T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREZELEMEDE TAKIM GEOMETRİSİ VE TIRLAMA TİTREŞİMLERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİ

Hüseyin SARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Danışman
Prof. Dr. Süleyman YALDIZ

Konya, 2008

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FREZELEMEDE TAKIM GEOMETRİSİ VE TIRLAMA TİTREŞİMLERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİ

Hüseyin SARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez …04.01.2008……tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Süleyman YALDIZ
(Jüri Başkanı)

Doç.Dr.Hacı SAĞLAM
(Üye)

Yrd.Doç.Dr.Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FREZELEMEDE TAKIM GEOMETRİSİ VE TIRLAMA TİTREŞİMLERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİ

Hüseyin SARI

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr.Süleyman YALDIZ

2008, 98 Sayfa

Gelişen imalat sektöründe talaşlı üretim çok sık kullanılan bir yöntemdir. Elde edilen ürünün ölçü ve yüzey kalitesinin nisbi olarak yüksek oluşu ile işleme parametrelerinin optimizasyona uygunluğundan dolayı talaşlı imalat diğer üretim yöntemlerine göre tercih sebebi olmuş ve bu sebeple bu alanda bilimsel çalışmalara önem verilmiştir.

Yüzey kalitesi birçok imalat yöntemleri için önemli bir ihtiyaçtır. Yüzey kalitesi, eş çalışan parçalarda sürtünme dirençleri, aşınma ve iş parçasının ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey kalitesi ile şekil ve konum toleransları kesme parametrelerine, takım geometrisine takım ve tezgahın rijitliğine ve iş parçasının bağlama durumuna göre değişmektedir. Bu yüzden istenen yüzey kalitesini kontrol etmek için optimum işleme parametrelerinin seçimi çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında AISI 1040 (60x60x20) malzemesi üzerinden, soğutma sıvısı kullanılmadan talaş derinliği (1.5 mm), kesme hızı (193 m/dak) ve ilerleme hızı (313 mm/dak) sabit tutularak farklı yaklaşma açılarında (45°, 60°, 75°) frezeleme işlemleri yapılmıştır. Kesici takım olarak P 20 kalitesinde farklı geometriye sahip kesici uçlar kullanılmıştır. Mengene ile tabla arasına özel yapım bir dinamometre bağlanmıştır. Mengeneye bağlanan üç boyutlu titreşim ölçer kullanılarak alınan veriler aynı anda dinamometreden alınan verilerle birlikte bilgisayara kaydedilmiştir. Deneyler sonunda üç farklı noktasından talaş kaldırılan numunelerin pürüzlülük ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Elde edilen kuvvet, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sayısal değerlerinin, microsoft exel programında grafikleri çizilmiştir. Böylece takımın geometrisine bağlı meydana gelen tırlama titreşiminin yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediği incelenmiştir. Talaş açısı 0^0, yaklaşma açısı 45^0 ve takım radyüsü 0,4-0,8 mm değerlerinde minumum yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kesici takım geometrisi, Tırlama titreşimi, Yüzey pürüzlülüğü.

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF TOOL GEOMETRY AND CHATTER VIBRATIONS ON SURFACE ROUGHNESS IN MILLING

Hüseyin SARI

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Education

Supervisor: Prof. Dr. Süleyman YALDIZ

2008, 98 Pages

Machining processes is a method which becomes used very frequently at the products sector. Due to the requirement of dimension and surface quality of products obtained should be considerably high and cutting parameters are suitable in optimization, machining processes are preferred according to other manufacturing methods and therefore scientific researches are given importance in this area.

Surface quality is very important necessity for many product methods. Surface quality has an important effect on friction resistant of counterparts, wears and workpiece life. Surface quality, form and position tolerance change according to cutting parameters, tool geometry, the rigidity of tool and machine tool and fixing conditions of workpiece. Therefore, in order to control desired surface quality selection of optimum machining parameters are very important,.

In this study the milling operations were carried out on specimens of AISI 1040 (60x60x20) steel in dry cutting conditions. The machining parameters are such as approaching angle (45°, 60°, 75°), the depth of cut (1.5 mm), cutting speed (193 m/min.) and feet rate (313 mm/min.) were kept constant. As a cutting tool which has a different geometrical shape have been used at P20 quality. Cutting force dynamometer were fixed on machine tool table. Three dimensional acceleration sensor was fixed to vise. The data taken from acceleration sensor and the dynamometer were transferred to the computer by means of data acquisition chard. The measurement of roughnesses was performed at three different places on the workpiece as an off-line. Then, using the data recorded the influence of cutting parameters and tool geometry on chatter vibration and surface roughness were investigated. iFrom the present work, minimum surface roughness and chatter

vibration has been achieved at rake angle 0°, approach angle 45° and tool noise radius 0,4-0,8 mm.

Key words: Cutting Tool Geometry, Chatter Vibration, Surface Roughness

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, derin bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, her türlü desteğini esirgemeyen Tez Danışmanım Prof. Dr. Süleyman YALDIZ'a, teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin her aşamasında engin anlayışı ile sınırsız yardımlarını gördüğüm hocam Doç. Dr. Hacı SAĞLAM'a, deneysel çalışmalarımda ve tezin düzenlenmesinde beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli arkadaşım Öğr.Gör. Süleyman NEŞELİ'ye, S.Ü. Teknik Bilimler M.Y.O. Makine atölyesi teknisyenlerine ve tüm mesai arkadaşlarıma, beni manevi olarak destekleyen sevgili babam, annem ve eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Özet…… i

Abstract……. ii

Teşekkür……. iv

İçindekiler…….. v

Şekil Listesi…… viii

Tablo Listesi……... xi

Semboller…… xii

1. GİRİŞ……..... 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI……..... 2

3. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNİN MEKANİĞİ…… 12

4. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNİN DİNAMİĞİ…… 14

5. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNE TAKIM GEOMETRİSİNİN ETKİSİ……... 16

5.1. Alın Frezeleme……..... 16
5.1.1.Talaş kaldırma olayı……..... 16
5.1.2.Kesme hızı ve ilerleme……..... 17
5.1.3.Talaş boyutları……. 17
5.1.4.Kesme kuvvetleri…… 18
5.1.5.Talaş kaldırma işlemine yaklaşma açısının etkisi…….. 18
5.1.6. Talaş kaldırma işlemine talaş ve boşluk açısının etkisi……. 21

6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ…….…….. 23

6.1. Yüzey Yapısının Özellikleri…… 24
6.2. Yüzey Hatalarının İncelenmesinde Genel Kurallar…… 28

6.3. Yüzey Kalitesinin Sayısal Olarak Değerlendirilmesi……..…... 29
6.3.1. Ortalama çizgi (*M*) sistemi…….…. 29
6.3.2. Zarf sistemi (*E*)……..... 30
6.4. Yüzey Kalitesini Belirlemede Esas Alınan Sayısal Değerler……..... 31
6.5. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri…….. 32
6.5.1. Ortalama eksen çizgi değeri (cla, R_a)……... 32
6.5.1.1. İşleme parametrelerinin R_a ile ilişkisi…….…..... 34
6.5.2. Maksimum tepe-dip yüksekliği (Rmax, Rt)……..... 35
6.5.3. Ortalamaların kareleri toplamının karekökü (Rq, Rs, rms)……. 35
6.5.4. Profil maksimum tepe yüksekliği (Rp)……..... 37
6.5.5. Profil maksimum dip derinliği (Rm)……... 37
6.5.6. On nokta yüksekliği (Rz)…….… 37
6.5.7. Örnekleme uzunluğu…….……...…. 38
6.5.8. Yüzey yapısı……..... 38
6.5.9. Gerçek yüzey……... 38
6.5.10. Pürüzlülük……...… 39
6.5.11. Pürüzlülük genişliği…….….. 39
6.5.12. Pürüzlülük izleme (cut-off) genişliği……..... 39
6.5.13. Dalgalılık…….….. 39
6.5.14. Dalgalılık yüksekliği…….…..... 39
6.5.15. Dalgalılık genişliği……..... 40
6.5.16. Konum/pozisyon……..... 40
6.5.17. Kusur/hata…….…….…..... 40
6.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçme Metotları……. 40
6.6.1. Dokunma metodu……..... 40
6.6.2. Mekanik metod……..... 40
6.6.3.Hidrolik medod…….…..... 41
6.6.4. Pnomatik metod……...…….…..... 41
6.6.5.Yüzey dinamometresi metodu…….. 42
6.6.6.Kapasitans metodu……..... 42
6.6.7. X Işını metodu……..... 43
6.6.8 Elektron mikroskobu medodu……... 43
6.6.9. Optik mikroskop metodu……. 43
6.6.10.Kesit alan metodu……... 43
6.6.11. Karşılaştırma mikroskobu metodu…… 44
6.6.12. Optik yansıtma metodu……. 44
6.6.13.İnterferometri metodları……. 44
6.6.14. İzleyici uçlu cihazlar metodu…… 45
6.6.15. Optik parazit aletleri metodu…… 46

6.6.16. Replika metodu…… 47
6.6.17. Elektro fiber optik sistem metodu…… 47

7. TAKIM TEZGAHLARINDA KARARLILIK…… 50

8. İŞLEME OPERASYONLARININ KAPALI BİR ÇEVRİM SİSTEMİ GİBİ DÜŞÜNÜLMESİ 51

9. TIRLAMA TİTREŞİMİ…… 53

9.1. Zorlanmış Titreşimler……. 55
9.2. Kendiliğinden Oluşan Titreşimler…….. 59
9.3. Yenilenebilen Tırlama…… 62
9.4. Mod Çiftlemesi…… 65
9.5. Termomekanik Tırlama…….. 68

10. DENEYSEL ÇALIŞMA…… 70

10.1. Deneyin Yapısı…… 70
10.2. Malzeme……. 71
10.3. Kesme Koşulları…… 71
10.4. Kesici Takım ve Takım Tutucu……. 71
10.5. Freze Tezgahı……. 73
10.6. Veri Alma ve Ekipmanları……. 73

11. Deneysel Bulgular ve Değerlendirmeler…… 75

11.1. Yaklaşma açısı (κ), talaş açısı (γ) ve değişimlerinin pürüzlülüğe olan etkileri…… 75
11.2. Yaklaşma açısı (κ) ve takım radüsü (r) değişimlerinin pürüzlülüğe olan etkileri…… 78
11.3. Talaş açısı (γ) ve uç yarıçapı (r) değişimlerinin pürüzlülüğe olan etkileri…… 81

12. SONUÇLAR…… 85

KAYNAKLAR…….. 87

EKLER……... 94

ŞEKİLER LİSTESİ

Şekil No		Sayfa No
Şekil 4.1	Metal kesme işleminde deforme edilmemiş talaş kalınlığı ve kesme hızının değişme durumu	15
Şekil 4.2	Metal kesme işleminde dalga oluşumu	15
Şekil 5.1	Alın frezelemede açılar ve kesme kuvvetleri	16
Şekil 5.2	Efektif normal talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisi	22
Şekil 6.1	İşlenmiş bir yüzeyin yüzey karakteri	24
Şekil 6.2	Takım uç yarıçapı ve ilerlemenin pürüzlülüğe etkisi.	26
Şekil 6.3	Yüzey pürüzlülük özellikleri.	26
Şekil 6.4	Pürüzlülük değerleri ve hangi işlemlerle elde edildiklerinin gösterimi	28
Şekil 6.5	Ortalama çizgi konumunun belirlenmesi (Scarr 1991).	30
Şekil 6.7	Ortalama zarf eğrisi (Scarr 1991)	32
Şekil 6.8	Yüzey kalitesi için sayısal değerler (Scarr 1991).	32
Şekil 6.9	Ordinatlarla R_a'nın gösterimi	34
Şekil 6.10	Alanlarla R_a'nın gösterimi	34
Şekil 6.11	Tepe-dip yüksekliği aynı olan yüzey örnekleri	36
Şekil 6.12	On nokta yükseklik hesabı için ortalama ölçümler	38
Şekil 6.13	(a) Düz yüzeyler için çanak biçimli dairesel başlık (b) İnce uzun kanallı başlık	42

Şekil 6.14	Ölçüm yapılan yüzeyleri birbirinden ayıran bir tepe üzerinden, izleyici uca kızaklık eden elemanın geçmesi ile profilde ortaya çıkan yanlış dipin şematik gösterimi	46
Şekil 6.15	Küçük, keskin bir basamak üzerinden geçen küresel uçlu izleyicinin takip ettiği yolun şematik gösterimi	47
Şekil 6.16	İzleyici uçlu elektronik cihazların şematik gösterimleri. (a) Akım üreten cihaz, (b) Gerilim üreten cihaz, (c) Sinyal modüle cihazı	47
Şekil 6.17	Taşlanmış (a) ve Leplenmiş (b) Çelik yüzeyler	48
Şekil 7.1	Tipik bir kararlılık diyagramı	50
Şekil 8.1	a) Kesme dinamiğinin gösterimi b) Kesme dinamiğinin blok diyagramı. (V kesme hızı)	53
Şekil 9.1	Sönümlü tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemi	57
Şekil 9.2	Tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin cevap eğrisi	58
Şekil 9.3	Cevap eğrisinden sönümlenmiş sistem sabitinin tespiti	59
Şekil 9.4	Kendiliğinden oluşan titreşimlerin prensip diyagramı	61
Şekil 9.5	Deforme edilmemiş talaş kalınlığının değişimi	62
Şekil 9.6	Titreşim sisteminin modellenmesi	65
Şekil 9.7	Kesme işleminde dalgalanmış yüzey	66
Şekil 9.8	İki serbestlik dereceli tırlama modeli	67
Şekil 9.10	Önceden deforme edilmemiş yüzeyin işlenmesi hali	67
Şekil 9.11	Konum çiftleme prensibine göre takımın aldığı eliptik yol	68
Şekil 10.1	Deney setinin şematik görünüşü	70
Şekil 10.2	Kesici ucun geometrik özellikleri (mm)	72
Şekil 10.3	Takım tutucu	72
Şekil 10.4	Üniversal freze tezgâhı	74
Şekil 10.4	8692C ivme ölçer	75

Şekil 10.5	a) Titreşim sensörünün bağlantısı b) Yükseltici ve PCLD-8712 board bağlantısı	75
Şekil 11.1	a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=45°, r=0,4) b) Titreşim genliği- talaş açısı grafiği (κ=45°, r=0,4)	75
Şekil 11.2	a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=60°, r=0,4) b) Titreşim genliği- talaş açısı grafiği (κ=60°, r=0,4)	76
Şekil 11.3	a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=75°, r=0,4) b) Titreşim genliği- talaş açısı grafiği (κ=75°, r=0,4)	76
Şekil 11.4	a) Bileşke kuvvet-talaş açısı grafiği (r=0,4) b) Yüzey pürüzlülüğü (Ra)-talaş açısı grafiği (r=0,4)	77
Şekil 11.5	a) Kesme kuvveti-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,4) b) Titreşim genliği-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,4)	78
Şekil 11.6	a) Kesme kuvveti-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,8) b) Titreşim genliği-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,8)	79
Şekil 11.7	a) Kesme kuvveti-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=1,2) b) Titreşim genliği-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=1,2)	80
Şekil 11.8	a) Bileşke kuvvet-Yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°,) b) Yüzey pürüzlülüğü (Ra)-Yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°)	80
Şekil 11.9	a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=45°), b) Titreşim genliği- talaş açısı grafiği (κ=45°)	81
Şekil 11.10	a) Kesme kuvveti (Fy)-talaş açısı grafiği (κ=45°), b) Titreşim genliği (Vy)- talaş açısı grafiği (κ=45°)	82
Şekil 11.11	a) Kesme kuvveti (Fz)-talaş açısı grafiği (κ=45°), b) Titreşim genliği (Vz)- talaş açısı grafiği (κ=45°)	83
Şekil 11.12	a) Bileşke kuvvet-talaş açısı grafiği (κ=45°) b) Yüzey pürüzlülüğü-talaş açısı grafiği (κ=45°)	83

TABLO LİSTESİ

Tablo No		Sayfa No
Tablo 6.3	Değişik pürüzlülük profilleri için R_q / R_a oranları	37
Tablo 10.1	AISI 1040 çeliği kimyasal bileşimi	72
Tablo 10.2	Kesme koşulları tablosu	72
Tablo 10.3	Kesici uç çeşitleri (mm)	73
Tablo 10.4	Takım tutucunun geometrik özellikleri (mm)	74

SEMBOLLER

A : Levhaları nominal alanı

a : Talaş derinliği

A_s : Talaş kesiti

b : Talaş genişliği

$b_{\lim}$: Kritik kesme derinliği

C : Sistem kapasitansı

C_x ve C_y : Sönümleme viskozite sabiti

D : Tarama çapı

D_a : Hava geçirgenlik katsayısı

f : Titreşim frekansı

F_m : Harmonik kuvvetin max. değeri

F_n : Normal kuvvet

F_S : Kesme kuvveti (Teğetsel kuvvet) (F_y)

F_r : Radyal kuvvet (F_z)

F_V : İlerleme kuvveti (F_f)

$G(\omega)$: MTT sisteminin takım ucu direkt FTF'si

h : Talaş kalınlığı

h_m : Ortalama talaş kalınlığı

l_{kt} : Yapışma-sürtünme bölgesinin uzunluğu

k_s : Özgül kesme kuvveti

K_f : Talaş kalınlığı yönündeki kesme kuvveti katsayısı

k_x ve k_y : Makine yapısı rijitlik sabiti

L : Örnekleme uzunluğu

m : Eşdeğer titreşim ağırlığı

r : Takım uç yarıçapı

R_a : Ortalama pürüzlülük

$R_{\max}$ (R_y) : En büyük pürüzlülük

R_q : Orta eksenin altında ve üstündeki sapmaların geometrik ortalama değeri

R_t : Filtre edilmiş pürüzlülüğün en yüksek tepesi ile en derin girintisi arasındaki mesafe

R_z : Değerlendirme aralığındaki en yüksek beş çıkıntı ile en derin beş girintinin mutlak değerlerinin ortalaması

u : İlerleme hızı

S : İlerleme

S_z : Diş başına ilerleme

t : Talaş derinliği

T : Periyot

t : Yalıtkan kalınlığı

V : Kesme hızı

Y : En son geçişteki titreşimler

Y_0 : Kesici takımın iş parçası yüzeyinden önceki geçişi sırasında oluşan yüzeydeki dalgalanmalar arasındaki fark

Z_e : Kavramadaki diş sayısı

α : Boşluk açısı

α_{f} : Yan-kenar talaş açısı

α_{ne} : Efektif boşluk açısı

α_{p} : Arka/sırt talaş açısı

β : Kama açısı

γ : Talaş açısı

δ : Sönümleme katsayısı

δ_c : İş-yüzey eğimi

$\Delta\gamma_{ne}$: Efektif talaş açısı

ΔF : Değişken kuvvet bileşkesi

μ : Üst üste binme faktörü

τ_f : Yapışma-sürtünme bölgesi sürtünme gerilmesi

τ_s : Kayma gerilmesi

τ_k : Kopma mukavemeti

ω : Açısal frekansı

ω_n : Tabii açısal frekans

1. GİRİŞ

Farklı talaşlı imal usulleri kullanılarak yapılan yüzey işlemleri doğrudan veya dolaylı olarak işleme parametrelerinden etkilenmektedir. İyi seçilmeyen işleme parametreleri kesici takımların kırılması, hızlı aşınması, yanması gibi ekonomik kayıpların yanı sıra iş parçasının bozulması veya yüzey kalitesinin düşüklüğü gibi ekonomik kayıplara da neden olmaktadır.

Talaşlı imalatın diğer imalat metotları arasında önemli bir yeri vardır. Bütün imalat yöntemlerinde ürünün ölçü ve geometrik toleranslarının yanında tatminkar bir yüzey pürüzlülük kalitesi de büyük önem arz etmektedir. Makine parçalarının yüzey yapısı iş parçasının, takımın, işleme koşullarının veya tezgahın herhangi birinin değişmesi ile yani işleme rejiminden doğrudan etkilenir. İmal edilen parçaların gerektiği tarzda çalışması, mekanik ömrü ve dış etkilere karşı direnci, diğer faktörlerin yanında yüzey kalitesine de bağlıdır. Bu yüzden nümerik değerlerle pürüzlülüğün nasıl oluştuğunu belirlemeye veya tahmin etmeye ihtiyaç vardır. Parçanın fonksiyonunu ve maliyetini etkileyen pürüzlülüğün gerçek değerinin tahmininde de takım-iş parçası arasındaki temas titreşimini (Tırlama titreşimi) kullanmak mümkün olmaktadır.

Yüzey kalitesinin bu öneminden dolayı imalatçıların dikkati işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğünü azaltma konusu üzerinde odaklanmıştır. Titreşim ve yüzey pürüzlülüğü çalışması ve bunlar arasındaki etkileşim dünyada çeşitli teknik üniversitelerde ve enstitülerde makine biliminin artan bir ilgisine sahip olmaktadır.

Teknolojik gelişmelerle birlikte işlenen yüzey özelliklerinde iyileşme ve ölçü tamlığı konusunda beklentiler de artmaktadır. 1960'lara kadar yüzey kalitesi için ortalama pürüzlük değeri olarak 100 µm yeterli görülürken, 2000'li yıllarda istenilen yüzey kalitesi 10 µm'ye kadar düşmüştür. Teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte her alanda ölçü, biçim ve görünüş tamlığı isteği artmıştır. Teknolojinin ihtiyaç duyduğu parçaları istenilen düzeyde üretmek farklı araştırmalar yapılmasını gerektirmektedir (Güllü 2005).

Bu çalışmanın amacı; değişik geometriye sahip takımlarla yapılan alın frezeleme işlemlerinde takım geometrisinin tırlama ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kim ve Lee (2000), yüksek hızlarda orta frezeleme esnasında meydana gelen tırlama titreşimlerini incelemişlerdir. Değişik kesme şartlarında deney yapmışlar meydana gelen tırlama titreşim değerlerini kaydetmişlerdir. Sonra orta frezelemede tırlama tahmini için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modelden elde edilen değerlerle deney sonuçlarını karşılaştırmışlar ve sonucun aynı olduğunu görmüşlerdir.

Ertürk, Budak ve Özgüven (2005), bu çalışmada; analitik yöntemlerle elde edilen iş mili takım tutucu ve takım frekansın tepki fonksiyonları ile deneysel olarak elde edilen dinamik özelliklerinden yararlanarak bütün sistem için gerekli frekans tepki fonksiyonlarının hesaplanması amaçlanmıştır. Bu sayede işleme merkezlerinde meydana gelen tırlama titreşimlerinin giderilerek yüzey pürüzlülüğünün minimum düzeye indirilmesi hedeflenmiştir.

Insperger, Stephan (2004), yüksek ve düşük hızlarda frezeleme işlemleri için oluşan tırlama titreşim bölgelerine ait bir harita çıkarıp kararsız bölgeler için yeni tanımlar yapıp bağıntılar kurmuşlardır. Doğruluğu ispatlanmış deneylerle bu bağıntılar karşılaştırmışlar.

Lee, Kim ve Sin (2002), yüzeysel frezeleme işlemleri için bazı dinamik özellikler geliştirmişlerdir. İmalat sırasında meydana gelen ani aşınmalar, titreşimler, takım kırılmalarını azaltmak ve daha kararlı bir kesme için iki aşamadan oluşan bir talaş kaldırma işlemi önermişlerdir.

Taşkesen, Yücel (2003), tarafından metal kesme işleminde takım tezgahının bir ve iki serbestlik dereceli tırlama titreşim analizleri yapılarak Visual Basic programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla takım tezgahının iş parçası malzemesinin ve kesme parametrelerinin özellikleri girilerek istenilen değerler tahmin edilebilmekte ve simülasyonlar görülebilmektedir. Sonuç olarak takım tezgahının tırlama titreşimlerinden arındırılmış olarak çalışması için uygun kesme parametreleri elde edilebilmektedir.

Weck (1985), kararlılık problemi için tek serbestlik dereceli bir yapı özetlemiştir. Bu çalışmanın paralelinde en son Yuan ve Cai (1986) çalışmış, bu çalışmaya kesme işleminin sönümlenmesi de dahil edilmiştir, fakat kesme modeli

gereğinden çok basitleştirilmiştir. Doğrusal tırlama teorisi günümüzdeki araştırmalarda genelleştirilmekte ve herhangi bir torna konfigürasyonuna (yapılanışına) uygulanabilmektedir. Bu genel teori hem kesme şartlarının hem de kararlılık üzerindeki takım oryantasyonunun işleme sistemine bağlı etkilerini açık bir biçimde gösterir. Ayrıca bu teori frezeleme gibi diğer işleme operasyonlarına kolayca uygulanabilir.

Akün (1956) tarafından yapılan araştırmada, tezgah titreşimlerinin önemi, titreşim probleminin çok karışık olduğu ve bu titreşimlerin analizi için gerekli aletlerin mevcut olduğu belirtilmiştir. Araştırmada üç eksen boyunca, kalem ve parça ekseni titreşimleri ve parçanın dönme titreşimleri incelenmiş; talaş kesiti, kesme hızları, kesici takım açıları, kesici uç yarıçapı, takım malzemesi, işlenen parçanın malzemesi hususlarının bu titreşimler üzerine olan etkileri gösterilmiştir. İki ayrı torna üzerine yapılan araştırmada prensip olarak takım ve parçanın titreşimlerinin her doğrultu için ölçülen değerlerin toplamının yüzey pürüzlülüğü bakımından yeter bir kriter olacağı hususu ele alınmış ve yapılan deneyler bu kabulün doğru olduğunu göstermiştir.

Zharkov (1985) tarafından yapılan araştırmalarda, benzerlik analizinin hakiki ölçüde ve model halindeki bir takım tezgahı yapı elemanına nasıl tatbik edileceği belirtilmiştir. Sonuçta, tam ölçüdeki elemanın dinamik karakterlerinin model kullanılarak incelenebileceğini, birçok hallerde önemli tabii frekansların teorik ölçek faktörü ile uyuştuğunu ve titreşim şeklinin tabii frekanslarda iyi bir benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Lin ve Weng (1991) tarafından yapılan araştırmalarda takım tezgahlarının rijitliğinin eğilme, burulma rijitlikleri ile temel titreşimlerin şekli ve tabii frekanslarının büyüklüğü ile karakterize edildiği ve bu rijitliğin karakteristik büyüklüklerinin model kanunu yardımı ile benzer yapılara aktarılacağı ve model tecrübelerin avantajları gösterilmiştir. Farklı yapıların rijitliklerindeki değişmeler bulunmuştur. Takım tezgahı gövdesinin rijitleştirilmesi için de araştırmalar yapılmış ve bunun için model kanunları göz önüne alınmıştır. Değişik malzemeler kullanılması halinde mukayese ilişkileri elde edilmiş, yapıların büyüklüğünün hata üzerindeki tesirlerinin yönü tayin edilmiş ve bağlama flanşlarının çeşitli konstrüksiyonlarının rijitlik üzerine tesirleri araştırılmıştır.

Tobias ve Fischwick (1958) tarafından yapılan araştırmada takım tezgahının kısıt şartlarındaki herhangi bir değişimin, sönüm, eşdeğer rijitlik ve sapma eğrisi ile ilgili tabii frekanslara etkisi gösterilmiş ve titreşim izolatörlerinin sönüm ve rijitlik üzerindeki etkileri belirtilmiştir. Buna bağlı olarak yapının iç ikaz kuvvetlerine karşı olan durumu ile titreşim karakterlerinin tesiri incelenmiştir.

Albrecht (1965) tarafından yapılan çalışmada, metal kesme işlemi dinamiğinin incelenmesi analitik ve deneysel yaklaşımlarla ele alınmıştır. Metal kesme işleminin dinamik davranışına, çalışma yüzeylerinin dalgalanmasından oluşan kesme kuvvetlerinin etkisini dinamik özellikler olarak verebilen geliştirilmiş bir analiz sunulmuştur. Bu bulgular sonucunda kendi kendine kesme işleminin kararsız bir kesme davranışına sebep olacağı ileri sürülmüştür. Dalgalı çalışma yüzey konumları için, kesilmemiş talaş kalınlığı dalgalanmaları ve kesme kuvveti arasındaki ilişkinin analitik olarak ifadesinin mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca dalgalanma şiddetinin kesme açılarına bağlılığı tespit edilmiştir. Talaş oluşumundaki atalet kuvvetlerinin, yüksek frekanslı dalgalanmalı kesme konumlarında önemli fonksiyonu olmasından dolayı analizde göz önüne alınmıştır. Neticede metal kesme işlemindeki kararsızlıkları düzeltmek mümkün olmuştur. Çalışmada bir deney düzeneği gerçekleştirilmiş olup, kesme kuvvetlerinin dinamik cevabının ölçümü için uygun bir takım dinamometresi dizayn edilmiştir. Deney setinde kesici takım, bir geri besleme mekanizmasıyla ortalama pozisyonda kontrol edilebilen elektro-hidrolik titreştirici yardımıyla kesme yapmaktadır. Bu sette yaklaşık 400 Hz frekans aralığında meydana gelen titreşimlerin sebep olduğu kesme kuvvetlerinin dinamik cevabının tespiti mümkün olmuştur.

Hana ve Tobias (1974) tarafından yapılan çalışmada takım tezgahı yapılarının non-lineer dinamik davranışı incelenmiştir. Bu çalışma üniversal bir freze tezgahı üzerinde dinamik davranışın incelenmesiyle yapılmıştır. Önceden tespit edilmiş titreşim verilerinden faydalanılarak, titreştirici kullanılması sonucundaki verilerle ilgili olduğu bulunmuştur. Titreştiriciden üretilen kuvvet-genlik değerinin tezgah yapısının dinamik cevabının non-lineer olmasına neden olduğu bulunmuştur. Bu araştırma ve çalışma sonucunda teori ile deneysel sonuçların uyumları göze çarpmaktadır.

Wu ve Liu (1985), metal kesme dinamiğinin analitik modellenmesi üzerine yaptıkları çalışmada kesme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin belirlenmesi için bir analitik yaklaşımla, kendiliğinden-doğan titreşimin matematik modeli geliştirilmiştir.

Hahn (1953) tarafından yapılan çalışmada metal kesme işleminde kendiliğinden-doğan titreşim ve onun yok edilmesi konusu işlenmiştir. Kendiliğinden-doğan titreşim probleminin çözümü için titreşim modlarının incelenip sönümleyici uygulanması gerektiğini açıklamaktadır. Kendiliğinden oluşan titreşimlerin sebeplerini üç kısımda inceleyen araştırmacıya göre ilk titreşimin (primary chatter) sebebi sıcaklık gecikmesi ve kayma düzlemi civarındaki gerilme durumudur. Kendiliğinden oluşan titreşimin nedenlerinden ikincisi, geçiş kararsızlığıdır. Bu kararsızlık iş parçasının homojen olmayan yapısından kaynaklanmaktadır. Yüzeyi sertleştirilmiş bir iş parçasının işlenmesi esnasında bu titreşimlerle karşılaşılabilir. Üçüncü neden, dalgalı olan bir iş parçası üzerinden talaş kaldırma esnasında oluşabilecek ve periyodik bir alternatif oluşturabilecek geri besleme etkisidir. Hahn ayrıca metal kesme işleminde meydana gelen zorlanmış titreşimlerde periyodik dalgalanmaların frekansının iş mili hızıyla orantılı olduğunu, fakat kendiliğinden-doğan titreşimlerde periyodik dalgalanmaların iş mili hızından bağımsız ve tabii frekansla orantılı olduğunu açıklamıştır. Temel teoriyi Den Hartog (1947)'dan alan araştırmacı neticede kendiliğinden-doğan titreşim için yeni bir teori geliştirmiştir.

Albrecht (1962) yaptığı çalışmada dinamik şartlar altında talaş kalınlığı değişimi nedeniyle kuvvet dalgalanmaları yanında, kesme işlemindeki kayma açısının periyodik değişiminin sonucunda ilave kuvvet dalgalanmalarının da meydana geldiğini bulmuştur. Bu çalışmada kesme işleminin içerisinde oluşan kararsızlığın, kayma açısının periyodik değişimine bağlı olduğu ve kararsızlığın sistemin dinamik şartlarına değil kesme şartlarına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Periyodik talaş teşekkülünün frekans ve genliği için analitik ifadeler çıkartılarak ölçümleri yapılmıştır. Sonuçta kesme işlemindeki kendiliğinden oluşan titreşimin, kesme işlemine bağlılığı incelenmiştir.

Tlusty ve Polacek (1963) yaptıkları çalışmada, minimum ağırlıkta tezgahın yüksek kararlılığına sahip olması için kendiliğinden-doğan titreşimin, tezgahın

karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. Sunulan teoride, tezgahtaki değişmelerin titreşim üzerindeki değişmelere nasıl etki ettiği belirlenmiştir. Bu çalışmada tezgah n-serbestlik dereceli bir titreşim sistemi olarak düşünülmüş, kararlılık sınırlarının hesaplanması için basit bir grafik metot verilmiştir.

Peters (1963) tarafından yapılan araştırmada, takım tezgahlarının incelenmesi ve tasarımının yapılmasında, dinamik analizin büyük bir öneme haiz olduğu belirtilmektedir. Tezgah üzerinde bir takım karakteristiklerin belirlenmesinde dinamik ölçmelerin yanında statik birtakım ölçümlerin yapılması gerektiği anlatılmaktadır. Tezgahların geliştirilmesi için statik yapı kuvvetleri kullanılarak yapı düzeltilmesi ve dinamik sönümleyicilerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca dinamik analizle, kesme işlemi sırasında meydana gelen titreşimlerin kaynakları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada iş parçasının yüzey düzgünlüğü ile tezgahın dinamik karakteristikleri arasındaki ilişki ve tezgahın hassasiyetinin kendiliğinden-doğan titreşime etkisi incelenmiştir.

Long ve Lemon (1965) ortak çalışmalarında, takım tezgahlarındaki kendiliğinden-doğan titreşimin yapısal dinamiğini araştırmışlardır. Burada tezgah dinamiği transfer fonksiyonu teorisi ile temsil edilerek, kendiliğinden-doğan titreşimleri incelemek için geliştirilen kararlılık teorisine geçiş yapılmıştır. Çalışmada, karmaşık tezgah yapılarının dinamik cevabını temsil eden analitik ifadeler elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonlarının kapalı çevrimli sistemlerin kararlılık analizi için de istenilen özelliklerde olduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşımla tezgahın dinamik davranışının incelemesi yapılmıştır.

Das ve Tobias (1967) tarafından yapılan ortak çalışmada kendiliğinden-doğan titreşimin, statik ve dinamik kesme katsayıları arasındaki bağıntıyı içeren bir matematiksel teori verilmiştir. Bu araştırmada dinamik kesmenin üç durumu incelenmiştir. Bu durumlar;

a) Dalga oluşturmalı kesme,

b) Dalgayı ortadan kaldırma kesmesi,

c) Dalga üzerinde dalgalı kesmedir.

Kesme işleminde kendiliğinden oluşan titreşimin analizi için kesme parametrelerinin (talaş kalınlığı, ilerleme, kesme hızı vs.) harmonik değişimiyle

meydana gelen kuvvet artımlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kesme parametrelerinin her birinin birim değişimi neticesindeki kuvvet artımlarının bilinmesi, kesme parametrelerinin her birinin katsayısını verir. Dinamik kesme katsayıları, kendiliğinden-doğan titreşimin matematiksel teorisine fiziksel gerçeği vermektedir. Dinamik kesme katsayıları, parametrelerden birinin sürekli değiştiği durumlardaki deneylerden elde edilmesine karşılık, statik kesme katsayıları ise parametrelerden birinin kademeli değiştiği durumdaki deneylerden elde edilmektedir. Dinamik ve statik kesme katsayıları arasındaki nedensel ilişkinin mevcudiyeti bilinmesine rağmen henüz belirlenememiştir. Bu çalışmada, araştırmacılar kuvvet genliği için bir teorik ifadeyi, deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve sonuçların uygunluğunu gözlemlemişlerdir.

Knight (1968) çalışmasında, Das ve Tobias'ın (1967) elde ettikleri artımsal kesme kuvveti ifadesi, basitleştirilmiş bir tezgah sistemi kararlılığının tayini için uygulanmıştır. Kararlılık sınırını tayin etme metotlarının temeli Tobias ve Fishwick (1958) tarafından atılmıştır. Burada kesme kuvvetinin; kesilmiş talaş kalınlığının ani değerine, takımın iş parçasına nüfuziyet oranına ve kesme hızına bağlılığı kabulü yapılır. Das ve Tobias (1967) tarafından sunulan kuvvet ifadelerinin katsayıları nominal kesme şartlarında tayin edilir. Bu teori esas alınarak yapılan çalışmada, nominal şartlarda elde edilen kararlılık kartlarının üniversal kesmedeki kararlılık kartlarına ilgisi belirlenerek, üniversal kesmedeki kartlar elde edilmiştir.

Merrittt (1965) tarafından yapılan çalışmada, takım tezgahlarının temel performans sınırı olan kendiliğinden-doğan titreşimin aynı zamanda takım tezgahı ile kesme işleminin birleştirilmesiyle oluşan sistemin kararsızlık bölgesi olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada takım tezgahı n-serbestlik dereceli bir yapı kabul edilerek, kararlılık sınırları tespiti için bir titreşim teorisi geliştirilmiştir. Zira kararlılık kartlarının oluşturulması için sınırların belirlenmesi gerekmektedir. Geliştirilen kendiliğinden-doğan titreşim teorisi deneysel olarak ölçülen dinamik kompliyanslarla açıklanmış bu işlemler yapılırken, kesme işleminin dinamiği ihmal edilmiştir. Burada kararlılık sınır çizgilerinin belirlenmesi için sistem karakteristik denkleminin harmonik çözümlerinin elde edilmesi gerekir. Karmaşık olan kararlılık kartları, tezgahın normal çalışma bölgelerini belirler.

Thompson (1969) çalışmasında, kendiliğinden-doğan titreşim tabiatıyla ilgili çeşitli deneysel incelemelerin sonuçlarını yorumlamıştır. Yapılan çalışmalardan kapalı bir çevrim olan titreşimin, genlik ayarlı olduğu sonucuna varmıştır. Bu araştırmacının çalışması, Doi ve Kato'nun (1956) elde ettikleri teoriyi esas almıştır. Kendiliğinden oluşan titreşimin matematik analizi için Doi ve Kato'nun hareket denklemi kullanılmış ve sonuçta titreşimin frekans ifadesi elde edilmiştir.

Nachtigal ve Cook (1970) tarafından yapılan çalışmada, kendiliğinden-doğan titreşimin aktif kontrolü üzerinde durulmuştur. Titreşimdeki yenilenebilir etki, tezgahın ilk performans sınırlarından biri olarak kabul edilmiştir. Önceki çalışmalarda yapının dinamik kompliyansını düzeltmek için yenilenebilir etki probleminin minimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu yaklaşımda; yapı sönümlemesinin artırılması, rijitliğin artırılması ve titreşim yutucularının kullanılması gibi pasif çözümler getirilmiştir. Bu çalışma da kendiliğinden-doğan titreşimlerin aktif kontrolü alanındadır. Aktif titreşim kontrol sistemi ile teçhiz edilmiş bir tezgahın analizi yapılmıştır. Bir torna tezgahındaki deneylerle önceki deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmış ve uygunluğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, kesme kuvvetinin bir ölçüsünü veren bir parametre geri-besleme sinyali olarak kullanılmış ve işlemedeki titreşimin yok edilmesi için bilgi edinilmiştir.

Nigm ve ark. (1977) ortaklaşa çalışmalarında, dinamik kesme katsayılarının kararlı hal verilerinden elde edilmesi için bir matematik model sunulmuştur. Bu teori kararlı halde ortogonal kesme işleminin boyutsuz analizini esas kabul eder. Bu çalışmanın sonucunda, dinamik kesme katsayıları ve kararlılık kartları tayin edilmiştir. Sunulan teoriye göre, elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumuna dikkat çekilirken, artımsal kesme kuvvet bileşenleri için açık ifadeler elde edilmiştir.

Opitz ve ark. (1965) tarafından yapılan bu araştırmada, büyük takım tezgahlarının dinamik karakteristiklerinin araştırılması için bir elektro-hidrolik titreştirici geliştirilmiştir. Titreştirici, iki kademeli bir Moog valfi ile buna bağlı çift tesirli ve statik basınç odasına sahip bir kuvvet pistonundan ibarettir. Sinüs şeklindeki giriş sinyali, uzama-ölçer (strain-gauge) köprüsünden alınan bir sinyalle, referans sinyalinin mukayesesinden elde edilen hata sinyalinin kumanda ettiği bir elektrik motoruna bağlı potansiyometre ile düzeltilmektedir. Çalışmada, bu

titreştiricinin bir sütunlu freze tezgahı ile dik bir torna tezgahına uygulanması ile elde edilen rezonans ve cevap yer eğrileri verilmiştir.

Çakır (1969) tarafından yapılan çalışmada büyük takım tezgahlarının dinamik kararlılığının araştırılması için bir elektro-hidrolik titreştiricinin tasarımı ve imalatı yapılmış, çeşitli karakteristik değerler elde edilmiştir. Bu çalışma esas olarak elektro-hidrolik titreştirici sistem, bir elektro-hidrolik servo valf, bir çift tesirli hidrolik kuvvet pistonu ve bir sabit basınçlı hidrolik kuvvet merkezinden oluşmuştur. Elektro-hidrolik servo valf, elektro-dinamik bir hareket verici ve piston tipli açık merkezli bir hidrolik valfden müteşekkildir. Tesir pistonundaki diferansiyel basınç, elektronik kontrol konsolundan gelen sinyal ile hareket ettirilen servo valf tarafından sağlanmıştır. Tesir pistonunun gerçek diferansiyel basıncı ile servo valf hareketini temsil eden geri besleme sinyalleri yardımcı bir operasyonel amplifikatörde, bir sinüs generatörü tarafından sağlanan referans sinyalleri ile birleştirilerek, istenen kuvvetle gerçek kuvvet arasındaki, dolayısıyla servo valf hareketindeki fark elde edilmiştir. Bu sinyal, kuvvet amplifikatöründeki mevcut sinyallerin düzeltilmesi için kullanılmıştır. İkinci olarak, tesir pistonunun kuvvet mili üzerine monte edilen bir geri-besleme uzama-ölçer, tesir pistonunun diferansiyel basıncını yük şartlarından bağımsız olarak muhafaza eden sinyali bir taşıyıcı amplifikatör yardımı ile operasyonel amplifikatöre taşır. Servo valf pistonuna monte edilen bir geri besleme transduseri de yine bir taşıyıcı amplifikatör vasıtası ile operasyonel amplifikatöre bağlanmıştır. Bu çalışmada kuvvet amplifikatörü kontrol sinyalini büyütmekte ve elektro-dinamik hareket vericiye gönderdiği sinyalle valf pistonunun istenilen hareketini gerçeklemiştir. Servo valf bir kuvvet amplifikatörü olarak çalışmış ve giriş sinyaline uygun olarak tesir pistonuna hidrolik güç vermiştir. Tesir pistonu bu hareketi kendi şaftına bağlı olan deney örneğinin hareketine dönüştürmüştür. Bulgular, sinüs şekli ve kumanda seviyesinin değiştirilmesiyle elde edilen çalışma genlikleri için titreştiricinin frekans bandı olan 2-250 Hz frekansları arasında istenen seviyeye ulaşmış, performans eğrileri çizilmiş ve hesaplanan karakteristiklere uygun sonuçlar bulunmuştur. Çalışmada, büyük takım tezgahlarının araştırılmasında kullanılacak yeni elektro-hidrolik titreştiricilerin geliştirilmesi üzerine bütün olarak bir teori kurulmuştur.

İşlenmiş parça yüzeylerinin tribolojik özellikleri, yüzey dokusundan birinci derecede etkilenmektedir. Yüzey pürüzlülüğü sadece aşınma, sürtünme ve yağlama gibi tribolojinin geleneksel konularında değil, aynı zamanda sızdırmazlık, hidrodinamik, elektrik, ısı iletimi vb. farklı alanlarda da dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu yüzden makine parçalarında yüzey pürüzlülük değerinin tespiti oldukça önemlidir. Talaşlı imal usulleri kullanılarak yapılan yüzey operasyonları birçok değişkenden etkilenebilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerinin azaltılması; talaş derinliğinin azaltılması, düşük ilerleme ve yüksek kesme hızları kullanımı, soğutma suyu debisinin artırılması, kesici takımın uç yarıçapının ve talaş açısı değerlerinin büyük olması gibi faktörlere bağlıdır (Thomas 1982).

Kopac ve Bahor (1999), pratikte sık kullanılan temperlenmiş Ç1060 ve Ç4140 çeliklerin işleme koşulları ile yüzey pürüzlülüğünün değişimi üzerindeki çalışmalarında, işleme parametrelerinin rasgele seçimi neticesinde ne tür sonuçlar ile karşılaşılabileceği üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında, her iki çelik için büyük uç yarıçaplı kesici takım kullanıldığında, düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

Aboulatta (2001) tarafından yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesi için yapılan çalışmalarda, yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri ve aynı zamanda kesici takım titreşimine bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Kesme parametreleri ve radyal yöndeki titreşim değerlerinin birbirlerine olan etkileşimi üzerine 4-farklı matematiksel model geliştirmiştir. Çıkardığı bu 4-matematiksel modelle R_a ortalama yüzey pürüzlülüğü, R_t maksimum yüzey pürüzlülüğü ve R_{sk} genlik dağılım eğrisi değerlerini hesaplamıştır. Bulduğu değerler ile matematiksel modeller arasında R^2'leri ile yüzdelik olarak hata oranlarını bulmuştur. Deneysel sonuçlarda ise yüzey pürüzlülüğünün sadece kesme parametrelerine bağlı olmadığı, titreşiminde yüzey pürüzlülüğüne etki ettiğini ortaya çıkarmıştır. Maksimum yüzey pürüzlülüğü R_t'nin en çok kesme hızı ve parça çapına bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Jang ve ark. (1996), esnek bir imalat sisteminde bir tezgahı kontrol etmek için gerçek zamanlı bir izleme algoritması geliştirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ile tırlama titreşimi arasındaki korelasyonla ilgili olan bu algoritma, takımla iş parçası arasında bağıl kesme titreşimlerinin olduğunu ortaya koymuştur.

Noker (1993), kesme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü ile ilgili çalışmalar üzerinde bir literatür taraması yapmıştır.

Ghani ve Choudhury (2002) tarafından yapılan çalışmalarda, kesme parametrelerinin ve takım üzerindeki titreşimin, yüzey pürüzlülüğüne ve serbest yüzey aşınması üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin artırılmasıyla serbest yüzey aşınması hızlanmıştır. Serbest yüzey aşınmasının artışıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, serbest yüzey aşınmasının artışıyla takım üzerinde oluşan titreşim genliği ve ivmesinin arttığını ortaya koymuştur.

3. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNİN MEKANİĞİ

Talaşlı imalat, iş parçası yüzeyinin kesici takımlar yardımıyla parça keserek şekillendirilmesi işlemidir. Metal kesme son zamanlarda kontrollü talaş üretme işlemi olmaya başlamıştır. Kaldırılan talaş, kesme bölgesinde kontrol edilebilmekte; işlem sırasında doğan ısının önemli bir miktarı çıkan talaş tarafından uzaklaştırılmaktadır. Metal kesmede talaş oluşumunun kontrolü, operasyonun özelliğine göre öncelik arz edebilir. Genel olarak talaşlı imalatın amacı metali belirli bir şekil ve boyuta getirmekse de verimli bir talaşlı imalat için işlemlerin uygun talaş oluşumunu sağlayacak şekilde yapılması gerekir. Bunun için talaşın uygun bir formda çıkarılması, gerekirse talaşın talaş kırma mekanizmaları ile kırılması sağlanmalıdır. Talaş kırma işleminin nedeni, sadece işlem sırasında oluşacak talaşın depolama kolaylığı değil, aynı zamanda kesme bölgesinden uzaklaşan talaşın temasta bulunacağı takım veya iş parçasına verebileceği zararları engellemek ve oluşan ısının büyük bir bölümünün talaşla ortamdan uzaklaşmasını sağlamaktır(Neşeli 2006).

Modern talaşlı imalat işlemlerinde yapılan işlem ve kaldırılan talaş hacmi ne olursa olsun, kontrollü bir talaş oluşumu şarttır. Talaş kaldırma işleminin anlaşılabilmesi, değişik tipteki metallerin talaşa dönüşmeleri esnasındaki davranışlarının anlaşılmasına bağlıdır. Bu işlemin bir kısmı, talaş kaldırma işleminin kalitesini etkileyen belli başlı faktörler olan deformasyon, sıcaklık ve kuvvetlerin belirlenmesi işlemidir.

Sıcaklık, talaş kaldırma işlemini doğrudan etkilerken, yeterince yüksek olursa, takım malzemesi üzerinde de negatif etkileri bulunur. Kesme kuvvetleri ise işlemin gerçekleştirilmesi için gerekli güç ve momenti doğrudan etkilerler. Kesme kenarlarının tasarımı, belirli işleme şartları altında sıcaklık, kesme kuvvetleri ve talaş teşekkülünün kontrol altında tutulmasını gerektirir. Kesici takım geometrisinin tasarımı sırasında, gerçekleştirilecek talaş kaldırma işleminin, takım ömrü ve uç mukavemeti üzerindeki etkilerinin de dikkate alınması gerekir. Bir kesici kenar ile bir metalden talaş kaldırma sırasında, kesici takım iş parçası malzemesinin bir bölümünü plastik olarak deforme eder ve talaşı keser. Talaş olarak ayrılacak malzeme tabakası üzerindeki gerilmeler, bu tabaka kesici kenara yaklaştıkça artar.

Bu artan gerilmeler malzemenin akma sınırına ulaştığı anda metal içerisinde elastik ve plastik deformasyonlar meydana gelir. İş malzemesinin tipine bağlı olarak değişik talaş tipleri (sürekli, kesintili, kırılgan) oluşur.

Talaş kaldırma işlemi için gerekli enerjinin büyük bir kısmı kayma düzlemi civarında harcanır. Oluşan talaşın takım yüzeyi boyunca akışını sağlamak amacıyla kesici kenar iş parçasına doğru bastırılır ve bunun sonucunda kayma meydana gelir. Metalin kayma düzlemi boyunca olan plastik davranışı, talaşın ve talaş kaldırılan yüzeyin şekil değiştirme (deformasyon) sertleşmesi/zorlaşması üzerine etkide bulunur. Deformasyon sertleşmesi/zorlaşması kesme kuvvetini artırır, kayma açısını azaltarak daha kalın bir talaşın, kesici ucun talaş yüzeyi üzerinde akmasına neden olur. Deformasyon miktarı takımın talaş açısının büyüklüğüne bağlıdır.

Kayma düzlemi iş parçasından kaldırılacak malzemenin talaşa dönüştüğü düzlemdir. Ancak bu düzlemde ortaya çıkan kayma gerilmesinin takım yüzeyi boyunca etkilerinin analiz edilmesi gerekir. Talaş kaldırma sırasında takım/talaş ara yüzeyinde bir etkileşim mevcuttur. Talaş oluşumu, temas uzunluğu üzerine etkide bulunan kayma açısından etkilenir. Talaşın temas uzunluğu boyunca takım yüzeyindeki hareketinin niteliği, talaş kaldırma işleminde dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktördür. Kayma açısının, bu anlamda, talaş ile takım yüzeyi arasındaki temas uzunluğu üzerine bazı etkileri mevcuttur. Bu bölgede kuvvetler ve sıcaklıklar takımı önemli ölçüde etkiler. Kayma açısı küçük ise kayma kuvveti büyüktür. Büyük talaş açısı talaşın daha büyük bir yarıçap etrafında daha az kıvrılması ve daha düşük kuvvetlerin oluşması demektir. Birçok talaş kaldırma işleminde kesme yönünün esas kesme kenarına dik olmayıp belirli bir açı yaptığı eğik kesme söz konusudur ki bu durum takım geometrisini ve talaş akış yönünü değiştirir.

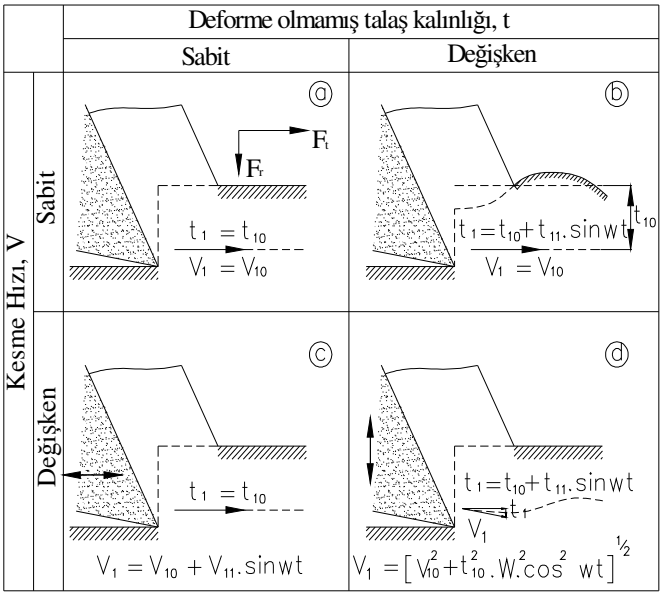
Talaş açısının, temas uzunluğu üzerine etkisi söz konusudur. Temas uzunluğu, büyüyen talaş açısıyla azalır daha büyük pozitif talaş açısı daha küçük temas uzunluğu demektir. Talaş oluşumu deforme olmamış talaş kalınlığına, ilerlemeye, talaş açısına ve iş malzemesinin mukavemetine bağımlıdır ve talaş deformasyon bölgesinde oluşur. Talaş, oluşumunu, talaş kaldırma işlemi esnasında ortaya çıkan eğilme kuvveti etkisiyle tamamlanır.

4. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNİN DİNAMİĞİ

Takım tezgahları, fonksiyonları gereği dinamik yüklerin birçok çeşidine aynı anda maruzdurlar. Bu yüklemeler karşısında takım tezgahlarının gösterdiği davranış biçimleri, takım tezgahlarının dinamik davranışlarını belirlerler. Tezgahlarda her konumda bir dinamik davranış olacağı için, tezgahların tasarımı yapılırken o tezgahın en kritik dinamik davranışının etkilerinin incelenmesi gerekir. Talaş kaldırma esnasında takıma ve buna bağlı olarak iş parçasına, üç eksende kesme kuvvetleri etki etmektedir. Kesme kuvvetleri; esas kesme kuvveti (F_s), dik kuvvet (F_r) ve ilerleme kuvveti (Fv) 'dir.

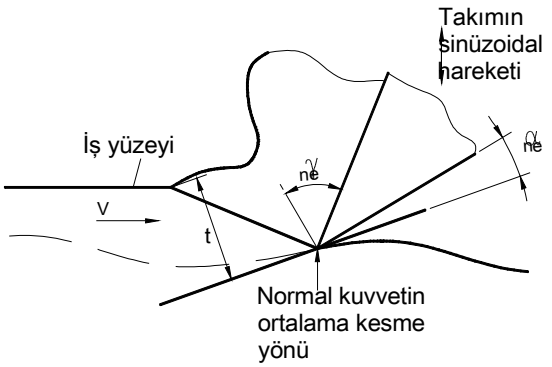
Metal kesme işleminin dinamiğini anlamak için Şekil 4.1'deki dört durumu incelemek gerekir. Şekil 4.1a durumunda, deforme olmamış talaş kalınlığı ve kesme hızı sabittir. Bu durum talaş kaldırmanın kararlı olduğunu gösterir. İkinci durumda kesme hızı sabit olduğu halde, deforme olmamış talaş kalınlığı değişkendir. Üçüncü durumda deforme olmamış talaş kalınlığı sabit olduğu halde, kesme hızı değişken olup, takım kesme doğrultusunda titreşmektedir. Bu durumların herhangi birinde tırlama titreşimi oluşabilir. Başka bir deyişle, bu durumlar kesme işleminde tırlama titreşimi şartları altında ortaya çıkan gerçek durum bileşenleridir. Tırlama titreşimi bunların birinde veya birkaçının bileşkesi olarak ortaya çıkabilir.

Şekil 4.1'deki durumların ayrı ayrı incelenmesi geniş bir inceleme oluşturacağı ve tırlama titreşimi üzerinde en etkili durum son durum olacağı için, bu incelemede deforme edilmemiş talaş kalınlığının ani değerini etkileyen bir harekette takımın radyal kuvvet doğrultusunda izafi takım-iş parçası deplasmanına sebep olan titreşim modu açıklanacaktır. Şekil 4.1-d'deki bu durumda deforme edilmemiş talaş kalınlığı ve kesme hızı değişkendir.



Şekil 4.1 Metal kesme işleminde deforme edilmemiş talaş kalınlığı ve kesme hızının (a ve b sabit, c ve d değişken) değişme durumu

Şekil 4.2'de dalga durumu esnasında sinüzoidal olarak titreşen takımın izleyeceği yol görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi deforme olmamış talaş kalınlığı (t), deforme olmamış talaş kalınlığının değişim hızı (V), efektif normal talaş açısı(γ_{ne}) ve efektif normal boşluk açısı (α_{ne}) sürekli değişmektedir.



Şekil 4.2 Metal kesme işleminde dalga oluşumu

5. TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNE TAKIM GEOMETRİSİNİN ETKİSİ

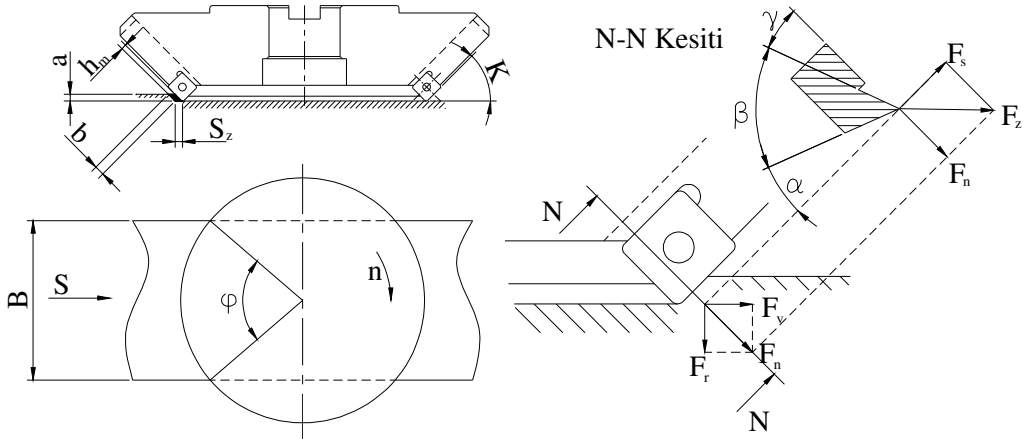
5.1.Alın Frezeleme

5.1.1.Talaş Kaldırma Olayı

Alın frezelemede takım ekseni işlenen yüzeye diktir. Kesme esasen dişlerin yan kenarı ile gerçekleşir(şekil 5.1). Bu bakımdan frezenin yaklaşma açısı (κ) talaş kaldırma olayını önemli ölçüde etkiler. κ=90° ve κ< 90° frezeler vardır; pratikte daha çok κ< 90° (κ=45°…..60°) olan frezeler kullanılır. Frezenin önemli boyutu D çapıdır.

Frezenin konumu işlenen yüzeyin B genişliğine göre simetrik veya asimetrik olabilir. Simetrik frezelemede frezenin yatay ekseni, işlenen yüzeyin orta çizgisi ile çakışır. Asimetrik frezelemede bu iki çizgi çakışmaz. Simetrik frezelemede B=D olduğu durumda işlem tam kavrama B<D olduğu durumda kısmi kavrama şeklinde olur.

Freze ile parça arasında iyi bir kavrama sağlamak amacıyla genellikle B<D olan kısmi kavramalı frezeleme tercih edilir. Bu bakımdan frezenin çapı D: kısa talaşlı, örneğin dökme demir gibi malzemeler için D=1,4 B; uzun talaşlı, örneğin çelik gibi malzemeler için D=1,6 B alınır.



Şekil 5.1.Alın frezelemede açılar ve kesme kuvvetleri

5.1.2. Kesme hızı ve ilerleme

Çevresel frezelemede olduğu gibi alın frezelemede de kesme hızı ve devir sayısı;

$V = (\pi D\, n/1000)$ m/dak (5.1)

$n = (1000V/\pi D)$ dev/dak (5.2)

Diş başına ilerleme, ilerleme ve ilerleme hızı;

$s_z = \frac{s}{z} = \frac{u}{n\,z}$ (mm/diş) (5.3)

$s = s_z\, z$ (mm/dev); (5.4)

$u = s_z.z.n$ (mm/dak) (5.25)

bağıntıları ile tayin edilir.

5.1.3.Talaş boyutları

Alın frezelemede talaş kalınlığı değişkendir. Pratikde hesapları kolaylaştırmak amacıyla aşağıdaki bağıntılarla tayin edilen ortalama talaş kalınlığı (h_m) alınır. Simetrik frezelemede;

$$h_m = \frac{360}{\pi\varphi^\circ} s_z \frac{B}{D} \sin\chi \quad (5.6)$$

veya

a/D= 0,6……0,85 olduğu durumda ;

$h_m = 0{,}88\ s_z\ \sin\chi$ (5.7)

şeklinde yazılır.

Talaşın genişliği b, a kesme derinliği olmak üzere;

$b = a/\sin\chi$ (5.8)

bağıntısı ile tayin edilir.

Bu bağıntılara bağlı olarak ortalama talaş kesiti ;

$A_s = b\ h_m = 0{,}88\ s_z\ a$ (5.9)

şeklinde ifade edilir.

5.1.4.Kesme kuvvetleri

Şekil 5.1'de frezelemede kesme kuvvetlerinin durumu gösterilmiştir. Ağıza normal N-N kesitte F_z kuvveti, kesme kuvveti F_s ve normal kuvvet F_n ilerleme kuvveti F_v ve radyal kuvvet F_r olarak ayrılır. Burada da bir dişe karşılık gelen ortalama kesme kuvveti

$$F_{sz}= A_s\, k_s= b\, h_m\, k_s \qquad (5.10)$$

ve frezeye karşılık gelen ortalama kesme kuvveti

$$Fs= ze\ Fsz = ze\ b\ hm\ ks \qquad (5.11)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k_s özgül kesme kuvveti ve z_e kavramada bulunan diş sayısıdır.

Ortalama radyal kuvvet (F_r) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_v) deneylere dayanan aşağıdaki bağıntılara göre tayin edilebilir.

Simetrik frezelemede:

$$Fv = (0{,}3\ldots..0{,}4)\ F_s \qquad (5.12)$$

$$F_r= (0{,}85\ldots\ldots.0{,}95)\ F_s \qquad (5.13)$$

$$Fa= (\ 0{,}5\ldots\ldots0{,}55)\ F_s \qquad (5.14)$$

5.2.1 Talaş kaldırma işlemine yaklaşma açısının etkisi

Yaklaşma açısı, kesici kenar ile ilerleme yönü arasında kalan açıdır. Bu açı talaşın oluşumunu etkilediği gibi kesme kuvvetlerinin yönünü, kesme işlemine katılan kesici kenar uzunluğunu, kesici kenar ile iş parçası arasındaki temas alanını ve kullanılan takım ile yapılacak talaş kaldırma işlemlerini de etkiler. Yaklaşma açısı 45°-90° arasında değişir. Yaklaşma açısı kesici takımın çeşitli yönlerde talaş kaldırmasına izin verecek ve işlemler için gerekli takım sayısını azaltacak şekilde seçilmelidir. Buna ek olarak, kesici takım daha büyük bir uç açısına, dolayısıyla daha güçlü bir uca sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Uygun yaklaşma açısının seçimiyle talaş kalınlığı azaltılarak basıncın daha büyük bir kesici kenar uzunluğu üzerine dağılımı sağlanır. Yaklaşma açısının kesme başlangıcında ve sonunda

takımın mukavemeti, kesme esnasında kuvvetlerin etkime yönleri ve talaş akışı üzerinde etkisi vardır (Çakır 1999).

Yaklaşma açısı, talaş derinliği ve talaş genişliği üzerine etki etmekte olup, bu açının artması ile talaş genişliği azalırken talaş kalınlığı ise artar. Yaklaşma açısı 90º olduğunda $Sin\kappa = 1$ olduğu için talaş kalınlığı ilerleme miktarına eşit olur .

Verilen talaş derinliğinde birim alandaki yük, dik kesmedeki kesici takımla karşılaştırıldığında, meyilli takımların kullanılması ile azalır. Daha büyük yaklaşma açısı da büyük kuvvet oluşturur.

Yaklaşma açısının 90°'den küçük olması halinde kesici uç parçaya en zayıf noktası olan uç kısmıyla değil, çok daha güçlü, ilk darbeye çok daha dayanıklı olan ana kesici kenarıyla girer ve ilk temastan itibaren aşırı bir darbeye maruz kalmadan kesme işlemini sürdürür. Uygun bir yaklaşma açısının seçimi halinde özellikle tufallı veya sert kabuklu yüzeylerde kesici kenar sert tabakayı ezmek yerine kesecek, iş parçasına girişte büyük bir avantaj sağlanacaktır. Tufallı veya sert kabuklu, sert tabakanın aşındırıcı özelliğinden dolayı yaklaşma açısının doğru seçilmesi takım ömrü üzerinde olumlu etkide bulunur (Çakır 1999).

Kesici uç parçadan çıkarken yaklaşma açısı, parçanın son kısmında kalan malzeme tabakası üzerinde, takımın ilerlemesi nedeniyle oluşan basıncı ve kesici kenar üzerindeki basınç değişimini etkiler. Büyük bir yaklaşma açısıyla kesme bölgesinin terk edilmesi durumunda kesici kenar üzerindeki basıncın aniden sıfırlanmasından dolayı ilerleme ve talaş kalınlığında ani bir artış görülecek ve kesici uç öne doğru bir esneme yapacaktır. Bu fazla yük kesici kenarın kırılmasına neden olabilir. 90°'lik bir yaklaşma açısında talaş derinliği efektif kesici kenar uzunluğuyla aynı uzunluğa sahiptir. Bu durumda talaş kalınlığı ilerlemeye eşittir. 45°'lik bir açı için, aynı ilerleme ve talaş derinliğinde kesici kenar uzunluğu çok büyük bir artış gösterir (yaklaşık olarak iki kat artar) talaş kalınlığı ise azalır.

Yaklaşma açısındaki değişim ilerlemeyi ve bunun sonucunda talaş debisini etkiler ve aynı talaş derinliği ve talaş kalınlığı için daha büyük bir ilerleme değeri elde edilir. Bu durum, genellikle basınç dağılımı ve kesici kenarın daha büyük bir kısmının kullanılması açısından avantajlıdır. Talaş kalınlığı, yaklaşma açısının değeri değiştikçe ilerlemeye bağlı olarak değişir. Yaklaşma açısının seçimi, kesici kenar üzerindeki birim alana gelen basıncı belirlemesi nedeniyle, takım ömrünü

etkiler. Talaşın kalınlığı yaklaşma açısı ve kesici kenarın dayanabileceği basınç miktarı ile ilişkilidir. İnce bir talaş, basıncı kesici kenar boyunca dağıtır ve kalın talaşa göre daha düşük güç gerektir (Çakır 1999).

Bir parçanın işlenmesi için geçen zaman ilerlemenin arttırılması ile ve 90°'den küçük bir yaklaşma açısı kullanılması ile azaltılabilir. İlerlemedeki artış işleme zamanının azaltılmasını ve kesici kenarın daha iyi kullanımını sağlayacak, takım ömrü artacak, dolayısıyla verimlilik artacaktır.

Yaklaşma açısının daha küçük seçilmesi daha büyük uç açısına sahip, daha mukavemetli kesici uçların kullanımına imkan verir. Bu durumda kesici kenarın daha büyük bir kesiti olacaktır. İş parçasına giriş ve çıkışta daha avantajlı olan küçük yaklaşma açıları genellikle mukavemeti arttırmak amacıyla kullanılmalı, büyük yaklaşma açıları ise sadece 90°'lik faturalara doğru olan talaş kaldırma işlemlerinde ve profillere erişiminin zor durumlarda tercih edilmelidir (Çakır 1999).

Yaklaşma açısı yatay düzlemdeki kesme kuvvetlerinin yönünü de etkiler. Büyük bir yaklaşma açısı büyük bir ilerleme kuvveti ve daha küçük bir radyal kuvvetin ortaya çıkmasına neden olurken daha küçük yaklaşma açısı kuvvetler arasında daha dengeli bir ilişkinin kurulmasını sağlar.

Takımın yaklaşma açısı, açı küçüldükçe talaş kalınlığının azalması ve genişliğinin artması nedeniyle, talaş oluşumunu etkiler. Daha küçük yaklaşma açılarında (45°-60°) talaş oluşumu daha yumuşak ve daha düzgündür. Talaşların şekli ve yönü kesici kenarın köşe radyüsüne bağlı olarak değişir.

Talaş akış yönünü yaklaşma açısı kadar talaş kalınlığına bağlı olarak köşe radyüsü de etkiler. Küçük talaş kalınlıkları köşe radyüsünden etkilenen, dairesel (virgül) şekilli talaş kesitlerinin elde edilmesini; büyük talaş derinlikleri ise köşe radyüsünden daha az, yaklaşma açısından daha fazla etkilenen dışa dönük, spiral talaş kesitlerinin elde edilmesini sağlar. İlerleme, talaş kesitinin genişliğini ve talaş akışını etkiler.

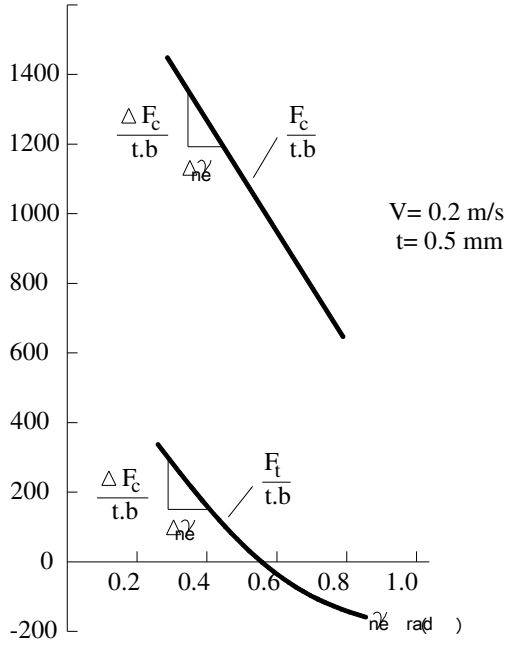
Verilen kesme şartlarında takım geometrisindeki değişikler, talaş oluşumu üzerinde iki etkiye sahiptir: birincisi, kayma açısı üzerine etki diğeri ise talaş kalınlığı üzerine etkidir. Bu iki etki birbiriyle ilişkili ve birinin değişimi diğerini etkiler. Pozitif uçlu takımlar daha küçük kama açısının (β) kullanılmasına müsaade eder. Dolayısı ile daha düşük takım kuvvetleri oluşur. Talaş açısı değerinde artış

hem ilerleme hem de kesme kuvvetlerini düşürür. Talaş açısının optimum bir değeri mevcut olup, daha fazla artış kesici ucun dayanımını zayıflattığından aşınmayı arttırır. Kayma düzlemi temas alanı azaldığı için titreşim yapma eğilimi azalır. Bu uçlar giderek artan oranda kullanılmaktadır. Pozitif ucun dezavantajı daha küçük kama açısına sahip olduğundan daha fazla talaş derinlikleriyle kesme yapıldığında takım ömrü azalır, takım kırılma riski artar.

5.2.2. Talaş kaldırma işlemine talaş ve boşluk açılarının etkisi

Şekil 4.2'deki dalga oluşumunda, takım titreşirken efektif normal boşluk açısı α_{ne} ve efektif normal talaş açısı γ_{ne} değerlerinin ikisi de değişme gösterir. Şekil 5.2'de belirli bir iş malzemesi ve kesme hızı için talaş açısındaki değişimin, takım kuvvetlerini nasıl etkilediği görülmektedir. Genel olarak talaş açısı arttığında, kuvvet bileşenlerinin azalacağı ifade edilebilir. Talaş açısındaki küçük bir değişme nedeniyle kuvvetlerdeki değişme aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir (Şişman 1989);

$$\Delta F_t = t.b.q_t.\Delta\gamma_{ne}$$
$$\Delta F_c = t.b.q_c.\Delta\gamma_{ne} \qquad (5.15)$$



Şekil 5.2 Efektif normal talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisi

Takımın iş parçasına dalması sonucunda deforme olmamış talaş kalınlığının artması, denklem (5.15)'de negatif bir sönümleme etkisi gösterir, efektif talaş açısı artar ve böylece dalmaya karşı koyan Fv kuvvet bileşeni azalır.

6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Talaşlı imalat sırasında iş parçasında istenmeyen izler oluşur. İşleme metodu, kesicinin cinsi, işlenen malzeme ve kesme parametreleri, fiziksel, kimyasal ve ısıl faktörler ve kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareketlere bağlı olarak, nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denir (Güllü 1995).

İşleme metodu ne olursa olsun (lepleme, taşlama, tornalama vb.) talaş kaldırılan yüzeylerde belli bir yüzey pürüzlülüğünün oluşması kaçınılmazdır.

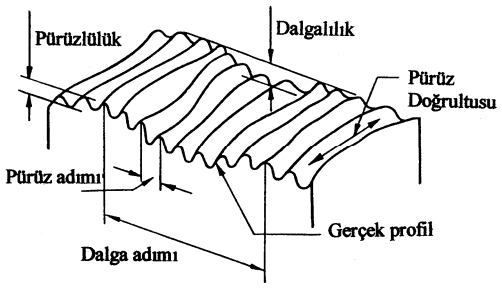
Farklı metotlarla işlenen aynı malzemelerin yüzey pürüzlülükleri sayısal değer olarak aynı olmasına rağmen bazen bunların aşınma, korozyon, sürtünme ve yorulma dirençlerinin farklı oldukları bilinmektedir. Çünkü yüzeydeki işleme izlerinin yönleri ve dağılımları da performansı etkiler. Bu nedenle işlenecek parçaların bazılarında yüzey pürüzlülük değerinin yanında işleme metodunun da belirtilmesi istenir.

Kaliteli işlenmiş bir yüzey, korozyon direncini, yorulma mukavemetini ve sürtünme ömrünü önemli derecede artırır. Ayrıca pürüzlülük, yüzey sürtünmesine sebep olan temas, aşınma, ışık yansıtma, ısı iletimi, yağ filminin tutulması ve dağıtılması kabiliyeti, kaplama veya direnç ömrü gibi parçaların çeşitli fonksiyonel özelliklerini de etkiler. Bundan dolayı ihtiyaç duyulan kaliteye ulaşmak için istenilen yüzey tamlığı belirlenerek uygun işlemler seçilir.

Tırlama veya takım tezgahı titreşimleri, iş malzemesinin yapısındaki hasarlar, takım aşınması veya talaş oluşumunun düzensizlikleri, işleme sırasında yüzeyin bozulmasına katkıda bulunurlar (Boothroyd 1989). Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek ve ilerleme veya kesme hızı gibi işleme parametrelerinin uyumunu değerlendirmek ürün kalitesini yükseltir ve istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesine ışık tutar.

6.1. Yüzey Yapısının Özellikleri

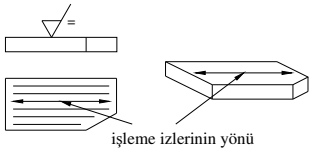
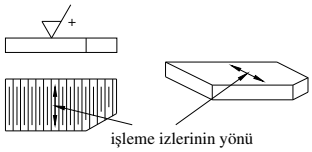
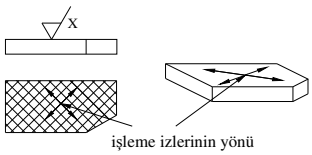
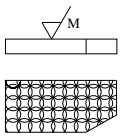
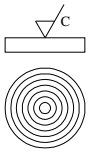
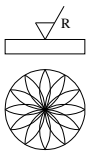
Bir yüzey yapısının kontrolünde yorulma ömrü, yataklık etme özelliği ve aşınma önemli faktörlerdir. İşlenen yüzeylerde dalgalılık ve pürüzlülük olmak üzere iki tip yüzey sapması meydana gelir. Dalgalılık yüzeyin geometrik şeklini karakterize ederken, pürüzlülük yüzey kalitesini tayin eder. Yüzey pürüzlülüğü standartlara göre yüzeye dik olan bir kesitte, belirli bir numune uzunluğu boyunca, belirli bir referans profiline ve profil ortalama çizgisine göre tayin edilir. Referans profil olarak genellikle geometrik profil alınır. Profil ortalama çizgisinin yeri, bu çizginin üstünde ve altında kalan alanların toplamı birbirine eşit olacak şekilde belirlenir. Düz bir yüzey denildiğinde dalgasız, pürüzsüz denildiğinde dalgalı, fakat gözle bakıldığında veya tırnakla kontrol edildiğinde, pürüzlülükleri fark edilemeyen yüzeyler anlatılmak istenir. Doğrultu, yüzey pürüzlerinin referans alınan bir alın yüzeyine göre durumunu belirler. Yüzey geometrileri, işleme metoduna bağlı olarak değişir. Şekil 6.1'de işlenmiş bir yüzey geometrisi görülmektedir (Galyer 1989).



Şekil 6.1. İşlenmiş bir yüzeyin yüzey karakteri

TS 2040 EN ISO 1302'a göre işleme izleri; izdüşüm düzlemine paralel, dik, her iki yönde çapraz, çok yönlü dairesel ve radyal olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 6.1) (Bağcı 1979).

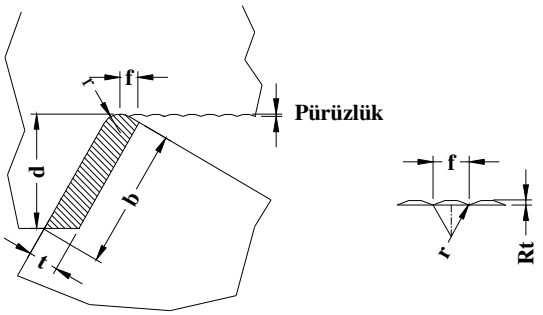
Tablo 6.1. İşleme izlerinin yönünün sembolik ifadesi.

Sembol	Açıklama
=	Sembolün uygulandığı görünüşün izdüşüm düzlemine paralel izler. 
+	Sembolün uygulandığı görünüşün izdüşüm düzlemine dik izler. 
X	Sembolün uygulandığı görünüşün izdüşüm düzlemine göre her iki yönde eğik çapraz izler. 
M	Çok yönlü izler. 
C	Sembolün üzerine konulduğu yüzeyin merkezine göre yaklaşık olarak dairesel izler. 
R	Sembolün üzerine konulduğu yüzeyin merkezine göre yaklaşık olarak radyal izler. 

Kesici ucu, istenilen kalitede (pürüzlülük değerinde) talaş kaldıramadığı noktada değiştirilmelidir. Pürüzlülük, işlenen yüzeyde örnek uzunluk boyunca ölçülen, küçük alanlı mikro düzensizliklerdir. Yüzey kalite standartlarının tespit edilmesinde, pürüzlülük değeri referans alınmalıdır. Bu, özellikle ince talaşta (son pasoda) büyük önem taşır. Metal kesmede yüzey yapısını, işleme operasyonu esnasında, malzemenin plastik akışından doğan düzensizlikler tayin eder.

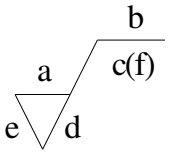
Yüzey yapısı, esas itibariyle işleme metoduna, titreşimlere, tezgah kızaklarındaki hatalara, takımın tip ve durumuna, kesme parametrelerine, iş malzemesine ve toplam kararlılığa bağlı olarak değişir. Takım ucunun yuvarlatılması, talaş kesitinin bombeli teşekkülüne sebep olur. Bu durumda gerçek

talaş kesiti, teorik talaş kesitinden daha küçük olur ve aradaki fark, parça üzerinde artık talaş olarak kalır. Bu kaldırılmamış talaş kesiti, yüzey pürüzlülüğünü meydana getirir (Şekil 6.2) (Akkurt 2000).



Şekil 6.2. Takım uç yarıçapı ve ilerlemenin pürüzlülüğe etkisi.

Daha hassas işlenmiş yüzeyler sayesinde birçok makinenin performansı artar. Bu amaçla, istenen yüzey kalitesinin elde edilmesinde esas alınacak standart yüzey pürüzlülük değeri belirlenir ve bu değer resim üzerinde bir sembol ile gösterilir (Şekil 6.3). Pürüzlülük değerleri, sınıf ve numaraları TS 2040 EN ISO 1302 ile standartlaştırılmıştır.



a : R_a pürüzlülük değeri (N1-N12)
b : İşleme metodu
c : Esas uzunluk (mm)
d : İşleme izlerinin yönü
e : İşlenecek aşırı kalınlık (mm)
f : Diğer pürüzlülük değerleri

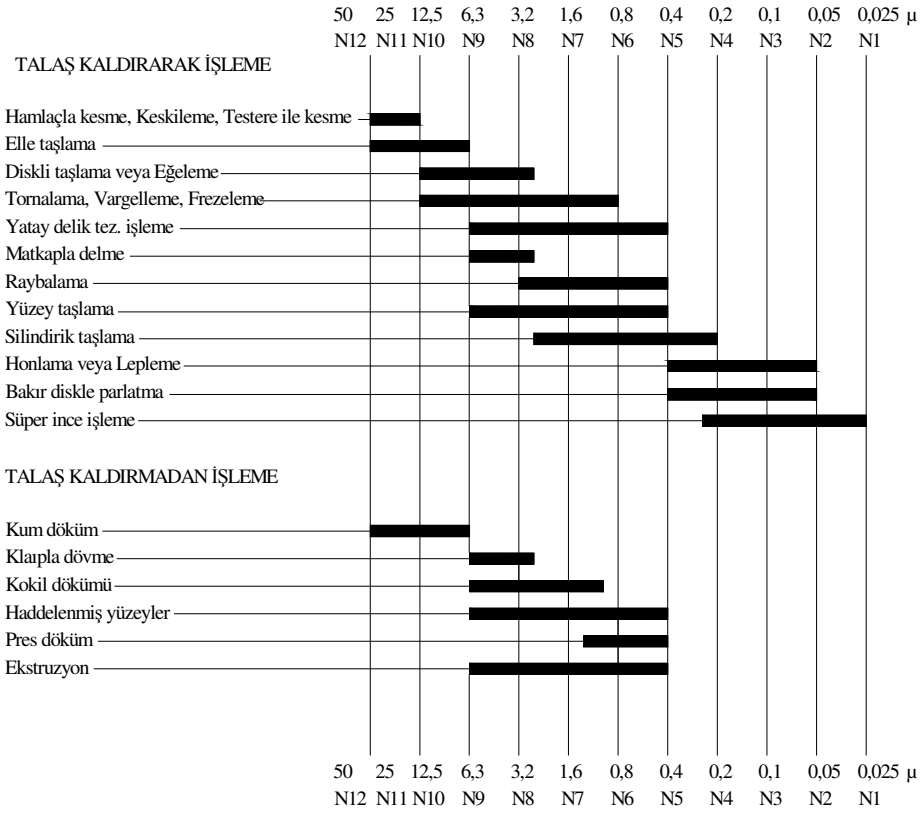
Şekil 6.3. Yüzey pürüzlülük özellikleri.

Belirlenmiş yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ve sınıf numaraları on iki kalite olarak tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Pürüzlülük değerleri ve sınıf numaraları

Pürüzlülük Değeri *R*a		**Pürüzlülük Sınıfı Numarası N**
µm	**µinç**	
0.025	1	N1
0.05	2	N2
0.1	4	N3
0.2	8	N4
0.4	16	N5
0.8	32	N6
1.6	63	N7
3.2	125	N8
6.3	250	N9
12.5	500	N10
25	1000	N11
50	2000	N12

Tablo 6.2'de belirtilen pürüzlülük değerlerinin hangi işleme usulleri ile elde edilebileceği Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Pürüzlülük değerleri ve hangi işlemlerle elde edildiklerinin gösterimi.

6.2. Yüzey Hatalarının İncelenmesinde Genel Kurallar

Son işlemesi yapılmış bir yüzeyin pürüzlülük değeri belirlenirken karşımıza üç boyutlu uzay problemi çıkar. Ancak yüzeye dik alınan bir kesit düzlemi üzerinde hata profillerinin incelenmesi ile problem iki boyuta indirgenebilir. Bu durumda pürüzlülüğün derecesi, seçilen bu düzlemin konumuna bağlıdır. Eğer pürüzler doğrultusunda ölçüm yapılırsa, elde edilen pürüzlülük değerinin, pürüzler doğrultusuna dik yapılan ölçümle elde edilene göre daha az olması tabiidir. Bu, tek doğrultulu pürüzlü yüzeyler için doğrudur. Çok yönlü karmaşık izlerde, iki ayrı yönde yapılan ölçüm sonuçları arasında fark daha az olur. Tek yönlü izlerin olduğu yüzeylerde, herhangi bir yön belirtilmemişse, ölçümler iz doğrultusuna dik yapılmalı, çok yönlü izlerde ise birkaç değişik yönde yapılan ölçümlerin ortalaması alınmalıdır. Tatmin edici bir değer vermesi için esas pürüzlülük izlerinin dalga boyu ne kadar büyük ise, numune uzunluğu o kadar büyük alınmalıdır. Yüzey tamlığı numarası; taşlama, honlama gibi farklı metotlarla üretilen, fakat eşit pürüzlülük değerine sahip yüzeyler arasındaki yapı farklılıklarını göstermez. Bunun için yüzeylerin grafiklerinin çizilmesi gereklidir. Yüzey kalitesi farklı işleme metotları için takım geometrisine, takım özelliklerine ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kesme parametrelerine bağlı olarak yazılabilir.

Tornalama için;

$$R_t = \frac{f^2}{8r} \tag{6.1}$$

Frezeleme için;

$$R_t = \frac{f.r^2.1000}{4D} \tag{6.2}$$

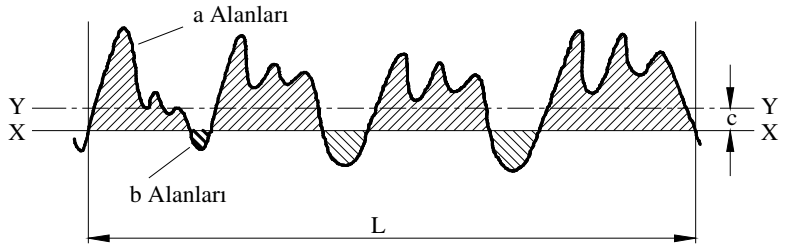
bağıntısı yazılabilir (Sandvik Coromant 1996). Takım ve parça arasındaki titreşimler sebebiyle, gerçek pürüzlülük değeri, yukarıdaki bağıntıdan elde edilenden daha küçüktür.

6.3. Yüzey Kalitesinin Sayısal Olarak Değerlendirilmesi

Yüzey kalitesi ölçme problemini çözmek için, üç boyuttan iki boyuta indirgemek ve grafik ortalamalarıyla sonucu göstermek mümkün olmasına rağmen, tasarımcının bu şekilde gerekli olan yüzey kalitesini açıkça belirleyebilmesi pratik bir metot değildir. Grafik metodunu, ne üretim mühendisi, ne de kalite kontrol elemanı kolayca yorumlayamaz. Bu yüzden ihtiyaç duyulan şey, yüzeyin fonksiyonel özelliklerine ait bazı ilişkilerin yer aldığı ve sayısal olarak yorumlanabilmesidir. Yüzey kalitesinin sayısal değerlerinin belirlenebileceği iki metot otoritelerce kabul edilmiştir. Bunlar; genellikle ortalama çizgi ve zarf sistemi olarak bilinir (Güllü 1995).

6.3.1. Ortalama çizgi (*M*) sistemi

Ortalama çizgi, elde edilen geometrik profili tasdik eden bir yöntem olarak tanımlanabilir. Bu ortalama çizgi öyle bir yere yerleştirilmiştir ki, bu çizgi ile profil arasındaki ordinatların karelerinin toplamı minimum olmalıdır. Dolayısıyla ortalama veya merkez çizgisi pratikte profilin genel yönüne paralel bir çizgi olarak belirlenebilir ve bu çizginin altında ve üstündeki profili oluşturan alanlar (a ve b) birbirlerine eşittir.



Şekil 6.5. Ortalama çizgi konumunun belirlenmesi (Scarr 1991).

Verilmiş olan bir profil için ortalama çizginin konumu, aşağıda açıklanan yöntemle belirlenebilir. Şekil 6.5 de gösterildiği gibi bir *XX* doğrusu çizilir. Bu çizgi uygun örnekleme uzunluğu (*L*)'nin üzerindeki profilin genel yönüne paraleldir. Bir

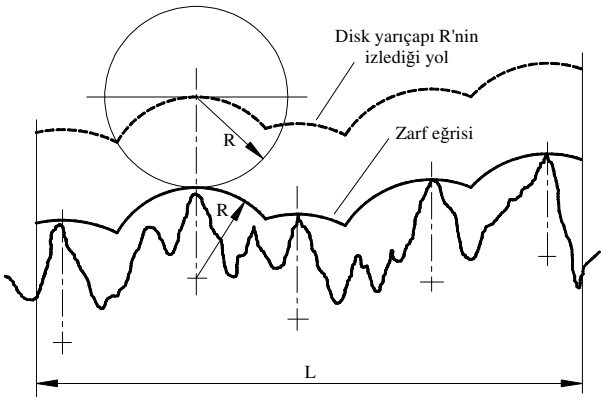
planimetre veya ordinat metodu kullanılarak *a* ve *b* alanları ölçülür. Sonra *XX* ve istenen ortalama çizgi *YY* arasındaki *c* mesafesi şu şekilde verilir.

$$c = \frac{\sum Alan\ (a) - \sum Alan\ (b)}{L} \tag{6.3}$$

6.3.2. Zarf sistemi (*E*)

Zarf sistemi, izlere karşı yuvarlanan bir dairenin yarıçapı tarafından üretilen bir çizgi esasına dayanır. Daire merkezinin hareketinden oluşturulan bu eğri *R* mesafesi tarafından düşey olarak yerleştirilmiştir. Bu çizgi yüzeyin üzerinde yer alır. Şekil 6.6'da gösterildiği gibi zarf eğrisi, ideal geometrik profile dik açılarda en yüksek profile doğru çizilen ordinatlar tarafından oluşturulur.

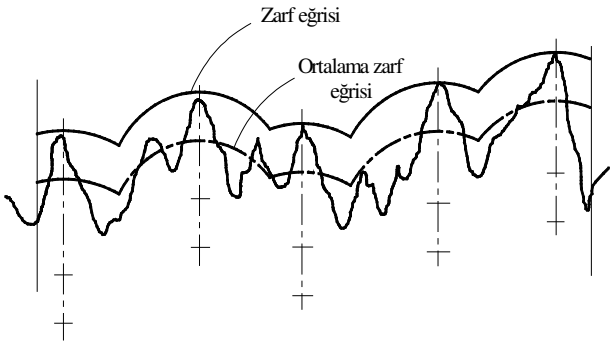
Yarıçap *R*'nin dairesel yayları ordinatlar üzerindeki merkezleriyle birlikte tepelere doğru çizilerek zarf eğrisini oluşturur. Bu eğrinin oluşumu yüzey kalitesinin grafik çıktısının dikey ve yatay eksenlerde aynı oranda büyütüldüğünü kabul eder.



Şekil 6.6. Zarf eğrisinin elde edilişi (Scarr1991).

Dikey büyümelerin yataydaki büyümelerden dikkati çekecek kadar fazla olması ve dairesel yayların bozularak eliptik şekil alması olağandır. Eğer *V* dikey büyüme ve *H* da grafiğin yatay büyümesi ise zarf profili dairesel yayların yarı çaplarının *R* yerine $(RxH^2)/V$ olarak düzeltilmesiyle yeniden elde edilir. Daha sonra üretilmiş haldeki temas eden zarf çizgisinin altında ve üstünde eşit olan yüzey

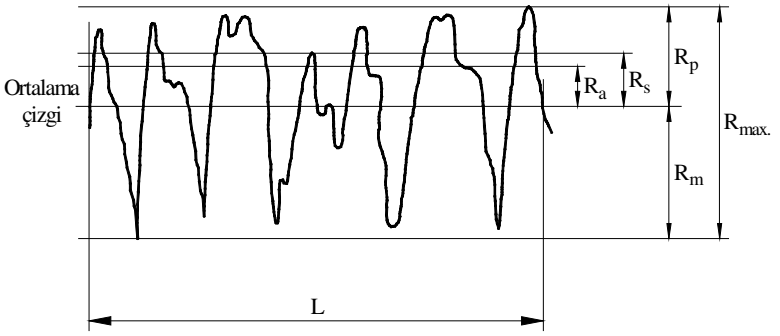
profili tarafından kapatılmış yayların pozisyonu ile değiştirilebilir. Bu durum Şekil 6.7'de görülmektedir. Bunun manası, zarf eğrisi *M* sistemindeki ortalama çizgiyi karşılar (Scarr 1991).



Şekil 6.7. Ortalama zarf eğrisi (Scarr 1991).

6.4. Yüzey Kalitesini Belirlemede Esas Alınan Sayısal Değerler

Birkaç farklı yoldan birisiyle, sayısal bir yüzey kalite profilinin verilmesi, başlangıç noktasının sağlanması için zarf sistemi veya ortalama çizgi sisteminin kullanılması ile mümkündür. Yine de şu anlaşılmalıdır ki, basit bir sayısal değer çeşitli geometrik yönlerin sadece birisinin ölçümü olduğu sürece yüzeyin geometrisini tamamen açıklayamaz.



Şekil 6.8. Yüzey kalitesi için sayısal değerler (Scarr 1991).

Belirtilen herhangi bir değerin seçimi yüzey kalitesinin görünümüne bağlıdır. Bununda fonksiyonel görüntü noktasından kontrolü çok önemlidir. Aşağıda

açıklanan değerler en çok kullanılan değerlerdir ve onların ortalama çizgi veya zarf sistemine eşit olarak uygulanabilirliği tekrar vurgulanmıştır.

6.5. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Yüzey kalitesinin sayısal değerlerinin belirlenebileceği "*ortalama çizgi*" (*M*) ve "*zarf sistemi*" olarak adlandırılan iki yöntem kullanılmaktadır. Gelişmiş ülkelerin büyük bir çoğunluğu *M* yöntemini benimsemekte, bu ülkelerin bir kısmı ortalama pürüzlülüğü (R_a) bir kısmı da en büyük pürüzlülüğü (R_{max}), yüzey pürüzlülük ölçme kriteri olarak kullanmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, pürüzlülük değerine bağlı olarak değişen ve "*değerlendirme uzunluğu*" olarak tanımlanan standart bir aralıkta ölçülmektedir (Thomas 1981).

Yüzeyde oluşan girinti ve çıkıntıların alan bakımından eşitlendiği orta eksenin üstünde ve altında kalan alanların aritmetik ortalamasını veren çizgiler arası mesafe R_a, orta eksenin altında ve üstünde meydana gelen sapmaların geometrik ortalama değeri R_q (rms), değerlendirme aralığındaki en yüksek beş çıkıntı ile en derin beş girintinin mutlak değerlerinin ortalaması R_z, değerlendirme aralığındaki filtre edilmemiş pürüzlülüğün en yüksek çıkıntısı ile en derin girintisi arasındaki mesafe R_{max} (R_y), filtre edilmiş pürüzlülüğün en yüksek tepesi ile en derin girintisi arasındaki mesafe de R_t olarak adlandırılmaktadır. Bunların dışında pürüzlülükle ilgili daha onlarca parametre tanımlanmaktadır (Scarr 1991, ISO 4287/1-1984, Dagnall, 1980)

6.5.1. Ortalama eksen çizgi değeri (cla, R_a)

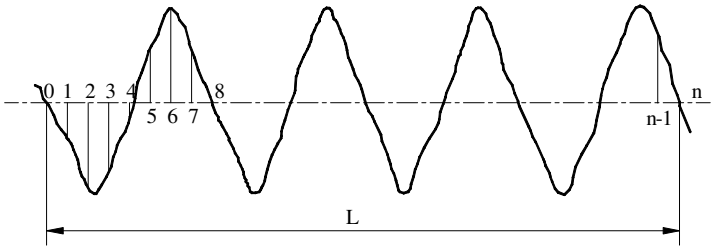
Bu parametre aritmetik ortalama pürüzlülük değeri *AA* (arithmetic average) veya *CLA* (center line average) olarak bilinir ve pürüzlülüğün en çok kullanılan parametresi olup genel olarak R_a diye tanımlanır. R_a, profil düzensizliklerinin ortalamasını vermesi sebebiyle, genel yüzey yapısı hakkında önemli bir kriterdir. R_a tahmin tekniğinin hassas, güvenilir, düşük maliyetli ve tahribatsız yapılması önemlidir.

Diğer bir tarife göre R_a seçilen örnekleme uzunluk sınırlarında, eksen çizgisinin altında ve üstünde oluşan profil sapmalarının aritmetik ortalama değeridir. (ISO 4287/1-1984) Şekil 6.8'de işaret edilen durum matematiksel olarak şöyle açıklanabilir; pürüzlülük profili ve onun orta çizgisi arasındaki alan veya örnekleme uzunluğu üzerindeki pürüzlülük profil yüksekliğinin mutlak değerinin integralidir.

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^1 \left|y(x)\right| dx \tag{6.4}$$

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left|y_i\right| \tag{6.5}$$

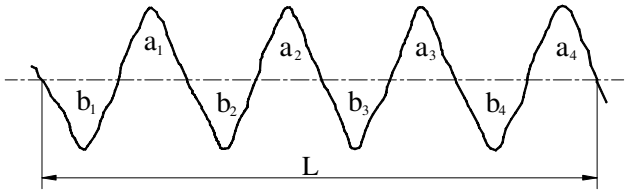
Burada *l*:örnekleme uzunluğu, *y*:ortalama eksen çizgisinden bağımsız dikeydeki yer değiştirmelerdir.



Şekil 6.9.Ordinatlarla R_a'nın gösterimi (Galyer 1993).

Ayrıca R_a yüzeyin bütün ordinatlarının orta çizgiden ortalama yüksekliği olarak ta tanımlanabilir. Şekil 6.9'de gösterilen ordinatlara 1,2,3,….,*n* ve ordinatların yüksekliklerine $h_1,h_2,h_3,\ldots..h_n$ dersek bağıntı aşağıdaki gibi olur:

$$R_a = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \ldots\ldots + h_n}{n} = \frac{\sum h}{n} \tag{6.6}$$



Şekil 6.10. Alanlarla R_a'nın gösterimi (Galyer 1993).

R_a'nın değeri Şekil 6.10'da görüldüğü gibi, düzensiz bir alan eşit uzunlukta bölünerek bu uzunluklara tekabül eden orta çizginin (eksen çizgisinin) üstünde (*a*) ve altında (*b*) kalan alanlar, planimetre ile ölçülüp bu alanların toplamının örnek uzunluğa (*L*) bölünmesi ile de belirlenebilir (Galyer 1993).

$$R_a = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{L} = \frac{\sum Alan\ (a) + \sum Alan\ (b)}{L} \qquad (6.7)$$

R_a değerini elde etmek için toplam alanın örnekleme uzunluğuna oranı düşey büyütmeye bölünür ve μm dönüşümü için 10^3 ile çarpılır;

$$R_a = \frac{\sum alan\ (a) + \sum alan\ (b)}{L} x \frac{10^3 \mu m}{Düşey\ Büyütme} \qquad (6.8)$$

Burada $\sum A =$ Toplam alan (mm^2), $L =$ Pürüzlülük izinin boyu (mm)'dur.

Maalesef, düzgün geometrik profillerden başka, tepe-dip yükseklikleri ve ortalama eksen çizgisi arasında sabit bir ilişki bulunmamıştır. Örneğin; sinizoidal profiller için $R_t / R_a = \pi$ ve kare şeklindeki profiller için $R_t / R_a = 4$ ilişkisi bulunmuştur. Pratikte R_t / R_a, tornalama ve frezelemeyle üretilmiş kaba yüzeyler için 3~5 arası alınırken, honlama ve leplemeyle üretilmiş daha ince yüzeyler için bu oran 14'e kadar alınır.

6.5.1.1. İşleme parametrelerinin R_a ile ilişkisi

R_a ile kullanılan kalemlerin geometrik özellikleri ve tezgah işleme parametreleri teorik olarak ilişkilendirildiğinde;

$$R_a = \frac{f}{4(\tan C_s + \cos C_e)} \qquad (6.9)$$

Burada *f* ilerleme hızı (mm/dev), C_s takımın yardımcı kenar açısı, C_e takım ayar açısıdır. Takım uç yarıçapı *r* olan bir takım için (6.9) denklemi aşağıdaki şekle dönüşür:

$$R_a = \frac{0,0642 f^2}{r} \tag{6.10}$$

(6.10) denklemden anlaşılacağı üzere pürüzlülük değeri ilerleme ve takımın uç yarıçapıyla bağıntılıdır. Uç yarıçapı 0,4 mm olan bir takım sıfır uç yarıçaplı (teorik) bir takıma göre sekiz kat daha küçük yüzey pürüzlülüğü verir (Begeman 1987).

6.5.2. Maksimum tepe-dip yüksekliği (R_{max}, R_t)

Şekil 6.6'da gösterildiği gibi, örnekleme boyunda dikkate alınan en yüksek tepe ve en düşük dip arasındaki mesafe tepe-dip yüksekliği olarak adlandırılır. Bu R_t değeri, örnekleme boyundaki yüzey düzensizliklerinin frekansı göz önüne alınmazsa yüzey pürüzlülüğünün tam bir tanımıdır.

Şekil 6.11'de gösterilen yüzey profilinin (R_t)'si gösterilmiştir. Fakat, yüzey kalite özelliklerinde büyük bir farklılık olduğu açıktır.



Şekil 6.11. Tepe-dip yüksekliği aynı olan yüzey örnekleri (Scarr 1991).

Tepe-dip yüksekliği ortalama değerini daha da iyileştirmek için, en yüksek tepe ve en düşük dip hesaba katılmaz. Böylece örnekleme uzunluğunda çok yüksek tepe ve dibin bulunması etkili olmaz.

6.5.3. Ortalamaların kareleri toplamının karekökü (R_q, R_s, rms)

Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarında, eksen çizgisinin altında ve üstünde meydana gelen sapmaların geometrik ortalama değeridir. Matematiksel olarak şöyle açıklanabilir:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^1 y^2(x)dx} \tag{6.11}$$

Eğer şekil 6.9'deki eşit aralıklı ordinatlar $h_1, h_2, \ldots\ldots h_n$ ise;

$$h_{r.m.s.} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \ldots\ldots + h_n^2}{n}} \tag{6.12}$$

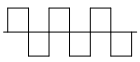
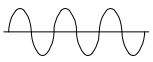
$$h_{r.m.s.} = \left(\frac{1}{L}\int_0^L h^2 dL\right)^{\frac{1}{2}} \tag{6.13}$$

şeklinde ifade edilir.

rms'ye karşılık elde edilen sayısal değer yaygın olarak kullanılmaz. Ortalama değer eksen çizgisi, alan ölçme metotları yoluyla bir grafiğin kolayca ölçülmesi ve izleyici ucun hareketinin hesaplandığı bir elektriksel cihazdaki okuma kolaylığı ve ortalama sonucun bir sayaç üzerinde okunuyor olması avantajlar sağlamaktadır.

R_q ve R_a arasındaki ilişki sabit değildir. Girinti ve çıkıntıların her ikisi de yuvarlak şekilli ise $R_q/R_a = 1.11$ olurken (Tablo 6.3), taşlama gibi işlemlerle elde edilen yüzeyler için ise $R_q/R_a = 1.3$'e kadar değişmektedir.

Tablo 6.3. Değişik pürüzlülük profilleri için R_q/R_a oranları (Yim ve Kim 1991).

Teorik Profiller	Yüzey Tipleri
Kare  $\frac{R_q}{R_a}=1.0$	$\frac{R_q}{R_a}=1.0$
Sinüzoidal  $\frac{R_q}{R_a}=1.11$	1.10 — Tornalanmış yüzey — 1.15
Üçgen  $\frac{R_q}{R_a}=1.15$	
Rasgele  $\frac{R_q}{R_a}=1.25$	1.18 — Taşlanmış yüzeyler — 1.3
Düz  $\frac{R_q}{R_a}=1.48$	1.3 — Leplenmiş yüzeyler — 1.5

6.5.4. Profil maksimum tepe yüksekliği (R_p)

Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en yüksek tepe (çıkıntı) ile temas eden ve eksen çizgisine paralel olan çizgi ile, eksen çizgisi arasındaki mesafedir. Böylece R_p değeri geniş çıkıntı ve dar girintilerden oluşan yüzeylerde küçük, dar çıkıntı ve geniş girintilerden oluşan yüzeylerde büyük olur.

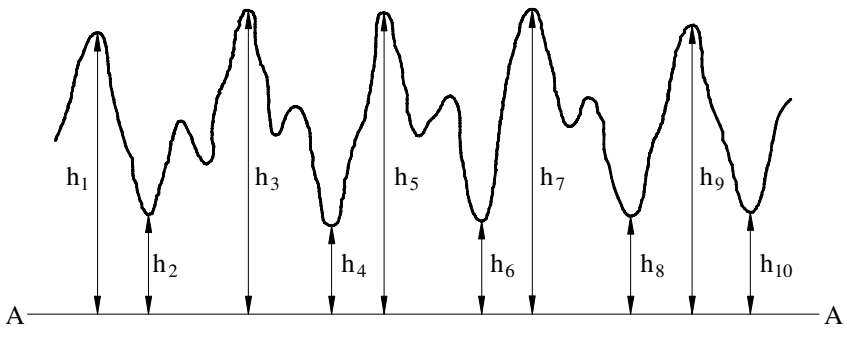
6.5.5. Profil maksimum dip derinliği (R_m)

Seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en dip girintiye temas edecek şekilde ve eksen çizgisine paralel olarak çizilen doğru ile, eksen çizgisi arasındaki mesafedir.

6.5.6. On nokta yüksekliği (Rz)

Profilin seçilen örnekleme uzunluk sınırlarındaki en yüksek beş tepe noktasının yükseklikleri ile en derin beş dip arasının derinliklerinin mutlak değerlerinin ortalamasıdır (Şekil 6.12).

$$R_z = \frac{\left[\left(h_1 + h_3 + h_5 + h_7 + h_9\right) - \left(h_2 + h_4 + h_6 + h_8 + h_{10}\right)\right]}{5} \tag{6.14}$$



Şekil 6.12. On nokta yükseklik hesabı için ortalama ölçümler (Yim ve Kim 1991).

6.5.7. Örnekleme uzunluğu

Sayısal değer olarak pürüzlülük belirleneceği zaman, seçilen profil uzunluğunun etkisi dikkate alınmalıdır. Basit periyodik biçimli yüzeyler için seçilen örnekleme boyu önemsizdir, çünkü adımların sayısı, sonucu yorumlamak için yeterlidir.

Bir örnek uzunluk L_1, maksimum tepe-dip değeri R_{t1} değeri ile bağlantılı olacaktır. Eğer örnek uzunluk L_2'ye artırılırsa tepe-dip değeri de R_{t2}'ye artırılmış olacaktır. Bundan dolayı, birbirine uygun sonuçlar elde etmek için yapılan ölçmeye uygun örnek uzunluk seçilmelidir. Seçilen örnek uzunluk yüzey yapısının görünümünü temsil edecek büyüklükte olmalıdır (Mike, 1999).

6.5.8. Yüzey yapısı

Yüzey tamlığı ve yüzey pürüzlülüğü endüstride yaygın olarak kullanılan terimler olup genellikle yüzey tamlığının düzlemselliğini nitelemek için kullanılır. 1947'de yüzey yapısı ile ilgili Amerikan standardı B46.1-1947 önceki standardı gölgede bırakacak şekilde yüzey metrolojisinin ve terminolojisinin bir çok kavramını tanımlamıştır. Bir kaç kavram da Broseer (1948), Hommen (1988), Olivo (1987) ve Asme (1988) tarafından tartışılmıştır. Yüzey yapısı nominal bir yüzeyden sapan yüzeyin modelidir. Bu sapmalar tekrarlı veya rasgele olabilir ve pürüzlülük, dalgalılık, konum ve yüzey kusurlarından kaynaklanabilir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.9. Gerçek yüzey

Bir cismin gerçek yüzeyi onu dış ortamdan ayıran dış kabuktur. Bu yüzey form hataları, dalgalılık ve yüzey pürüzlülüğü olarak sınıflandırılan yapısal sapmaları aynı şekilde yansıtır (Mike, 1999).

6.5.10. Pürüzlülük

Yüzey pürüzlülüğü yüzey yapısının çok küçük düzensizliklerini ihtiva eder ve bu düzensizlikler işleme işleminin tabii hareketinden kaynaklanır. Pürüzlülük ve dalgalık profilleri Şekil.6.1'de gösterilmiştir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.11. Pürüzlülük genişliği

Pürüzlülük genişliği takip eden tepe veya pürüzlülüğün hakim modelini oluşturan sert noktalar arasındaki nominal yüzeye paralel mesafedir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.12. Pürüzlülük izleme (cut-off) genişliği

Pürüzlülük izleme genişliği tekrarlanan yüzey düzensizliklerinin en büyük aralığını gösteren ortalama pürüzlülük yüksekliğinin ölçümünü ihtiva eder. 1/1000 inç olarak ifade edilir. Standart cut-off değerleri 0.08, 0.25, 0.8, 2.5 mm'dir. Eğer herhangi bir değer belirtilmezse 0.8 mm kabul edilir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.13. Dalgalılık

Dalgalılık bütün düzensizlikleri ihtiva eder. Onun aralığı pürüzlülük örnekleme uzunluğundan daha büyük ve dalgalılık örnekleme uzunluğundan daha azdır (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.14. Dalgalılık yüksekliği

Dalgalılık yüksekliği dip ve tepe değerleri arasındaki mesafedir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.15. Dalgalılık genişliği

Dalgalılık genişliği ardışık dalga tepe noktaları veya dip noktaları arasındaki mesafedir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.16. Konum/pozisyon

Normal olarak işleme metodu tarafından tayin edilen hakim yüzey modelinin doğrultusudur (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.5.17. Kusur/hata

Kusurlar parça yüzeyinin tipik topografyasındaki planlanmamış, beklenmedik ve istenmeyen kesintilerdir (Mike, Josep ve Cabel 1999).

6.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçme Metotları

6.6.1. Dokunma metodu

En eski ve hala kullanılan bir metottur. Bir iğne, kalem ve hatta tırnak ucunun bir yüzey üzerine işleme yönüne dik olarak sürülmesiyle, yüzeyin pürüzlülüğü hakkında bilgi edinilir (Barash 1966).

6.6.2. Mekanik metot

Tornebohm'a (1936) göre, çelik bilye kullanılarak minimum 500 gram ağırlığın yüzey üzerine düşürülmesi sonucu; yüzeyin içine doğru 1 μm'lik yer değiştirmesi yüzey pürüzlülüğünün bir ölçümüdür.

6.6.3. Hidrolik metot

Kamnev (1966), 200 mm boyunda eğik bir düzlemde 0.25 cm^3 yağ damlasının geçiş süresi ve düzensizliklerinin 10 nokta yüksekliği ilişkisi neticesinde bir eşitlik elde etmiştir. Bu metotla 2~50 μm'lik R_z değeri elde edilir.

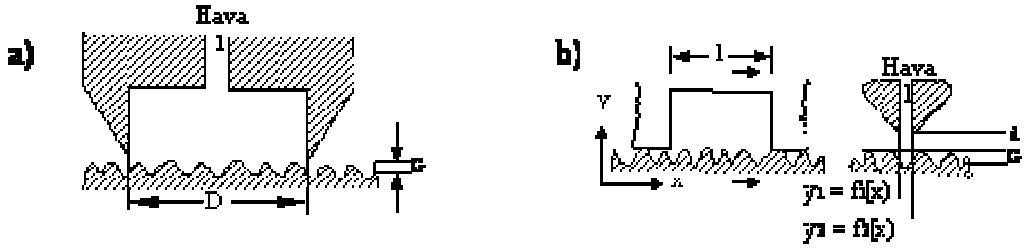
$$R_z = 0.13\ x\ t^{3.7} \tag{6.15}$$

6.6.4. Pnömatik metot

Pnömatik ölçme metotlarının kullanımı, düz yüzeylerin pürüzlülüğünün ölçülmesi için Nicolau tarafından araştırılmış ve yaklaşık 5 mm çapında bir dairesel ölçme başlığı kullanılmıştır (Şekil 6.13). Eğer bu başlık ucunun dairesel yüzey alanı $y = f(x)$ eşitliği ile tanımlanırsa, pürüzlülük (G) hava için alan göstergesi prensibine göre aşağıdaki eşitlikle bulunmuştur (Nicolau 1937).

$$G = \frac{1}{\pi D}\int ydx \tag{6.16}$$

$$G = d\left(\int_0^l y_1 dx + \int_0^l y_2 dx - 1\right) \tag{6.17}$$



Şekil 6.13. (a) Düz yüzeyler için çanak biçimli dairesel başlık (b) İnce uzun kanallı başlık (Nicolau 1937).

Wunsch ve Graneek (1952), yüksek basınçlı hava kullanımıyla yüksek hassasiyetli, hızlı tepki özellikli ve 0.05~3.7 μm R_a değerleri için lineer taksimatlı bir cihaz geliştirilmiştir. Bu cihaz düz yüzeyler gibi silindirik yüzeylerde de

kullanılabilir. Bu cihazın ölçme başlığında hava göndermek için 125 μm çaplı ve ölçüm yapılacak yüzeyden 46 μm yukarıda bir delik vardır. Bu başlığın ağız açıklığı 2.54 mm olarak tavsiye edilir. Delik ağzının her bir bölgesindeki yüzey eşitliği $y_1 = f_1(x)$ ve $y_2 = f_2(x)$ ise yüzey pürüzlülüğü eşitliği yukarıdaki gibi verilir.

6.6.5. Yüzey dinamometresi metodu

İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı, sürtünen parçaların yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Sürtünme katsayısının dinamometre ile ölçülmesi sırasında elde edilen *F* kuvveti yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılıdır (Swigert, 1942).

6.6.6. Kapasitans metodu

Ortalama pürüzlülük yüksekliğinin ölçümü (R_c) bir paralel plakalı kondansatörün kapasite değişimine dayanılarak yapılabilir. Plakalardan birisi referans alınacak olan kondansatörün düzgün yüzeyi, diğeri ise test edilecek yüzeydir. Her iki yüzey birbirlerinden katı bir yalıtkan ile ayrılmış olmalıdır. Yalıtkana temas eden pürüzlülüğü ölçülecek yüzey arasındaki boşluklara havanın dolmasıyla ikinci bir yalıtkanlık oluşur. Böylece yüzey pürüzlülüğü aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Neşeli 2005).

$$R_c = \left(A/4\pi C - \frac{t}{D} \right) D_a \tag{6.18}$$

A : Levhaların nominal alanı,

C : Sistem kapasitansı,

t : Yalıtkan kalınlığı,

D : Yalıtkan geçirgenlik katsayısı,

D_a : Hava geçirgenlik katsayısı.

6.6.7. X Işını metodu

Guentert (1966), çalışmasıyla mikroskop altında yüzey düzensizliklerine küçük açılarla gönderilen *X* ışınları 0.00254~0.0508 μm arasındaki yüzey pürüzlülük yüksekliklerinin ölçümünü sağlar (Neşeli 2005).

6.6.8. Elektron mikroskobu metodu

Elektron mikroskobu en küçük düzensizlikleri ölçme gücüne sahip olmasına rağmen, ölçüm yapılacak yüzey boyutunun küçük tutulması zorunluluğu ve yüzey pürüzlülüğü görüntüsünü kopyalama sırasında oluşabilecek zorluklar bu metodun kullanımını sınırlar (Neşeli 2005).

6.6.9. Optik mikroskop metodu

Herhangi bir parçanın yüzeyi bir büyüteç veya mikroskopla gözlenebilir. İncelenecek numunenin yüzeyine yoğunlaştırılmış ışın gönderilerek aydınlatılır. Işınların etkisi ve mercek vasıtası ile meydana gelen şeklin görüntüsüne bakılarak yüzeydeki boşluklar ve onların meydana getirdiği en büyük açı ve yüzey yapısı hakkında değerlendirme yapılır (Neşeli 2005).

6.6.10. Kesit alan metodu

Numunenin ince kesitinin alınmasından sonra yüzey koruyucu bir metal tabaka ile kaplanır. Yüzeyin dik kesitinden optik yansıtma yapılarak yüzey düzensizliklerinin büyütülmüş hali görüntülenir, gerekirse şeklin optik olarak daha da büyütülmesi mümkündür. Bu metodun dezavantajı numunenin tahrip edilmesi ve yavaşlığıdır (Neşeli 2005).

6.6.11. Karşılaştırma mikroskobu metodu

Cihazın çıplak gözle bakılan ekranında; hem kontrolü yapılacak yüzeyin büyütülmüş kesitini, hem de arka planda kıyaslamaya esas alınan yüzeyin büyütülmüş kesitini birlikte görmek mümkündür. Bu kıyaslamada; aynı malzemeden yapılan, aynı işleme metodu ile en iyi sonucu veren iş parçasının görünüşü referans alınırsa, aynı grubu oluşturan diğer iş parçalarının uygunluk kontrolü kolayca yapılabilir (Neşeli 2005).

6.6.12. Optik yansıtma metodu

Bir yüzeyin yansıtması pürüzlülüğün bir fonksiyonudur. Eğer ışığın dalga boyu R_q (rms) değerinden çok büyükse, yansıtma sadece yüzey pürüzlülüğüne bağlı olup, düzensizliklerin eğimine bağlı değildir. Böyle durumlarda ρ_0'ın (pürüzsüz yüzeyin yansıtması) ρ'ya oranı aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$\log_{10}\frac{\rho_0}{\rho} = \left(4\pi R_q\right)^2 \Big/ \left(2,303\right)\lambda^2 \qquad (6.19)$$

Yüzeyin iki ayrı dalga boyunda ölçülmesi, yüzey pürüzlülüğünün ve pürüzlülük eğimlerinin R_q'larının hesaplanmasına imkan verir (Neşeli 2005).

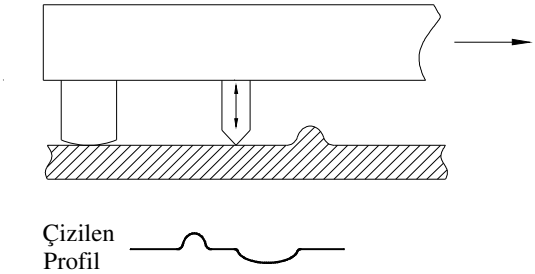
6.6.13. Interferometri metotları

Bir ışın huzmesi bölünüp iki ayrı uzunluktaki yoldan gönderildikten sonra birleştirilirse, bu ışığın yoğunluğu ya maksimum ya da minimumdadır. Bu ise; ışınların ya aynı fazda yada 180 derece faz farkında bulunmalarına bağlıdır. Huzmelerden birinin küçük bir alanda yansıtılmasıyla elde edilen büyütülmüş ışın girişim modeli yoluyla yüzey pürüzlülüğü incelenebilir (Neşeli 2005).

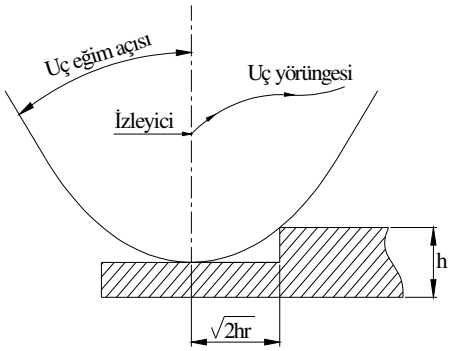
6.6.14. İzleyici uçlu cihazlar metodu

İzleyici uçlu cihazlar, kullanılan çok sivri bir izleyici ucun, ölçüm yapılan yüzey üzerinde, yüzey düzensizliklerine çapraz yönde ve değerlendirme uzunluğu boyunca hareket ettirilmesi ve hareket boyunca meydana gelen titreşimlerin büyütülerek, yine hareketli bir şerit üzerine kayıt edilmesi veya göstergeden okunması esasına dayanır (Reason 1970). İzleyici ucun yüzey üzerindeki baskısı çok azdır ve pürüzlülük büyütme oranı 100.000 kata kadar çıkabilir.

Numune yüzeyini ölçmek için kullanılan iğnenin idealde keskin bir uca sahip olması gerekir. Bu ise pratikte mümkün değildir. İğnenin ucundaki sonlu yarıçap, ölçme yapılan yüzeyin şekline bağlı olan hareketin hassasiyetinde bazı kayıplara sebep olur. İzleyici ucun sonlu yarıçapından dolayı meydana gelen hatanın pratikte çok ciddi olmadığı görülmüştür. 0.0001 inç yarıçaplı bir uca sahip olan iğne 0.0002 inç genişliğinde bir hata ile ölçmesi beklenirken, sonucun bundan daha iyi olduğu görülmüştür (Şekil 6.14).



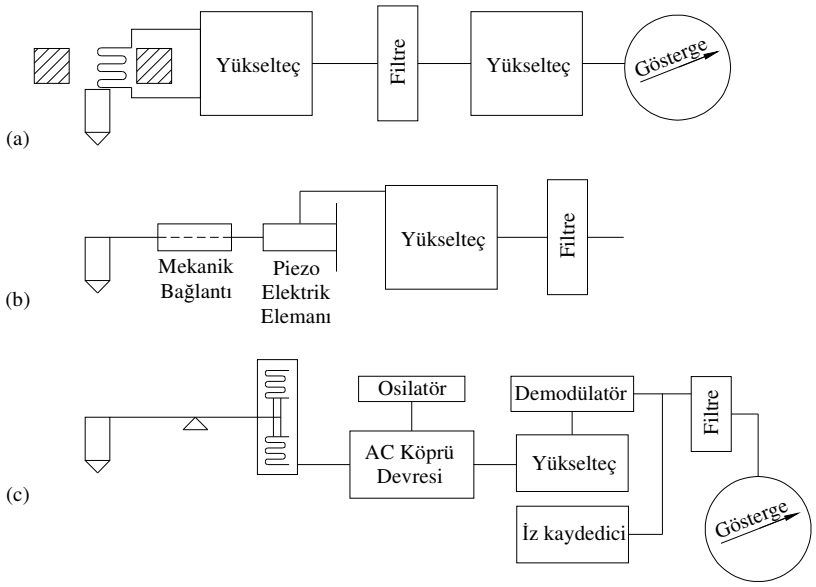
Şekil 6.14. Ölçüm yapılan yüzeyleri birbirinden ayıran bir tepe üzerinden, izleyici uca kızaklık eden elemanın geçmesi ile profilde ortaya çıkan yanlış dipin şematik gösterimi (Song 1990).



Şekil 6.15. Küçük, keskin bir basamak üzerinden geçen küresel uçlu izleyicinin takip ettiği yolun şematik gösterimi (Song 1990).

Bu cihazlar mekanik, pnömatik, optik veya elektronik olarak yapılmışlardır. En yaygın olanı elektroniktir, zira elektrik sinyalleri kolaylıkla işlenebilir. İzleyici ucun mekanik yer değiştirmelerini elektrik sinyallerine dönüştürmede kullanılan transdüserler iki çeşittir. Bunlar:

a) Akım (şekil 6.16a) veya gerilim (Şekil 6.16b) üreten cihazlar,
b) Sinyal tarayıcı modüle cihazları (Şekil 6.16c)

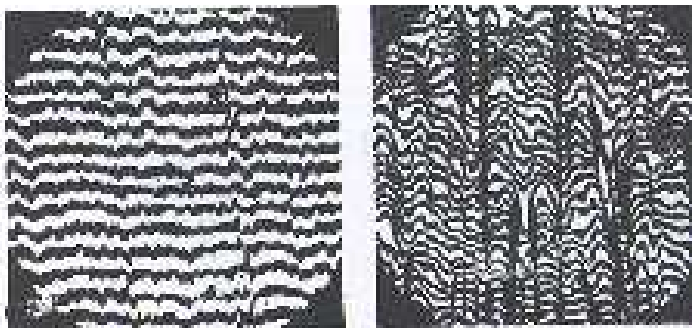


Şekil 6.16. İzleyici uçlu elektronik cihazların şematik gösterimleri. (a) Akım üreten cihaz, (b) Gerilim üreten cihaz, (c) Sinyal modüle cihazı (Reason 1960).

6.6.15. Optik parazit aletleri metodu

Çok düzgün yüzeyler parazitlenme bakımından test edildiklerinde, yüzeyler optik olarak parlatılmadıkları sürece, yüzey izleri testere dişi görüntüsünde olacaktır. Bu görüntü yüzey üzerinde mevcut olan yüzey bozukluklarından kaynaklanmaktadır. Parazit mikroskobu, bir optik yüzeyin yardımıyla oluşturulan yüzey izlerinin büyütülmesini sağlar.hatta yana doğru yüzey kalite düzensizliklerinin büyütülmüş görüntüsünü verir ve onların derinliklerini büyütür. Bu ise, yüzey izleri boşluk etkilerinin bir sonucudur. Şekil 6.17a'da bu tip alet tarafından çekilmiş taşlanmış bir çelik yüzeyin fotoğrafı görülmektedir. İki veya üç yüzey izi boşluğu arasındaki tepeden dipe olan yükseklik 20~30 μinç'tir.

Şekil 6.17b'de görülen leplenmiş bir çelik yüzeyi beklendiği gibi düzgündür. Onun yüzeyindeki düzensizlikler genellikle yüzey izi boşluklarının bir çeyreğini aşmaz, örneğin 2 ila 3 µinç. Buna 8 µinç derinliğinde olan merkezdeki bozulma dahil değildir (Sandvik Coromant 1996).



a) b)

Şekil 6.17. Taşlanmış (a) ve Leplenmiş (b) Çelik yüzeyler (Sandvik Coromant 1996).

6.6.16. Replika (Mask) metodu

Yüzey kalitesi ölçümünün gerektiği bazı durumlarda, yüzeyin parça üzerindeki yeri nedeniyle, pürüzlülük ölçümü yapmak mümkün olmayabilir. Bu durumda, ölçüm yapılacak yüzeyin önce bir maskının çıkarılması zorunludur. Selüloz-asetat filmi asetonla yumuşatılır ve sertleşene kadar temizlenmiş yüzeye bastırılırsa elde edilen mask yüzeyin karakterini yaklaşık %80 oranında temsil eder. Çağdaş teknolojide bugün epoksi ve diğer reçine türlerinden yararlanarak %100'e varan sonuçlar elde edilmektedir (Neşeli 2005).

6.6.17. Elektro-fiber-optik sistem metodu

Yüzey pürüzlülüğü ölçülecek malzeme x-y yönünde hareket edebilen ayarlanabilir bir tablaya bağlanır ve malzeme yüzeyi yatay konuma getirilir. Malzeme, sabit ve dik konumda olan fiber-optik algılayıcı altından x-y tablası hareketi ile sabit bir hızla geçmektedir. Algılayıcıdan malzeme yüzeyine dik olarak

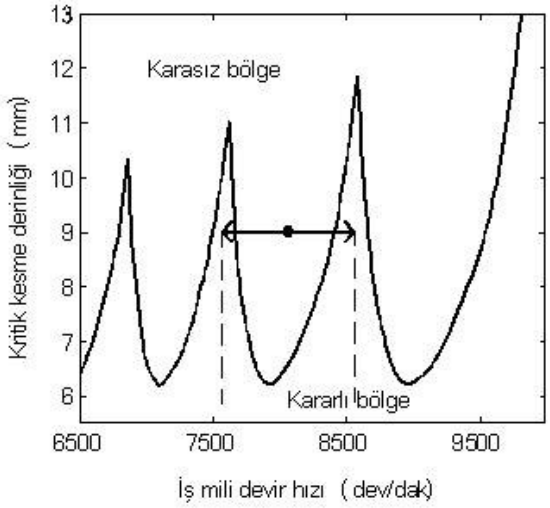
gönderilen ve malzeme yüzeyine odaklanmış ışın yüzeyden yansımaktadır. Malzeme yüzeyi ile 45˚ açı yapacak ve yüzeyle arasında 1 mm açıklık olacak şekilde yerleştirilen fiber-optik kablo yüzeyden yansıyan ışının bir kısmını diğer ucuna yerleştirilen foto algılayıcıya taşımaktadır.

Malzeme yüzeyine gelen ışınlar, yüzeyin pürüzlü olması nedeni ile dağılıma uğrar ve yansıma açıları farklı olacak şekilde yansırlar. Malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğe sebep olan mekanik çizgiler arasındaki mesafe ışık dalga boyu mertebesinde ise yüzey bir ışık kırıcı gibi davranış gösterir. Böylece malzeme yüzeyine gelen ışınlar farklı ışıma fazında yansırlar (spektruma ayrılır). Bununla birlikte malzeme yüzeyindeki çizgilerin düzensiz oluşu, yansıyan farklı fazdaki ışımada, ışık şiddeti dağılımına neden olur. Böylece foto algılayıcının üreteceği elektriksel çıkış düzensiz olacak, buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü belirlenmiş olacaktır (Neşeli 2005).

7. TAKIM TEZGAHLARINDA KARARLILIK

İşleme merkezlerinde kendiliğinden-doğan titreşimler olmaksızın imalat yapılabilmesi için, öncelikle kararlılık diyagramlarının elde edilmesine gerek vardır. Bu diyagramlar sayesinde, verilen bir iş mili-takım tutucu-takım (MTT) kombinasyonu için, titreşim problemlerine neden olmayan talaş derinliği-iş mili devir hızı eşlemesi pratik olarak yapılabilmektedir. (Neşeli 2006)

Şekil 7.1'de kararlılık diyagramlarının bir örneği görülmektedir. Sınırın altındaki bölgede tırlamasız işleme yapılabilirken sınırın üstünde kalan bölgede tırlama kaçınılmaz olmaktadır. Bu diyagramların en önemli yararlarından birisi de kesme derinliğinin çok yüksek olduğu ceplere karşı gelen kesme hızlarını da göstermesidir. Bu sayede tırlama olmadan hem kesme ve ilerleme hızları hem de derinlik çok fazla arttırılabildiği için, işleme süresinde çok önemli düşüşler sağlanabilir.



Şekil 7.1 Tipik bir kararlılık diyagramı

Kendinden-doğan titreşimler oluşmadan üretim yapabilecek işleme koşullarını belirleyen bu diyagramlar, doğal olarak iş mili-takım dinamiğinin bir fonksiyonudur. Kararlılığın nasıl elde edildiğini anlamak, takım tezgahlarında yüksek devirli üretim sürecine bir "kapalı döngü kontrol problemi" olarak bakmayı gerektirmektedir.

Bilindiği gibi bazı girdilere sistemin kararsız yanıt vermesi, kapalı döngü kontrol sistemlerinin yapısında olan bir durumdur. Bu noktada gerekli olan, sistemin kararlılık sınırlarını elde etmektir. Konuyla ilgili ilk çalışmalar Tlusty ve Polacek (1957), Tobias ve Fiswick (1958) tarafından birbirinden bağımsız olarak ve neredeyse aynı dönemde yayınlanmıştır. Daha sonra Merrit (1965) Nyquist kararlılık kriterini kullanarak yeni bir teori önermiştir. Koenigsberger ve Tlusty (1971), kesme kuvvetlerinin yönü ve benzeri ayrıntıları da göz önünde bulundurarak çalışmalarını geliştirmişlerdir. Bu çalışmaya dayanarak, MTT kombinasyonu için kararlılık diyagramlarının oluşturulmasında kullanılan temel ilişki şu şekilde yazılmıştır:

$$b_{\lim} = \frac{-1}{2mK_f \operatorname{Re}\left[G(\omega)\right]} \tag{7.1}$$

Burada; K_f, talaş kalınlığı yönündeki kesme kuvveti katsayısı; m, takım ucundaki ortalama diş sayısı; $G(\omega)$, MTT sisteminin takım ucu direkt FTF'si ve $b_{\lim}$ kritik kesme derinliğidir. $\operatorname{Re}\left[G(\omega)\right]$ karmaşık bir fonksiyon olan $G(\omega)$'nın gerçek kısmını ifade etmektedir. Bu denklem sayesinde, belirli bir iş mili devir hızındaki kritik kesme derinliği değeri ($b_{\lim}$) hesaplanabilmektedir.

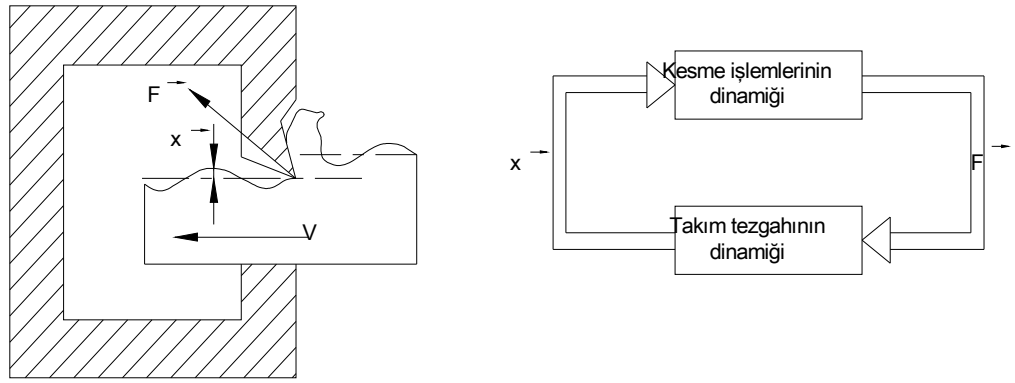
Takip eden çalışmalarda, Tlusty ve Ismail (1981) tırlamanın önceden tahmini için analitik çözümün zorluğunu göz önünde tutarak, frezeleme süreci için yaklaşık bir sayısal model ve zaman boyutunda benzetimler oluşturmuştur. Frezeleme süreçlerinde takım sürekli döndüğü ve kesici uçlar sırayla parçaya girip çıktıkları için kararlılık analizleri çok daha karmaşıktır. Minis ve Yanushevsky (1993) frezeleme işlemi süreç kararlılığı çözümünde Floquet Teoremini ve Fourier serilerini kullanarak diyagramların oluşturulması açısından önemli bir adım atmıştır. Bu sayısal çalışmaların sonrasında, Altıntaş ve Budak (1995) frezeleme işleminde süreç kararlılığını çözmek için analitik bir yöntem sunmuştur. Daha sonra Budak ve Altıntaş (1998) yenilenebilir kesme kuvveti harmoniklerini ve tezgah-iş parçasının iş mili yönündeki değişken dinamiğini hesaba katan çalışmaları yayınlamıştır.
Kararlılık limitlerinin analitik olarak elde edilmesi için gereken takım ucu FTF'si $G(\omega)$, deneysel ya da teorik olarak elde edilebilir.

8. İŞLEME OPERASYONLARININ KAPALI BİR ÇEVRİM SİSTEMİ GİBİ DÜŞÜNÜLMESİ

İşleme esnasında takım-iş parçası arasındaki yüklenmelerden dolayı tezgahta şekil değişiklikleri meydana gelecektir. Tezgah dağılmış kütleye sahip olduğu için çok sayıda rezonans frekansına sahiptir. Bu frekanslar freze çakıları ve azdırmalar kullanılarak kesintili olarak kesme yapılmasıyla ikaz edilmiş olacaktır. Bunların yanında tornalama, planyalama, delme gibi sürekli talaş işlemleriyle de ikaz edilebilirler. Bunun sebebi talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılabilen, iş parçası üzerinde herhangi bir sert nokta, kesici takım üzerinde oluşan talaş sıvanması (BUE) ve/veya talaş kırılması, takım ucunun sapma miktarındaki değişme (böylece kesme derinliğinde değişme) gibi sebeplerle aniden değişen kesme kuvvetleri, yapıyı sık sık uyarır. Bu uyarımlar tırlama olarak bilinen titreşimin oluşabileceği gerekli şartları ortaya çıkartabilir, bazen da gittikçe hafifleyerek yok olur. Bu fiziksel prensiplerin daha iyi anlaşılması, yukarda belirtilen şartların rahatsız edici tesirlerinden nasıl kaçınılacağının bilinmesini sağlar (Neşeli 2006).

Şekil 8.1a'da işleme operasyonunun şematik olarak bir gösterimi mevcuttur. Takıma uygulanan kuvvet ile meydana gelen takım ve iş parçası arasındaki bağıl yer değiştirmeye yapı, tepki gösterir. Kesme işlemlerindeki talaş kalınlığı, takım geometrisi gibi parametrelerinin değeri bu yer değiştirmeleri etkiler.

Bir takım tezgahı hassas iş parçaları üretmek için statik olarak rijit olmalıdır. Fakat statik rijitlik, dinamik rijitliğin sadece özel bir durumudur. Hem analitik hem de deneysel inceleme amacıyla tezgah ve talaş kaldırma işlemi, kesme işlemi ve takım tezgahı arasındaki etkileşim Şekil 8.1b'de gösterildiği gibi iki temel blok içeren kapalı-çevrim sistemi ile açıklanır, birinden çıkış, diğerine giriştir. Bu kapalı-çevrim takım tezgahı bloğu yapının tepkisi ($\vec{x}$) ve takım üzerine uygulanan dinamik kesme kuvveti ($\vec{F}$) arasındaki ilişkiyi açıklar. Yani bu ilişki; kesme işlemleri bloğu ile gösterilen talaş kaldırma işlemine ait hesaplamalar tarafından tanımlanabilen kesme kuvvetinin ($\vec{F}$) değişimi üzerine bağıl yer değişimin ($\vec{x}$) etkisidir. İşleme operasyonlarının kararlılık problemi olan tırlama probleminin çözümünde kapalı çevrim sistemi önerilir.



))

Şekil 8.1 a) Kesme dinamiğinin gösterimi b) Kesme dinamiğinin blok diyagramı. (V kesme hızı)

9. TIRLAMA TİTREŞİMİ

Takım tezgahlarında tırlama titreşimleri konusunun anlaşılması bakımından mekanik titreşimlerin iyi derecede bilinmesi gerekir. Bir cismin denge konumu etrafında periyodik olarak yaptığı harekete mekanik titreşim denir. Genel halde titreşim, istenmeyen ve lüzumsuz bir enerji halidir. Özellikle takım tezgahlarında gürültü yapması, parçaları kırması ve istenmeyen kuvvetleri iletmesi bir gerçektir. Bu sebeplerden dolayı titreşimin azaltılmasına çalışılır.

Bir çok sistem birden fazla şekil ve doğrultuda titreşebilir. Eğer sistem, sadece bir tek mod ve tarzda titreşmeye şartlandırılırsa veya sistemin kütlesinin uzayda geometrik yerini tayin etmek için bir tek bağımsız değişkene ihtiyaç varsa, bu şekildeki sisteme tek serbestlik dereceli sistem denir. Konumlarını belirtmek için, *n* adet bağımsız koordinat gerektiren sistemlere *n* serbestlik dereceli sistemler denir.

Titreşim problemlerinde hareketin denkleminin çözülmesi gereklidir. Sistem önce varlığını, elastikiyetini ve sürtünmesini ifade eden kütle, yay ve sönüm elemanları cinsinden basitleştirilir. Hareketin denklemi, zamanın fonksiyonu olan yerdeğiştirme cinsinden veya hareketin herhangi bir anında kütlenin denge pozisyonuna olan mesafesini verecek şekilde ifade edilir. Hareket denkleminden sistemlerin en önemli özelliği olan tabii frekans elde edilir.

Düzgün lineer ve burulma şeklindeki titreşim hareketlerinin her ikisini de, hareketin kendisini tekrarlaması için gerekli zamana periyot, birim zamanda hareketin tekrarlanma sayısına frekans adı verilir. Tabii frekans, sistemin sürtünmesiz serbest titreşimi esnasındaki frekansıdır. Sönümlü tabii frekans ise sistemin sürtünmeli serbest titreşim yapması halindeki frekansıdır.

Her bir işleme operasyonunda hatanın esas kaynağını takım ve iş parçası arasındaki bağıl dinamik hareket oluşturur. Takım ve iş parçası arasındaki bağıl hareket, doğal frekanslı bir sistemdir ve büyük genlikli bağıl yer değiştirmelerle meydana gelen kararlı olmayan davranışlardan dolayı, işlenmiş son yüzeye ve kesici takıma büyük ölçüde zarar verebilir. Bu hareket kabul edilebilir limitlerin ötesinde gelişirse bu olay tırlama olarak adlandırılır ve meydana gelen tırlama kötü yüzey sonuçlarına, düşük ölçü tamlığına, takım aşınmalarının artmasına, sık sık takım kırılmasına ve dolaylı olarak tezgah ömrünün kısalmasına yol açar. İlaveten,

tırlamanın her zaman mevcut potansiyel zorlamaları (zorla yüklemeleri) önemli işlemelerde ilerleme ve dönme hızlarını azaltır ve işleme verimliliğini düşürür.

Titreşimin imalat sırasında ortaya çıkan bir kaç tipi vardır. Bunlar genel olarak serbest titreşimler, zorlanmış titreşimler, kendi kendini uyaran titreşimler, yenilenebilen titreşimler, termomekanik titreşimler ve mod çiftlemesi olarak adlandırılır. Bu sınıflamanın dışında titreşimler, doğrusal ve doğrusal olmayan titreşimler, sönümlü ve sönümsüz titreşimler, belirli ve rasgele titreşimler olmak üzere de sınıflandırılabilirler.

Titreşimler altında, doğal durumuna hemen hemen yakın bir frekansta meydana gelen art arda dinamik kesme kuvveti değişimi, talaş kalınlığı oluşumunun niteliğini değiştirir. Değişken bir yapıya sahip talaş kalınlığı oluşturan bu durum, sistemi daha fazla uyarır. Bu koşullar altında eğer titreşimin genliği önceki geçişte oluşan genlikle karşılaştırıldığında azalmadıysa veya kararsızlığın sonucunda titreşimin genliği sürekli olarak büyüyorsa bu titreşim tırlama titreşimi olarak adlandırılır. Bu tırlamanın mekanizması üzerine analizler ve çalışmalar yaklaşık 50 yıl önce (Tobias , 1965) ile başlamıştır. O zamandan beri farklı imalat işlemleri için tırlama kararlılığının limitlerini tahmin etmek ve tırlama titreşimlerinin analizi için bir çok model geliştirilmiştir.

Tırlama araştırmaları kesme işlemleri esnasında kararlılığı etkileyen en kritik faktörün talaş kalınlığı olduğunu göstermiştir (Kayhan ve Budak (2004)). Kesme işlemleri talaş kalınlığı küçük olduğu zaman çok kararlı olur. Tırlama titreşimi, tırlama limit noktası $b_{\lim}$'den sonra talaş kalınlığının artması ile başlar ve talaş derinliğinin en yüksek değerinde daha belirgin hale gelir. $b_{\lim}$'in değeri ise takım tezgahının, iş parçası malzemesinin, takımın kesme hızı ve geometrisinin dinamik karakteristiklerine bağlıdır (Tlusty (1999).

9.1. Zorlanmış Titreşimler

Serbest titreşim, sistemin denge konumundan uzaklaştırılıp bırakılması halinde yaptığı periyodik harekettir. Tatbik edilen kuvvetler, yay kuvveti, sürtünme kuvveti ve kütlenin ağırlığıdır. Sürtünme olması halinde titreşim zamanla azalır. Bu serbest titreşim veya kısa süreli (geçici) hareket olarak adlandırılır. Serbest titreşimde $F(t)=0$ olduğundan sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi verilir:

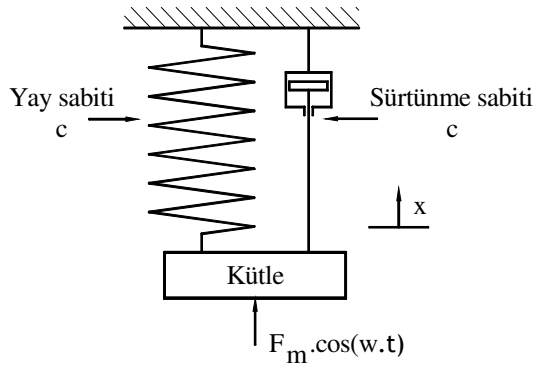
$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=0 \tag{9.1}$$

m : Eşdeğer kütle,
x : Deplasman (yerdeğiştirme)
c : Birim zamandaki sönümleme kuvveti,
k : Birim deplasmandaki yay kuvvetidir.

Zorlanmış titreşim, genellikle $F(t)=F_m\sin(\omega t)$ veya aynı şekilde $F(t)=F_m\cos(\omega t)$ şeklindeki dış kuvvetlerin sisteme etki etmesi sonucu oluşan titreşimlerdir. Zorlanmış titreşim hareketinde sistem kendi tabi frekansı ile olduğu kadar, tatbik edilen dış kuvvetlerin frekansıyla da titreşmeye zorlanır. Sürtünme olması halinde, hareketin tatbik edilen sinüzoidal dış kuvvetin ihtiva etmediği bölümü, zamanla söner. Neticede sistem ilk şartlardan ve kendi tabii frekansından bağımsız olarak tatbik edilen dış kuvvetin frekansı ile titreşir. Dış kuvvetin tesiri ile meydana gelen titreşime düzgün titreşim hali veya tepki denir. Genellikle titreşimin devamlı tesirleri dolayısıyla düzgün titreşim hali meydana gelir. Şekil 9.1'de görülen tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi, (9.2) denklemindeki gibidir.

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F_m\cos(\omega t) \tag{9.2}$$

F_m : Dış harmonik kuvvetin max. değeri,
ω : Dış harmonik kuvvetin açısal frekansıdır.



Şekil 9.1 Sönümlü tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemi

Bu sistemin sabit durumlu titreşim hali aşağıdaki gibidir;

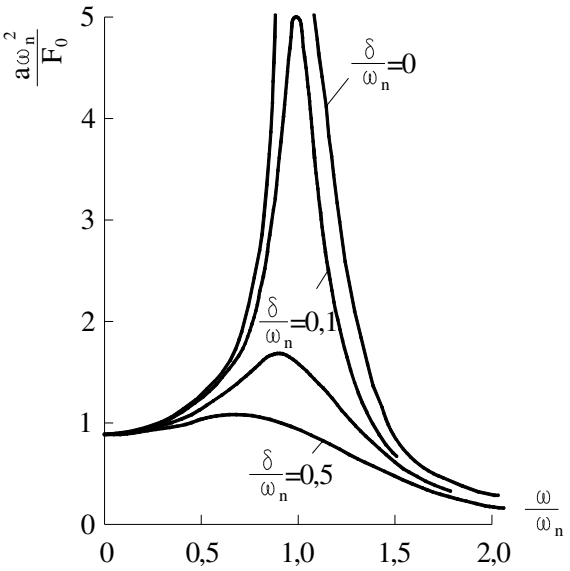
$$x = \frac{F_0 \cos(\omega t - \phi)}{\left[4\delta^2\omega^2 + \left(\omega_n{}^2 - \omega^2\right)^2\right]^{1/2}} \tag{9.3}$$

burada, $F_0 = F_m/m$, $\omega_n = \sqrt{k/m}$ (tabii açısal frekans), $\delta = c/2m$ (sönümleme katsayısı)'dır.

Denklem (9.3), a genliğinde ve ϕ faz açılı bozucu kuvvet geciktirmeli ω açısal frekansında bir hareketi ifade eder. Bu genlik aşağıdaki gibidir;

$$x = \frac{F_0}{\left[4\delta^2\omega^2 + \left(\omega_n{}^2 - \omega^2\right)^2\right]^{1/2}} \tag{9.4}$$

ω ile ω_n birbirlerine eşit olduğu zaman rezonans meydana gelir. Rezonanstaki genlik ise $F_0/2\delta\omega_n$'dir. Bu sonuçlar Şekil 9.2'de görülmektedir. Bu şekil sönümleme katsayısının değişen değerleri için çizilmiş bir grafiktir.



a : Titreşim genliği,

F_0 : Bozucu kuvvetin kütleye oranının maksimum değeri,

ω : Açısal zorlanmış frekans,

ω_n : Sistemin açısal tabii frekansı,

δ : Sönüm katsayısı.

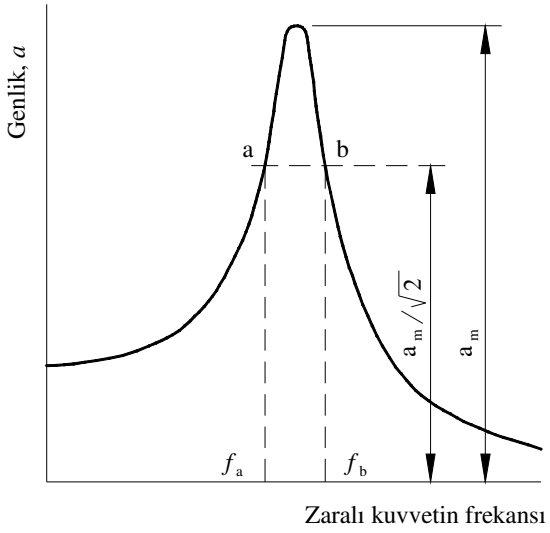
Şekil 9.2 Tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin cevap eğrisi

Bu sonuçlardan, sönümlü kütle-yay sisteminin titreşim genliğini minimize etmek için sönümleme mümkün olduğu kadar büyük olmalı, buna karşılık sistemin tabii frekansı, bozucu (zararlı) kuvvetin frekansından önemli derecede büyük olması gerektiği çıkartılabilir.

Takım tezgahlarındaki zorlanmış titreşimler genellikle kesme kuvvetlerindeki periyodik değişmeler sebebiyledir. Mesela, böyle değişiklikler yan yüzey veya alın frezelemesinde görülebilir. Burada zorlanmış titreşim frekansı, takım dönme frekansının takım diş sayısıyla çarpımına eşittir.

Tasarımcı tarafından maksimum sönümlemenin düzenlenmesinde de gayret gösterilmelidir. Bu sönümleme, yapı malzemesinin iç sönümlemesi, çeşitli civatalı bağlantılarda sürtünmeli sönümleme ve yataklar, kızaklar v.s. çeşitli yağlanmış ara yüzeylerde viskoz sönümleme dahil olmak üzere çeşitli yollarla artırılabilir. Maalesef sönümleme hakkında, tasarım konusunda oldukça az faydalı bilgiler mevcuttur. Bununla birlikte bir yapıdaki sönümlemenin tahmini, deneysel olarak elde edilen cevap eğrilerinden yapılabilir.

Şekil 9.3'de sönümlenmiş bir sistemin cevap eğrisi görülmektedir. Maksimum genlik, $a_m/2$ genliğinde meydana gelen frekanslar f_a ve f_b eğrilerinden elde edilir.



Şekil 9.3 Cevap eğrisinden sönümlenmiş sistem sabitinin tespiti

Şekilden görülebilir ki, sönümleme oldukça küçük olduğunda, sönümleme katsayısı (sönüm faktörü) şöyle olur;

$$\delta = \pi\left(f_b - f_a\right) \tag{9.5}$$

bu sonuç (9.4) denkleminde yerdeğiştirmenin konulması ve ω^2'ye göre çözülmesiyle,

$$\omega^2 = \left(\omega_n^{\,2} - 2\delta^2\right) \pm 2\delta\sqrt{\omega_n^{\,2} + \delta^2} \tag{9.6}$$

elde edilir. Bu denklemin Şekil 9.3'de a ve b noktalarına karşılık gelen iki çözümü mevcuttur. Düşük sönümlemede δ^2 ve $\omega_n^{\,2}$ ihmal edilirse,

$$\omega_a^{\,2} = \omega_n^{\,2} - 2\delta\omega_n \tag{9.7}$$

$$\omega_b^{\,2} = \omega_n^{\,2} + 2\delta\omega_n \tag{9.8}$$

denklemleri elde edilir. (9.7) ve (9.8) denklemlerinde düzenlemeler yapılırsa,

$$\omega_b - \omega_a = 4\delta\omega_n / (\omega_a + \omega_b) \tag{9.9}$$

denklemi elde edilir.

$\omega_b + \omega_a = 2\omega_n$ olduğu zaman (9.9) denklemi, (9.10) denklemi halini alır.

$$\omega_b - \omega_a = 2\delta \text{ veya } \delta = (\omega_b - \omega_a)/2 \tag{9.10}$$

olur. Sonuç olarak ω_a ve ω_b, $2\pi f_a$ ve $2\pi f_b$ ile verilirse, $\delta = \pi(f_b - f_a)$ istenen ifade bulunur. Gerekli olduğu zaman eşdeğer yay rijitliği aşağıdaki denklem yardımı ile bulunur.

$$k = F_m\omega_n / 2\delta a_m \tag{9.11}$$

9.2. Kendiliğinden-Doğan Titreşimler

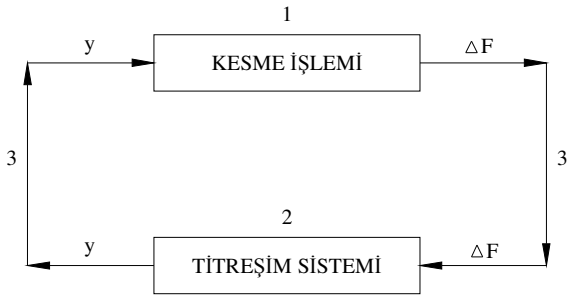
Takım tezgahlarında performansı etkileyen en önemli faktörlerden birisi; kendiliğinden oluşabilmesi için gerekli enerjiyi kesme işleminden alan titreşimlerdir. Kendiliğinden-doğan titreşimlere etki eden çok çeşitli parametreler mevcuttur. Etkili tüm parametrelerin ayrı ayrı incelenmesi zor olduğu için genellikle araştırmacılar tarafından sınıflamaya tabii tutulmuştur. Araştırmacılardan (Merrit, 1965) bu parametreleri; kesme işlemine ait parametreler, yapının dinamik davranışına ait parametreler ve yenilenebilir titreşim oluşmasına sebep olan parametreler olmak üzere üç sınıfta incelemiştir. (Tlusty, 1970)'de buna benzer bir sınıflandırma yapmıştır. (Tobias, 1965) ise kendiliğinden-doğan titreşimlere etki eden parametreleri kesme işlemine ait parametreler üzerine kurmuştur.

Tezgahın yapı dinamiğinin kendiliğinden oluşan titreşimler üzerindeki etkilerini reseptansa bağlayan Merritt ve Tlusty, reseptansı kendiliğinden oluşan titreşim kriteri olarak kabul etmişlerdir. Reseptans; bir mekanik sistemin herhangi bir noktasındaki deplasmanın, bu noktaya uygulanan kuvvete oranı olarak tanımlanabilir (Koenigsberger ve Tlusty, 1971). Buna aynı zamanda dinamik kompliyans da denir. Reseptans yapının tabii frekansı, statik rijitlik ve sönümleme miktarı değerleri birleşiminin ve titreştirici kuvvetin frekansının bir fonksiyonudur.

Merritt ve Tlusty'e göre reseptans ne kadar küçükse, tezgahın kendiliğinden-doğan titreşimden uzakta çalışma ihtimali de o kadar büyüktür.

Takım tezgahlarının kullanımında, metal kesme işleminden gelen enerjiyle oluşan titreşimlere sık sık rastlanmaktadır. Bu titreşimler işlenen yüzeylerdeki dalgalanmalar, takım ve tezgah ömrünün azalmasına ve kesme kuvvetlerindeki büyük değişmelere neden olur. Bazı işleme şartları altında kaldırılan talaş miktarı küçükse, rölatif titreşimler oluşmaz ve işlem kararlıdır. Bazı durumlarda ise rölatif titreşimlerin oluştuğu ve işlemin kararsız olduğu görülür. Kararlı ve kararsız kesme işlemleri arasında genellikle çok belirgin bir sınır mevcuttur. Kesme işlemi sırasında kararlı olan durumun, talaş genişliğinin belli bir değere çıkarılmasıyla kararsızlığa dönüşmesi mümkündür. Talaş genişliğinin bu sınır değeri kendiliğinden oluşan titreşimlerin başlama değeridir. Burada enerji kaynağı kesme işlemi içerisindedir. Kendiliğinden-doğan titreşimlerin kötü etkilerinden uzaklaşmak için, bu titreşime neden olan işleme şartlarından kaçınmak gerekir. Farklı tasarımlara sahip takım tezgahlarının kararlılık sınırları farklıdır. Bundan dolayı, kendiliğinden-doğan titreşimlerin analizi, kesme şartlarının seçimini ve takım tezgahlarında yüksek kararlılık bölgelerini verebilecek tasarımları gerçekleştirecektir.

Talaş kaldırma işleminde kendiliğinden-doğan titreşimlerin prensip diyagramı Şekil 9.4'de görülmektedir. Bu iki temel kısımdan oluşan kapalı bir çevrimdir. Burada birinci kısım kesme işlemi, ikinci kısım ise tezgahın titreşim sistemidir. Kesme işlemi esnasında oluşan kuvvet değişimi, tezgahın titreşim sistemine etki etmektedir. Tezgahın titreşim kaynaklarından oluşan sistem, kuvvet değişimi sebebiyle takımla iş parçası arasındaki *y* titreşimini oluşturur.



Şekil 9.4 Kendiliğinden oluşan titreşimlerin prensip diyagramı

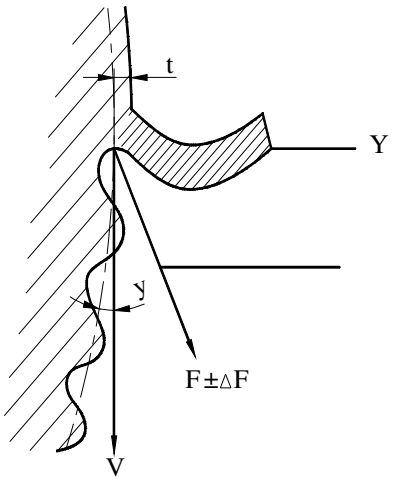
Kesme işlemine etki eden bu *y* titreşimi, tekrar olarak kesme işleminden değişken bir *ΔF* kuvvetinin çıkmasına sebep olur. Bu olay kapalı bir çevrim şeklinde tekrarlanır. 3 nolu bağlantı kısmı, kesme işlemi ve tezgahın titreşim sistemini birbirine karşılıklı bağlayan kısımdır.

Şekil 9.4'deki kesme işlemi, belirtildiği gibi kapalı bir çevrimdir. y titreşiminin ΔF kuvvetine ilişkisi bir transfer fonksiyonu ile ifade edilebilir. Bu transfer fonksiyonunun oluşturulması için iki tane basit kabulün yapılması gerekmektedir. Bu kabuller;

a) Kesme kuvvetinin değişimi, talaş genişliği değişimi ile orantılı,

b) Kesme kuvvetinin değişen bileşeninin doğrultusu, kararlı işlemdeki kesme kuvvetinin doğrultusunun aynısı olmalıdır (Koenigsberger ve Tlusty (1971).

Kesme işleminde transfer fonksiyonunun esası Şekil 9.5'de görülmektedir. Kesme hızı doğrultusuna dik düzlemdeki titreşim bileşiminin sadece talaş kesitine etki ettiği Şekil 9.5'da görülmektedir. y doğrultusunun da kararlı kesme esnasında ortalama talaş kalınlığı t ise, titreşim esnasında, talaş kalınlığının $(t-y)$ ve $(t+y)$ arasında değişmesi mümkündür. Yine kararlı kesme sırasında iş parçasına etki eden ortalama kesme kuvveti F ise, değişken kuvvet bileşkesi de ΔF 'dir.



Şekil 9.5 Deforme edilmemiş talaş kalınlığının değişimi

Bu değişken kuvvet bileşkesi, y titreşiminin oluşmasına neden olur. Küçük kuvvet değişmeleri için, deplasman değişimleri lineerlik gösterirler. Talaş kalınlığının ortalama değeri ve kuvvetin ortalama değeri titreşim işlemine etki etmez. Transfer fonksiyonu kuvvet ve talaş kalınlığının değişen bileşenleri arasındaki bir ilişki olarak açıklanabilir. Bunu açıklamak için şu formül kullanılabilir:

$$\Delta F = -R.y \tag{9.12}$$

Bu formüldeki R; kuvvet ile deplasman arasındaki ilişkiyi veren, çiftleme katsayısı olarak tanımlanan bir sabittir (Koenigsberger ve Tlusty (1971)). R katsayısı kesme şartlarına ve talaş genişliği b'ye bağlıdır. Ayrıca bu katsayı ΔF ve y'nin seçilen konumlarına göre değişir. Denklemde değişken kuvvet ile deplasmanın ters işaretli oldukları görülmektedir. Bunun açıklaması için kuvvet ile deplasmanın iş parçası üzerindeki konumları dikkate alınmalıdır. Diğer konumlarda kuvvet ile deplasman arasındaki bağıntı;

$$\Delta F = -b.r.y \tag{9.13}$$

şeklinde yazılır. Buradaki r katsayısı; talaş genişliği dışındaki parametrelere bağlı bir katsayıdır (Tlusty ve Polacek (1963)).

9.3. Yenilenebilen Tırlama

Kendi kendini uyaran titreşimlerin en genel formu yenilenebilen tırlamadır. Her ne kadar makine takım yapısı kendi-kendini kararlı yapsa da, kesme operasyonları üst üste binmiş kesmeler içerdiğinden dolayı, bu durum sık sık gerçekleşir. Önceki kesmede oluşan yüzey dalgalılığı üzerinden yapılan kesmeden kaynaklanan zorlanmış titreşimlerin genliği önemli derecede büyüyebilir. Yenilenen tırlama titreşiminin esasları, ortogonal kesme işleminde bir örnekle açıklanır. Deneysel olarak gözlemlenen kesme kuvveti (F_c), kesme derinliği (h), meyil açısı (α) ve boşluk açısının (β) bir fonksiyonu olup şöyle yazılabilir.

$$F_c = F_c(h, \alpha, \beta) \tag{9.14}$$

Bu denklem bir toplam diferansiyel fonksiyon olarak varsayılır. Kudinov aşağıda verilen formu kesme kuvvetinin dinamik değişimi için bir formül olarak önermiştir.

$$dF_c = \frac{\partial F_c}{\partial h}\mathrm{d}h + \frac{\partial F_c}{\partial \alpha}\mathrm{d}\alpha + \frac{\partial F_c}{\partial \beta}\mathrm{d}\beta \tag{9.15}$$

Talaş kalınlığı değişken olduğu zaman aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\mathrm{d}h = x(t) - \mu x(t-T) \tag{9.16}$$

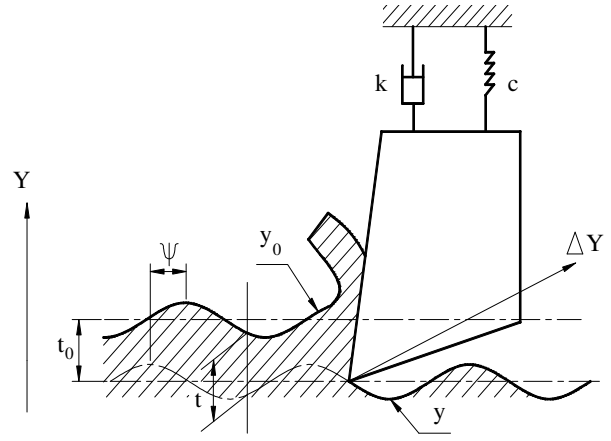
Burada μ, şu anki ve bir önceki kesmeler arasındaki üst üste binme faktörüdür. T, bir turun periyodudur. Başlangıçta, kesme işlemleri tarafından uyarılan basit tek serbestlik dereceli sistemin kararlılığı aşağıda verilen eşitlik tarafından açıklanmıştır.

$$1 - \frac{\omega^2}{\omega_0} + \frac{k_1}{k}\left(1 - \mu\cos\frac{2\pi\omega}{\Omega}\right) = 0 \tag{9.17}$$

$$\xi + \mu\frac{k_1}{k}\frac{\omega_0}{\Omega}\sin\frac{2\pi\omega}{\Omega} + \frac{4\pi k_2}{k}\frac{\omega_0}{\Omega} + \frac{2k_3}{k}\frac{\omega_0}{R} = 0 \tag{9.18}$$

Burada k_1, k_2 ve k_3 işleme şartları ve R ise bir anlık iş parçası yarıçapıdır. (9.17) ve (9.18) denklemleri yenilenebilir kararlılığın yapısını ifade eder.

Bu etkinin incelenmesi için titreşim sisteminin en basit olan tek serbestlik dereceli sistem olarak kabul edilmesi gerekmektedir (Tlusty ve Polacek (1963). Şekil 9.6'da sistemin modellenmesi görülmektedir.



Şekil 9.6 Titreşim sisteminin modellenmesi

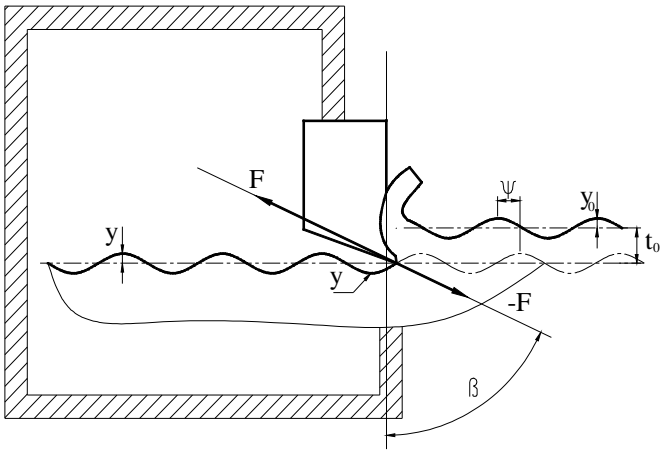
Tornalama işleminde önceden işlenen yüzey, planyalama işleminde önceki stroktaki işlenmiş yüzey ve frezeleme işleminde önceki diş tarafından işlenen yüzey, takım tarafından işlenir. Belli bir kesme sayısında takım ile iş parçası arasında bir titreşim varsa, kesilen yüzey dalgalı olacaktır. Bu kesme sayısı i olsun. (i+1) kesmede talaş dalgalı yüzeyden kaldırılır. i. kesmede, kesme normal doğrultusundaki titreşim genliği y_0, (i+1). kesmedeki titreşim genliği y ise talaş kalınlığının değişimi (y-y_0)'dır. Burada y ve y_0 zamana bağlı değerlerdir. Şekil 9.7'de dalgalı yüzey görülmektedir. y ve y_0'ın zaman vektörleri olması sebebiyle;

$$y = q.y_0.e^{-j.\psi} \tag{9.19}$$

denklemiyle ifade edilebilirler (Koenigsberger ve Tlusty 1971). Bu denklemde ψ; oluşan dalgalar arasındaki faz farkıdır. Neticede (9.13) denklemi yerine (9.20) denklemi gerçek kesme işlemleri için kullanılabilir.

$$\Delta F = -b.r.\left(y - y_0\right) \tag{9.20}$$

Şekil 9.7 esas alınarak y titreşimi tekrar iş parçası üzerinde bir dalgalı yüzey meydana getirir. Birbirini takip eden dalgalanmalar arasındaki titreşimin frekansı ve faz farkı kendilerini ayarlayarak, maksimum enerjiyi titreşim sistemine gönderirler.

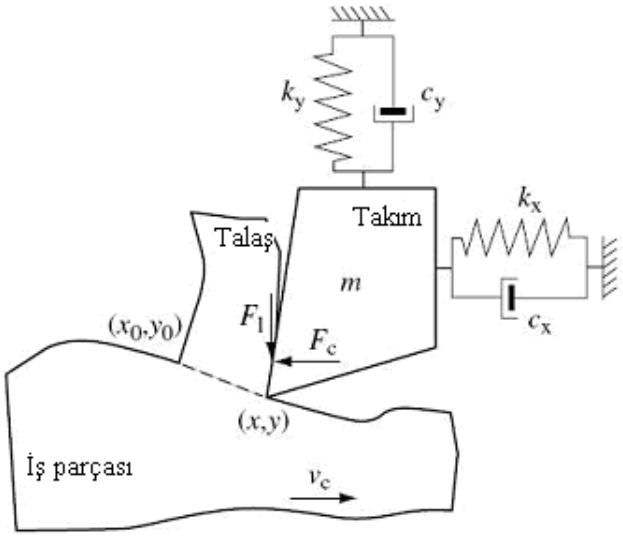


Şekil 9.7 Kesme işleminde dalgalanmış yüzey

Bu enerji titreşim sistemindeki sönümleme tarafından oluşan enerji kayıplarını karşılamaya yeterli olabilir. Böylece sonraki kesme işlemlerinde titreşimin arttığı görülür. Bu, dinamik kararsızlığın özel bir durumu olan yenilenebilir titreşimi oluşturur. Talaş kalınlığı ve kesme kuvvetinin değişimi arasındaki çiftleme yoğunluğu *b.r* ile verilir ve bu durum kararsızlığın artacağı halleri belirler.

Pratikte; yenilenebilir titreşim, *b* genişliğinin yeterli bir büyüklüğe gelmesiyle oluşur.

9.4. Mod Çiftlemesi



Şekil 9.8 İki serbestlik dereceli tırlama modeli

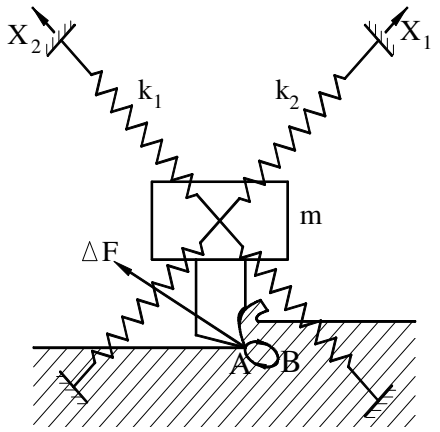
Eğer itici kuvvet doğrultusundaki titreşim kesme kuvveti doğrultusu ve tersine titreşim oluştururs a, oluşan tırlama mod çiftlemesi türündendir. Bu, kesme ve itme kuvvet doğrultularında eş zamanlı titreşim oluşumunun sonucudur. Fiziksel olarak bu duruma talaş kalınlığı değişimi, kesme açısıyla değişen salınımlar, yenilenebilirlik etkisi, meyil ve yüzey boşlukları üzerindeki sürtünme gibi çok sayıda kaynak sebep olur. Yukarıda şekli verilen iki serbestlik dereceli modelde, mod çiftlemesini aşağıdaki kesme ve itme kuvvetleri için verilen form ile hassas bir biçimde tespit etmişlerdir (Wu ve Liu, 1985).

$$m\ddot{x}+c_x\dot{x}+k_x x=2\omega\sigma_s\left(x_0-x\right)\left[\left(A_x-C_x\nu_c\right)+\frac{1}{2}B_x\left(\dot{x}-\dot{x}_0\right)-\frac{1}{2}C_x\left(\dot{y}-\dot{y}_0\right)\right]-\frac{K\omega}{\nu_c}\dot{x} \quad (9.20)$$

$$m\ddot{y}+c_y\dot{y}+k_y y=2\omega\sigma_s\left(x_0-x\right)\left[\left(A_y-C_y\nu_c\right)+\frac{1}{2}B_y\left(\dot{x}-\dot{x}_0\right)-\frac{1}{2}C_y\left(\dot{y}-\dot{y}_0\right)\right] \quad (9.21)$$

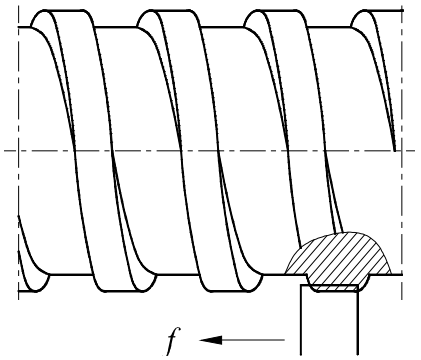
Burada m eşdeğer titreşim kütlesi, C_x ve C_y sönümleme viskozite sabiti, k_x ve k_y makine yapısı rijitlik sabiti, ν_c kesme hızı ve K takım ucundaki dalarak talaş çıkartma hareketinden hesaplanan sönümleme katsayısıdır. (9.20) ve (9.21) denklemlerinden geri kalan sabitler (A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y) dinamik kuvvet katsayıları olarak adlandırılır ve bunları Wu ve Liu (1985) tamamen açıklamışlardır.

Bu prensipte sistem, en az iki serbestlik dereceli bir titreşim sistemi olarak kabul edilir. Böyle bir sistemin en basit formu Şekil 9.9'da görülmektedir. Farklı rijitlik katsayılarına sahip iki yaya bir m kütlesi bağlanır ve yaylar X_1, X_2 doğrultularında hareket ederler. Bu doğrultular birbirlerine diktir.



Şekil 9.9 İki serbestlik dereceli titreşim sisteminin modellemesi

Bu prensibi önceki prensipten ayırmak için Şekil 9.10'da görülen özel bir işleme durumu düşünülmelidir. Bu durumda takım daima işlenmemiş bir yüzeyden talaş kaldırır. Bir kare dişin yüzeyinden kesme yapılacak şekilde bu durum düzenlenebilir. Bu düzenin kurulma nedeni kesme işlemindeki yenilenebilir etkiyi ortadan kaldırmaktır.

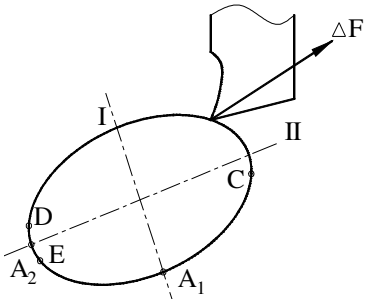


Şekil 9.10 Önceden deforme edilmemiş yüzeyin işlenmesi hali

Şekil 9.9'daki durum göz önüne alınırsa, titreşim *f* frekansı ile oluşur. m kütlesi X_1 ve X_2 doğrultularında, farklı genlik ve farklı bir fazla aynı zamanda titreşir. Böylece son hareket eliptik bir eğri oluşturur. Bu sırada takım da Şekil 9.10'da görüldüğü doğrultuda hareket eder. Takımın eliptik eğri üzerindeki A noktasından B noktasına yarım periyotluk hareketi sırasında, kesme kuvveti ΔF harekete karşı etki eder. Takım B noktasından A noktasına giderken, bu yarım periyotta da kesme kuvveti hareketin hızı doğrultusunda etki eder. Takımın ilk yarım periyottaki hareketi esnasında enerji, sistem tarafından harcanır. İkinci yarım periyotta ise kesme kuvveti tarafından titreşim sistemine enerji verilir. İkinci yarım periyot daha büyük bir ortalama kesme derinliği ile yapıldığı için, ortalama kesme kuvveti birinci yarım periyottaki kuvvetten daha büyük olur. Neticede, bir çevrimde sisteme verilen enerji, sistem tarafından harcanan enerjiden daha büyüktür. Fazla enerji, sönümleme kayıplarını karşılayabilir.

Bu prensibe göre; sistemin uygun düzenlemeleri ile açıklanan prosedür oluşturularak, kendiliğinden-doğan titreşim meydana çıkarılmıştır. Şekil 9.9'deki düzende, X_1 doğrultusu ΔF ve Y doğrultuları arasında kalırsa $(X_1 \perp X_2)$ konum çiftlemeyi esas alan kararsızlık kriteri $k_1<k_2$ durumudur. Eğer aynı şartlarda $k_1>k_2$ olursa kesme işlemi kararlıdır. Bu yargı yalnızca yenilenebilir titreşimin olmadığı durumlarda geçerlidir.

Şekil 9.11'de bu prensibe göre kendiliğinden-doğan titreşimde takımın aldığı eliptik yol görülmektedir. Burada I doğrultusunda maksimum deplasman A_1 noktasında, II doğrultusunda ise maksimum deplasmanın A_2 noktasında oluşur. Kesme kuvvetinin maksimum değeri ise E noktasında olur.



Şekil 9.11 Konum çiftleme prensibine göre takımın aldığı eliptik yol

Konum çiftleme prensibine göre meydana gelen kendiliğinden oluşan titreşimde takımın aldığı eliptik yol, deneysel olarak (Hahn, 1953) tarafından belirlenmiştir. Ayrıca bu prensibe göre oluşan titreşimin kriteri için matematiksel bağıntılar elde edilmiştir.

9.5. Termomekanik Tırlama

Termomekanik tırlamayı açıklayıcı ilk kapsamlı yaklaşım Hastings ve ark. (1980) tarafından yapılmıştır. Bu yaklaşımla tüm mekanizmalar üzerindeki talaş formuna ait plastik deformasyon bölgesindeki deformasyon hızı ve sıcaklığın etkisini hesaplamak için bir imalat teorisi yaklaşımı formülize edilmiştir. İki sade karbonlu çelik kullanılarak bu teori uygulanmıştır. Yüksek hızlı kesmeden elde edilen kayma gerilmesi verileri ve teori ile deney arasındaki iyi uyum kesme itici kuvvetlerinin tahmini için bir gösterge oldu. Bu yaklaşımla minimum iş kriterinden tahmin edilmiş talaş plastik bölge kalınlığı için esas olan talaş kalınlığındaki azalma ile kesme hızındaki artış gözlemlenip deneysel olarak açıklanmıştır. Daha önceleri bahsedildiği gibi (Recht 1985) dikkate değer bir hipotez ile parçalanmış talaş formuna ait önemli ve tanımlayıcı açıklamada bulunmuştur. İlk defa parçalanmış talaş oluşumu mekanizmasının açıklanıp matematiksel olarak doğrulanmasını Davies ve ark. (1997) önermiştir. Burada rijit takım tarafından kesintisiz kesilen homojen malzemelerin basitleştirilmiş tek boyutlu termomekaniksel modeli kullanılmıştır. Bu modelde aşağıdaki başlıca varsayımlar yapılmıştır;

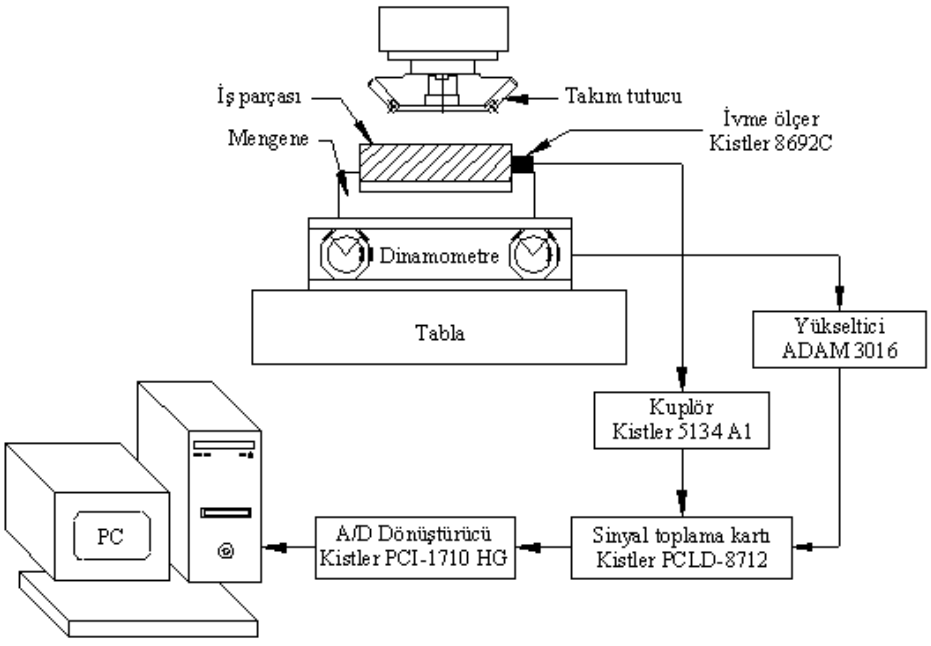
1) İş parçası, termal yumuşama ve deformasyon hızının zor olmasına karşı tek boyutlu kesme sürekliliğinin bir formudur.
2) İş parçası ve takım arasındaki etkileşimler elasto-plastik zorlanma gerilimi kurallarına uyarlar.
3) Kesme düzlemine sadece gerilimlerin paralel olduğu dikkate alınır.
4) Talaşın momentumu ihmal edilir.
5) Takım rijittir ve titreşimi iletmez.
6) İş parçasının belirli ısılarda iletkenliği ve yoğunluğu sabittir.

10. DENEYSEL ÇALIŞMA

10.1. Deneyin Yapısı

Bu tez çalışmasında dinamik kesme şartları altında takım geometrisine bağlı olarak meydana gelen kesme kuvvetleri ve tırlama titreşiminin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Tam Faktöriyel Tasarım (TFT) yöntemiyle üç seviyeli üç faktörlü deney yapısı kullanılarak $27(=3^3)$ farklı deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde farklı yaklaşma açılı (45^0, 60^0 ve 75^0) ve aynı çapta (110mm) negatif talaş açılı freze başlığı kullanılmış, kullanılan freze başlığına uygun farklı uç radyüslü 72 adet kesiciyle 560 dev/dak kesme hızında, 1,5 mm talaş derinliğinde ve 313 mm/dak ilerleme hızında, 60 uzunluk ve 60 mm genişliğindeki 27 adet iş parçası üzerinden talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler soğutma sıvısı kullanılmadan kuru ortamda yapılmıştır. Takım her kesme operasyonu için değiştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçmeden önce numunenin yüzeyi aseton ile temizlendi. Son olarak numunelerin işlenen yüzeyleri üzerinden üç farklı noktadan pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Deney planı Ek 1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada, kurulan deney setinin şematik görüntüsü Şekil 10.1'de görülmektedir.



Şekil 10.1 Deney setinin şematik görünüşü

10.2. Malzeme

Deney numunesi olarak; 60x60x20 mm boyutunda AISI 1040 imalat çeliği kullanılmıştır. Malzeme yüzeyindeki tufal tabakası deneyden önce 1 mm talaş derinliği verilerek alınmıştır.

10.3. Kesme Koşulları

Yapılan deneylerde kullanılan sabit ve değişken parametreler Tablo 10.1'de verilmiştir.

Tablo 10.1 Kesme koşulları tablosu

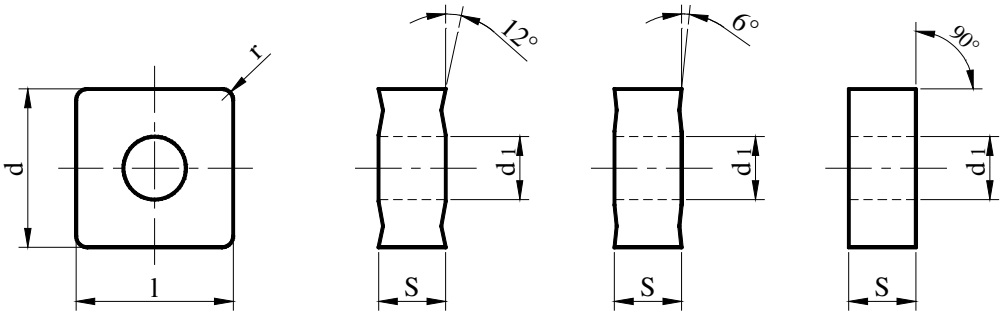
Takım uç radyüsü (*r*) *mm*	0.4	0.8	1.2
Yaklaşma açısı (κ)	45º	60º	75º
Talaş açısı (γ)	0º	-6º	-12º
Talaş derinliği (*d*) *mm*	1.5		
Devir Sayısı (*n*) *dev/dak*	560		
Kesme Hızı (V_c) *m/dak*	193		
İlerleme hızı (f) *mm/dak*	313		

10.4. Kesici Takım ve Takım Tutucu

Deneylerde P20 kalitesinde TiC kaplı SNMG sert metal kesici 1204xx (Mitsubishi) uçlardan dokuz farklı radüse ve talaş geometrisine sahip takma uçlar kullanılmıştır. Uçlara ait detaylar Tablo 10.3 ve şekil 10.2'de verilmiştir.

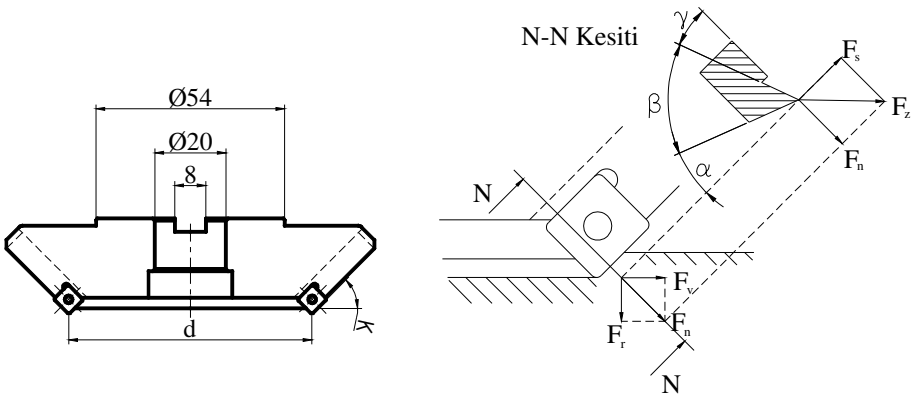
Tablo 10.2 Kesici uç çeşitleri (Mitsubishi)

SNMG 120404-MS	SNMG 120408-MS	SNMG 120412-MS
SNMG 120404-MA	SNMG 120408-MA	SNMG 120412-MA
SNMG 120404-UC	SNMG 120408-UC	SNMG 120412-UC



Şekil 10.2 Kesici uçlar (Mitsubishi)

Bu uçlara uygun takım tutucuları (Takımsaş NFR 45 110 12, NFR 60 110 12, NFR 75 110 12) kullanılmıştır. Takım tutucunun şekli ve geometrik yapısı Şekil 10.3'de gösterilmiştir.



Şekil 10.3 Takım tutucu

Tablo 10.3 Takım tutucunun geometrik özellikleri (mm)

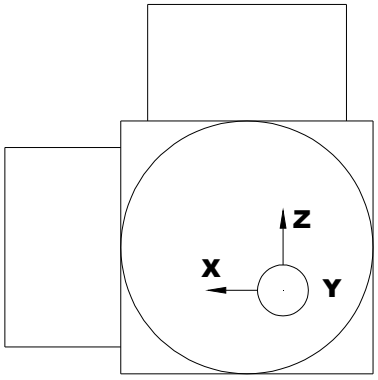
	d	**z**	**κ**
NFR	110	8	45
NFR	110	8	60
NFR	110	8	75

10.5. Freze Tezgahı

Deneyler dik başlık takılmış (Taksan marka FU-315) üniversal bir freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir.

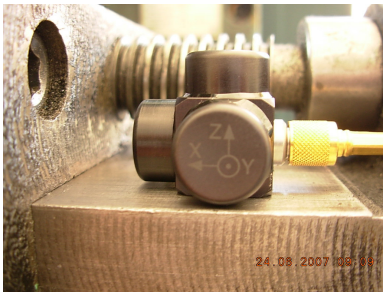
10.6. Veri Alma ve Ekipmanları

Titreşim sinyalleri, mengene üzerindeki ivmelenme sensörünün kitapçığında belirtilen pürüzlülük, şekil ve konum toleranslarına uygun işlenmiş tespit yüzeyine, titreşimin ölçüleceği yönde (bağlantı yönü okla gösterilir) mıknatıslanma özelliğinden faydalanılarak monte edilen üç boyutlu titreşim ölçer (Kistler 8692C50) kullanılarak alınmıştır (Şekil 10.4.).

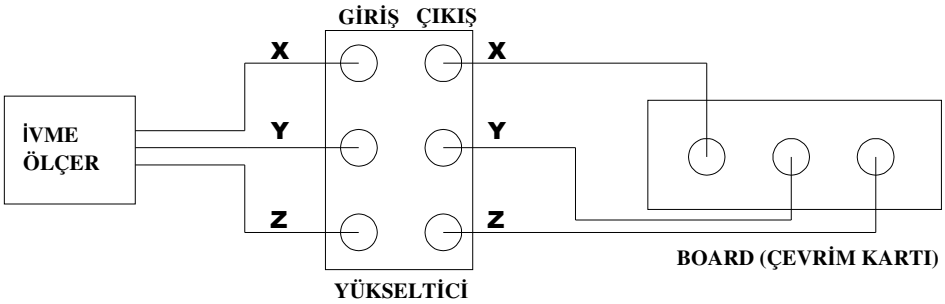


Şekil 10.4 8692C ivme ölçer

İvmelenme sensöründen alınan sinyaller kablo (Kistler 1756B3) aracılığıyla sinyal yükselticiye (Kistler 5134A1(E)) giriş yapar. Yükseltici çıkış kısmından alınan sinyal çıkış kablosu (Kistler 1511B1) kullanılarak veri toplama board'una (Kistler PCLD-8712) aktarılan sinyaller buradan PC içerisindeki veri toplama kartı (Advantech PCI-1712) tarafından karta ait yazılım programı ile PC üzerine kaydedilmiştir. Şekil 10.5'da deney seti bağlantısının kısmi bir resmi gösterilmektedir.



a)



b)

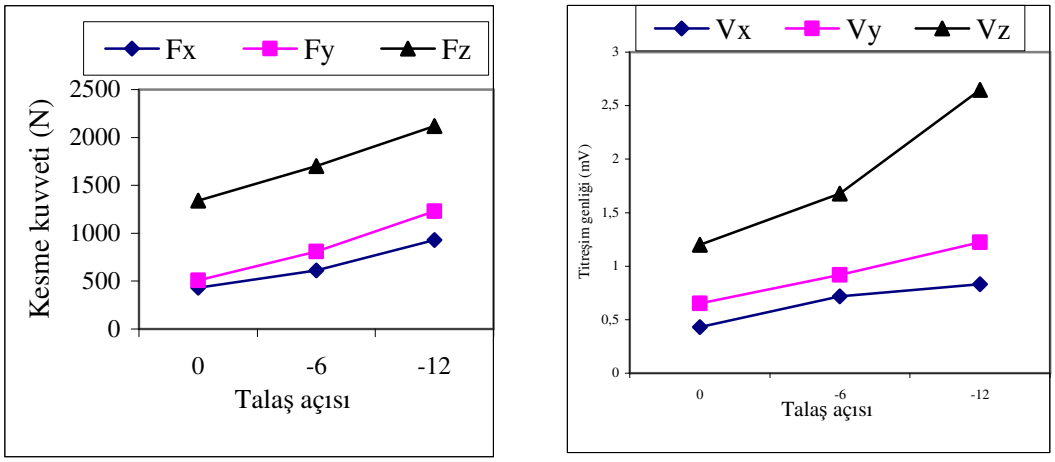
Şekil 10.5 a) Titreşim sensörünün bağlantısı
b) Yükseltici ve PCLD-8712 board bağlantısı

İşlenen numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmek için pürüzlülük ölçüm cihazı (Mahr Perthometer M1) kullanılmıştır.

11. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

11.1. Yaklaşma açısı (κ), talaş açısı (γ) ve değişimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Bu deneysel çalışmada yaklaşma açıları κ=45°, 60° ve 75° ve talaş açısı γ=0°, -6°, -12° olarak uygulanmıştır. Her bir yaklaşma açısı için uç yarıçapları sabit tutulmuştur. Belirlenen parametrelere bağlı kalarak yapılan deneylerde değişik yaklaşma açılarında meydana gelen kuvvet, titreşim, bileşke kuvvet ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimleri Şekil 11.1, Şekil 11.2, Şekil 11.3 ve Şekil 11.4'de verilmiştir.

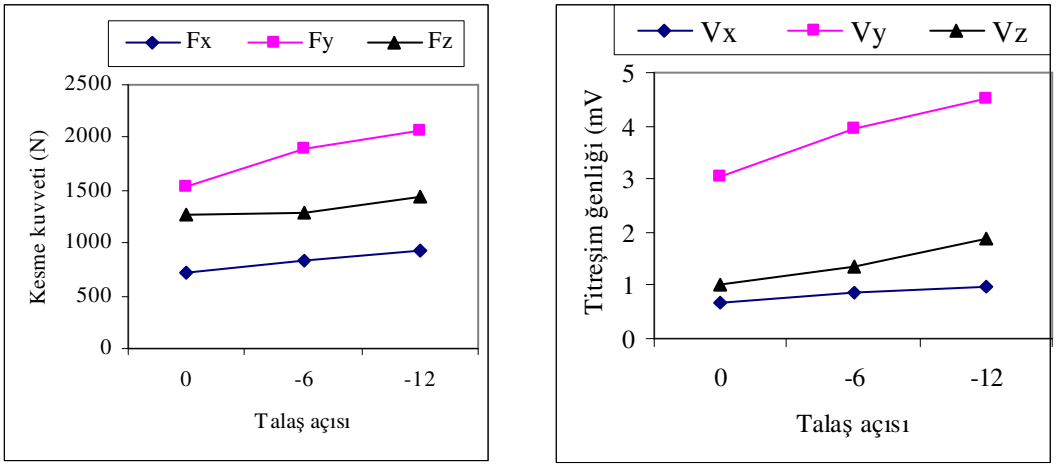


(a) (b)

Şekil 11.1.a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=45°, r=0,4), b) Titreşim genliği-talaş açısı grafiği (κ=45°, r=0,4)

Şekil 11.1.a ve b'de yaklaşma açısı ve takım radüsü sabit alınarak üç farklı deney yapılmıştır. Her deney için üç farklı talaş açılı kesici uç kullanılmıştır. Şekil 11.a'da talaş açısının azalmasıyla kesme kuvvetinin nasıl etkilendiği, Şekil 11 b'de ise aynı parametrelerde aynı iş parçasından elde edilen titreşim grafiği görülmektedir. Şekil 11.1.a incelenirse talaş açısının azalmasıyla meydana gelen kesme kuvvetlerinin arttığı belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 11.1.b'de talaş

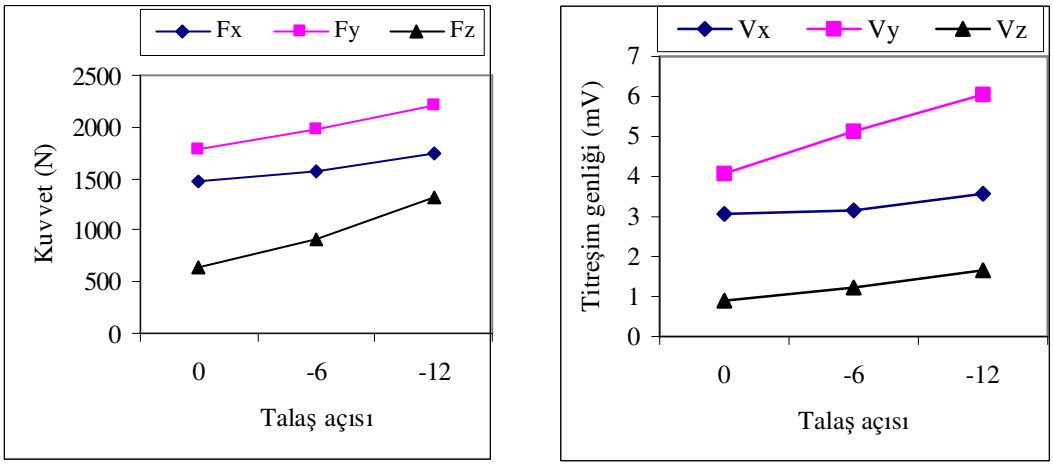
açısının azalmasıyla titreşimin artığı grafikten anlaşılmaktadır. İki grafiğe birden bakarsak kesme kuvvetlerindeki artışa bağlı olarak titreşimin artırdığı görülmüştür.



(a) (b)

Şekil 11.2.a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=60°, r=0,4), b) Titreşim genliği-talaş açısı grafiği (κ=60°, r=0,4)

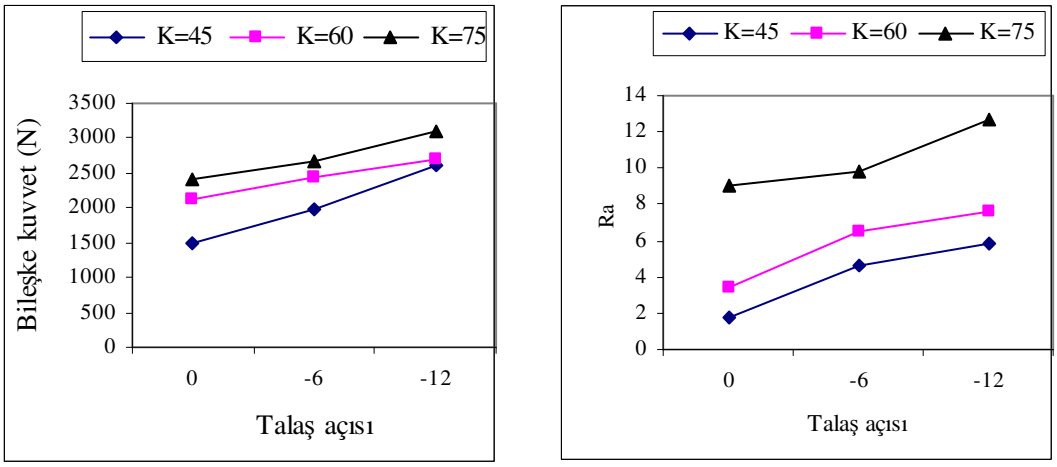
Yaklaşma açısı 60° ve kesici uç radüsü 0.4 mm alınarak yapılan deneyler Sekil 11.2.a ve Şekil 11.2.b'de görülmektedir. Kuvvet grafiği incelenirse, talaş açısının azalmasıyla kesme kuvvetlerindeki artış görülmektedir. Her iki grafiğe birden bakılırsa (Şekil 11.2.a ve b) talaş açısının negatif değerlerinde kuvvet ve titreşimin birbirine paralel arttığı anlaşılmaktadır.



(a) (b)

Şekil 11.3.a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=75°, r=0,4), b) Titreşim genliği-talaş açısı grafiği (κ=75°, r=0,4)

Yaklaşma açısı 75° ve kesici uç radüsü 0.4 mm alınarak yapılan deneyler Sekil 11.3.a ve Şekil 11.3.b'de görülmektedir. Kuvvet grafiği incelenirse, talaş açısının azalmasıyla kesme kuvvetlerindeki artış görülmektedir. Her iki grafiğe birden bakılırsa (Şekil 11.3.a ve b) talaş açısının azalan değerlerinde kuvvet ve titreşimin birbirine paralel arttığı anlaşılmaktadır.



(a) (b)

Şekil 11.4.a) Bileşke kuvvet-talaş açısı grafiği (r=0,4), b) Yüzey pürüzlülüğü (Ra)-talaş açısı grafiği (r=0,4)

Şekil 11.4.a'da kesme kuvvetlerinin bileşkesi alınarak çizilen grafik görülmektedir. Bu grafiğe göre yaklaşma açısı büyüdükçe iş parçasına etki eden bileşke kuvvetin de arttığı açıkça bellidir. Aynı parametrelerde yapılan deneylerden elde edilen titreşim değerlerinde de artış görülmektedir. Kuvveteki artışın titreşimi artırdığını rahatlıkla söyleyebiliriz.

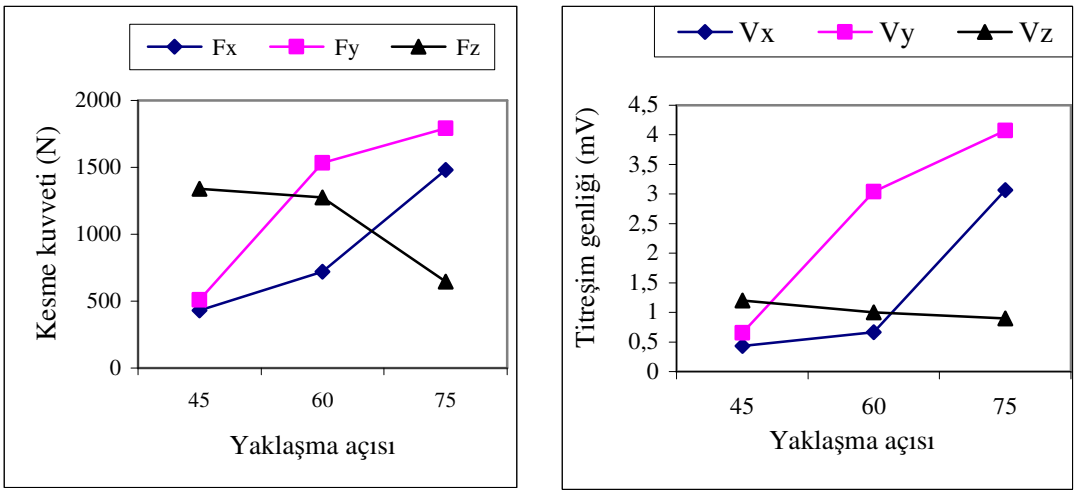
Şekil 11.4.b'de ise ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği görülmektedir. Grafiğe göre talaş açısının negatif artışı ile elde edilen pürüzlülük değerlerinde giderek artma meyli göze çarpmaktadır. Aynı grafikte yaklaşma açısının artmasıyla pürüzlülüğün de arttığı görülüyor.Ortalama yüzey pürüzlülüğündeki bu artış Şekil 11.1.b, Şekil 11.2.b ve Şekil 11.3.b'de elde edilen titreşim değerlerindeki artışla paralellik göstermektedir. Titreşim değerlerindeki bu artış miktarlarının yüzey pürüzlülüğünü artırdığı yorumunu rahatlıkla yapabiliriz.

Yorumları özetlersek; talaş açısındaki azalma ve yaklaşma açısındaki artmanın bir sonucu olarak kesme kuvvetleri artmış, kesme kuvvetlerindeki bu artış titreşim

genliğini fazlalaştırmış ve bu artışların doğal bir sonucu olarak da iş parçasındaki yüzey pürüzlülüğü değeri normalin üzerindeki bir seviyeye çıkmıştır diyebiriz.

11.2. Yaklaşma açısı (κ), takım radüsü (r) ve değişimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Deneylerde κ=45°, 60°, 75° yaklaşma açılı freze kafaları ve r=0,4-0,8-1,2 mm uç yarıçaplı takımlar kullanılmıştır. Talaş açısı γ= 0° olacak şekilde sabit tutulmuştur. Belirlenen parametrelere bağlı kalarak yapılan deneylerde değişik uç yarıçaplı takımlarla işleme esnasında meydana gelen kuvvet, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü değişimleri grafik halinde verilmiştir.

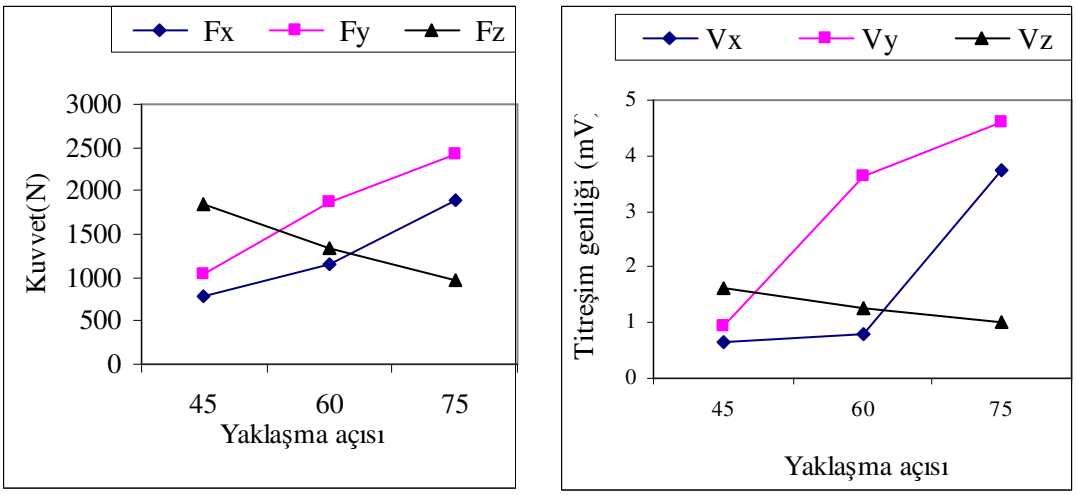


(a) (b)

Şekil 11.5.a) Kesme kuvveti-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,4), b) Titreşim genliği-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,4)

Şekil 11.5.a ve b'de talaş açısı ve takım radüsü sabit alınarak üç farklı deney yapılmıştır. Her deney üç farklı yaklaşma açısında gerçekleştirilmiştir. Şekil 11.5 a'da yaklaşma açısının artmasıyla kesme kuvvetinin nasıl etkilendiği, Şekil 11.5 b'de ise aynı parametrelerde aynı iş parçasından elde edilen titreşim grafiği görülmektedir. Şekil 11.5.a incelenirse yaklaşma açısının artmasıyla meydana gelen kesme kuvvetlerinden Fx ve Fy'nin arttığı, Fz kuvvetinin azaldığı belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 11.5.b'de yaklaşma açısının artmasıyla Vx ve Vy titreşim

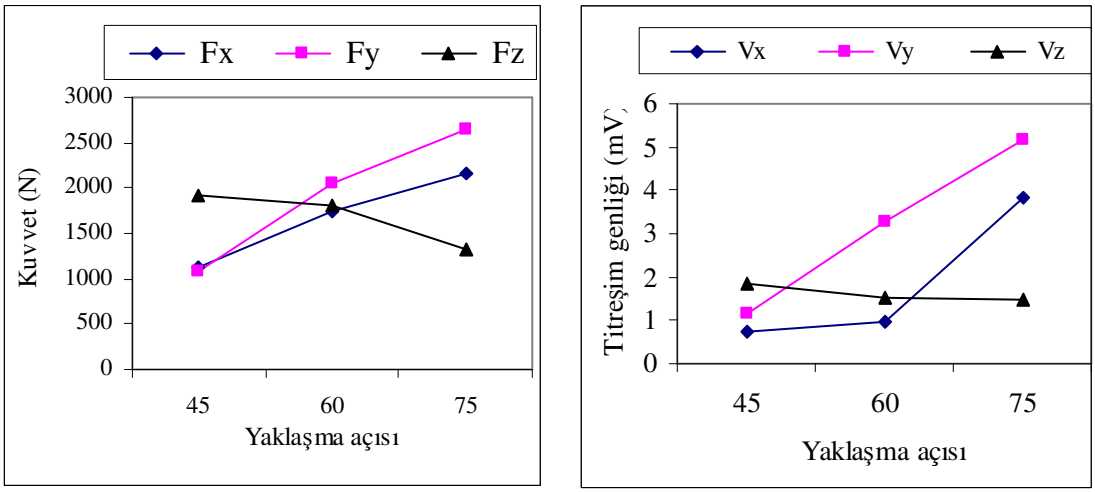
genliği değerlerinin artığı Vz'nin azaldığı grafikten anlaşılmaktadır. İki grafiğe birden bakarsak kesme kuvvetlerindeki artışın titreşimi artırdığı kesme kuvvetlerindeki azalmanın titreşimi azalttığını görebiliriz.



(a) (b)

Şekil 11.6.a) Kesme kuvveti-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,8), b) Titreşim genliği-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=0,8)

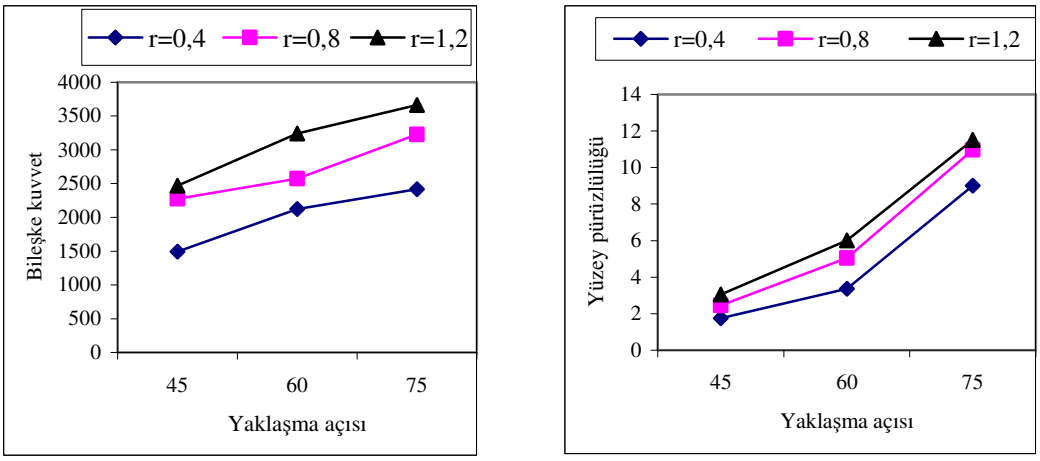
Şekil 11.6.a ve b'de talaş açısının ve takım radüsünün sabit değerlerinde kesme kuvveti yaklaşma açısı ilişkisi ve titreşim genliği-yaklaşma açısı ilişkisi grafiği olarak görülmektedir. Takım radüsünün 0.8 mm değerinde yapılan bu deneyde, yaklaşma açının artmasıyla kesme kuvvetlerindeki etkileşimin titreşim genliğinede aynı şekilde yansıdığını görmekteyiz. Takım radüsündeki artışın kesme kuvveti ve tırlama titreşimlerini bir önceki deneye göre daha fazla artırdığı belirgin bir şekilde görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 11.7.a) Kesme kuvveti-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=1,2), b) Titreşim genliği-yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°, r=1,2)

Şekil 11.7.a ve b'de talaş açısının ve takım radüsünün sabit değerlerinde kesme kuvveti-yaklaşma açısı ilişkisi ve titreşim genliği-yaklaşma açısı ilişkisi grafiği görülmektedir. Takım radüsünün 1,2 mm değerinde yapılan bu deneyde, yaklaşma açısının artmasıyla kesme kuvvetlerindeki etkileşimin titreşim genliğinde de aynı şekilde yansıdığını görmekteyiz. Takım radüsündeki artışın kesme kuvveti ve tırlama titreşimlerini bir önceki deneye göre daha fazla artırdığı belirgin bir şekilde görülmektedir.



(a) (b)

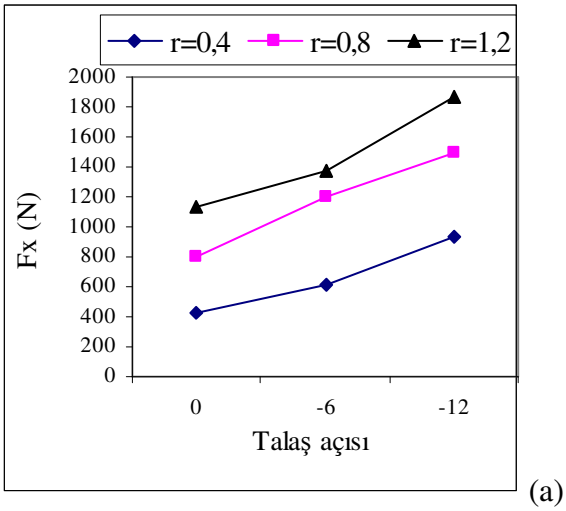
Şekil 11.8.a) Bileşke kuvvet-Yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°,), b) Yüzey pürüzlülüğü (Ra)-Yaklaşma açısı grafiği (γ= 0°)

Şekil 11.8.a'da kesme kuvvetlerinin bileşkesi alınarak çizilen grafik görülmektedir. Bu grafiğe göre takım radüsü büyüdükçe iş parçasına etki eden bileşke kuvvetin de arttığı açıkça bellidir. Aynı parametrelerde yapılan deneylerden elde edilen titreşim değerlerinde de artış görülmektedir. Kuvveteki artışın titreşimi artırdığını rahatlıkla söyleyebiliriz.

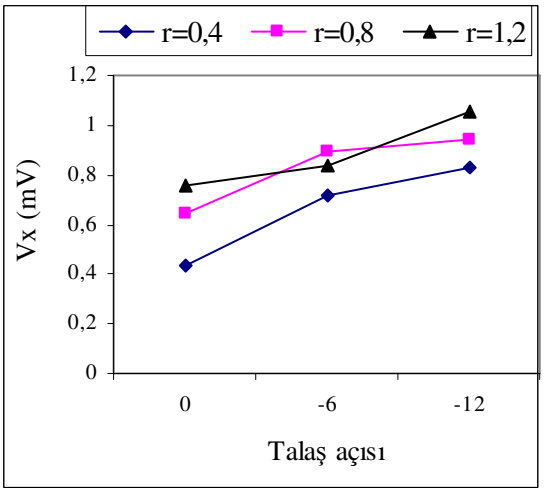
Şekil 11.8.b'de ise ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği görülmektedir. Grafiğe göre takım radüsünün artmasıyla elde edilen pürüzlülük değerlerinde giderek artma meyli göze çarpmaktadır. Aynı grafikte yaklaşma açısının artmasıyla pürüzlülüğün de arttığı görülüyor. Ortalama yüzey pürüzlülüğündeki bu artış Şekil 11.8.a'daki bileşke kuvvet grafiğindeki kuvvet artışı ile paralellik göstermektedir. Kuvvetteki bu artışın titreşimi, titreşim değerlerindeki bu artışın yüzey pürüzlülüğünü artırdığı ifade edilebilir.

11.3.Talaş açısı (κ) ve uç yarıçapı (*r*) değişimlerinin pürüzlülüğe olan etkileri

Bu deneylerde yaklaşma açısı sabit tutularak; talaş açısı ve takım radüsü değişimlerine göre kuvvet, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenmiştir.



(a)

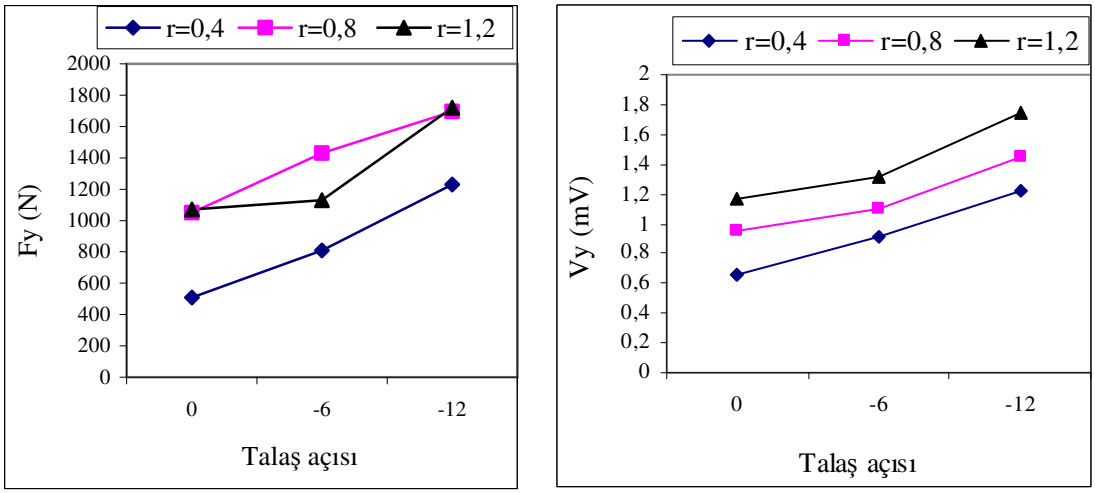


(b)

Şekil 11.9.a) Kesme kuvveti-talaş açısı grafiği (κ=45 °), b) Titreşim genliği- talaş açısı grafiği (κ=45 °)

Şekil 11.9.a'da yaklaşma açısı 45° olan freze kafasına üç değişik radüs ve talaş açısına sahip kesici uçlar takılarak yapılan dokuz adet deneyin grafiği görülmektedir. Bu grafiğe göre takım radüsünün artmasıyla kuvvetin belirgin şekilde arttığı anlaşılmaktadır.Aynı şartlarda elde edilen titreşim verileriyle elde edilen Şekil 11.9.b grafiğinde, takım radüsünün artmasıyla titreşim genliği değerlerinin arttığı da göze çarpmaktadır. Her iki grafiğe birden bakıldığında kesme kuvvetindeki artma ve/veya azalma oranının titreşim genliği değerleriyle aynı meyilde olduğunu söylemek mümkündür.

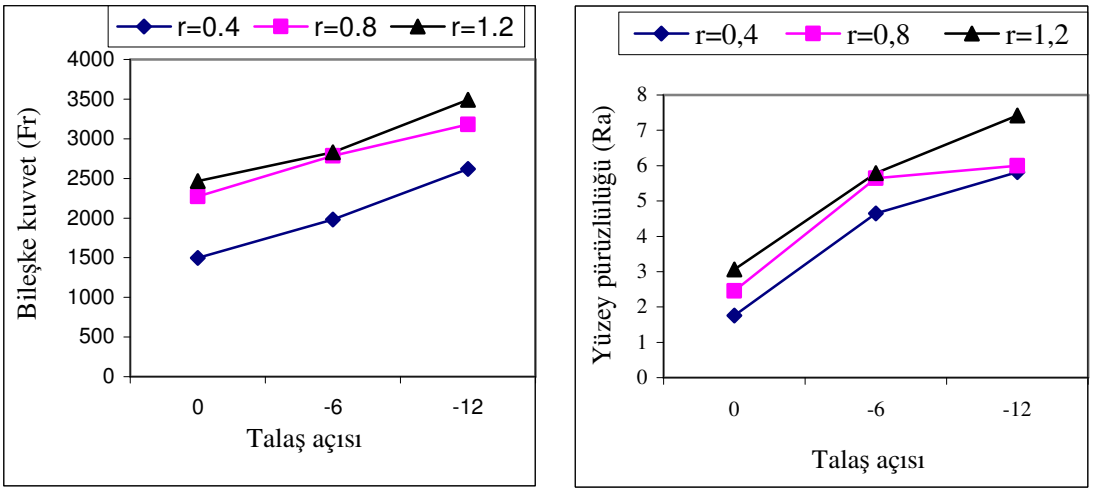
Şekil 11.10.a'da Fy (araba ilerleme yönü) kuvveti ile takım radüsü etkileşimi, Şekil 11.10.b'de yine aynı yöndeki titreşim genliği takım radüsü ilişkisi görülmektedir. Şekil 11.9'daki yorumun aynısını bu grafikten de çıkarabiliriz.



(a) (b)

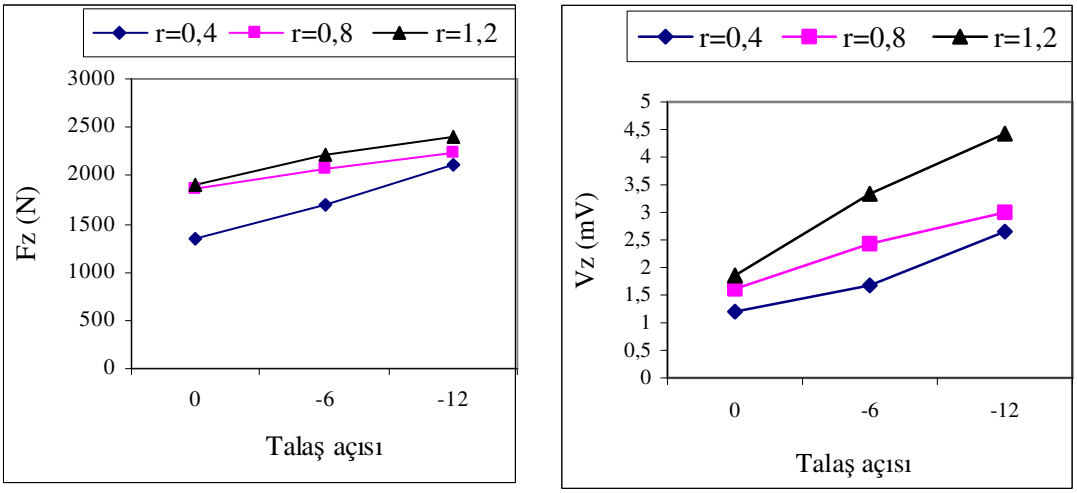
Şekil 11.10.a) Kesme kuvveti (Fy)-talaş açısı grafiği (κ=45°), b) Titreşim genliği (Vy)- talaş açısı grafiği (κ=45°)

Şekil 11.11.a'da Fz (konsol hareket yönü) ve takım radüsü ilişkisinin grafiği çizilmiştir. Grafik incelenirse, takım radüsünün arttırılmasıyla z yönündeki kesme kuvvetinin de fazlalaştığını görmekteyiz. Aynı parametrelerde ve aynı yöndeki titreşim verilerinden elde edilen grafiğe (Şekil 11.11.b) bakıldığında kuvvetteki artma veya azalma davranışının benzeri titreşim değerleri için de söylenebilir.



(a) (b)

Şekil 11.11.a) Kesme kuvveti (Fz)-talaş açısı grafiği (κ=45°), b) Titreşim genliği (Vz)- talaş açısı grafiği (κ=45°)



(a) (b)

Şekil 11.12.a) Bileşke kuvvet-talaş açısı grafiği (κ=45°), b) Yüzey pürüzlülüğü-talaş açısı grafiği (κ=45°)

Şekil 11.12.a'da yaklaşama açısının sabit değerinde (κ=45°) ve üç yönde (x,y,z) oluşan kesme kuvvetlerinin bileşkesi alınarak elde edilen grafik görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi uç radüsünün artması bileşke kuvveti de aynı şekilde etkilenmiştir, yani kuvvet yine artma meyli göstermiştir.

Şekil 11.12.b' de takım radüsünün her değeri için yüzey pürüzlülüğü-talaş açısı grafiği görülmektedir. Talaş açısı sıfır iken ve takım radüsünün 0.4, 0.8 ve 1.2

mm değerlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığı çok belirgindir. Şekil 11.9.b, Şekil 11.10.b, Şekil 11.11.b ve Şekil 11.12.b grafiklerinin hepsini birden incelersek; takım radüsündeki artışın titreşim genliğini artırdığını ve titreşimin artmasının da iş parçasının yüzeyindeki ortalama yüzey pürüzlülüğünü (Ra) artırdığı ifade edilebilir.

12. SONUÇLAR

Talaş kaldırma sırasında, kesici takımda takım geometrisine bağımlı olarak meydana gelen kesme kuvvetleri, titreşimler ve yüzey pürüzlülüğü gibi değerlerin önceden bilinip kesme parametreleriyle optimize edilmesi büyük önem arz etmektedir. Kesme parametrelerinin yükseltilerek işleme zamanının azaltılması aynı zamanda kesici takımda meydana gelen aşınmayı azaltıp kesici takım ömrünün artırılması için, kesici takım geometrisinde yapılan ayarlamalar en yaygın yöntem olarak bilinmektedir. Bu tez çalışmasında literatürlerden yola çıkılarak, talaşlı imalatta oldukça büyük bir öneme sahip yüzey pürüzlülüğünün takım geometrisinden ve tırlama titreşiminden ne derecede etkilendiği değerlendirilmiştir. Bu araştırmada elde edilen en önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir

1. Bu deneysel çalışmada talaş açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelendiğinde, talaş açısının daha küçük negatif değerlerinde kesme kuvvetinin artmasının bir sonucu olarak tırlama titreşimlerinin arttığı belirlenmiştir. $\gamma=0°$ talaş açılı takımla yapılan işlemede meydana gelen yüzey pürüzlülüğü $\gamma=-6°$ ve $\gamma=-12°$ açılarına göre daha düşük olarak gerçekleşmiştir.

2. Yaklaşma açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde, her yaklaşma açısında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yaklaşma açısı $\kappa=45°$ olduğu durumda kesme kuvveti ve tırlama titreşimi en küçük seviyede gerçekleşmiş, açı değerinin $\kappa=60°$ ve $\kappa=75°$ olduğu durumlarda kesme kuvvetinde meydana gelen artışlardan dolayı titreşimlerde önemli ölçüde yükselmeler olmuştur. İş parçası üzerinde oluşan yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerinin ölçülmesi sonucunda, pürüzlülüğün işleme sırasında meydana gelen tırlama titreşimi şiddetiyle orantılı olduğu tespit edilmiştir.
3. Uç radyüsünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelendiğinde elde edilen sonuçlarda, r=0,4 mm uçta en düşük R_a pürüzlülük değeri elde edilmiştir. r=0,8 mm ve r=1,2 mm uç radyüslü takımlarla işlenen numunelerde daha düşük R_a pürüzlülük değeri beklenirken tersi gerçekleşmiştir. Bunun sebebi takım uç radyüsünün büyümesi ve dolayısı ile takım ile iş parçası ara

yüzeyinde oluşan sürtünme alanının artmasıyla oluşan kuvvet ve artan kesme kuvvetinin bir etkisi olarak da tırlama titreşimin ortaya çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uç radyüsü r=1,2 mm uçlarla bitirme işlemleri, bu titreşimlerin her an ortaya çıkması ihtimalinden dolayı tavsiye edilmemektedir. Bitirme işlemleri için uç radyüsü r=0,4-0,8 mm kesici uçlar yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemede tavsiye edilmektedir.

Yapılacak talaş kaldırma işlemleri için, doğru kesici ve takım geometrisi seçiminde yukarıdaki açıklamalar dikkate alınmalıdır. Ancak, son bitirme işleminden önce dikkate alınması gereken diğer bazı değişkenler mevcut bu faktörlerden bağlama metodu, kesici takım açıları, tezgâh gücü, soğutma sıvısı, kesici takım uç maliyeti, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve devir sayısı önem taşımaktadır. Bu değişkenlerden genellikle, malzeme özellikleri, kaldırılacak talaş miktarı, iş parçası boyutu, iş parçası sertliği, iş parçası yüzey durumu, işleme operasyonu, yüzey pürüzlülüğü, tezgâh tipi ve iş bağlama mekanizmaları gibi sabit şartlardan herhangi bir değişikliğe gidilmez, fakat değişebilen şartlarda kesme operasyon işlemleri için en iyi kesici takımının seçilmesinde kesme şartlarının optimize edilmesi gerekir.

KAYNAKLAR

Aboulatta, O.B., (2001), "Surface Roughness Prediction Based On Cutting Parameters and Tool Vibrations in Turning Operations", *Journal of Material Processing Technology*, 118: 269-277.

Akkurt, M., (2000), "Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları", İstanbul, sf. 104-105.

Akün, F., (1956), "Tezgah Titreşimlerinin İşlenen Parçanın Durumu Üzerine Etkisi", İ.T.Ü Kütüphanesi, İstanbul.

Albrecht, A.B., (1956), "How to secure desired surface finish in turning operations", *American machinist*, pp. 133-136.

Albrecht, P., (1962), "Self-Induced Vibrations in Metal Cutting", *Journal of Engineeringfor Industry, Trans. of the ASME*, pp. 405-416.

Albrecht, P., (1965), "Dynamics of Metal Cutting Process", *Journal of Engineeringfor Industry, Trans. of the ASME*, pp. 429-441.

Altıntaş, Y. ve Budak, E., (1995), "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling", *Annals of the CIRP*, c.44/1, s.357-362.

Beauchamp, Y., Thomas, M., Masounave, A.Y., Youssef, A.Y., (1994), "Aplication of Full Factorial Design For The Development of Prediction Models For Surface Roughness in The Lathe Turning and Boring Operations", *Tenth international conferance of the Israel society for quality*, Part 2, Jerusalem, pp. 953-961.

Beauchamp, Y., Thomas, M., Youssef, A.Y., et Masounave, J., (1995), "Investigation of Cutting Parameter Effects On Surface Roughness in Lathe Boring Operation By Use of A Full Factorial Design", *Computers Industrial Engineering*, Vol.31, No.3/4, pp. 645-651.

Begeman, M.L., Ostwald, P.F. and Amstead, B.H., (1987), "Manufacturing Processes", *John Willey & Sons Inc*., Singapore.

Boothroyd, G., and Knight, W.A., (1989), "Fundamentals of Machining and Machine Tools". *Second edition, Marcel Dekker Inc.*,New York.

Budak, E., Altıntaş, Y., (1998), "Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Freedom Systems in Milling. Part I:

Çakır, M.C., (1999), "Modern Talaşlı İmalatın Esasları", *Vipaş Yayınları*, Bursa.

Çakır, Y.A., (1969), "Büyük Takım Tezgahlarının Araştırılması için Elektronik-Hidrolik Titreşim İkazcısı", *Doktora tezi*, İ.T.Ü., İstanbul.

Dagnall, H., (1980 (RTH)), "Exploring Surface Texture".

Das, M.K. ve Tobias, S.A., (1967), "The Relation Between the Static and Dynamic Cutting of Metals", *Int. J. Mach. Tool Des. Res*., vol. 7, Permagon Pres, pp.63-89.

Davies, M.A., Burns, T.J. and Evans, C.J., (1997), "On The Dynamic of Chip Formation in Machining Hard Materrials", *Ann. CIRP* 46, 25-30.

Ertürk, A., Budak, E. ve Özgüven, H., N., " İşleme Merkezlerinde İş Mili TakımTutucu Takım Sisteminin Dinamik Modellemesi" *12. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu UMTS*, 2005.

Galyer, J.F.W. and Shotbolt, C.R., (1993), "Metrology For Engineers", *Cassel Publishers Limited*, London, Vol. 9, pp. 191-194.

Ghani, A.K., and Choudhury, I.A., (2002), "Study of Tool Life Surface Roughness and Vibration in Machining Nodular Cast Iron With Ceramic Tool", *Journal of Material Processing Technology,* 127: 17-22.

Güden, K., (2005), "Meyil Açısı Ve Yaklaşma Açısının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Güllü, A., (1995), "Silindirik Taşlamada İstenen Yüzey Pürüzlüğünü Elde Etmek İçin Taşlama Parametrelerinin Bilgisayar Yardımıyla Optimizasyonu", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Makine Eğitim Bölümü, Ankara, 1-30.

Hahn, R.S., (1953), "Metal Cutting Chatter and Its Elimination", *Trans. ASME.*

Hana, N.H., ve Tobias, S.A., (1974), "A Theory of Nonlineer Regenerative Chatter", *J. Eng. Industry, trans. ASME*, PP. 247-255.

Hastings, W.F., Mathew, P. and Oxley, P.L.B., (1980), "A Machining Theory For Predicting Chip Geometry, Cutting Forces, etc., From Material Properties and Cutting Conditions", *proc. R. Soc.* Lond. A371, 569-587.

Insperger, T. ve Stephan, G., " *Vibration Frequencies in High-Speed Milling Processes Or a Positive Ansver to Davies Pratt, Duttererand Burns*" Journal of Manufacturing Science and Engineering. ISO 4287/1 (E/F/R), 2004.

Jang, D.Y., Choi, Y.G., Kim, H.G., Hsiao, A., (1996), "Study of The Corelation Between Surface Roughness and Cutting Vibrations To Develop An Online Roughness Measuring Tecnique İn Hard Turning", *International Journal of Machine Tools manufacture*, Vol. 36(4), pp. 453-464.

John L.Y. and Joseph C.C., (2001), "A Systematic Approach For Identifying Optimum Surface Roughness Performance in End-Milling Operations", *Journal of Industrial Technology*, Volume 17, Number 2.

Kayhan, M., ve Budak, E., (2004), "Investigating Effects of Chatter on Tool Life in Turning", *Proceedings of 4th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Sorrento, Italy.

Kim, S., K. Ve Lee, S., Y., " *Chatter Prediction of End Milling in a Vertical Machining Center*" Journal of Sound and Vibration 241(4), 567-586, 2000.

Knight, W.A., Sadek, M.M., ve Tobias, S.A., (1970), "Automatic Determination and Digitization of Machine-Tool Frequency Response Data", *Ad. MTOR*, vol. 11, pp. 7-19.

Knight, W.A., (1968), "Application of the Universal Machinability Chart to the Prediction of Machine Tool Stability", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, vol. 8, Permagon Press, pp. 1-14.

Koenigsberger, I. and Tlusty, J., (1971), "Stuctures of Machine Tools", *Permagon Pres*.

Kopac, J., and Bahor, M., (1999), "Interaction of The Technological History of A Workpiece Material and The Machining Parameters On The Desired Quality of The Surface Roughness of A Product", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 92-93.

Lee, W., Y. ve Kim, K., W. ve Sin, H., C., *" Design and Analysis of a Milling Cutter With the Improved Dynamic Characteristics*" International Journal of Machine Tools Manufacture 42 961-967, 2002.

Lin, J.S. and Weng, C.I., (1991), "Nonlinear Dynamics of The Cutting Process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 33, pp. 645-657.

Long, G.W. ve Lemon, J.R., (1965), "Structural Dynamics in Machine-Tool Chatter", *Journal Eng. Industry*, *Trans. ASME*, pp. 455-463.

Merrit, H.E., (1965), "Theory of Self-Excited Machine Tool-Chatter", *Journal of Eng. for Industry*, *Trans. ASME.*

Mike, S.L., Josep C.C., Cabel M.L., (1999), "Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling", *Journal of Industrial Technology*, Vol.15, No.1, 2-3.

Minis, I. ve Yanushevsky, T., (1993), "A New Theoretical Approach for the Prediction of Machine Tool Chatter in Milling", *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, c.115, s.1-8.

Nachtigal, C.L., ve Cook, N.H., (1970), "Active Control of Machine Tool Chatter", *Journal of Eng. for Industry*, *Trans. ASME*, pp. 238-244.

Neşeli, S., (2005), "Tornalamada Kesme Parametreleri, Takım Geometrisi ve Tırlama Titreşimlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi", *Yüksek Lisans Semineri*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Neşeli, S., (2006), "Tornalamada Takım Geometrisi ve Tırlama Titreşimlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri", *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Nigm, M.M., Sadek, M.M. ve Tobias, S.A., (1977),"Determination of Dynamic Cutting Coefficients Fron Steady State Cutting Data", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, vol. 17, Permagon Press, pp. 19-37.

Noaker, P.M., (1993), "How Smooth is Smooth Enough?", *Manuf. Eng*., 47-51.

Olsen, K.V., (1968), "Surface roughness on turned steel componenets and relevant matematical analysis", *The production engineer*, pp. 593-606.

Opitz, H., Kalkert, W. ve Rehling, E., (1965), "Design and Application of Electro-Hydraulic Exciters for The Investigation of Large Machine Tools", *Ad. MTDR*, vol. 6, pp. 5-21.

Peters, J., (1963), "What Can Vibration Research Contribute To Machine Tool Development", *Int. Res. Prod. Eng. ASME*, Pittsburgh, pp. 486-498.

Reason, R.E., (1970 (RTH)), "The Measurement of Surface Texture".

Recht, R.F., (1985), "A Dynamic Analysis of High-Speed Machining", *Trans. ASME J. Engng Industry* 107, 309-315.

Sağlam, H., (2004), "Metal Kesmede Veri Toplama ve Değerlendirme", *Lisans üstü ders notu*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Sandvik, (1996), "Modern Metal Cutting-A Practical Handbook", *Sandvik coromant,* Sandviken, Sweden, pp. V1-18-V1-24.

Sankar, R.S. and Osman, M.O.M., (1975), "Characterization of Manufactured Surface Using Random Function Excursive Technique", *American Society of Mechanical Engineering, Journal of engineering for industry*, Vol. 97, pp.190-195.

Sarnicola, J.F. ve Boothroyd, G., (1973),"Factors Which Influence Cutting Forces During Wave Removing Machine Tool Chatter", *Proc. 1 st No. Amer. Metalworking Res. Conf.*, Hamilton, Ontario, 1973, p. 111.

Saxsena, J.P., (1982), "Effect of Machining Conditions On Cutting Tool Vibrations", *Advanced Machining Tool, Design Manufacturing Technology*, pp.98-106.

Scarr A.J.T., (1991), "Metrology and Precision Engineering", *Mc. Graw-Hill Publishhing Company Limited*. New York.

Sweeney, G. and Tobias, S.A., (1963),"An Algebraic Method for the Determination of the Dynamic Stability of Machine Tools".*Int. Res. Prod. Eng. ASME*, Pittsburgh, pp. 475-485.

Swigert, A.M., (1942). "Story of Superfinish", *American Society of Mechanical Engineers*, Lynn Publishing Company, Detroit, p. 91ff.

Şahin, Y., (2000), "Talaş Kaldırma Prensipleri 1-2", *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara.

Şişman, T., (1989), "Metal Kesmede Tırlama Titreşimlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Taşkesen, A. ve Yücel E., " Bilgisayar Yardımıyla Takım Tezgahı Titiresimlerinin Nonlineer Ananlizi ve Geliştirilen Bir Bilgisayar Programı" *11. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu* Gazi Ünversitesi Mühendislik Fakültesi, 4-6 Eylül 2003.

Thomas, T.R., (1982), "Rough Surface", *Longman*, New York.

Thomas, T.R. and Charton, G., (1981), "Variation of Roughness Parameters On Same Typical Manufactured Surfaces". *Precision Engineering*, Vol. 3(2), pp. 91-96.

Thompson, R.A., (1969), "The Modulation of Chatter Vibrations", *Journal of Engineering for Industry, Trans ASME*, PP. 673-679.

Tlusty ,J., (1965), "A Method of Analysis of Machine Tool Stability", *Proc. 6th MTDR Conf.*, pp. 5-14.

Tlusty, J., (1999), "Manufacturing Processes and Equipment", *Prentice Hall*, NJ

Tlusty, J., (1970), "General Features of Chatter", *Machine Tool Structures*, vol. 1, Permagon Pres, pp.115-132.

Tlusty, J., Polacek, M., (1957), "Besipiele der behandlung der selbsterregten Schwingung der Werkzuegmaschinen", FoKoMa, Hanser Verlag, Munchen.

Tlusty, J. ve Ismail, F., (1981), "Basic Nonlinearity in Machining Chatter", *Annals of the CIRP*, c.30, s.21-25.

Tlusty, J., ve Polacek, M., (1963), "The Stability of Machine Tool Against Self-Excited vibration in Machining", *Prod. Eng. Research Conf.*, Pittsburgh, No.51. asme *Permagon Press*.

Tobias, S.A., (1965), "Machine Tool Vibration", *Willey*, New York.

Tobias, S.A., and Fishwick, W., (1958), "Theory of Regenerative Machine Tool Chatter", London.

Wallace, P.W. ve Andrew, C., (1965), "Some Effects of Tool Vibration Machining Forces", *J. Mach. Eng. Sci. (GB),* vol. 7, pp. 152.

Weck , M., (1985), "Handbook of Machine Tools", *Willey*, Vol.4, pp. 55-61.

Welbourn, D.B. and Smith, J.D., (1970), "Machine Tool Dynamics an Introductions", *Cambridge University Pres*.

Wu, D.W. and Liu, C.R., (1985), "A Nonlineer Analitical Model of Cutting Dynamics Based On Friction in Chip Formation", part 2, *J. Eng. Ind., ASME.*

Yaldız ve ark (2007) "Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque" Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) 1499–1511

Yim, D.Y. and Kim, S.W., (1991) "Optimum Sampling for Ra Roughness Measurement", *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 205, pp. 139-142,

Youssef, A.Y., Beauchamp, Y. and Thomas, M., (1994), "Comparison of A Full Factorial Experiment To Fractional and Taguchi Design in A Lathe Dry Turning Operation", *Computers Industrial Engineering*, Vol. 27, No.1-4, pp. 59-62.

Yuan, Z.J., Zhou, M. and Dong, S., (1996), "Effect of Diamond Tool Sharpness On Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface İntegrity in Ultraprecision Machining", *Journal of Material Processing Technology*, 62, pp. 327-330.

Yuan Zeh-jun and Cai Li-Jun., (1986), "A New Critical Stability Formula and A New Absolute Stability Criterion", *Annals of the CIRP*, Vol.35, 1.

Zang, G.M. and Kapor, S.G., (1991), "Dynamic Generation of Machined Surfaces, Part 2: Construction of Surface Topography", *Journal of Engineering For Industry, Transactions of the ASME*, Vol. 113, pp. 145-153.

Zharkov, I.F., (1985), "*Vibration in Metal Cutting*", Moskow.

EK-3

Ortalama Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

		Ra					Ra					Ra		
		γ=0	**γ=-6**	**γ=-12**			**γ=0**	**γ=-6**	**γ=-12**			**γ=0**	**γ=-6**	**γ=-12**
r=0.4	**κ=45**	1,754	4,652	5,816	**r=0.4**	**κ=45**	2,456	5,646	5,998	**r=0.4**	**κ=45**	3,058	5,787	7,416
	κ=60	3,368	6,488	7,568		**κ=60**	5,048	7,528	10,248		**κ=60**	6,018	9,678	11,328
	κ=75	8,998	9,768	12,658		**κ=75**	10,958	11,708	12,758		**κ=75**	11,508	12,658	23,838

EK-1
Ortalama Kuvvet Ölçüm Sonuçları

		Fx					Fy					Fz		
		γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12
r=0.4	κ=45	430	612	930	r=0.4	κ=45	509	810	1230	r=0.4	κ=45	1339	1700	2120
	κ=60	720	840	934		κ=60	1533	1886	2063		κ=60	1274	1290	1447
	κ=75	1481	1570	1740		κ=75	1792	1968	2211		κ=75	647	916	1320
		γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=-3	γ=-6	γ=-9	γ=-6		γ=0	γ=-6	γ=-12
r=0.8	κ=45	794	1198	1498	r=0.8	κ=45	1050	1430	1696	r=0.8	κ=45	1852	2066	2238
	κ=60	1150	1450	1871		κ=60	1875	2269	2656		κ=60	1331	1672	2072
	κ=75	1894	1980	2126		κ=75	2420	2560	2800		κ=75	976	1214	1665
		γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12
r=1.2	κ=45	1131	1371	1870	r=1.2	κ=45	1070	1130	1720	r=1.2	κ=45	1913	2204	2394
	κ=60	1734	1849	1989		κ=60	2060	2564	4176		κ=60	1806	2033	2135
	κ=75	2169	2327	2409		κ=75	2643	3038	6270		κ=75	1315	1852	1857

EK-2

Ortalama Titreşim Ölçüm Sonuçları

		Vx					Vy					Vz		
		γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12
r=0.4	κ=45	0,431	0,718	0,833	r=0.4	κ=45	0,652	0,917	1,224	r=0.4	κ=45	1,199	1,679	2,648
	κ=60	0,666	0,865	0,964		κ=60	3,041	3,929	4,497		κ=60	1,003	1,357	1,866
	κ=75	3,065	3,156	3,574		κ=75	4,074	5,134	6,048		κ=75	0,898	1,224	1,653
		γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=-3	γ=-6	γ=-9	γ=-6		γ=0	γ=-6	γ=-12
r=0.8	κ=45	0,643	0,895	0,943	r=0.8	κ=45	0,947	1,104	1,446	r=0.8	κ=45	1,612	2,429	2,998
	κ=60	0,794	0,977	1,142		κ=60	3,626	5,095	5,17		κ=60	1,254	1,814	2,85
	κ=75	3,742	3,842	4,218		κ=75	4,588	5,51	6,352		κ=75	0,999	1,484	1,99
		γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12			γ=0	γ=-6	γ=-12
r=1.2	κ=45	0,76	0,84	1,057	r=1.2	κ=45	1,173	1,321	1,741	r=1.2	κ=45	1,857	3,336	4,424
	κ=60	0,979	0,991	1,255		κ=60	3,275	5,2	5,699		κ=60	1,546	1,9	3,667
	κ=75	3,815	4,239	4,508		κ=75	5,191	5,827	6,611		κ=75	1,492	1,659	3,355