University***, Ohio/A.B.D., 8-22 (2004).
132. Howerton, D. H., "An Experimental and Numerical Investigation Of Orthogonal Machining of Aluminum 6061-T6", PhD thesis, ***North Carolina State University***, North Carolina/A.B.D., 1-107 (1989).
133. Lin, Z. C. and Lee, B. Y., "Investigation Of The Residual Stress Of A Machined Workpiece Considering Tool Flank Wear", ***Journal of Materials Processing Technology***, 51 (1-4): 25-124 (1995).
134. Hsu, H. C., "An Elasto-Viscoplastic Finite Element Model Of Orthogonal Metal Cutting For Residual Stress Prediction", PhD thesis, ***North Carolina State University***, North Carolina/A.B.D., 50-133 (1992).
135. Chien, W. T., "Numerical And Experimental Investigation Of The Sticking And Sliding Contact Regions At The Chip-Tool Interface In Machining Aluminum 6061-T6", PhD thesis, ***North Carolina State University***, North Carolina/A.B.D., 30-112 (1992).

136. Shih, A. J. And Yang, H. T. Y., "Experimental And Finite Element Predictions Of Residual Stresses Due To Orthogonal Metal Cutting", ***International Journal for Numerical Methods in Engineering***, 36 (9): 1487-1507 (1993).
137. Shih, A., "Finite Element Simulation Of Orthogonal Metal Cutting", ***Journal of Engineering for Industry Transactions of the ASME***, 117: 84-93 (1995).
138. Lajczok M. R., "A Study of Some Aspects of Metal Machining Using the Finite Element Method", PhD thesis, ***North Carolina State University***, North Carolina/A.B.D., 1-10 (1980).
139. Nair R. R., Natarajan, R. And Rao U. R. K., "Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis For Residual Stresses", ***4th ISME Conference on Mechanical Engineering***, 19-24 (1981).
140. Natarajan, R., Biswas, S. And Jeelani, S., "Residual Stress Distribution In 2024-T351 Aluminum Alloy Due To Machining", ***1985 International Computers in Engineering Conference and Exhibition***, 2: 59-63 (1985).
141. Zadoo, D. P., Biswas, S., Jeelani, S. And Natarajan, R., "Residual Stress Distribution In AISI 4340 Steel Due To Machining", ***International Computers in Engineering Conference and Exhibit***, 3:45-448 (1987).
142. Field, M., Kahles, J. F. And Cammett, J. T., "A Review Of Measuring Methods For Surface Integrity", ***Annals of the CIRP***, 21 (2):219-237 (1972).
143. Shirakashi, T., Obikawa, T., Sasahara, H. And Wada, T., "Effect Of Tool Condition On Residual Stress Distribution Within Machined Sublayer", ***Journal Of The Japan Society Of Precision Engineering/Seimitsu Kogaku Takeshi***, 59 (12): 2003-2008 (1993).
144. Shirakashi, T., Obikawa, T., Sasahara, H. And Wada, T., "Analytical Prediction Of The Characteristics Within Machined Surface Layer (1st Report), The Analysis Of The Residual Stress Distribution Within Machined Surface Layer With FEM Simulation", ***Journal Of The Japan Society Of Precision Engineering/Seimitsu Kogaku Takeshi***, 59 (10): 1695-1700 (1993).
145. El-Axir, M. H., "A Method Of Modeling Residual Stress Distribution In Turning For Different Materials", ***International Journal Of Machine Tools & Manufacture***, 42: 1055-1063 (2002).
146. Ee, K. C., Dillon, O .W. And Jawahir, I. S., "Finite Element Modelingof Residual Stresses In Machining Induced By Cuttingusinga Tool With Finite Edge Radius", ***International Journal Of Mechanical Sciences***, 47: 1611-1628 (2005).
147. Lo, S. P., "An Analysis Of Cutting Under Different Rake Angles Using The Finite Element Method", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 105: 143-151 (2000).

148. Shet, C. And Deng, X., "Residual Stresses And Strains In Orthogonal Metal Cutting", *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 43: 573-587 (2003).
149. Arunachalam, R. M., Manan, M. A. And Spowage, A. C., "Surface Integrity When Machining Age Hardened Inconel 718 With Coated Carbide Cutting Tools", *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 44: 1481-1491 (2004).
150. Cullity, B. D., "Elements Of X-Ray Diffraction", *Addison-Wesley Publishing Company*, California, 1-20 (1978).
151. Jang, D. Y., Liou, J. H., Watkins, T. R., Kozaczek, K. J. And Hubbard, C.R., "Characterisation Of Surface Integrity In Machined Austenitic Stainless Steel", *Manufacturing Science And Engineering*, 3 (1): 399-413 (1995).
152. Kafkas F., "Katman Kadirma Tekniğine Dayalı Olarak Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesini Sağlayan Bilgisayarlı Ölçme Cihazının Tasarımı ve İmalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-41 (2001).
153. Yu X. X., Lau, T W. S. And Lee, T. C., "A Finite Element Analysis Of Residual Stresses In Stretch Turning", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 37 (10): 1525-1537 (1997).
154. Brinksmeier, E., "Residual Stresses Measurement And Calculations In Machining Process", Keynote Paper, *CIRP Ann.* 32:491-510 (1982).
155. Lau, W. S., And Wang, M., Lee, W. B. "A Simple Method Of Eliminating Residual Tensile Stresses In The Grinding Of Low Carbon Steels", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 31(3): 425-434 (1991).
156. Zehua Z., And Datong G., "Pre-Stressed Machining", *10th Int. Conf. On Production Research*, Cincinnati, Ohio, 1: 257-263 (1987).
157. Lanchaa, J., Lapena A., Serranoa, M., Gorrochategui, I., "Metallurgical Failure Analysis Of A BWR Recirculation Pump Shaft", *Engineering Failure Analysis*, 7: 333-346 (2000).
158. Leis B., "Effect Of Surface Condition And Processing On Fatigue Performance", *ASM Handbook Of Fatigue And Fracture*, 19: 314-320 (1997).
159. Mitchell M., "Fundamentals Of Modern Fatigue Analysis For Design". *ASM Handbook Of Fatigue And Fracture*, 19: 385-437 (1997).
160. Liu, C. R. And Mittal, S., "Optimal Pre-Stressing The Surface Of A Component By Superfinish Hard Turning For Maximum Fatigue Life In Rolling Contact", *Wear*, 219: 128-140 (1998).

161. Rech, J. And Moisan, A., "Surface Integrity In Finish Hard Turning Of Case-Hardened Steels", *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 43 (5): 543-550 (2003).
162. Konig, W., Berkold, A. And Koch, K.F., "Turning & Grinding", *Annals Of The CIRP*, 42 (1): 39-43 (1993).
163. Gunnberg, F., Escursell, M. And Jacobson M., "The Influence Of Cutting Parameters On Residual Stresses And Surface Topography During Hard Turning Of 18MnCr5 Case Carburised Steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 174 (1-3): 82-90 (2006).
164. Thiele, J. D. And Melkote, S. N., "Effect Of Cutting Edge Geometry And Workpiece Hardness On Surface Generation In The Finish Hard Turning Of AISI 52100 Steel", *J. Mater. Proc. Technology*, 94: 216-226 (1999).
165. Jacobson, M., "Surface Integrity Of Hard-Turned M50 Steel", *The Institution Of Mechanical Engineers, Part B, J. Engineering. Manufacture*, 216 (1): 47-54 (2002).
166. Scholtes, B., "Residual Stresses Introduced By Machining", *Advances In Surface Treatments; Technology-Applications-Effects*, 4: 59-71 (1987).
167. Griffiths, B., "Manufacturing Surface Technology", *Taylor & Francis Book Inc*, New York, 1-26 (2001).
168. Guo, Y. B. And Liu, C. R., "Residual Stress Formation Mechanism And Its Control By Sequential Cuts", *Trans. NAMRI/SME*, 28: 179-183 (2000).
169. Prime, M. B. And Hill, M. R., "Residual Stress, Stress Relief And Inhomogeneity In Aluminum Plate", *Scripta Materials*, 46 (1): 77-82 (2002).
170. Heymes, F., Commet, B., Du Bost, B., Lassince, P., Lequeu, P. And Raynaud, G.M., "Development Of New Aluminium Alloys For Distortion Free Machined Aluminium Aircraft Components", *1st ASM International Non-Ferrous Processing And Technology Conference*, St. Louis, Mo, A.B.D., 249-255 (1997).
171. Shih, A. J., "Finite Element Analysis Of The Rake Angle Effects In Orthogonal Metal Cutting", *Int. J. Mechanics Science*, 38 (1): 1-17 (1996).
172. Yen, Y. C., Jain, A. And Altan, T., "A Finite Element Analysis Of Orthogonal Machining Using Different Tool Edge Geometries", *Journal Of Materials Processing Technology*, 146: 72-81 (2004).
173. Özel, T., Hsu, T. K. And Zeren, E., "Effects Of Cutting Edge Geometry, Workpiece Hardness, Feed Rate And Cutting Speed On Surface Roughness And Forces In Finish Turning Of Hardened AISI H13 Steel", *Int J Adv Manuf Technol.*, 25: 262-269 (2005).

174. Prengela, H. G., Jindalb, P. C., Wendta, K. H., Santhanamb, A. T., Hegdeb, P. L. And Penich, R. M., "A New Class Of High Performance PVD Coatings For Carbide Cutting Tools", ***Surface And Coatings Technology***, 139:25-34 (2001).
175. Jindal, P. C., Santhanam, A. T., Schleinkofer, U. And Shuster, A.F., "Performance Of PVD TiN, TiCN, And TiAlN Coated Cemented Carbide Tools In Turning", ***International Journal Of Refractory Metals & Hard Materials***, 17: 163-170 (1999).
176. Ezugwu, E. O., Okeke, C. I. And Machado, A. R., "High Speed Threading Of Inclusion-Modified Steels With Coated Carbide Tools", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 86: 216-225 (1999).
177. Tonshoff, H. K. And Blawit, C., "Influence Of Surface Integrity On Performance Of Coated Cutting Tools", ***Thin Solid Films***, 308-309: 345-350 (1997).
178. Liew, W. Y. H., Yuan, S. And Ngoi, B. K. A., "Evaluation Of Machining Performance Of Stavax With PCBN Tools", ***Int J Adv Manuf Technol***, 23: 11-19 (2004).
179. Tonshoff H. K., Wobker H. G. And Brandt, D. "Tribological Aspects Of Hard Turning With Ceramic Tools", ***J. Soc. Tribol. Lubric. Eng.***, 51:163-168 (1995).
180. Dhar, N. R., Paul, S. And Chattopadhyay, A. B., "Machining Of AISI 4140 Steel Under Cryogenic Cooling Tool Wear, Surface Roughness And Dimensional Deviation", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 123: 483-489 (2002).
181. Bhadeshia, H. K. D. H., "Handbook Of Residual Stress And Deformation Of Steel; Material Factors", University Of Cambridge, ***ASM International***, 3-9 (2002).
182. Capello, E., "Residual Stresses In Turning Part II: Influence Of The Machined Material", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 172 (3): 319-326 (2006).
183. Jacobson, M., Dahlman, P., Gunnberg, F., "Cutting Speed Influence On Surface Integrity Of Hard Turned Bainite Steel", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 128: 318-323 (2002).
184. Lin, Z. C. And Yarnig, Y. D., "Three-Dimensional Cutting Process Analysis With Different Cutting Velocities", ***Journal Of Materials Processing Technology***, 70: 22-33 (1997).
185. Lin, Z. C. And Lo, S. P., "A Study Of Deformation Of The Machined Workpiece And Tool Under Different Low Cutting Velocities With An Elastic Cutting Tool", ***Int. J. Mechanics Science***, 40 (7): 663-681 (1998).

186. Dolinsek, S., Ekinovic, S. And Kopac, J., "A Contribution To The Understanding Of Chip Formation Mechanism In High-Speed Cutting Of Hardened Steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 157-158: 485-490 (2004).
187. O'Sullivan, D. And Cotterell, M., "Temperature Measurement In Single Point Turning", *Journal Of Materials Processing Technology*, 118: 301-308 (2001).
188. Trent, E. M., Metal Cutting, *Butterworths/Heinemann*, London, 46-47, 60-61 (1991).
189. Abrao, A. M. And Aspinwall, D. K., "The Surface Integrity Of Turned And Ground Hardened Bearing Steel", *Wear*, 196: 279-284 (1996).
190. Fujimoto, Y. And Ohhata, O., "Providing Residual Stress By Machining After Heat-Treatment", *Elsevier*, Amsterdam, 1350-1355, (1992).
191. Barbacki, A., Kawalec, M. And Hamrol, A., "Turning And Grinding As A Source Of Microstructural Changes In The Surface Layer Of Hardened Steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 133: 21-25 (2003).
192. Hua, J., Shivpuri, R., Cheng, X., Bedekar, V., Matsumoto, Y., Hashimoto, F. And Watkins, T. R., "Effect Of Feed Rate, Workpiece Hardness And Cutting Edge On Subsurface Residual Stress In The Hard Turning Of Bearing Steel Using Chamfer+Hone Cutting Edge Geometry", *Materials Science And Engineering- A*, 394: 238-248 (2005).
193. Chou, Y. K., "Surface Hardening Of AISI 4340 Steel By Machining: A Preliminary Investigation", *Journal Of Materials Processing Technology*, 124: 171-177 (2002).
194. Korznikov, A. V., Ivanisenko, Y. V., Laptinok, D. V., Safarov, I. M., Pilyugin, V. P. And Valiev, R. Z., "Influence Of Severe Plastic Deformation On Structure And Phase Composition Of Carbon Steel", *Nanostructure. Materials*, 5 (2): 159-167 (1993).
195. Stiiwe, H. P., "Interaction Of Stress And Strain With Phase Change In Metals", (M. Berveiller, F.D. Gissher Eds.), *Mechanics Of Solids With Phase Changes*, *Springer*, Wien, 53-67 (1997).
196. Ifergane, S., Eliaz, N., Stern, N., Kogan, E., Shemesh, G., Sheinkopf, H. And Eliezer, D., "The Effect Of Manufacturing Processes On The Fatigue Lifetime Of Aeronautical Bolts", *Engineering Failure Analysis*, 8: 227-235 (2001).
197. Kopacl, J. And Sokovic, M., "Dimensional Accuracy And Cost Optimisation In The Finish Machining Of Cold Formed Parts", *Journal Of Materials Processing Technology*, 2: 335-343 (1999).

198. Coelho R. T., Silva L. R., Braghini, A. And Bezerra, A.A., “Some Effects Of Cutting Edge Preparation And Geometric Modifications When Turning Inconel 718 At High Cutting Speeds”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 148: 147-153 (2004).
199. Sokovica, M. And Mijanovic, K. “Ecological Aspects Of The Cutting Fluids And Its Influence On Quantifiable Parameters Of The Cutting Processes”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 109: 181-189 (2001).
200. Avila, R. F. And Abrao A. M., “The Effect Of Cutting Fluids On The Machining Of Hardened AISI 4340 Steel”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 119: 21-26 (2001).
201. Capello E., “Residual Stresses In Turning Part I: Influence Of Process Parameters”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 160: 221-228 (2005).
202. Zahavi, E. And Turbilo, V., “Fatigue Design Life Expectance Of Machine Parts”, *Crc Press*, 183-238 (1996).
203. Whitehouse, D. J., “Handbook Of Surface Metrology”, *Institute Of Physics Publishing*, Bristol, 10-51 (1994)
204. Lima, J. G., Vila, R. F. A. A., Abrao, A.M., Faustino, M., Davim, J. P., “Hard Turning: AISI 4340 High Strength Low Alloy Steel And AISI D2 Cold Work Tool Steel”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 169: 388-395 (2005).
205. Coelho, R. T., Eu-Gene, Ng., Elbestawi, M.A., “Tool Wear When Turning Hardened AISI 4340 With Coated PCBN Tools Using Finishing Cutting Conditions”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 263-272 (2007).
206. Grzesik, W., “Friction Behaviour Of Heat Isolating Coatings In Machining: Mechanical, Thermal And Energy-Based Considerations”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 145-150 (2003).
207. Grzesik, W., “Experimental Investigation Of The Cutting Temperature When Turning With Coated Indexable Inserts”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39: 355-369 (1999).
208. Nouari, M. H., Abdel-Aal, A. and El Mansori, M., “Analysis Of Coating Delamination Under Extreme Contact Loading”, *Tribology Letters*, 23 (1): 39-45 (2006).
209. Sandwik Coromant “Metal İşleme Ürünleri, Tornalama Takımları”, *Elanders*, İsveç, C: 62-70 (2002).

210. Podzey, A. B. And Sulima, A. M., “Teknologiçeskiye Otatoçniye Napriyajeniya”, **Moskow**, Moskova, 151-196 (1973).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KAFKAS, Fırat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum Tarihi ve Yeri : 26/03/1971, Elazığ
 Medeni Hali : Bekar
 Telefon : 312-202 86 18
 Faks : 312-212 00 59
 e-posta : fkafkas@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makine Eğt. Böl.	2001
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Talaşlı Ürt. Öğrt.	1998
Lise	Kayseri Merkez Teknik Lisesi	1989

İş Deneyimi

Kurum/Kuruluş	Yer	Görev
2001	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
1999-2001	Milli Eğitim Bakanlığı	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

YAYINLARI

1. Kafkas, F., Karataş, Ç., Sarıtaş, S., “Effect Of Heat Treatment Conditions And Densities On Residual Stresses At Hybrid (FLN2-4405) P/M Steels”, *Materials Science Forum*, (534-536): 669-672 (2007)
2. Kafkas, F., Karataş, Ç., Sözen, A., Arcaklıoğlu, E., Sarıtaş, S., "Determination Of Residual Stresses Based On Heat Treatment Conditions And Densities On A Hybrid (FLN2-4405) Powder Metallurgy Steel Using Artifical Neural Network", *Materials and Design*, 28(9): 2431-2442 (2007).

3. Karata, Ç., Fetullayev, E., Kafkas, F., "AISI 5115 Çelikten İmal Edilen Dişli Çarkın Diş Dibiindeki Kalıcı Gerilmelerin İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi**, 16 (1): 9-18 (2001).
4. Fetullayev, E., Karataş, Ç., Kafkas, F., Akyıldız, H.K., "Vidaların Talaşlı İmalatında Oluşan Isının Yüzey Sıcaklığına Etkisinin Analizi", **3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, ANKARA, 49-60 (2003).
5. Karataş, Ç., Fetullayev, E., Kafkas, F., "Nitrik Asit Elektrolit Kullanarak T/M Çeliğin Elektro Polisajlanması", **3. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı**, Türk Toz Metalürjisi Derneği-Gazi Üniversitesi, ANKARA (2002).
6. Fetullayev, E., Karataş, Ç., Kafkas, F. "Teknolojik gerilmelerin teorik ve deneysel yöntemle değerlendirilmesini sağlayan bilgisayarlı ölçme cihazının tasarımı ve imalatı", **4. Uluslararası mekatronik modelleme çalışma toplantısı**, ODTÜ, Ankara, 135-143 (1999).
7. Kahraman, N., Kafkas, F., "Plastik Malzemelerde Kalıcı Gerilmeler ve Kalıcı Gerilmelerin Ölçüm Yöntemleri", **Pagev Plastik Dergisi**, 79: 116-120 (2005).
8. Karataş, Ç., Kafkas, F., Kalıcı Gerilme Ölçüm Yöntemleri, **Pagev Plastik Dergisi**, 64: 134-140 (2002).
9. Karataş, Ç., Kafkas, F., İmal Yöntemlerinin Kalıcı Gerilmeler Üzerindeki Etkileri, **Pagev Plastik Dergisi**, 63: 48-52 (2002).