

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

**FARKLI TAKIM GEOMETRİLERİNİN  
İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatih BATMAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Dr. Ergün NART**

**Ağustos 2008**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TAKIM GEOMETRİLERİNİN  
İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih BATMAN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Bu tez 01 / 08 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

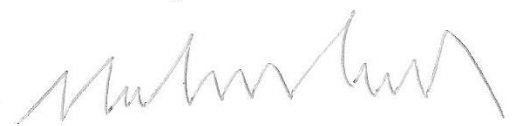
Yrd. Doç. Dr. Ergün NART  
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL  
Üye



Yrd. Doç. Dr. Muhammet CERİT  
Üye



## **TEŞEKKÜR**

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Ergün NART ve Yrd. Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL'a, DEFORM – 2D programının kullanılmasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Babür ÖZÇELİK'e, sıcaklık ölçme deneylerinde yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAYIKÇI'ya, tez süresince yardımlarını gördüğüm Arş Gör. Murat ÇOLAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos 2008  
Fatih BATMAN

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiii
TABLolar LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xx
SUMMARY.....	xxi

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür taraması.....	2

## BÖLÜM 2.

TORNALAMA VE TALAŞ KALDIRMA TERMOLOJİSİ.....	6
2.1. Tornalama.....	6
2.2. Torna Kalemalarının Sınıflandırılması.....	6
2.2.1. Takım çelikleri.....	7
2.2.2. Yüksek hız çelikleri.....	7
2.2.2.1. Yüksek hız çeliğın içerisinde bulunan alaşım elemanlarının çeliğe etkileri.....	8
2.2.3. Pulver metalurjik yüksek hız çelikleri.....	9
2.2.4. Sert metaller.....	9
2.3. Talaşlı İşlem Temel Terminolojisi.....	10
2.4. Talaş Kaldırma Mekaniği.....	12
2.5. Kesme Çeşitleri.....	12
2.5.1. Dik kesme.....	12

2.5.2. Eğik kesme.....	16
2.6. Talaş Kaldırma Teorileri.....	17
2.6.1. Ernst, merchant ve pispaen yaklaşımı.....	18
2.6.2. Lee ve shafer yaklaşımı.....	20
2.7. Talaş Kaldırmada Isı Oluşumu.....	21
2.7.1. Talaş kaldırmada sıcaklık dağılımı.....	25
2.8. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler.....	27
2.8.1. Takım geometrisi.....	27
2.8.2. Kesme hızı.....	29
2.8.3. İlerleme.....	30
2.8.4. Talaş boyutları.....	31
2.8.5. Kesme kuvvetleri.....	31
2.8.5.1. Kuvvet bağıntıları.....	33
2.8.5.2. Esas kesme kuvvetinin belirlenmesi.....	36
2.8.5.3. Kesme kuvvetlerinin takım üzerine etkileri.....	38
2.8.5.4. Kesme kuvvetlerinin iş parçası üzerine etkileri.....	39
2.8.6. Kesme gücü ve tezgah gücü.....	39
2.8.7. Takım aşınması.....	40
2.8.8. Takım ömrü.....	41

### BÖLÜM 3.

#### TORNALAMA İŞLEMLERİNDE KESME KUVVETLERİNİN VE

SICAKLIKLARIN ÖLÇÜLMESİ.....	44
3.1. Tornalama İşlemlerinde Kesme Kuvvetlerinin Ölçme Metotları.....	44
3.1.1. Bilinen bir yükü dengelenerek kuvvet ölçme.....	45
3.1.2. Elastik cismin deformasyonu ile kuvvet ölçme.....	45
3.1.3. Fiziksel özelliklerin değişimi ile kuvvet ölçme.....	46
3.2. Yük Hücreleri.....	46
3.2.1. Gerilme ve gerinim ilişkisi.....	46
3.2.2. Uzama ölçer.....	48
3.2.3. Dirençli tip uzama ölçer.....	49
3.2.4. Direnç ile gerinim arasındaki bağıntı.....	50
3.2.5. Uzama ölçer malzemeleri ve yapıştırıcıları.....	51

3.2.6. Wheatstone köprüsü.....	52
3.3. Tornalama İşlemlerinde Sıcaklık Ölçülmesi.....	54
3.3.1. Termokopullar.....	54
3.3.1.1. Termokopulların eleman tellerinin izole edilmesi.....	56
3.3.2. Isıl çift yöntemi.....	57
3.3.2.1. Takım iş parçası ısı çift yöntemi.....	58
3.3.2.2. Gömülmüş ısı çift yöntemi.....	60
3.3.2.3. Mekanik bir talaş kırıcı altına yerleştirilen ısı çift ile sıcaklık ölçme.....	62
3.3.2.4. Bileşik takım yöntemi.....	62
3.3.2.5. Kesilen tek tel-takım ısı çift (hareketli ısı çift) yöntemi.....	63
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>SONLU ELEMANLAR METODUNUN GENEL ANLATIMI.....</b>	<b>65</b>
4.1. Analitik Yaklaşımlar.....	67
4.1.1. Analitik yaklaşımların değerlendirilmesi.....	68
4.2. Nümerik Yaklaşımlar.....	69
4.3. Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi.....	70
4.4. Üç Boyutlu Gerilme ve Sonlu Elemanlar Analizi.....	71
4.4.1. Gerilme–gerinme ilişkileri.....	75
4.5. Dörtüzlü Sonlu Elemanların Formülasyonu.....	78
4.6. Sonlu Elemanlar Analizi.....	84
4.7. Sonlu Elemanlarda Kesme Simülasyonu.....	84
4.8. Sonlu Elaman Modeli.....	89
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>91</b>
5.1. Giriş.....	91
5.2. İş Parçası Malzemesi.....	92
5.3. HSS Torna Kalemlerinin Kenar Uç Geometrilerinin Elde Edilmesi	93
5.4. Sistem Donanımı.....	96
5.5. Sistem Kalibrasyonları.....	97

5.5.1. Kesme kuvveti ölçüm sistemi kalibrasyonu.....	97
5.5.2. Sıcaklık ölçme sistemi kalibrasyonu.....	98
5.6. Deneysel Çalışmalar.....	99
5.7. Sonlu Elemanlar Analizi.....	100
5.7.1. Deform – 2d programın yapısı.....	101
5.7.1.2. Kesme simülasyonu oluşturulması.....	101
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	105
6.1. Giriş.....	105
6.2. Deneysel Sonuçlarının Kıyaslanması.....	105
6.2.1. Aynı kesme şartlarında takımların kesme kuvveti açısından karşılaştırılması.....	105
6.2.1.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar.....	106
6.2.1.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar.....	114
6.2.2. Farklı ilerleme hızlarında takımların kesme kuvveti açısından karşılaştırılması.....	122
6.2.2.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar.....	122
6.2.2.2. Pahlı kalem kenar uçları.....	124
6.2.3. Farklı kesme hızlarında takımların kesme kuvveti açısından karşılaştırılması.....	127
6.2.3.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar.....	127
6.2.3.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar.....	130
6.2.4. Yarıçaplı ve pahlı kesici kenarlı takımların bütün kesme şartları için karşılaştırılması.....	133
6.3. Kesme Kuvvetlerinin Deneysel ve FEM Sonuçlarının Kıyaslanması..	136
6.3.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar.....	137
6.3.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar.....	143
6.4. Takım Talaş Ara Yüzeydeki Sıcaklıkların Deneysel Sonuçlarının Kıyaslanması.....	149
6.4.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar.....	149
6.4.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar.....	152
	155

6.4.3. Yarıçaplı ve pahlı kesici kenarlı takımların sıcaklıklarının kıyaslanması.....	
6.5. Sonuç ve Öneriler.....	157
6.5.1. Sonuçlar.....	157
6.7.2. Öneriler.....	158
KAYNAKLAR.....	160
ÖZGEÇMİŞ.....	163



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Si	: Silisyum
Cr	: Krom
W	: Volfram
Mo	: Molibden
V	: Vanadyum
HRC	: Rockwell sertlik
HSSE	: Yüksek hız çeliği kobaltlı
Ni	: Nikel
TiN	: Titan nitrür
TiCN	: Titan karbon nitrür
TiAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Titan alüminyum oksit
WC	: Saf wolfram karbür
TiC	: Titan karbon
TaC	: Tantal karbon
Co	: Kobalt
$\gamma$	: Talaş açısı
v	: Kesme hızı
t	: Deformasyona uğramamış talaş kalınlığı
t <sub>c</sub>	: Talaş kalınlığı
$\phi$	: Talaş kıvrılma yarıçapı
$\alpha$	: Boşluk açısı

$\beta$	: Kama açısı
R	: Bileşke takım kuvveti
R <sub>1</sub>	: Bileşke talaş kuvveti
V <sub>c</sub>	: Talaş hızı
$\phi$	: Kayma açısı
AB	: Kayma düzlem uzunluğu
rc	: Talaş oranı veya talaş basıncı
$\delta$	: İş parçasının yoğunluğu
l	: Takım – talaş yüzeyi uzunluğunca temas uzunluğu
$\gamma_1$	: Talaş kayma uzaması
V <sub>s</sub>	: Kayma hızı
$\lambda$	: Eğim açısı
Fr	: Takımın kesme kenarını etkileyen bileşke kuvveti
F <sub>c</sub>	: Esas kesme kuvveti
F <sub>t</sub>	: İtme kuvveti
$\tau_s$	: Kayma düzlemi üzerinde iş malzemesinin kayma dayanımı
A <sub>s</sub>	: Kayma düzlemi alanı
A <sub>c</sub>	: Deforme olmamış talaş kesiti alanı
$\gamma_{ne}$	: Normal talaş açısı
k	: 1 kaynağa bak
$\tau_{so}$	: 1 kaynağa bak
$\beta_s$	: Sürtünme açısı
BC	: Takım-talaş ara yüzeyi
BD	: İş parçasının işlenmiş yüzeyi arasındaki serbest kenar
Q <sub>maks</sub>	: Toplam ısı (W)
Q <sub>c</sub>	: Talaşla taşman ısı (W)

$Q_w$	: İş parçasına iletilen ısı (W)
$Q_t$	: Takıma iletilen ısı (W)
$\theta_m$	: İkinci deformasyon bölgesi boyunca sürtünmeyle oluşan sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_s$	: Birinci deformasyon bölgesi boyunca geçen malzemedeki sıcaklık artışı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta_0$	: İş parçasının başlangıçtaki sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
$s$	: İlerleme (mm/dev)
$n$	: Devir sayısı (dev/dak)
$D$	: Parça çapı
$D_o$	: İşlenmiş malzeme çapı
$u$	: İlerleme hızı
$a$	: Paso kalınlığı
$b$	: Talaş genişliği
$h$	: Talaş kalınlığı
$d$	: Bir paso kaldırdıktan sonraki çap
$F_v$	: İlerleme kuvveti
$F_p$	: Radyal kuvveti
$F$	: Sürtünme kuvveti
$F_s$	: Kayma düzlemi boyunca etki eden kuvvet
$F_R$	: $F_c$ ile $F_p$ bileşke kuvveti
$F_{ns}$	: $F_s$ dik kuvvet
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$k_v$	: Kesme hızı faktörü
$k_\gamma$	: Talaş açısı faktörü
$k_a$	: Takımın aşınma faktörü
$k_t$	: Takım malzemesi faktörü

ks	: Özgül kesme direncini (MPa)
$\chi$	: Kesme kenar açısı
$f$	: İlerleme değeri
Ps	: Kesme gücü
Pm	: Tezgah gücü
$\eta_m$	: Kinematik sistemin verimi
BUE	: Built-up edge – kesici kenar üzerinde talaş yığılması
T	: Takım ömrü
HSS	: High speed steel (yüksek hız çeliği)
$\sigma$	: Gerilme
$\varepsilon$	: Gerinim
$\nu_p$	: Poisson oranı
$\rho$	: Özdirenç
GF	: Gage Faktörü
I	: Akım
mV	: Milivolt
EMF	: Elektro motor frekansı
emk	: Elektro motor kuvveti
[K]	: Cismin tümel direngenlik matrisi
{P}	: Tümel kuvvet vektörü
FEM	: Finite element method (sonlu elemanlar metodu)
$\sigma_x$	: x eksenini doğrultusundaki normal gerilme
$\sigma_y$	: y eksenini doğrultusundaki normal gerilme
$\sigma_z$	: z eksenini doğrultusundaki normal gerilme
$\tau_{xy}$	: xy düzlemindeki kayma gerilmesi
$\tau_{xz}$	: xz düzlemindeki kayma gerilmesi

$\tau_{yz}$	: yz düzlemindeki kayma gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler ( $\sigma_p$ )
$\sigma_{VM}$	: Von mises teorisi
$\epsilon_x$	: x eksenini doğrultusundaki normal gerinme
$\epsilon_y$	: y eksenini doğrultusundaki normal gerinme
$\epsilon_z$	: z eksenini doğrultusundaki normal gerinme
$\gamma_{xy}$	: xy düzlemindeki kayma gerilmesi
$\gamma_{xz}$	: xz düzlemindeki kayma gerilmesi
$\gamma_{yz}$	: yz düzlemindeki kayma gerilmesi
$\{u\}$	: Genel yer değiştirme vektörü
$\{q\}$	: Düğümlere ait yer değiştirme vektörü
$\{\sigma\}$	: Gerilme vektörü
$[N]$	: Şekil fonksiyonları matrisi
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$	: Parametrik koordinatlar
$q_n$	: Birim hacimde birim zamanda sürtünmeden dolayı üretilen ısı (W/m <sup>3</sup> )
$k$	: Isı iletim katsayısı (W/m*K)
$p$	: Malzemenin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$c$	: Özgöl ısı (J/kg*K)
$[K(e)]$	: Elemanın direngenlik matrisi
Dev	: Devir
3B	: Üç boyut
VC	: Vanadyum karbür
N	: Newton

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kalem micro geometrisi.....	2
Şekil 1.2.	Kalem geometrisi için şematik modelleri.....	3
Şekil 1.3.	Deneylerde kullanılan kalem kenar uç geometrileri.....	3
Şekil 1.4.	Kalem kenar uç görünümleri.....	4
Şekil 2.1.	Kesici takımın kullanıldığı tornalama işlemi.....	6
Şekil 2.2.	HSS torna kalemleri.....	8
Şekil 2.3.	Talaşlı işlem temel terminolojisi.....	11
Şekil 2.4.	Dik kesme ve kesici takım açıları.....	13
Şekil 2.5.	Hız üçgeni.....	15
Şekil 2.6.	Eğik kesme.....	16
Şekil 2.7.	Ortogonal kesme kuvvet diyagramı.....	18
Şekil 2.8.	Ortogonal kesme için lee ve shaffer'ın kayma hattı alanı teorisi...	21
Şekil 2.9.	Dik (ortogonal) kesmede ısı oluşumu.....	22
Şekil 2.10.	Metal işlemede ısı dağılımı.....	23
Şekil 2.11.	Sıcaklığın kesme hızı ve ilerlemeye göre değişimi.....	24
Şekil 2.12.	Dik kesme sırasında talaş ve iş parçası arasındaki sıcaklık dağılımı.....	25
Şekil 2.13.	Talaş kaldırmada kesme hızının oluşan sıcaklık üzerindeki etkisi.....	26
Şekil 2.14.	Torna Kalemi.....	27
Şekil 2.15.	Tornalamada takımın çalışma düzemi.....	28
Şekil 2.16.	Tornalamada talaş kaldırma işlemi.....	30
Şekil 2.17.	İlerleme.....	30
Şekil 2.18.	Talaş boyutları.....	31
Şekil 2.19.	Farklı malzemeler için kesme hızının, kesme kuvvetine etkisi.....	32
Şekil 2.20.	Kesme kuvvetinin talaş açısına göre değişimi.....	32

Şekil 2.21.	Kesme kuvvetinin, kesme kenar açısına ve talaş kesitine göre değişimi.....	33
Şekil 2.22.	Dik kesmede oluşan kuvvetler.....	34
Şekil 2.23.	Kesme kuvvetlerinin torna tezgâhı için yorumlanması.....	34
Şekil 2.24.	Kesme kuvvetleri için kullanılan hesaplama üçgenleri.....	35
Şekil 2.25.	Talaş kesitinin kesme kenarı açısı ile ilişkisi.....	37
Şekil 2.26.	Talaş kaldırma kuvvetleri.....	38
Şekil 2.27.	Kesici takımında görülen aşınma biçimleri.....	41
Şekil 2.28.	Ömür kesme hızı bağıntısı.....	43
Şekil 3.1.	Gerilmenin tanımı.....	47
Şekil 3.2.	Çapsal gerilme, boylamsal gerilme ve poisson oranı.....	48
Şekil 3.3.	Yük hücresinin seramik film üzerindeki görünümü.....	49
Şekil 3.4.	F kuvvetinin etkisi altındaki çubuğun şekil değişimi.....	50
Şekil 3.5.	Yaprak ve tel tip uzama ölçerler.....	51
Şekil 3.6.	Wheatstone köprüsü.....	53
Şekil 3.7.	Kesme bölgesindeki sıcaklıkları ölçmek için geliştirilen yöntemler.....	54
Şekil 3.8.	Basit termokopul.....	54
Şekil 3.9.	Sıcak nokta ile soğuk nokta sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 3.10.	Termokopul üzerinde mV (EMF).....	56
Şekil 3.11.	Termokopul izolasyon şeması.....	57
Şekil 3.12.	Isıl çift yöntemi.....	58
Şekil 3.13.	Termoelektrik tekniği ile takım-talaş ara yüzey sıcaklığının ölçümü için geliştirilen ısıl çift yöntemi.....	59
Şekil 3.14.	Takım iş parçası ile oluşturulan ısıl çift.....	60
Şekil 3.15.	İş parçasına gömülmüş ısıl çift yöntemi.....	61
Şekil 3.16.	Takıma gömülmüş ısıl çift yöntemi.....	61
Şekil 3.17.	Talaş kırıcının altına yerleştirilmiş ısıl çift yöntemi.....	62
Şekil 3.18.	Birleşik takım yöntemi.....	63
Şekil 3.19.	Kesilen tek tel-takım ısıl çift (hareketli ısıl çift) yöntemi.....	64
Şekil 4.1.	Analiz metotlarının gösterilişi.....	65
Şekil 4.2.	Talaş kaldırma analizlerinde kullanılan iki temel model.....	68

Şekil 4.3.	Dinamik kesme kuvvetlerini değerlendirmek amacıyla kullanılan paralel sınırlı kayma bölgesi modeli.....	71
Şekil 4.4.	Üç boyutlu gerilme elemanı.....	72
Şekil 4.5.	Üç yüzeyli eleman üzerindeki gerilme bileşenleri.....	73
Şekil 4.6.	Lineer dört yüzlü.....	79
Şekil 4.7.	Talaş kaldırma işlemi için ikiz düğüm modeli.....	85
Şekil 4.8.	Arola ve Ramulu'nun FEM çalışması.....	87
Şekil 4.9.	Sonlu eleman modelinin şematik gösterimi.....	88
Şekil 5.1.	Verilerin elde edilmesi süreci şematik gösterimi.....	91
Şekil 5.2.	İş parçası ölçüleri.....	92
Şekil 5.3.	HSS torna kalemi kesici kenar mikro geometri modelleri.....	93
Şekil 5.4.	Kesici takım talaş yüzeyi ve kesici kenarın üst görünüşü A) Pahlı kesici kenar 50 $\mu\text{m}$ B) Yarıçaplı kesici kenar 35 $\mu\text{m}$ .....	95
Şekil 5.5.	Sistem donanımı.....	96
Şekil 5.6.	Deney düzeneği.....	97
Şekil 5.7.	Kesici takım ile yük hücrelerinin konumları.....	98
Şekil 5.8.	HSS torna kalemlerinin sıcaklık ölçme sistemi için kör delik ölçüleri.....	99
Şekil 5.9.	HSS torna kalemlerinin açıları.....	100
Şekil 5.10.	Kesme simülasyonu.....	102
Şekil 6.1.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08$ mm/dev, $v = 47,93$ m/dk).....	106
Şekil 6.2.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08$ mm/dev, $v = 67,51$ m/dk).....	107
Şekil 6.3.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08$ mm/dev, $v = 95,86$ m/dk).....	107
Şekil 6.4.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11$ mm/dev, $v = 47,93$ m/dk).....	108
Şekil 6.5.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11$ mm/dev, $v = 67,51$ m/dk).....	109
Şekil 6.6.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11$ mm/dev, $v = 95,86$ m/dk).....	109



Şekil 6.7.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14$ mm/dev, $v = 47,93$ m/dk).....	110
Şekil 6.8.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14$ mm/dev, $v = 67,51$ m/dk).....	111
Şekil 6.9.	Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14$ mm/dev, $v = 95,86$ m/dk).....	112
Şekil 6.10.	Yarıçaplı takımların aynı kesme şartlarında bileşke kuvvetleri.....	113
Şekil 6.11.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08$ mm/dev, $v = 47,93$ m/dk).....	114
Şekil 6.12.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08$ mm/dev, $v = 67,51$ m/dk).....	115
Şekil 6.13.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08$ mm/dev, $v = 95,86$ m/dk).....	115
Şekil 6.14.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11$ mm/dev, $v = 47,93$ m/dk).....	116
Şekil 6.15.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11$ mm/dev, $v = 67,51$ m/dk).....	117
Şekil 6.16.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11$ mm/dev, $v = 95,86$ m/dk).....	117
Şekil 6.17.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14$ mm/dev, $v = 47,93$ m/dk).....	118
Şekil 6.18.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14$ mm/dev, $v = 67,51$ m/dk).....	119
Şekil 6.19.	Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14$ mm/dev, $v = 95,86$ m/dk).....	120
Şekil 6.20.	Pahlı takımların aynı kesme şartlarında bileşke kuvvetleri.....	121
Şekil 6.21.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı yarıçaplı $55 \mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	122
Şekil 6.22.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı yarıçaplı $135 \mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	123
Şekil 6.23.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı yarıçaplı $155 \mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	123

Şekil 6.24.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	124
Şekil 6.25.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı pahlı 30 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	125
Şekil 6.26.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı pahlı 50 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	125
Şekil 6.27.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı pahlı 150 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	126
Şekil 6.28.	Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	127
Şekil 6.29.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı yarıçaplı 55 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	128
Şekil 6.30.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı yarıçaplı 135 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	128
Şekil 6.31.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı yarıçaplı 155 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	129
Şekil 6.32.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	130
Şekil 6.33.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı pahlı 30 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	131
Şekil 6.34.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı pahlı 50 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	131
Şekil 6.35.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı pahlı 150 $\mu\text{m}$ takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	132
Şekil 6.36.	İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri.....	133
Şekil 6.37.	Keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) - keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	134
Şekil 6.38.	Yarıçaplı 55 $\mu\text{m}$ – pahlı 50 $\mu\text{m}$ kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	135
Şekil 6.39.	Yarıçaplı 155 $\mu\text{m}$ – pahlı 150 $\mu\text{m}$ kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 6.40.	Yarıçaplı 135 $\mu\text{m}$ deney ve FEM ortalamaları.....	138

Şekil 6.41.	Yarıçaplı 155 µm deney ve FEM ortalamaları.....	140
Şekil 6.42.	Yarıçaplı 55 µm deney ve FEM ortalamaları.....	142
Şekil 6.43.	Pahlı 30 µm deney ve FEM ortalamaları.....	144
Şekil 6.44.	Pahlı 50 µm deney ve FEM ortalamaları.....	146
Şekil 6.45.	Pahlı 150 µm deney ve FEM ortalamaları.....	148
Şekil 6.46.	Yarıçaplı takımların sıcaklıkların karşılaştırılması.....	149
Şekil 6.47.	Yarıçaplı takımların sıcaklık dağılımı.....	151
Şekil 6.48.	Pahlı takımların sıcaklıkların karşılaştırılması.....	152
Şekil 6.49.	Pahlı takımların sıcaklık dağılımı.....	154
Şekil 6.50.	Keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) - keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) sıcaklıkları karşılaştırılması....	155
Şekil 6.51.	Yarıçaplı 55 µm – pahlı 50 µm sıcaklıkları karşılaştırılması.....	156
Şekil 6.52.	Yarıçaplı 155 µm – pahlı 150 µm sıcaklıkları karşılaştırılması.....	156

## TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1.	Ortogonal kesme ile ilgili yapılan analitik çalışmalar.....	69
Tablo 4.2.	Talaş ayrılması kriterleri.....	86
Tablo 5.1.	Pirinç malzemenin kimyasal birleşimi.....	92
Tablo 5.2.	Pirinç malzemenin termofiziksel özellikleri.....	93
Tablo 5.3.	Kesici kenar geometrilerinin tasarlanmış ve gerçek ölçüleri.....	94
Tablo 5.4.	HSS torna kaleminin kimyasal birleşimi.....	96
Tablo 5.5.	HSS torna kaleminin termofiziksel özellikleri.....	96
Tablo 5.6.	Kesme şartları.....	100
Tablo 6.1.	Yarıçaplı 135 $\mu\text{m}$ FEM simülasyonlarının hataları.....	137
Tablo 6.2.	Yarıçaplı 155 $\mu\text{m}$ FEM simülasyonlarının hataları.....	139
Tablo 6.3.	Yarıçaplı 55 $\mu\text{m}$ FEM simülasyonlarının hataları.....	141
Tablo 6.4.	Pahlı 30 $\mu\text{m}$ FEM simülasyonlarının hataları.....	143
Tablo 6.5.	Pahlı 50 $\mu\text{m}$ FEM simülasyonlarının hataları.....	145
Tablo 6.6.	Pahlı 150 $\mu\text{m}$ FEM simülasyonlarının hataları.....	147
Tablo 6.7.	Yarıçaplı takımların sıcaklıklarının sıralamaları.....	150
Tablo 6.8.	Pahlı takımların sıcaklık sıralamaları.....	153

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Ortogonal kesme, kesici takım kenar hazırlama, Kesme kuvvetleri, takım – talaş ara yüzey sıcaklıkları, FEM simülasyonu

Bu çalışmada, farklı mikro geometrik özelliklere sahip HSS kesici takımların kesme kuvvetine ve takım – talaş ara yüzeyi sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Esas kesici kenara verilen ve boyutları 30 ile 150 mikron arasında değişen pahlı ve yay şeklindeki mikro geometrik özelliğin yukarıdaki parametrelere olan etkisi sivri uçlu kesici kenara kıyasla incelenmiştir.

Kesme deneyleri pirinç malzeme üzerinde, dik (ortogonal) tornalama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde soğutma sıvı kullanılmamıştır. Kesme işlemini simüle eden bir FEM modeli geliştirilerek, elde edilen deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlarda yarıçaplı ve pahlı uç kenar geometrileri artıkça kesme kuvvetleri arttığı gözlenmektedir.

# **THE EFFECT OF DIFFERENT CUTTING EDGE MICRO GEOMETRIES ON MACHINABILITY PARAMETERS**

## **SUMMARY**

**Key Works:** Orthogonal cutting, Tool edge preparation, cutting forces, Tool – chip interface temperature, FEM simulation

In this study, the effect of cutting edge micro geometry on cutting forces and cutting temperatures has been investigated during orthogonal turning of CuZn37 brass as the test material. These types of micro geometry were used namely, chamfered, round and sharp edges with various sizes between 30 and 150 microns.

The micro geometry can considerably affect the tools performance and some other properties such as cutting force, temperature, tool wear and surface finish. The results showed that cutting forces and temperatures produced by round and chamfered micro geometry increased with increasing edge dimensions. A FEM model has been developed for predicting cutting forces and the results were compared with that of the test results.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Talaş kaldırma işlemlerinde temel amaç; kesici takımın yüksek performansla istenilen özelliklerde, maksimum takım ömründe talaş kaldırabilmesidir. Son yıllarda işleme tekniğinde meydana gelen değişikliklere karşılık tornalama mikro işlemede kalem uç geometrilerinin etkilerini anlamaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Önemli deneylerde ve teorik analizlerde kalem kesici uçun talaş kaldırma işleminde çok temel durumları etkilediği kanıtlanmıştır. Metal kesmede kalem geometrisinin kesme yöntemlerinde; kesme kuvvetleri, gerilmeler, sıcaklıklar, deformasyon bölgesi ve yüzey bütünlüğü gibi etkilerin önemli sonuçları vardır.

Kesme işlemi; kesici takımın geometri parametreleri (talaş açısı, boşluk açısı), kesme şartları (kesme hızı, ilerleme ve paso derinliği) ve iş parçası – kesici takım malzeme çifti için kesme kuvvetlerinin bilinmesi ve kesici takımdaki gerilme ve sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi amacıyla analiz edilmektedir. Bu amaçla deneysel, sonlu elemanlar metodu ve analitik yöntemler gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

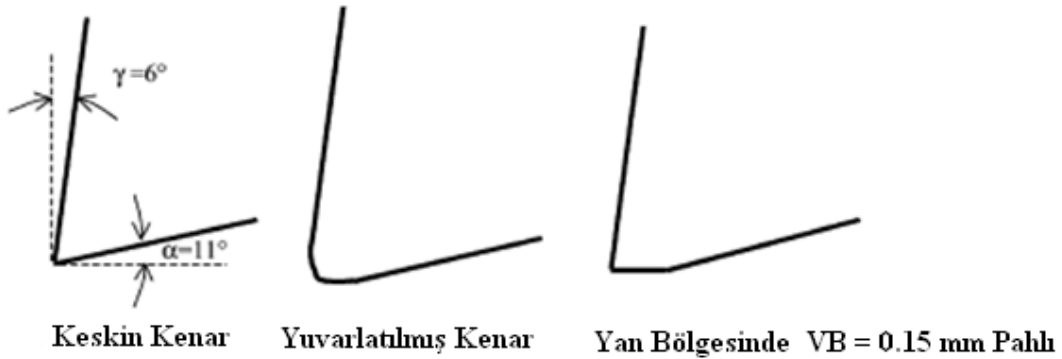
Bugüne kadar talaş kaldırma işlemini tam anlamıyla analiz edebilecek bir sonlu elemanlar metodu geliştirilememiştir. Bunun sebebi talaşlı imalat alanında çalışan birçok araştırmacının ortogonal kesme işlemindeki özel konularla ilgili özel sonlu eleman kodları yazma eğiliminde olmalarıdır.

Bu tez çalışmasında, universal torna tezgâhında ortogonal işleme yöntemi kullanılarak pirinç (CuZn37) boru malzemenin üç farklı takım geometrileri kullanılarak kesme kuvvetlerini, takım – talaş ara yüzeyindeki sıcaklıklarının deneysel sonuçları, sonlu elemanlar modelleme yöntemi ile elde edilen kesme simülasyonu sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

### 1.1. Literatür Taraması

Talaşlı imalatta micro işlemede kalem kenar uç geometrilerinin kesme kuvvetleri, gerilmeler, sıcaklıklar, deformasyon bölgesi ve yüzey bütünlüğü etkileri vardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile değişik kesme yöntemleri kullanılarak bu etkiler analiz edilmektedir. Bu amaçla literatür incelendiğinde çeşitli kalem kenar uç geometrileri ile talaş kaldırmadaki etkilerin iyileştirilmesine ve çeşitli sonlu elemanlar modelleri kullanılarak gerçek deney ortamındaki değerlere ulaşılması amaçlanmıştır.

2003 yılında Saoubi ve Chandrasekaran kalem mikro geometrisinde ortogonal tornalama esnasında kalem kaplaması boyunca sıcaklığın etkisi araştırmışlardır. 5 tane kalem kenar uç geometrisi yapılmış ve bu kenar uçların 2 tanesine PVD - TiN kaplama yapılarak sıcaklıkları CDD kızıl ötesi termal kamerayla ölçülmüştür. FEM sayısal modeli yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kalem kenar uç geometrileri; yarıçaplı  $2 \pm 0.7 \mu\text{m}$ , yarıçaplı  $25 \pm 4 \mu\text{m}$ , yarıçaplı  $2 \pm 0.7 \mu\text{m}$  yan bölgesinden  $0.15 \text{ mm}$  pahlı kenar, yarıçaplı  $5 \pm 3 \mu\text{m}$  ve  $5 \mu\text{m}$  TiN kaplamalı, yarıçaplı  $28 \pm 3 \mu\text{m}$  ve  $5 \mu\text{m}$  TiN kaplamalı olarak belirlemişlerdir (Şekil 1.1) [1].

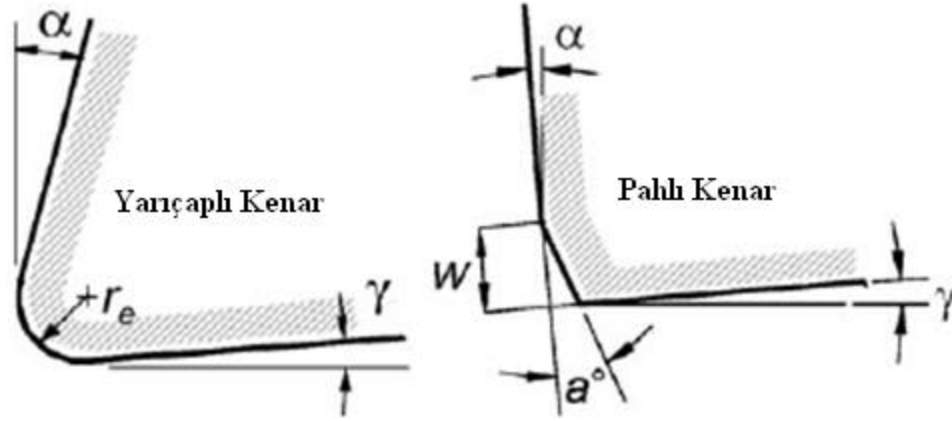


Şekil 1.1. Kalem micro geometrisi [1]

2004 yılında Yung-Chang, Anurag ve Taylan ortogonal işlemede farklı takım uç geometrisi kullanılarak sonlu elemanlar analizi sonuçlarını araştırmışlardır. 7 tane kalem kenar uç geometrisi yapılarak talaş oluşumu, kesme kuvveti ve işlemedeki değişken olan sıcaklık, gerilim, gerinim sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak FEM simülasyonu yapılmıştır. Kesme simülasyonunda DEFORM-2D®'i kodlayan bir ticari FEM kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarla Ortogonal kesme simülasyonları

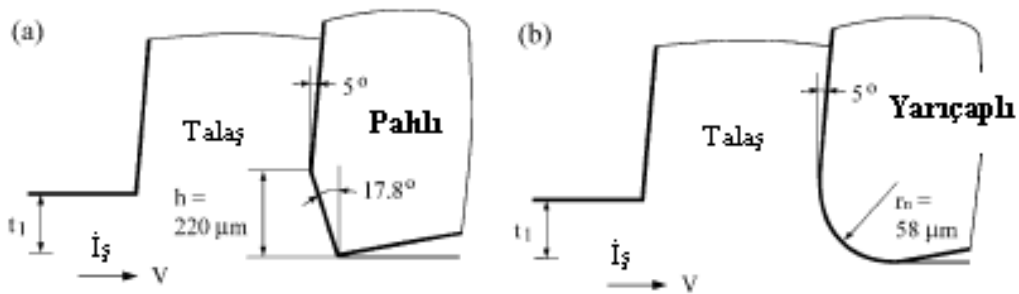


kıyaslanmıştır. Kalem kenar uç geometrileri; yarıçaplı 0.01 mm, 0.05 mm, 0.1 mm ve pah genişliği 0.1 mm, 0.2 mm olan pah açıları  $15^\circ$  -  $25^\circ$  pahlı takımlar belirlemiştir (Şekil 1.2) [2].



Şekil 1.2. Kalem geometrisi için şematik modelleri [2]

2005 yılında Fang ve Wu üç alüminyum alaşımının yarıçaplı ve pahlı takım geometrileri kullanılarak ortogonal kesme sonuçlarını araştırmışlardır. Takım geometrileri; yarıçaplı  $58 \mu\text{m}$  ve pah genişliği  $220 \mu\text{m}$ , pah açısı  $17.8^\circ$  pahlı takımlar belirlenmiştir (Şekil 1.3). Kesme kuvvetleri ölçülmüş ve deneysel sonuçlara göre matematiksel model oluşturmuşlardır [3].

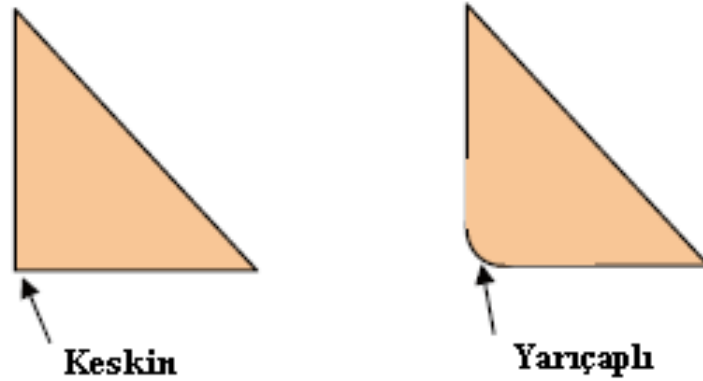


Şekil 1.3. Deneylerde kullanılan kalem kenar uç geometrileri [3]

2005 yılında Jiang, Domenico ve Rajiv; iş parçasının sertliğinin etkilerini, kalem geometrisinin kesme şartlarında artan gerilim dağılmasında sert tornalamada işleme yüzeyinde yakın zamanlarda kullanılmış yüzey – sertlik tabanlı akışı araştırmada gerilim modeli olarak kullanılmıştır. Bir elastik-visko plastik FEM formül halinde ifade edilmiştir. Simülasyon, farklı takım geometrileri kullanılmıştır. Keskin kenar,

küçük, geniş yarıçaplı farklı bileşimlerle pozitif pahlı takımlar işlenmiş yüzeyde artan gerilim profili elde etmek için kullanılmıştır. Kesme simülasyonunda DEFORM-2D® kodlayan bir ticari FEM kullanılmıştır. 5 tane takım geometrisi yapılmıştır. Takım geometrileri; yarıçaplı 0.025 mm, pah genişliği 0.1 mm ve 20° pah açılı, yarıçaplı 0.1 mm, pah genişliği 0.1 mm ve 20° pah açılı ve yarıçaplı 0.15 mm belirlenmiştir [4].

2006 yılında Santosh, Albert ve Daniel kesici takımlarının belirli ayarlamalar yapılarak bilenmesi sonucu işleme esnasında kuvvetlerin bir modeli yapılarak tahmin edilmesini araştırmışlardır. 5 tane TiN-TiAlN kaplamalı takım geometrisi kullanılarak ortogonal işlemede kesme kuvvetleri modelinin yapılmasında genel bir mekanik yaklaşım tanımlanmıştır. Takım geometrileri; keskin kenar, yarıçaplı 15 µm, 26 µm, 57 µm, 72 µm belirlenmiştir (Şekil 1.4) [5].



Şekil 1.4. Kalem kenar uç görünümleri [5]

2006 yılında Mohamed, Ng ve Elbestawi AISI 316L ortogonal kesmede artan gerilimlerdeki yarıçaplı takımların modeli yapmışlardır. Lagrangian–Eulerian sonlu elemanlar modeli yapılmıştır. 4 tane takım geometrisi yapılmıştır. Takım geometrileri; yarıçaplı 20 µm, 50 µm, 75 µm, 100 µm belirlenmiştir [6].

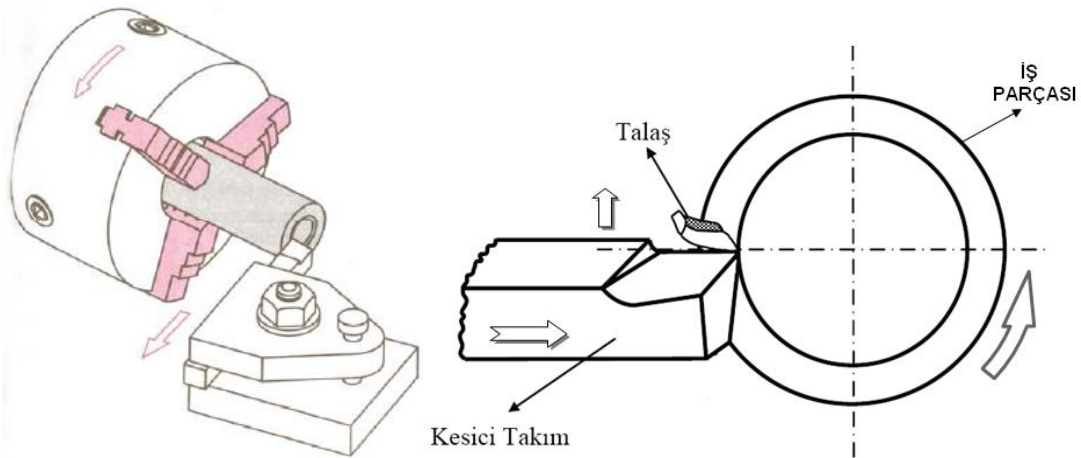
Yapılan literatür taraması göstermiştir ki takım geometrileri yarıçaplı ve pahlı olmak üzere iki temel model kullanılmıştır. Özellikle kalem kenar uç geometrileri ortogonal kesme yapılarak araştırılmıştır. Araştırmalarda belirli kesme şartlarında sıcaklık, kesme kuvvetleri ve gerilmelerin ölçümleri yapılmıştır. Torna kalemi olarak HSS ve elmas kalemler kullanılmış bazılarına kaplama yapılarak kullanılmıştır. Genel olarak

deney sonuçlarında yarıçaplı takım geometrisi işlemede son pasolar için pahlı takım geometrisi kaba talaş için kullanılması önerilmiştir. Kuvvet katsayıları modeli yapılarak mekaniksel ve kesme simülasyonu için modeller yapılmıştır. Sonlu elemanlar kesme simülasyonu (FEM) kullanılmıştır. Dik kesme (Ortogonal) simülasyonların bazı modellerinde DEFORM-2D® modülleri kullanılmıştır ve iyi sonuçlar alınmamıştır. Her araştırmada kesme simülasyonları için değişik modeller oluşturmuşlardır.

## BÖLÜM 2. TORNALAMA VE TALAŞ KALDIRMA TERMOLOJİSİ

### 2.1. Tornalama

Tornalama kesme hareketi, dönen iş parçası üzerinde sabit konumda bağlanan takımın ilerleme hareketi ile gerçekleşen talaş kaldırma işlemidir [7]. Birçok açıdan fazla karmaşık tanımlamalar gerektirmeyen, en bilinen talaşlı imalat yöntemidir. Genellikle tek kesici kenarın talaşlı imalat işlemine katıldığı bir işlem olmasına karşın tornalama işlemleri iş parçasının şekli ve malzemesi, işlemin tipi, işleme koşulları, işleme maliyeti gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir.



Şekil 2.1. Kesici takımın kullanıldığı tornalama işlemi [8]

### 2.2. Torna Kalemle rinin Sınıflandırılması

Metal işleme sanayinde kesme bütün operasyonların kalbi niteliğindedir. Yapılacak operasyona, işlenecek malzemenin cinsine ve istenilen hassasiyete göre metal kesiciler farklıdır. Talaşlı imalattaki gelişmeler, kesme ve ilerleme hızlarını da gün geçtikçe arttırması, üretimde değişik malzemelerin kullanılması, talaşlı üretim tezgahlarının gelişimi, kesici takımların gelişimini de zorunlu kılmaktadır.

Yapılacak operasyona göre, uygun tezgah seçimini de göz önüne alırsak, kesici takımlardan istenen özellikler;

- 1) Uzun ömürlü olması
- 2) İstenilen işleme kalitesini ve ölçüsünü sağlaması
- 3) Parça başı takım maliyetinin uygun olması
- 4) Kolay temin edilebilir olması [9]

### **2.2.1. Takım çelikleri**

Takım çelikleri endüstride ilk olarak kullanılan kesici takım malzemeleridir. Sertliklerini ısıtılma işlemi sağlarlar. Alaşım ve alaşımsız olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Alaşımsız olanlar; % 1.25 C ve az miktarda Si ve N ihtiva eder. Alaşım olanlar; % 1.25 C ve % 1.5 Cr, % 1.2 W, % 0.5 Mo ve % 1.2 V içerirler. Alaşımsız çelikler kullanım esnasında 200 °C sıcaklığın üzerine çıkılması tavsiye edilmediği için ege, kalem gibi el aletleri ve ahşap işleme takımlarında kullanılması ile sınırlıdır. Alaşım çeliklerin, alaşımsız olanlara karşı avantajları karbür oluşturan elementler sayesinde aşınma mukavemetini artırması ve yüksek sıcaklıklarda sertliğini muhafaza edebilmesidir [9].

### **2.2.2. Yüksek hız çelikleri**

Konvansiyonel ergitme yöntemi ile üretilen yüksek hız çelikleri değişik kompozisyonlarda olabilir. Yüksek hız çelikleri, takım çeliklerine göre yüksek ısıya dayanabilme (~600°C) ve daha yüksek sertliğe ulaşabilme (62/67 HRC) özelliklerine sahiptir. Bu özellikler ana yapıdaki karbürlerin sayısına ve dağılımına bağlıdır.

Yüksek hız çelikleri üç ana grupta toplanabilir.

- 1) Wolfram içeren yüksek hız çelikleri
- 2) Molibden içeren yüksek hız çelikleri
- 3) Wolfram ve Molibden içeren yüksek hız çelikleri [9]



Şekil 2.2. HSS torna kalemleri

### 2.2.2.1. Yüksek hız çeliğin içerisinde bulunan alaşım elemanlarının çeliğe etkileri

Karbon; yüksek hız çeliklerinde karbon miktarı genelde % 0,7-1,6 arasında değişebilir. Hız Çeliklerinin karbon oranına bağlı olarak sertlikleri de artar. Karbon karbür oluşumunda önemli rol oynar. Karbon oranının artması darbe mukavemetini düşürür ancak kesme özelliğini ve aşınma direncini artırır.

Wolfram; yüksek hız çeliğinin ana alaşım elemanıdır. % 20'ye kadar ilave edilebilir. Yüksek hız çeliklerinin temperleme direncini artırır. Sıcak sertliğin artması ince taneli bir içyapımın oluşturması nedeniyle önemli bir alaşım elemanıdır.

Molibden; yüksek hız çeliklerde Wolfram yerine kullanılan bir elementtir. Hız çeliklerine etkisi wolframın etkisi gibidir. % 1,6 - 2,0 wolframın yerine % 1,0 Molibden ilave edilir. Molibdenin ergime sıcaklığı wolframın ergime sıcaklığından daha düşük olduğundan molibden içerikli hız çelikleri, wolfram içerikli olanlara nazaran daha düşük sıcaklıkta sertleştirilmelidir.

Krom; hız çeliklerinin her çeşidinde % 3-4 arasında bulunur. Sertlik ve kesme verimim artırır. Yüksek hız çeliklerine diğer bir etkisi de oksidasyonu önler.

Vanadyum; yüksek hız çeliklerinin kesme verimini artırır. Çelik üretim esnasında cürufların çelik bünyesinden ayrılmasını ve bünyedeki azot gazının giderilmesi için önemli rol oynar. Çelik içerisinde vanadyum oranına bağlı olarak, karbon oranının yükseltilmesi gerekir. Vanadyum çelik bünyesindeki karbonu kendisine bağlar, diğer metal karbürlerin oluşmasını azaltır. Vanadyum karbürler (VC) yüksek hız çeliklerinin en sert karbürleridir. Oksitlenme esnasında en az çözünen karbürlerdir.

Kobalt; Kobaltın yüksek hız çeliklerine en büyük etkisi sıcak sertliğini arttırmasıdır. Bu nedenle kesici takımın kesme verimini artırır. Büyük paso ile çalışan takımlarda Cr-Ni alaşımlı çeliklerin işlenmesinde uygun sonuç verir. Sertleşme esnasında % 95 oranında çözünerek içyapıyı güçlendirir [9].

### **2.2.3. Pulver metalurjik yüksek hız çelikleri**

Konvensiyonel metalurjik yöntemleriyle elde edilen yüksek hız çeliklerin, karbür konsantrasyonları mekanik dengeli olmayan kaba taneli içyapı, malzemenin mukavemetine, aşınmaya karşı dayanıklılığına ve yüksek hızlardaki sertlik derecelerine zarar verirler. Buna karşın; Pulver Metalurjik Hız çeliklerin içyapısı çok daha dengeli ve ince taneciklerden ibaret karbür dağılımı gösterirler. Araştırmalar tornalama ve vida işleme, azdırma ile dişli açma işlemlerinde bu tür çeliklerin daha uzun dayanma zamanları verdiklerini göstermiştir. Maliyet masrafları yüksek olduğundan maliyetleri daha uygun olan konvensiyonel yöntemle üretilen yüksek hız çeliklerin ömürlerini arttırmak için, TiN (Titan nitrür), TiCN (Titan karbon nitrür), TiAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Titan alüminyum oksit) kaplama maddeleri ile kaplanırlar. Böylece iş parçası ile kesici takım arasındaki sürtünme kuvvetlerinin azaltılması nedeniyle krater aşınma azalır [9].

### **2.2.4. Sert metaller**

Sert metaller sinter malzemesi olup, karbürler ile bağlayıcı maddeden oluşurlar. Bağlayıcı fazın özelliği, gevrek olan karbürleri sağlam bir yapıda birleştirmesi ile ve böylece yüksek sıcaklık mukavemeti ve direnci kazandırmasıdır. Sert Metaller,

Wolfram, titan ve tantal karbürlerin kobalt bağlayıcı madde ile birleşmesinden ve 1300-1600 °C'de sinterlenmesi ile üretilmektedir.

Sert metalin avantajı sinterleme ile homojen bir yapıya sahip olması ve bu nedenle sertlik ve aşınma mukavemetinin yükselmesidir. Sert metaller 1000 °C de yüksek hız çeliğinin oda sıcaklığında sahip olduğu sertliktedir. Ayrıca bağlayıcı faz ve karbür oranları ile değişik kalitede sert metal üretme olanağı mevcuttur.

Sinterlenmiş sert metaller bugün de varlığını sürdüren WIDIA adı altında 1927 yılında Friedrich Krupp tarafından tanıtılmıştı. Temel buluşlar Almanya'da yapılmasına karşın, daha sonra İsveç, Avusturya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde gelişmeler gerçekleşti. Saf wolfram karbürden (WC) kesici takım imali için 2000°C sinterlenme sıcaklığı gereklidir. Ancak üretilen mamulün, çok gevrek olması nedeniyle endüstride kullanılmaya elverişli değildir. Bu nedenle 1914 yılından bu ana problem üzerine çalışan "Kail Schröter" wolfram karbür tozu içerisine % 10 kadar kobalt, nikel ve demir tozu elementleri karıştırılıp, preslendiği zaman mamulün yaklaşık 1500 °C de sinterlenerek düşük prositeli çok yüksek sertlikte ve mukavemette bir ürün elde edilmesini sağlamıştır.

Sert metalde sertlik metalik seri madenden (WC, TiC ve TaC), süneklilik ise, bağlayıcı maddeden (Co, Ni, Mo) kazanılmaktadır [9].

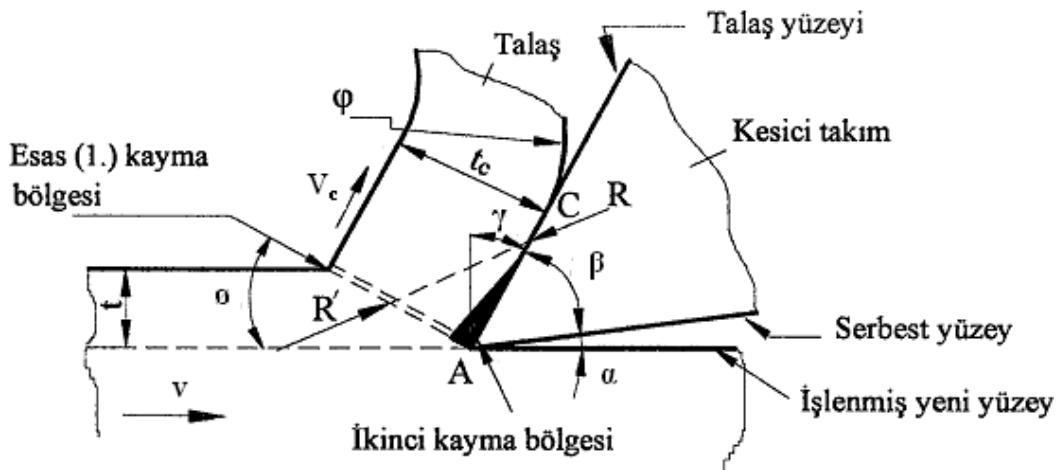
### 2.3. Talaşlı İşlem Temel Terminolojisi

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi kesici takım iki yüzeyden oluşmaktadır. Bunlar; talaşın üzerinden akıp gittiği talaş yüzeyi ve işlenen yüzeye bir açı yapan serbest yüzeydir. Metal işlemede önemli değişkenlerden birisi takım yüzeyinin eğimi olup dik kesmede bu talaş açısı ( $\gamma$ ) olarak tanımlanmıştır. Bu açı, talaş yüzeyi ile işlenen yüzeyin normali arasındaki açıdır.

İş parçası yüzeyi ile talaş yüzeyi arasındaki açının ( $\beta+\alpha$ ) değerine bağlı olarak talaş açısı pozitif ( $\beta+\alpha<90$  ise) veya negatif ( $\beta+\alpha>90$ ) talaş açısı olarak adlandırılır. Kesme hızıyla kalemin parça üzerinden kaldırdığı talaş katmanı kalınlığı; kesme



derinliği veya deformasyona uğramamış talaş kalınlığı ( $t$ ) olarak bilinir ve kesme süresince bu kalınlığın sık sık değişmesine karşın araştırma çalışmalarında basitlik nedeniyle genellikle sabit olarak alınır. Takım talaş yüzeyinden ayrılmakta olan iş parçası malzemesi kalınlığı da talaş kalınlığı ( $t_c$ ) olarak adlandırılır. İkinci kayma bölgesinde talaş yüzeyi boyunca deformasyona uğrayan talaş, kalem talaş yüzeyi ile AC doğal temas uzunluğu boyunca sıkı bir şekilde temas halinde olup bu noktadan sonra  $\phi$  yarıçapıyla kıvrılarak takımdan uzaklaşır. Takım serbest yüzeyi, talaş kaldırma işleminde rol oynamaz; fakat serbest (veya esas) yüzey ile yeni oluşan parça yüzeyi arasındaki açı, kesici takımın aşınma miktarı üzerinde önemli etkiye sahip olup boşluk açısı veya serbest açı ( $\alpha$ ) olarak tanımlanır. Talaş, boşluk ve kama açılarının toplamı  $\alpha+\beta+\gamma=90$  'dir [10].



Şekil 2.3. Talaşlı işlem temel terminolojisi [10]

$R$	= Bileşke Takım Kuvveti,	$\phi$	= Talaş Kıvrılma Yarıçapı,
$R^1$	= Bileşke Talaş Kuvveti,	$\sigma$	= Kayma Açısı,
$V_c$	= Talaş Hızı,	$\beta$	= Kama Açısı,
$v$	= Kesme Hızı,	$\gamma$	= Talaş Açısı,
$t_c$	= Talaş Kalınlığı,	$\alpha$	= Boşluk Açısı,
$t$	= Deforme olmamış Talaş Kalınlığı,		

Talaş oluşumu ile ilgili mevcut modellerin pek çoğunda talaşın, kayma düzlemi olarak tanımlanan bir düzlem üzerinde devamlı şekilde kayarak akma suretiyle meydana geldiği kabul edilir. Dik kesmede kayma düzleminin kesme hızı yönüyle yaptığı eğim, kayma açısı olarak tanımlanır. Kayma açısı genellikle  $\theta$  ile gösterilir [10].

#### 2.4. Talaş Kaldırma Mekanikliği

Belirli boyut, şekil ve yüzey kalitesine sahip bir parça meydana getirmek için kesici bir takım ile ve güç kullanarak, iş parçası üzerinden tabaka şeklinde malzeme kaldırma işlemine “talaş kaldırma” denilir. Kaldırılan malzeme tabakasına “talaş” denir. Talaş kaldırma işlemi plastik şekil değiştirmeye dayanan sürtünme, ısı oluşumu, talaşın oluşumu, işlenen parçanın yüzey bütünlüğü, takım ucunun aşınmasını içine alan karmaşık bir fiziksel olaydır.

Parçanın üzerinden belirli bir malzeme tabakası kaldırılması için, takımın o malzemeye nüfuz etmesi gerekir. Bu da ancak takıma uygulanan kuvvetlerin yeterli ve takım malzemesinin parça malzemesinden daha sert olması halinde gerçekleşir [11].

#### 2.5. Kesme Çeşitleri

Talaş kaldırma sırasında kalemin kenarının işlenen parçaya göre dik (ortogonal) veya eğik konumda bulunmasına göre iki çeşit kesme vardır.

##### 2.5.1. Dik kesme

Kesici kenar dönme eksenine dik ise bu duruma dik kesme denir. Dik kesmede kesici takım açıları;

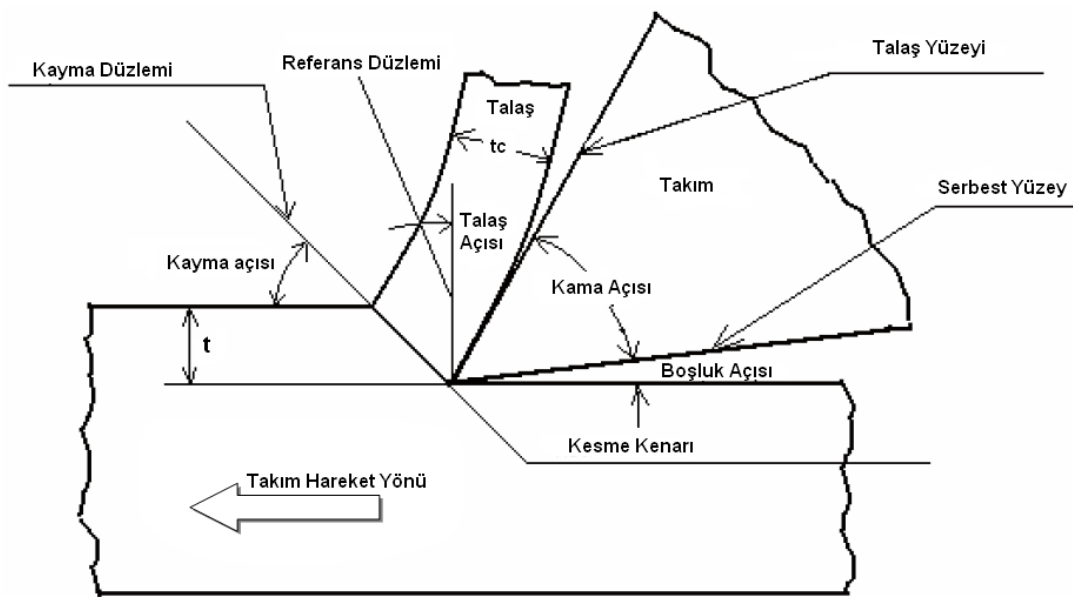
$\alpha$  = Boşluk açısı,

$\gamma$  = Talaş açısı,

$\beta$  = Kama açısı,

$\phi$  = Kayma Açısı,

Şekil 2.4' deki dik kesme ile ilgili kesici takım açılarından,  $\alpha$  kesici ağzın daha doğrusu taban yüzünün işlenen parçaya sürtünmemesini  $\beta$  ve  $\gamma$  açıları da kesici ağzın kesme işlemini yapabilmesini sağlar.  $\beta$  açısı çok küçük dolayısıyla  $\gamma$  açısı çok büyük ise kesici ağız zayıflayacağından kesici takım çok çabuk zayıflayacaktır.  $\beta$  açısı çok büyük  $\gamma$  açısı küçük ise kesici uç hantal ve küt olacağından aşırı mukavemet ve oluşan ısı dolayısıyla genelde daha çabuk bozulacaktır.



Şekil 2.4. Dik kesme ve kesici takım açıları [12]

Bu açıların değerleri kesici ve işlenecek parçalara göre ayrı ayrı saptanmaktadır.

$\alpha$  açısının ancak sürtünmeyi önleyecek kadar büyük olması gereklidir. Genellikle  $50^\circ$  ile  $80^\circ$  arasında seçilir.

$\phi$  açısı, talaşın kayma düzlemi ile takım hareket yönü arasındaki açıdır. Bu açının önemi büyüktür. Çünkü  $\phi$  açısı değiştikçe deforme olmuş talaş kalınlığı ( $t_c$ ) da değişir. Paso derinliği sabit kabul edildiğinde  $\phi$  açısı küçük ise  $t_c$  büyük,  $\phi$  büyük ise  $t_c$  küçük olur.  $t_c$  talaş kalınlığının küçük yani talaşın ince olması, talaş rijitliğinin

daha az, dolayısıyla talaş ile talaş yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetlerinin daha küçük olmasını sağlar. Bu durum takım ömrünün artmasına neden olur [12].

Dik kesmede; talaş oranı, kayma açısı, kayma uzaması ve hız ilişkileri gibi temel kavramlar vardır.

Deforme olmamış talaş kalınlığı ( $t$ ), deforme olmuş talaş kalınlığı ( $t_c$ ), kayma açısı ( $\theta$ ), talaş açısı ( $\gamma$ ), takım ucundan iş parçasının serbest yüzeyine kadar olan kayma düzlem uzunluğu ( $AB$ ), talaş oranı veya talaş basıncı ( $r_c$ ) arasında şu bağıntı vardır,

$$r_c = \frac{t}{t_c} = \frac{AB \cdot \sin\theta}{AB \cdot \cos(\theta - \gamma)} \quad \text{ise } \tan\theta = \frac{r_c \cdot \cos\gamma}{1 - r_c \cdot \sin\gamma} \quad (2.1)$$

Talaş oranlarını ölçmek için hem kesme işlemi esnasında dinamik hem de kesme işlemi sonra statik olarak kayma açısının ölçülmesinde kullanılan metotlar mevcuttur.

$$t_c = \frac{w}{\delta \cdot t \cdot l} \quad (2.2)$$

Burada; iş parçasının yoğunluğu ( $\delta$ ), takım – talaş yüzeyi uzunluğunca temas uzunluğu ( $l$ ) ilerleme miktarı ( $t$ ) veya deforme olmamış talaş kalınlığını göstermektedir.

Plastik deformasyon miktarı; kayma açısı ve talaş açısı ile ilgili olduğundan talaş kayma uzaması ( $\gamma_1$ ) maruz kalır ki bu da şu şekilde yazılabilir:

$$\gamma_1 = \frac{\cos\gamma}{\sin\theta \cdot \cos(\theta - \gamma)} \quad (2.3)$$

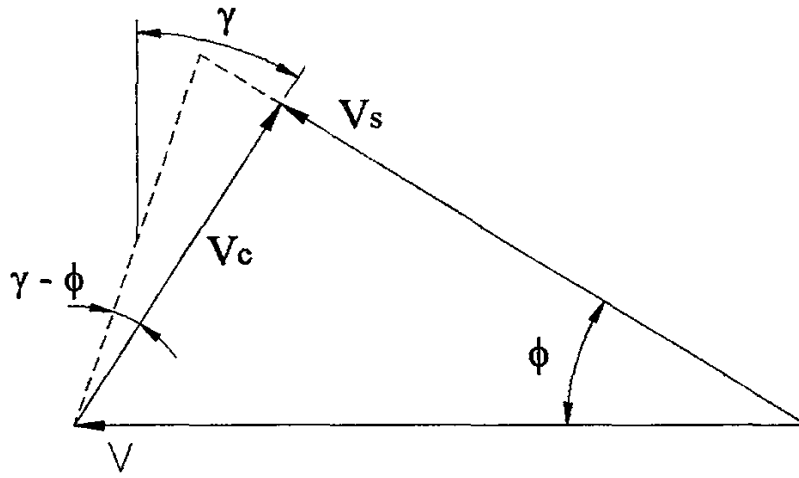
Dik kesme işleminde dikkate alınan üç hız vardır:

Kesme hızı ( $v$ ) : Takımın iş parçasına göre hızı olup işlenen yüzeye paralel doğrultudaki hızdır.

Talaş hızı ( $V_c$ ) : Talaşın takıma göre hızı olup vektörü takım yüzeyine paraleldir.

Kayma hızı ( $V_s$ ) : Talaşın iş parçasına göre hızı olup kayma düzlemi üzerinde yönlendirilmiştir.

Kinematik prensiplere göre bu üç hız vektörü Şekil 2.5 de görüldüğü gibi kapalı bir hız diyagramı oluşturmaktadır [10].



Şekil 2.5. Hız üçgeni [13]

$$V_c = \frac{\sin\phi \cdot V}{\cos(\phi - \gamma)} = r_c \cdot V \quad (2.4)$$

$$V_s = \frac{\cos\gamma \cdot V}{\cos(\phi - \gamma)} = \gamma \cdot \sin\phi \cdot V \quad (2.5)$$

Yeni teknikler kullanılarak kayma hızı ölçülebilmektedir. Bu teknikte kesme esnasında ön kayma hızını, talaş hızını ( $V_c$ ) ölçmek için kullanılır. Bu nedenle, kayma hızının ( $V_s$ ) ve talaş hızının vektörel toplamı kesme hızına eşittir. Hacim değişikliği olmadığı için şu bağıntılar vardır;

$$\frac{V_c}{V} = \frac{t}{t_c} = r_c = \frac{\sin\phi}{\cos(\phi - \gamma)} \quad (2.6)$$

Kayma hızının kesme hızına oranı ise;

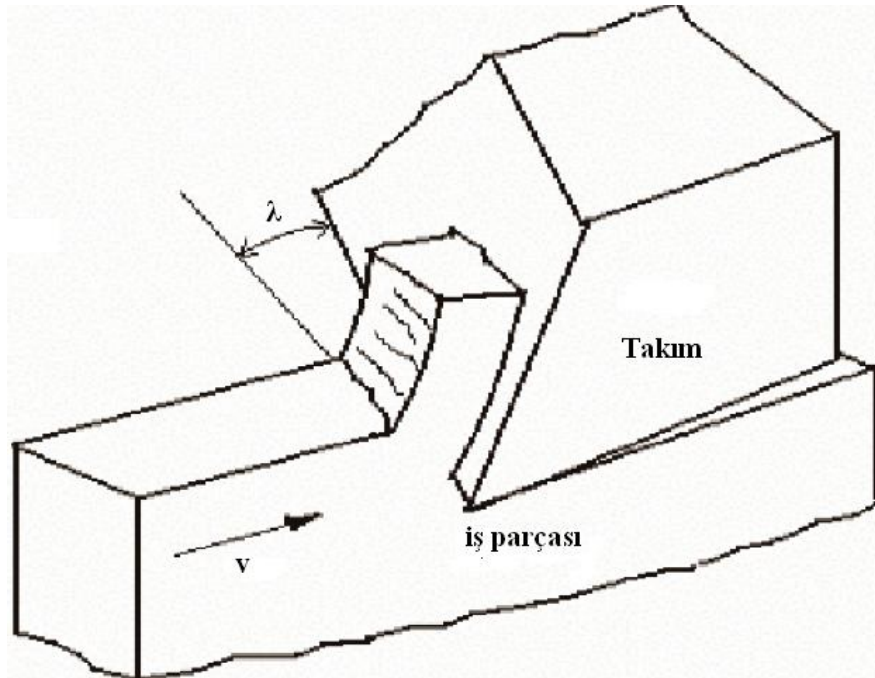
$$\frac{V_s}{V} = \frac{\cos\phi}{\cos(\phi - \gamma)} \quad (2.7)$$

### 2.5.2. Eğik kesme

Takımın kesici kenarının, kesici takım hareket yönüne göre  $\lambda$  gibi bir açı yapması durumuna eğik kesme denir (Şekil 2.6).

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (2.8)$$

bağıntısı her zaman geçerlidir. Mevcut bir takımın kesme kenarının  $\lambda$  açısını hareket yönüne göre değiştirmekle kesme açıları değiştirilebilir. Takımın  $\lambda$  açısı ne kadar büyütülürse takım tamamen aynı kaldığı halde  $\beta$  açısı küçülür. Bu durum dik kesmede takımın  $\beta$  açısı küçültülmüş gibi etki yapar [12].



Şekil 2.6. Eğik kesme [14]

$\alpha$  açısı sabit kabul edilirse  $\beta'$  nin  $\lambda'$  ya göre değişmesi ile  $\gamma$  açısı da değişecektir. Halbuki talaş kaldırmada en karakteristik açı  $\gamma$  açısıdır. Bu açının değişimi kesme kuvvetini, parça yüzey kalitesini ve takım ömrünü doğrudan etkileyecektir [12].

$\lambda$  açısının en önemli etkilerinden biriside talaşın akma yönünü belirlemesidir. Kesici bir takımın işlenen parçaya göre durumu ve kesme koşulları;

- 1) Kesme açıları,
- 2) Eğim açıları,

ile belirlenir. Kesme olayı ile ilgili değerler tüm kesici takımlar için geçerlidir. Kesici takımlar için kesme açılarının en uygun değerleri aşağıdaki genel kriterler irdelenerek belirlenir [12].

- 1) Takım ömrü,
- 2) Kesme kuvveti değeri ve güç tüketimi,
- 3) Yüzey kalitesi,
- 4) Talaş akışında kolaylık.

## **2.6. Talaş Kaldırma Teorileri**

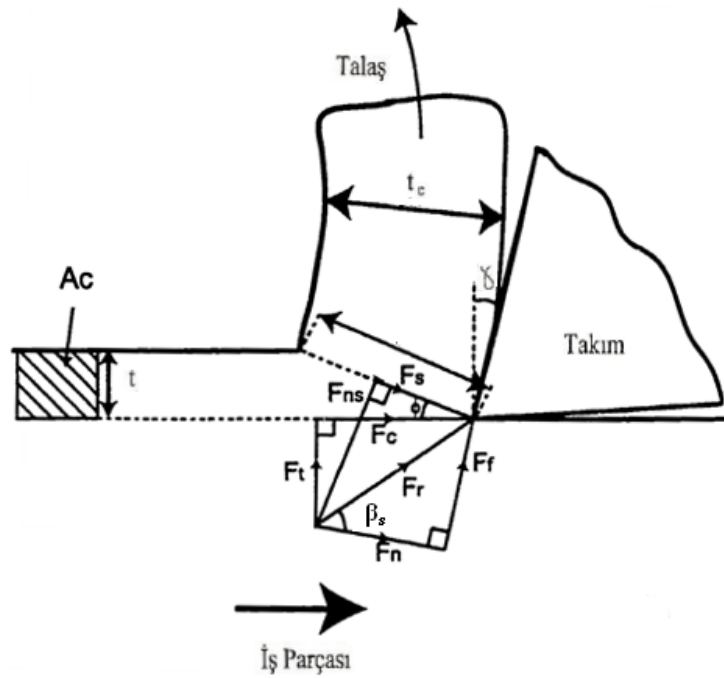
Genel olarak temel alınan 7 tane talaş kaldırma teorileri vardır. Bunlar;

- 1) Timme Yaklaşımı
- 2) Ernst, Merchant ve Pispäen yaklaşımı
- 3) Lee ve Shafer yaklaşımı
- 4) Shaw, Cook ve Finne yaklaşımı
- 5) Hill yaklaşımı
- 6) Okushima ve Hitomi yaklaşımı
- 7) Zorev yaklaşımı

Dik kesme ile ilgili en önemli temel alınan 2 teori vardır. Bunlar Ernst, Merchant ve Pispäen yaklaşımı, Lee ve Shafer yaklaşımlarıdır.

### 2.6.1. Ernst, Merchant ve Pispaaen yaklaşımı

Bu yaklaşımlar, talaş kesici takım önünde kesici kenardan iş parçası yüzeyine uzanan yaklaşık tek bir düzlem ile sınırlanan kayma işlemi ile oluşacağını dikkate alır. Fakat kayma düzlemi ve takım/talaş ara yüzeyi boyunca nakledilen kuvvetlerin etkisi ile dengede kalan talaş rijit bir gövde gibi davrandığı varsayılır [7].



Şekil 2.7. Ortogonal kesme kuvvet diyagramı [15]

Şekil 2.7’de gösterilenler takımın kesme kenarını etkileyen bileşke kuvveti  $F_r$ , bunun kayma düzlemi boyunca ve buna dik doğrultudaki bileşenleri  $F_{ns} - F_s$ ; takım yüzeyi boyunca dik doğrultudaki  $F_n - F_f$  bileşenleri ve bileşke kuvvetin esas kesme kuvveti  $F_c$ , itme kuvveti  $F_t$  bileşenleridir. Verilen kesme şartları için kesme de yapılan iş,  $F_c$  kuvveti ile orantılı olduğundan  $\phi$ ’ye bağlı  $F_c$  için bir ifade elde etmek gerekir.

Şekil 2.7;

$$F_s = F_r \cdot \cos(\phi + \beta_s - \gamma_{ne}) = \tau_s \cdot A_s = \frac{\tau_s \cdot A_c}{\sin\phi} \quad (2.9)$$



Yazılabilir.  $\tau_s$ : kayma düzlemi üzerinde iş malzemesinin kayma dayanımı,  $A_s$ : kayma düzlemi alanı,  $A_c$ : deforme olmamış talaş kesiti alanı,  $\gamma_{ne}$ : normal talaş açısı,  $\beta_s$ : takım/talaş arasında ortalama sürtünme açısını göstermektedir. 2.9 eşitliğinden;

$$F_r = \frac{\tau_s \cdot A_c}{\sin \varnothing} \cdot \frac{1}{\cos(\varnothing + \beta_s - \gamma_{ne})} \quad (2.10)$$

Bu geometriden de;

$$F_c = F_r \cdot \cos(\beta_s - \gamma_{ne}) \quad (2.11)$$

Yazılabilir. 2.10 ve 2.11 eşitliklerinden;

$$F_c = \frac{\tau_s \cdot A_c}{\sin \varnothing} \cdot \frac{\cos(\beta_s - \gamma_{ne})}{\cos(\varnothing + \beta_s - \gamma_{ne})} \quad (2.12)$$

2.12 eşitliğinin  $\varnothing$  açısına göre difransiyeli alındığında  $A_c$ ,  $\gamma_{ne}$  ve  $\tau_s$ 'nin  $\varnothing$  açısına bağımsız olarak alınıp 0 eşitlenirse;

$$\frac{\pi}{2} = 2\varnothing + \cos(\beta_s - \gamma_{ne}) \quad (2.13)$$

Bu varsayımla;

$$\tau_s = \tau_{s0} + k \cdot \sigma_s \quad (2.14)$$

$\tau_s$ : malzemenin kayma dayanımı göstermektedir. Eşitlik 2.9 den;

$$F_{ns} = F_r \cdot \cos(\varnothing + \beta_s - \gamma_{ne}) = \sigma_s \cdot A_s = \frac{\sigma_s \cdot A_c}{\sin \varnothing} \quad (2.15)$$

yazılabilir. 2.15 eşitliğinden;

$$\sigma_s = \frac{\sin \varnothing}{A_c} F_r \cdot \sin(\varnothing + \beta_s - \gamma_{ne}) \quad (2.16)$$

olur. 2.11 ve 2.16 eşitliği birleştirilirse;

$$\tau_s = \sigma_s \cdot \cot(\phi + \beta_s - \gamma_{ne}) \quad (2.17)$$

elde edilir. 2.14 ve 2.17'den;

$$\tau_s = \frac{\tau_{so}}{1 - k \cdot \cot(\phi + \beta_s - \gamma_{ne})} \quad (2.18)$$

yazılabilir.  $\phi$  bağılı olarak  $F_c$  için yeni bir eşitlik elde etmek için 2.12 eşitliğinde yerine koyulursa;

$$F_c = \frac{\tau_{so} \cdot \cos(\beta_s - \gamma_{ne})}{\sin\phi \cdot \cos(\beta_s - \gamma_{ne}) \cdot [1 - k \cdot \cot(\phi + \beta_s - \gamma_{ne})]} \quad (2.19)$$

İfade edilir. Belirli bir malzeme için  $k$  ve  $\tau_{so}$ 'nin ve kesme işlemi için  $A_c$  ve  $\gamma_{ne}$  sabitlerdir. 2.19 eşitliğinin difrensiyeli alınırsa;

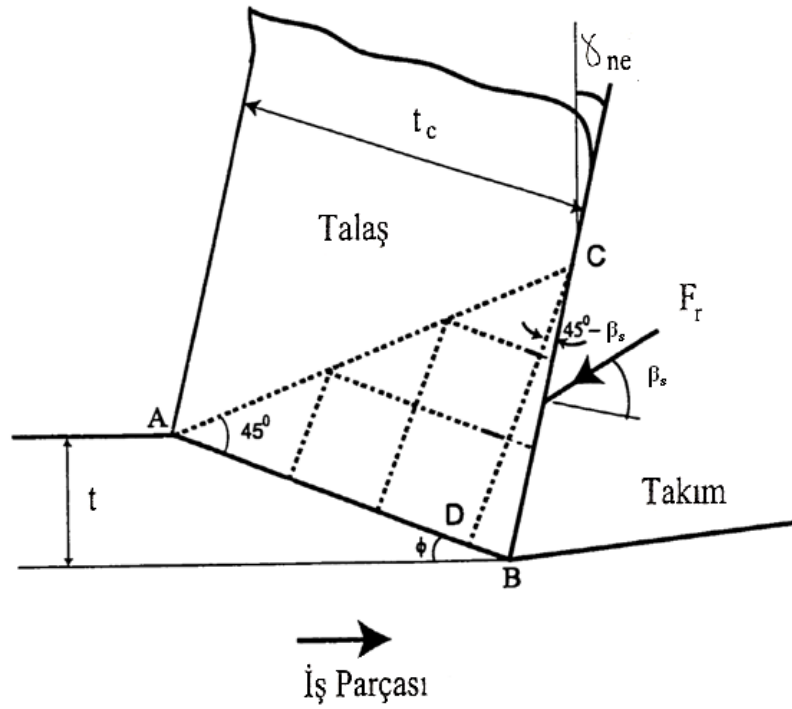
$$2\phi + \beta_s - \gamma_{ne} = C \quad (2.20)$$

yazılabilir. Bu teorinin plastikler işlendiğinde deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu fakat karbürlü takımla çelik işlendiğinde elde edilen sonuçlarla uyumluluğu zayıf olduğu ortaya çıkmıştır [7].

### 2.6.2. Lee ve Shafer yaklaşımı

Bu yaklaşımda, mükemmel plastik malzemelerin kayma hattı şekilde gösterildiği gibi paralel düz doğrulardan oluşan talaşa belli bir kayma doğrusu alanın mevcut olduğu varsayılmaktadır [7]. Lee ve Shaffer, ideal rijit plastik malzeme için plastisite teorisini uygulamışlar ve deformasyonun ince bir kayma düzlemi üzerinde oluştuğunu kabul etmişlerdir. Talaş içerisinde kayma düzleminden kesici takımın yüzeyine kesme kuvvetlerini geçiren bir gerilme bölgesinin olması gerektiğini

düşünmüşler ve bunu akma noktasının üstüne kadar gerilmeye uğramasına rağmen hiçbir deformasyonun oluşmadığı kayma hattı bölgesi ile göstermişlerdir [16]. Şekil 2.8’de bileşke kuvvet  $F_r$ , kayma açısı  $\phi$ , normal açı  $\gamma_{ne}$ , sürtünme açısı  $\beta_s$ , deforme olmuş talaş kalınlığı ( $t_c$ ) ile gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Ortogonal kesme için Lee ve Shaffer'in kayma hattı alanı teorisi [15]

Şekil 2.8 den;

$$\phi + \beta_s - \gamma_{ne} = \frac{\pi}{4} \quad (2.21)$$

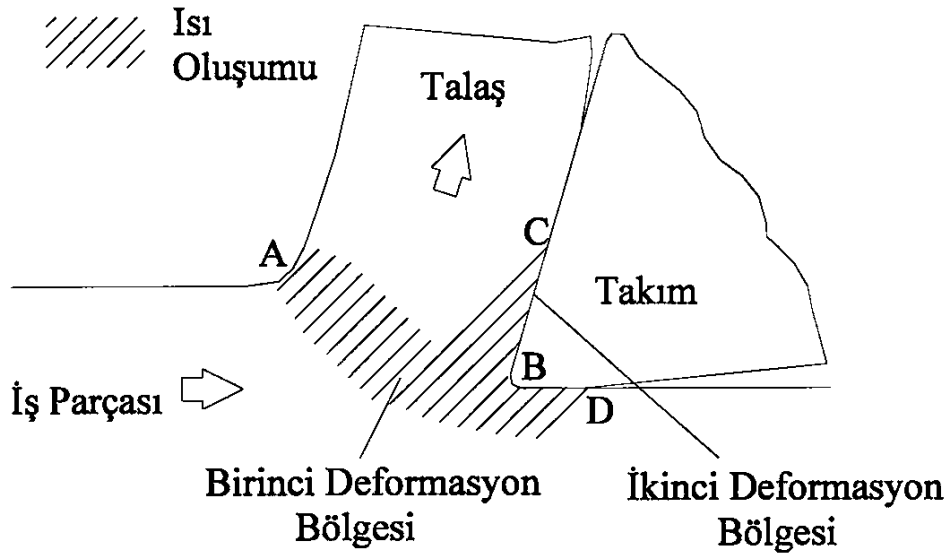
Eşitliği yazılır. Gerekli kayma açısı için çözümü göstermektedir.

## 2.7. Talaş Kaldırmada Isı Oluşumu

Bir malzeme plastik olarak deforme edildiği zaman, uygulanan kuvvetlerden oluşan mekanik enerjinin hemen hemen tamamına yakın kısmı ısıya dönüşür. Talaş kaldırma sırasında malzeme, Şekil 2.9' de görüldüğü gibi I. deformasyon bölgesinde aşırı derecede gerilmeye maruz kalır. Gerinim (strain) için harcanan enerji, elastik

gerinim için harcanan enerjiden oldukça yüksektir. Bundan dolayı, mekanik enerjinin yaklaşık olarak tamamına yakın kısmının ısıya dönüştüğü kabul edilebilir. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşan ısı, takım performansı ve iş parçası yüzey kalitesini etkilediği için oldukça önemli bir faktör olarak kabul edilebilir.

Belirli bir kesme hızında etkili olan "teğet kesme kuvveti", enerjinin belli bir kısmını temsil eder. Bu enerji, talaş oluşturmak için deformasyon ve kesme işinde harcanır. Ayrıca, bir kısım enerji, talaş yüzeyinde ve talaş kırıcı karşısında talaşın biçimlendirilmesi için kullanılır. Talaş kaldırma esnasında ısı oluşumu, Şekil 2.9 de görüldüğü gibi prensip olarak üç bölgede oluşur [17].



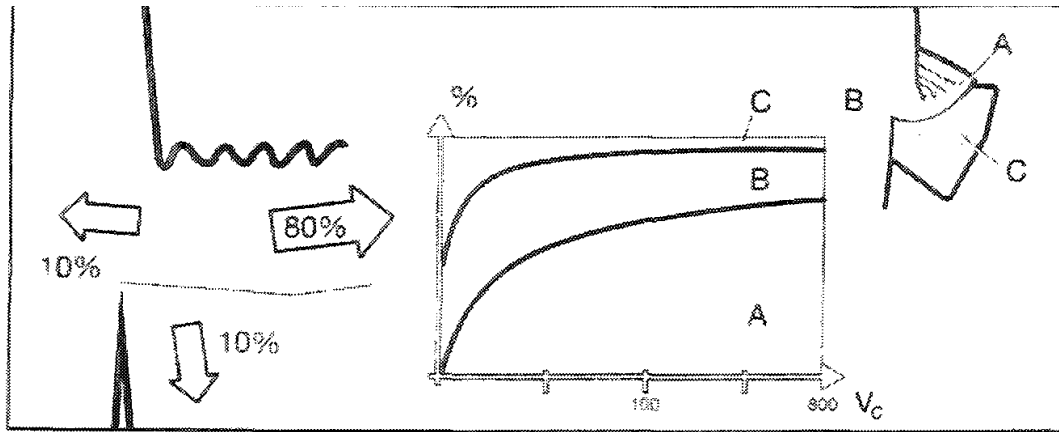
Şekil 2.9. Dik (ortogonal) kesmede ısı oluşumu [17]

Dik kesmede oluşan üç ısı bölgesi şöyle sıralanabilir;

- Birinci deformasyon (AB) bölgesi, plastik deformasyon ile oluşan temel ısı kaynağı. Bu bölgedeki ısının büyük bir kısmı talaş içinde kalır ve talaşla kesme bölgesinde uzaklaştırılır.
- İkinci deformasyon (takım-talaş ara yüzeyi (BC)) bölgesi. Talaş içinde ekstra plastik deformasyonun olduğu ve yeni talaş malzemesinin sürekli akışı sonucu, sürtünme nedeniyle meydana gelen ısının, bir kısmı talaşla atılırken, bir kısmı da kesici takım gövdesine geçerek kesme bölgesinden uzaklaştırılır.

- c) Üçüncü ısı kaynağı, takım ve iş parçasının işlenmiş yüzeyi arasındaki serbest kenarda (BD' de) oluşur. Oluşan ısının bir miktarı talaş, bir kısmı da iş parçası tarafından uzaklaştırılır. Bu bölgede oluşan ısı, ön boşluk açısı olan kesici takım kullanıldığında olmamaktadır. Bu durum kesici takım ön boşluk açısına bağlıdır.
- d) Talaş kaldırma sırasında en büyük ısı, kayma bölgesinde (birinci deformasyon bölgesinde) ortaya çıkar. Bu sebeple, takım ve talaş arasındaki temas miktarı ve kalitesi performansı etkilemektedir.

Talaş kaldırma sırasında oluşan ısının büyük bir kısmı, kesme bölgesinden talaşla uzaklaştırılır. Talaş üzerinde bulunan ısı, talaşla kesici takımın temasta olduğu temas yüzeyi boyunca takımı etkileyecektir. Metallerin işlenmesi sırasında takım, talaş ve iş parçası üzerine ısının dağılımı Şekil 2.10' de şematik ve grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.10' de A talaştaki, B iş parçasındaki C ise kesici takımdaki sıcaklık dağılımını göstermektedir [17].



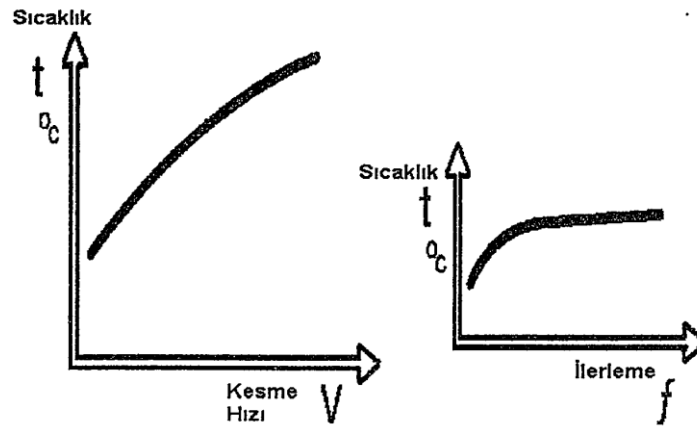
Şekil 2.10. Metal işlemede ısı dağılımını [17]

Talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan ısı, kesme kuvvetleri ve işlenen iş parçası malzemesine göre farklılık gösterir. Kesme parametrelerinden kesme hızı ve ilerleme ısı oluşumu üzerinde çok önemli bir rol oynarlar. Isı oluşumunda kesme hızının ilerlemeye göre daha etkili olduğu bilinmektedir [17].

Isı oluşumunda en önemli etken mekanik şekil değiştirmelerdir. Ayrıca talaşın takım yüzeyinde hareketi ve bir miktar da talaş birikintisi şeklindeki olaylar ısı oluşumuna etkide bulunurlar. Kesme hızının artırılmasıyla talaşla ortamdaki uzaklaştırılan ısı

miktarı da artar ve parçaya geçen ısı miktarı azalır. Takıma geçen ısı miktarı kesme hızı tarafından fazla etkilenmez [18].

İşlem esnasında ortaya çıkan ısı iş parçası malzemesi cinsine göre farklılık gösterir. İlerlemenin ısı oluşumuna etkisi, kesme hızının etkisinden daha azdır (Şekil 2.11). Takımın yüksek sıcaklıklarda özelliğini koruması, kızıl sertlik değerinin yüksek olmasına bağlıdır. Yüksek kesme hızlarında difüzyon ve deformasyonların oluşumu daha kolaydır. Takım ile işlenmiş yüzey arasında oluşan ısının düşük tutulması gerekir. Bu ise boşluk açısının yeterince büyük tutulması ve serbest yüzey aşınmasının kontrolü ile gerçekleşir [18].



Şekil 2.11. Sıcaklığın kesme hızı ve ilerlemeye göre değişimi [18]

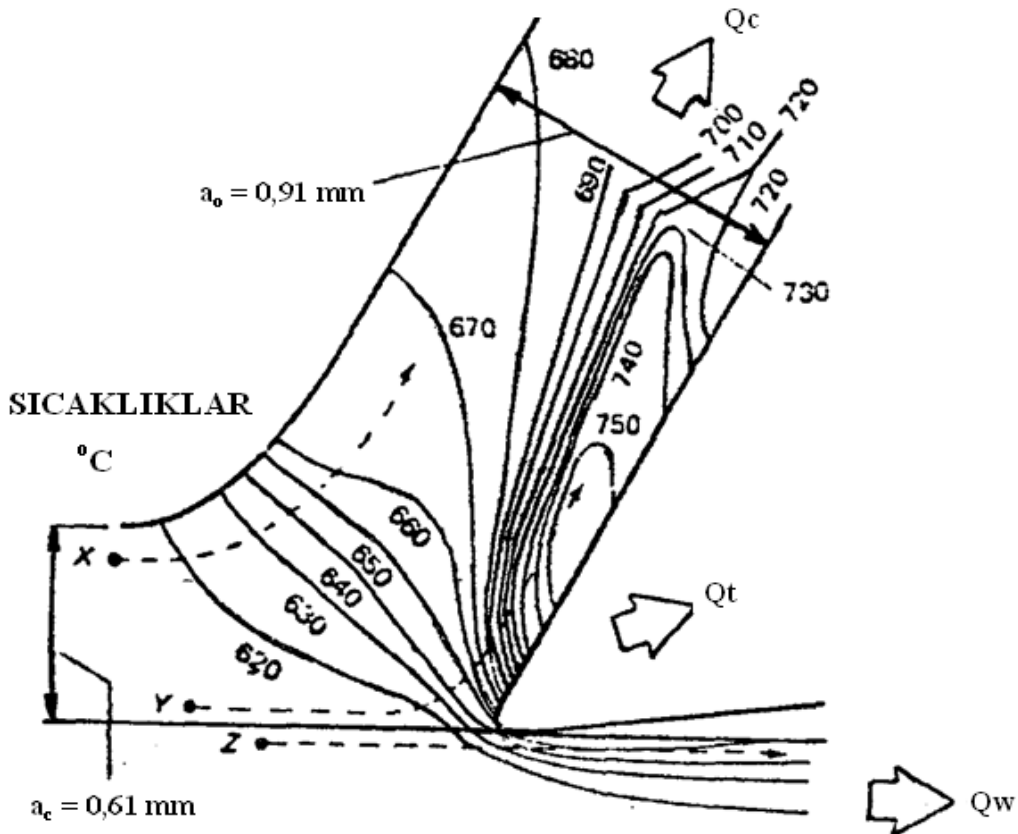
Oluşan sıcaklık takım üzerinde iki tip etkide bulunur.

- 1) Takımın sertliğini düşürür,
- 2) Takımın aşınmaya karşı mukavemetini azaltır.

Su verme ile sertleştirilen takım çelikleri ve ısıya duyarlı hız çelikleri sıcaklıkla sertliklerini kaybeder ve etkisiz hale gelirler. Bu yüzden bu takımların kesme hızı değerleri, sıcaklığın da artması nedeniyle sınırlıdır. Soğutma sıvısı ek bir maliyet getirirse de, bu tip takımların daha yüksek kesme hızlarında çalışılabilmeleri için gereklidir [18].

### 2.7.1. Talaş kaldırmada sıcaklık dağılımı

Şekil 2.12' de dik kesme sırasında talaş ve iş parçasında oluşan ve deneysel olarak belirlenmiş sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Kesici takıma doğru hareket eden malzemedeki X noktası, birinci deformasyon bölgesine doğru yaklaşır ve geçer. X noktası bu bölgeden ayrılana kadar ısıtılır ve ısı talaş içine doğru taşınır. Y noktası her iki deformasyon bölgesinden geçer ve ikinci deformasyon bölgesinden ayrılana kadar ısıtılır. Bu nokta, talaş gövdesinde ısı iletimi yoluyla soğutulur ve talaşta üniform bir sıcaklık dağılımı oluşturulur. Böylece, kesici kenardan belirli bir mesafede, takım yüzeyi boyunca maksimum sıcaklık oluşur. İş parçası içinde kalan Z noktası, birinci deformasyon bölgesinden ısı iletimi yoluyla ısıtılır [17].



Şekil 2.12. Dik kesme sırasında talaş ve iş parçası arasındaki sıcaklık dağılımı [17]

Şekil 2.12' e göre sıcaklık dağılımı şöyledir:

$$Q_{maks.} = Q_c + Q_w + Q_t \quad (2.22)$$

Burada;

$Q_{maks.}$  : Toplam ısı (W)

$Q_c$  : Talaşla taşınan ısı (W)

$Q_w$  : İş parçasına iletilen ısı (W)

$Q_t$  : Takıma iletilen ısı (W) dir.

Kesme hızı, talaş kaldırma işlemini doğrudan etkilemektedir. Kesme hızının talaş kaldırmada oluşan ısı üzerine etkisi, Şekil 2.13' de verilmiştir. Talaş içindeki maksimum sıcaklık, ikinci deformasyon bölgesinde oluşur ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir :

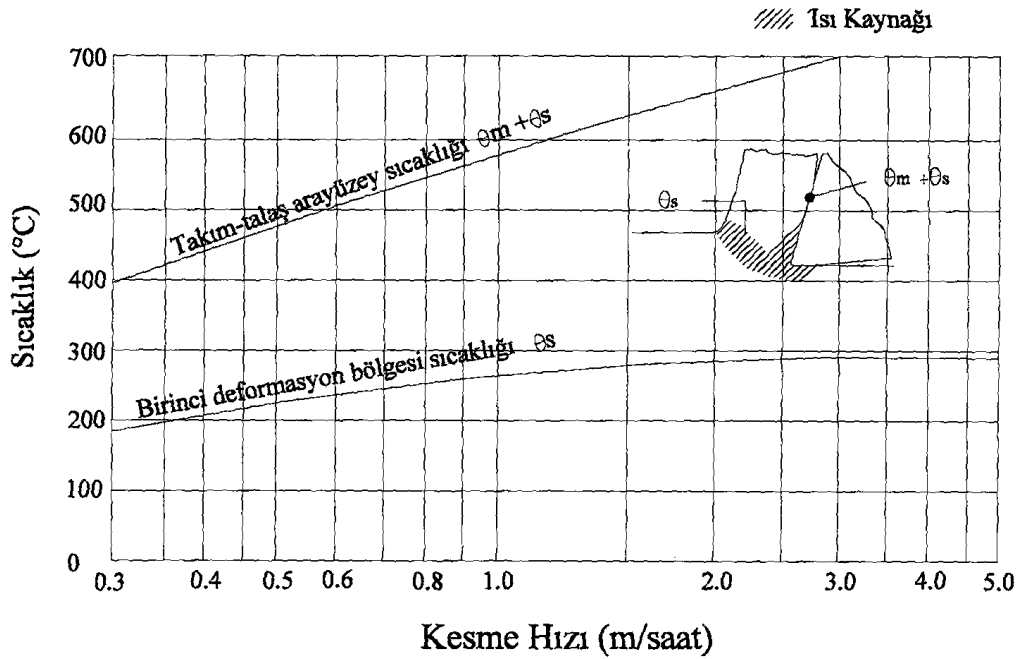
$$\theta_{maks.} = \theta_m + \theta_s + \theta_0 \quad (2.23)$$

Burada;

$\theta_m$ : İkinci deformasyon bölgesi boyunca sürtünmeyle oluşan sıcaklık (°C)

$\theta_s$ : Birinci deformasyon bölgesi boyunca geçen malzemedeki sıcaklık artışı (°C)

$\theta_0$ : İş parçasının başlangıçtaki sıcaklığı (°C)



Şekil 2.13. Talaş kaldırmada kesme hızının oluşan sıcaklık üzerindeki etkisi [17]

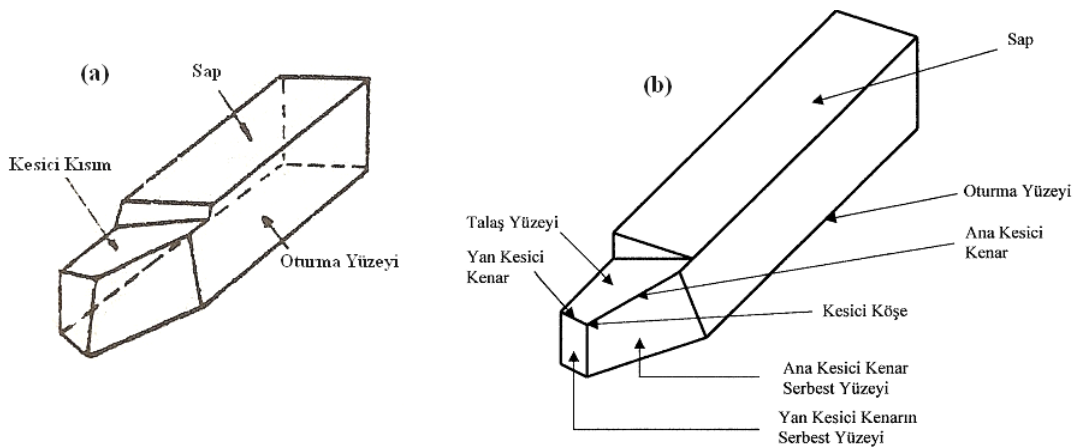


Kesme hızının artışı ile birinci kesme bölgesinde hafif bir sıcaklık artışı oluşmakta ve sonra sabit kalmaktadır. Bununla birlikte, kesme hızındaki artışla takım talaş ara yüzey sıcaklığı ( $\theta_m + \theta_s$ ) hızlı bir şekilde artmaktadır. İkinci deformasyon bölgesinde oluşan bu ani sıcaklık artışı, takımla temas uzunluğu boyunca kesici takım performansını etkilemektedir [17].

## 2.8. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler

### 2.8.1. Takım geometrisi

Tornalama işleminde kullanılan takımlar tek ağızlı takımlardır. Torna kalemleri, sap ve kesici kısımdan meydana gelir (Şekil 2.14a). Kesici kısım; talaş yüzeyi, serbest yüzeyler, ana ağız, yan ağız ve uçtan oluşur (şekil 2.14b). Talaş yüzeyi, parçadan kaldırılan talaşın aktığı yüzeydir. Bazı hallerde bu yüzeyin ağza paralel olan tarafına açı verilir, açı verilen bu yüzeye talaş yüzeyinin eğik kenarı denilir [11].

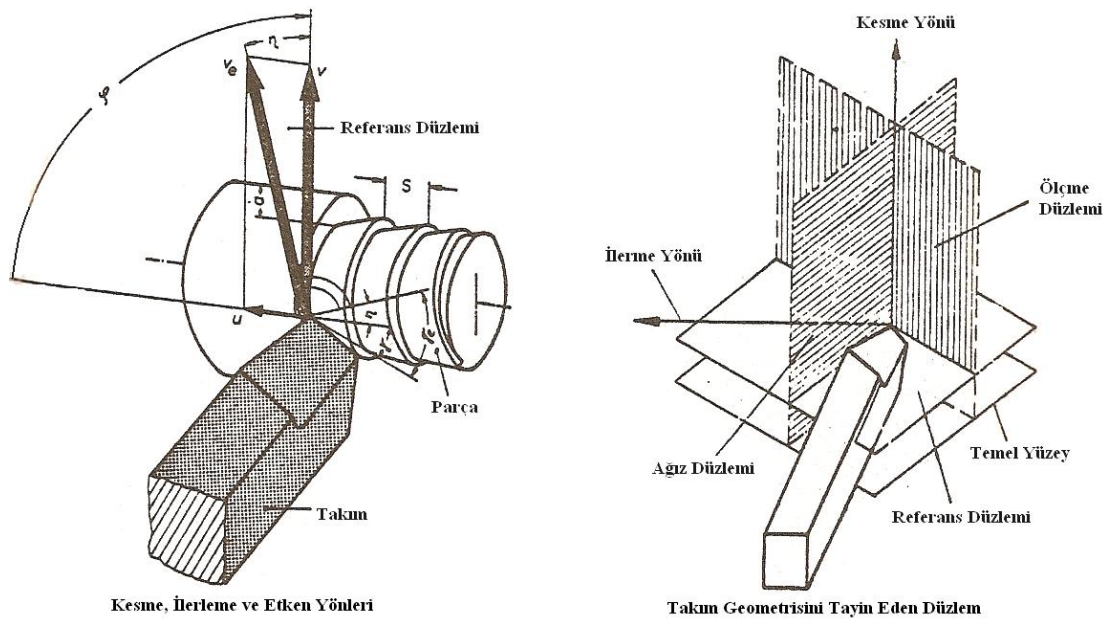


Şekil 2.14. Torna Kalemi [14,19]

Serbest yüzeyler, takımın işlenen yüzeye doğru bakan yüzeyleridir. Bu yüzeylere ana serbest yüzeyi ve yan (veya yardımcı) serbest yüzeyi denilir. Ana ağız, takımın talaş kaldıran kesme kenarıdır. Bu kenar, ana serbest ve talaş yüzeylerinin kesişmesinden meydana gelir. Yan ağız, yan serbest yüzey ile talaş yüzeyinin kesişmesinden oluşan ağızdır. Uç ana ve yan ağzın birleştiği yerdir; uç belirli bir yarıçapa göre yuvarlatılır. Takımın sap kısmı genelde dikdörtgen kesitli yapılıdır. Bazı durumlarda sap dairesel ve çokgen kesitli olabilir [11].

Dik kesme işleminde kayma açısı  $\phi$ , serbest açısı  $\alpha$ , kama açısı  $\beta$ , ve talaş açısı  $\gamma$  gibi açılar kesici takımın geometrisini oluşturan açılardır. Kayma açısı değiştiğinde talaş kalınlığını değiştirdiği için bunun önemi büyüktür. Boşluk açısı; kesici takım ucunun ve taban alt yüzeyinin işlenecek iş parçasına sürtünmesini önlemek amacıyla verilir. Kama açısı; kesici takım ucunun kesme özelliğinin sağlanması yani batmanın kolaylaştırılması için verilmekte olan açıdır. Talaş açısı; talaşın kesici takım yüzeyinden akarak uzaklaşmasını sağlayan açıdır. Dik kesme işleminde boşluk açısı, kama açısı ve talaş açısı toplamı her zaman  $90^\circ$  olmalıdır [7].

Talaş kaldırma sırasında, takımın parçaya göre konumu, kesme ve ilerleme yönleri ve bu yönlerde kesme hızı ( $v$ ), ilerleme hızı ( $u$ ) Şekil 2.15' de gösterilmiştir. Kesme ve ilerleme hareketlerinin bileşimi etken hareketini, bunların yönleri etki yönünü ve hızları da etken hızı ( $v_e$ ) oluşturur. Etken hareketin esası bir helis hareketidir. Dolayısıyla kesme ve ilerleme hareketlerinin sonunda, parça üzerinden kaldırılan talaşın izleri helis şeklinde olacaktır [11].



Şekil 2.15. Tornalamada takımın çalışma düzemi [14]

Takımın kesici kısmının geometrisi belirli bir referans sistemine göre tayin edilir. DIN 6851 standardına göre kesme yönünü esas alan takım referans sisteminin ve etki yönünü esas alan etki referans sistemi olmak üzere iki referans sistemi vardır. Burada

takım açıları takım referans sistemine göre ifade edilecektir. Bu referans sistemi (Şekil 2.15); referans düzlemi, ağız düzlemi ve ölçme düzleminden oluşur.

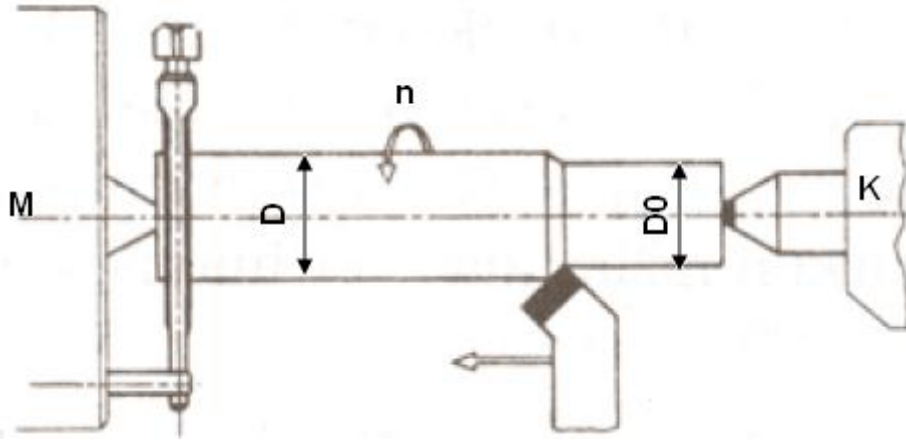
Referans düzlemi, kesme yönüne dik, temel yüzeye paralel ve takım ağzının belirli bir noktasından geçen düzlem; ağız düzlemi ise takımın ana ağzını ve kesme yönünü içeren ve referans düzlemine dik olan düzlemdir. Ölçme düzlemi de bu iki düzleme ve dolayısıyla ana ağza dik düzlemdir. Takım açıları, takımın kesme durumundaki konumunu gösteren referans düzlemi esas alınarak tayin edilir [11].

### 2.8.2. Kesme hızı

Kesme hızı, talaş kaldırma esnasında kesici takımın dönen iş parçası üzerinden dakikada metre cinsinden aldığı yoldur. Boyuna tornalama işleminde, parça çapı  $D$  (m) (Şekil 2.16) ve devir sayısı  $n$  (dev/dak) olarak ifade edilirse kesme hızı;

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/dak)} \quad (2.24)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Talaş kaldırma işlemi ile parçanın çapı  $D$ 'den  $D_0$ 'a azalırken, takımın ağzı, MK doğrusu boyunca temas halindedir. Dolayısıyla parça çapı azaldığı için temas boyunca kesme hızı değişecektir. Ancak, temas parçası küçük olduğundan kesme hızı parçanın başlangıçtaki çapı  $D$ 'ye göre hesaplanır. Boyuna iç (delik) tornalama ve alın tornalamada da kesme hızı meydana gelen en büyük çap göz önüne alınarak (2.24) bağıntısı yardımıyla hesaplanır. Bir parça işlenirken kesme hızı, teknik veya ekonomik şartlara göre tayin edilen takım ömrü ve genişletilmiş Taylor bağıntısı yardımı ile tayin edilir. Daha sonra, eğer kullanılan tezgah universal veya mekanik otomat bir tezgah ise (2.24) bağıntısı yardımı ile hesaplanır ve tezgahın hız kademelerinden en yakın, fakat daha düşük bir devir sayısı seçilir [11].



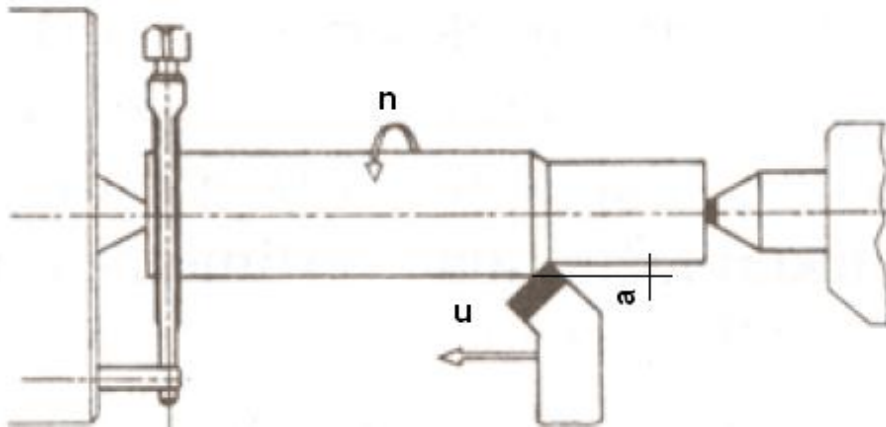
Şekil 2.16. Tornalamada talaş kaldırma işlemi [20]

### 2.8.3. İlerleme

İlerleme kalem ucunun bir devirde parça eksenini boyunca aldığı yoldur (Şekil 2.17). Bu nedenle ilerleme  $s$  (mm/dev) olarak ifade edilir. İlerlemenin yanı sıra dakikada mm cinsinden alınan yol olarak ifade edilen ilerleme hızı ( $u$ ) da vardır.  $s$  ve  $u$  arasındaki bağıntı;

$$s = \frac{u}{n} \quad (\text{mm/dev}) \quad (2.25)$$

veya  $u=s.n$  (mm/dev) şeklinde yazılır. İlerleme, işleme zamanı ve yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. İlerleme değeri büyüdükçe işleme zamanı aynı oranda azalacaktır [11].



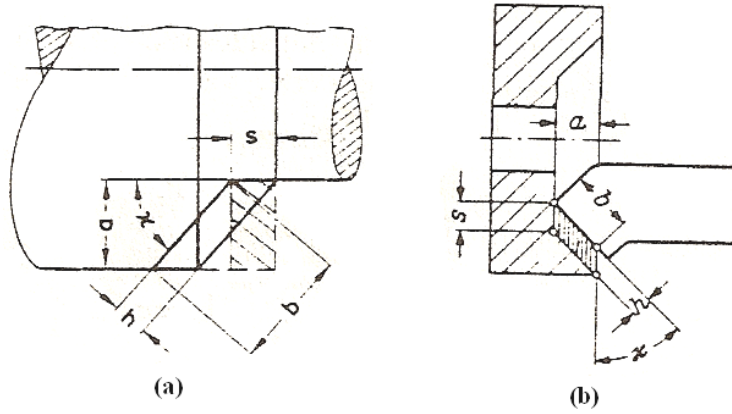
Şekil 2.17. İlerleme [20]

#### 2.8.4. Talaş boyutları

Talaş boyutları, kesme derinliği veya paso kalınlığı denilen kaldırılacak tabakanın kalınlığı  $a$  ve ilerleme  $s$  veya şekil değiştirmemiş talaş genişliği  $b$  ve talaş kalınlığı  $h$  ile ifade edilir. Parçanın çapı başlangıçta  $D$  ve bir paso kaldırıldıktan sonra  $d$  olursa, paso kalınlığı dış tornalama (şekil 2.18a) ve iç tornalama (şekil 2.18b) için sırasıyla;

$$a = \frac{D - d}{2} \quad (\text{mm}); \quad a = \frac{d - D}{2} \quad (\text{mm}) \quad (2.26)$$

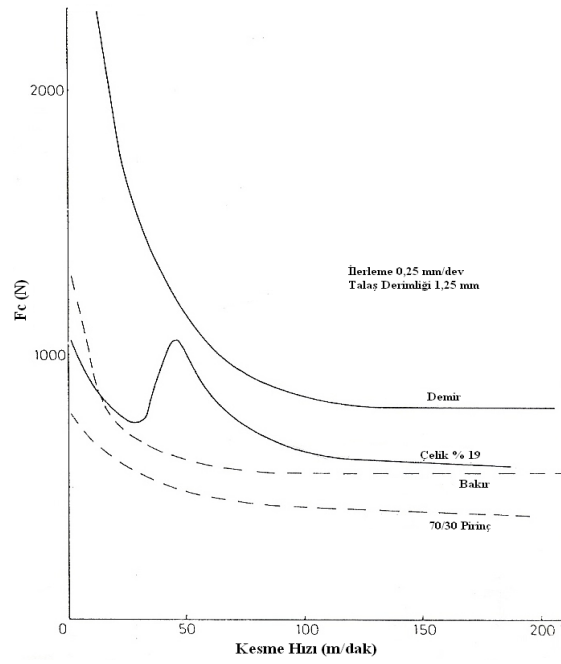
şeklinde bulunur [11].



Şekil 2.18. Talaş boyutları [14]

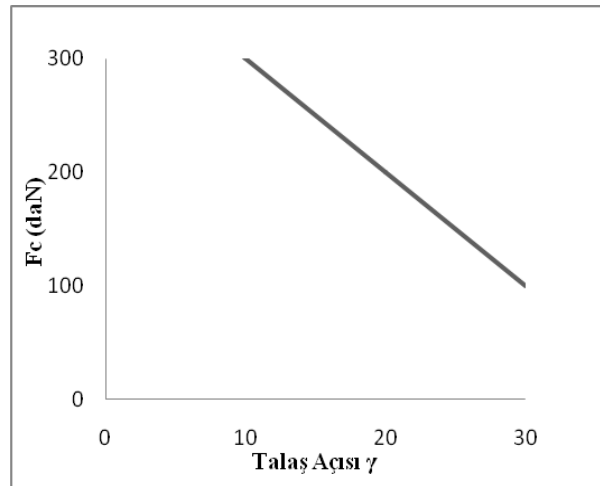
#### 2.8.5. Kesme kuvvetleri

Kesme kuvvetleri talaş oluşumundan, talaş şekil değiştirmesinden ve talaş ile takım arasında oluşan sürtünmelerden dolayı oluşur. Kesme kuvveti üzerinde kesme hızının ve kesme sıvısı kullanılıp kullanılmamasının etkisi azdır [7]. Kesme hızının kesme kuvveti üzerine etkisi, hız çeliğinden yapılan takımlarda  $v = (30..35)$  m/dak ve sert metalden yapılan takımlarda  $v > 80$  m/dak olduğu durumlarda görülür [3]. Şekil 2.19'de farklı malzemeler üzerinde, kesme hızının, kesme kuvveti üzerine etkisi görülmektedir.



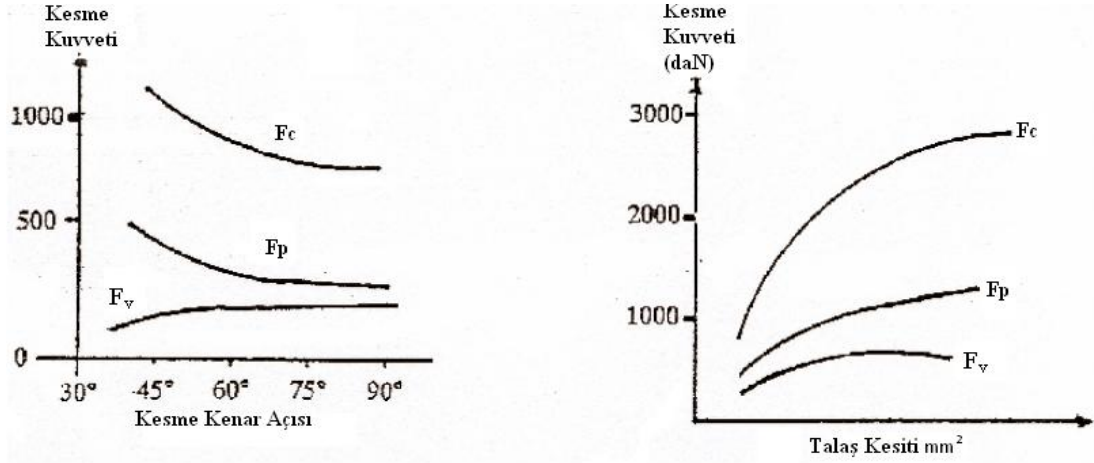
Şekil 2.19. Farklı malzemeler için kesme hızının, kesme kuvvetine etkisi [21]

Talaş açısı ve kesme kenarı açısı büyüdükçe kesme kuvveti azalmaktadır. Belirli kesme koşullarında kesme kuvvetinin kesme hızına göre değişimi sabittir. Şekil 2.20’da kesme kuvvetinin talaş açısına göre değişimi görülmektedir [12].



Şekil 2.20. Kesme kuvvetinin talaş açısına göre değişimi [12]

Talaş kesitinin, kesme kuvveti üzerindeki etkisi büyüktür. Şekil 2.21’da kesme kuvvetinin kesme kenar açısına ve talaş kesitine göre değişimi görülmektedir.



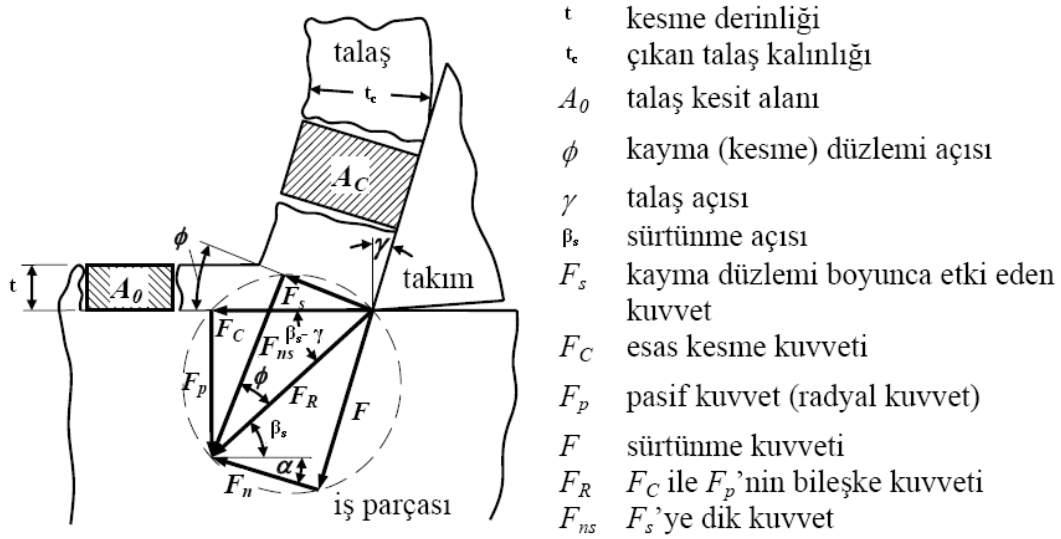
Şekil 2.21. Kesme kuvvetinin, kesme kenar açısına ve talaş kesitine göre değişimi [12]

Şekil 2.21'da  $F_c$  kesme kuvveti,  $F_v$  ilerleme kuvveti,  $F_p$  radyal kuvveti, simgelemektedir [12].

#### 2.8.5.1. Kuvvet bağıntıları

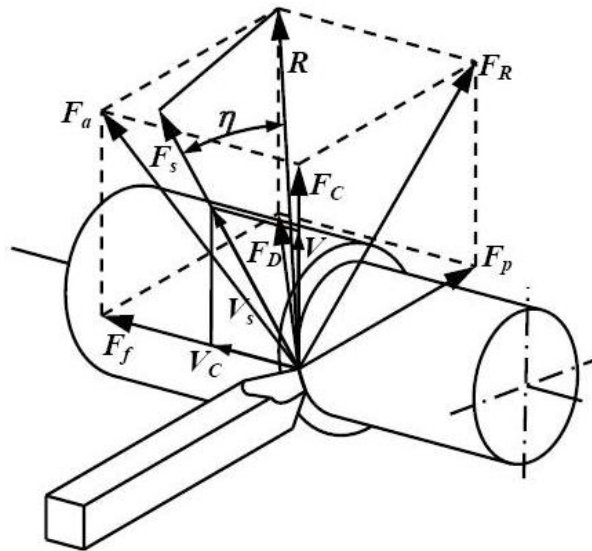
Kuvvet bağıntılarını çıkarabilmek için talaş serbest olarak, malzemedan izole edilmiş gibi dengede düşünülerek incelenir. Takım yüzeyinde elde edilen kuvvet bileşenleri, takım yüzeyindeki sürtünme katsayısının ve sürtünme kuvvetinin hesaplanmasına da imkan sağlar.

Şekil 2.22'da ortogonal kesmede oluşan kuvvetleri ve hesaplamalarda kullanılan hesaplama üçgenleri görülmektedir.



Şekil 2.22. Dik kes mede oluşan kuvvetler [16]

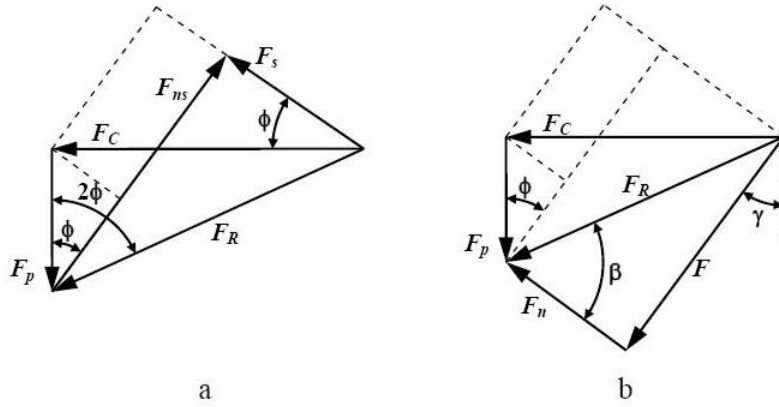
Şekil 2.23'de ise oluşan kuvvetlerin tornalama için yorumlanması ifade edilmiş olup;  $F_v$  ilerleme kuvvetini,  $F_p$  pasif (radyal) kuvveti,  $F_c$  esas kesme kuvveti ve  $R$  bileşke kuvveti göstermektedir.



Şekil 2.23. Kesme kuvvetlerinin torna tezgâhı için yorumlanması [16]

Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'den yola çıkarak yatay ve dikey bileşenler kullanılarak Şekil 2.24'deki kuvvet vektörlerini veren hesaplama üçgenleri elde edilir. Hesaplama üçgenlerinden özetle şu bağıntılar yazabilir:





Şekil 2.24. Kesme kuvvetleri için kullanılan hesaplama üçgenleri [16]

$$F_{ns} = F_p \cdot \cos\phi + F_c \cdot \sin\phi \quad (2.27)$$

$$F = F_c \cdot \cos\gamma + F_p \cdot \sin\gamma \quad (2.28)$$

$$F_n = F_c \cdot \cos\gamma - F_p \cdot \sin\gamma \quad (2.29)$$

Bu bağıntılardan yola çıkarak  $\beta_s$  sürtünme açısını ve dolayısıyla sürtünme katsayısı ( $\mu$ ), aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$\tan\beta_s = \mu = \frac{F}{F_n} \quad (2.30)$$

Eşitlik 2.28, 2.29 ve 2.30 kullanılarak sürtünme açısı;

$$\mu = \frac{F_c \cdot \sin\gamma + F_p \cdot \cos\gamma}{F_c \cdot \cos\gamma - F_p \cdot \sin\gamma} \quad (2.31a)$$

$$\mu = \mu = \frac{F_p + F_c \cdot \tan\gamma}{F_c - F_p \cdot \tan\gamma} \quad (2.31b)$$

elde edilir.

Talaş açısı ( $\gamma$ ) negatif bir değer alması halinde ise, eşitlik 2.31b'deki "+" ve "-" işaretlerin yerleri değişir.

### 2.8.5.2. Esas kesme kuvvetinin belirlenmesi

Kayma düzlemi boyunca etki eden  $F_s$  kuvveti, malzemenin çekme dayanımına ( $\sigma$ , MPa) ve kayma düzlemi açısına ( $\theta$ ) bağlı olarak;

$$F_s = A_o \cdot \sigma_k \cdot \cos \sec \theta \quad (2.32a)$$

$$F_s = a.f. \cos \sec \theta \quad (2.32b)$$

şeklinde elde edilir.

Eşitlik 2.32 ve Şekil 2.25'deki hız üçgenlerini kullanarak  $F_c$ 'yi

$$F_c = \frac{F_s \cdot \cos(\beta - \gamma)}{\cos(\theta + \beta - \gamma)} \quad (2.33)$$

biçiminde hesaplamak mümkün olacaktır.

Ancak yapılan pek çok deneysel araştırmanın ortaya koyduğu sonuçlara göre, talaş kaldırma sırasında esas kesme kuvvetini etkileyen değişik faktörler söz konusudur. Bunların en önemlileri; kesme hızı faktörü ( $k_v$ ), talaş açısı faktörü ( $k_\gamma$ ), takımın aşınma faktörü ( $k_a$ ), takım malzemesi faktörü ( $k_t$ ) biçiminde sıralanabilir.

Bu faktörleri de dikkate alarak esas kesme kuvveti,

$$F_c = [A_o \cdot k_s] k_v k_\gamma k_a k_t \quad (2.34)$$

olarak ifade etmiştir [16]. Burada  $k_s$  özgül kesme direncini (MPa) göstermektedir. Esas kesme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan özgül kesme direnci.  $k_s = k_{11} h^{-m}$  ampirik bağıntısı ile bulunur. Bu bağıntıdaki  $k_{11}$ ;  $h=1$  mm ve  $b=1$  mm olan bir kesitin özgül kesme kuvvetini ifade ederken  $m$  ise işlenen malzemenin  $k_s$  değeri ile  $h$  değeri

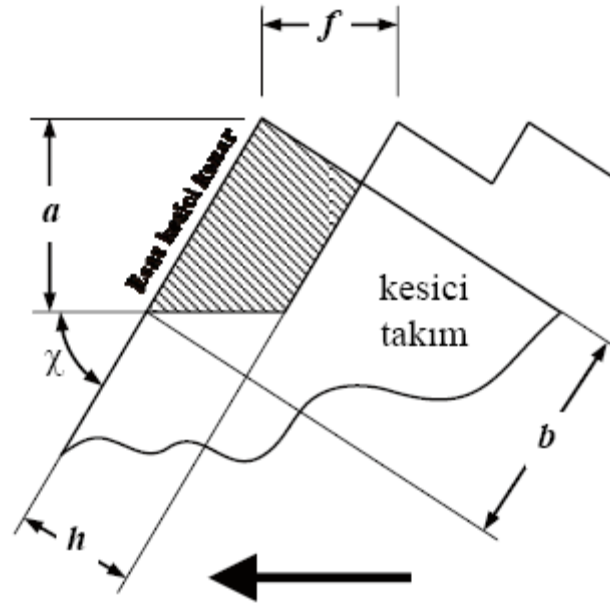
arasındaki logaritmik ilişkiyi gösteren eğrinin karakteristik eğimi olup malzeme cinsine bağlı olarak sabit bir değer almaktadır.

Özgül kesme direnci ile kesme derinliği ve ilerlemeye bağlı talaş kesiti alanı (mm) da dikkate alındığında; Eşitlik 2.34'den;

$$F_c = \left[ a \cdot f \cdot \frac{k_{11}}{h^m} \right] k_v k_\gamma k_\alpha k_t \quad (2.35)$$

haline gelir.

Talaşlı imalatta takım tezgâhlarının pek çoğu için kesme kuvveti ve buna bağlı kesme gücünü hesaplamak için  $F_c$  kullanılır. Bu hesaplamada, talaş geometrisi de büyük önem taşımaktadır. Talaş kesitini belirleyen en önemli faktör kesme kenarı açısıdır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25. Talaş kesitinin kesme kenarı açısı ile ilişkisi [10]

Şekil 2.25'da  $\chi$ , kesme kenarı açısını ifade etmekte olup. Talaş kesit alanı için  $A_o = a \cdot f$  veya  $A_o = b \cdot h$  yazılabilir. Kesme kenarı açısı;  $\sin \chi = (h/f)$  olduğuna göre talaş genişliği ve talaş kalınlığı için sırasıyla

$$b = \frac{a}{\sin\chi} \quad (2.36)$$

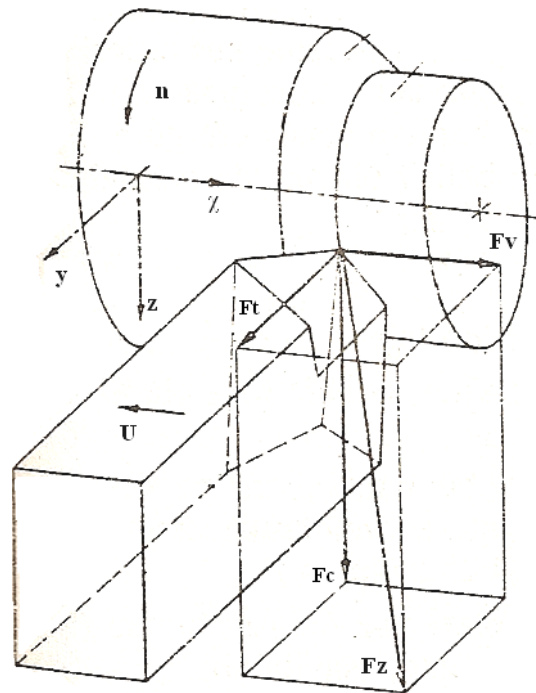
$$h = f \cdot \sin\chi \quad (2.37)$$

bağıntıları yazılabilir. Şekil 2.25'deki taralı alan talaş kesitini ifade ettiğinden;  $\chi = 90^\circ$  olması halinde kesit dikdörtgen ( $A_o = a \cdot f$ ) ve  $\chi < 90^\circ$  halinde ise kesit paralel kenar şeklinde olacaktır ( $A_o = b \cdot h$ ).

### 2.8.5.3. Kesme kuvvetlerinin takım üzerine etkileri

Takım ankastre bir çubuk olarak göz önüne alınırsa kesme kuvvetleri takımı şu şekilde etkiler (Şekil 2.26);

- $F_c$  kuvveti, eğilmeye (düşey düzlemde),
- $F_v$  kuvveti, eğilmeye (yatay düzlemde),
- $F_t$  kuvveti, basmaya ve takım uzun olduğu halde burkulmaya zorlar.



Şekil 2.26. Talaş kaldırma kuvvetleri [14]

Ayrıca takım, tutturma sistemine yeterli derecede sıkılarak bağlanmadığı veya uygun şekilde desteklenmediği halde, Fv kuvveti takımı eğik bir konuma getirebilir ve Ft kuvveti de takımı parçadan uzaklaştırabilir [11].

#### 2.8.5.4. Kesme kuvvetlerinin iş parçası üzerine etkileri

Etki-tepki kanununa göre kesme kuvvetleri parçayı zıt yönde etkilemektedir. Bu durumda parça, Fc kuvveti ile eğilmeye (düşey düzlemde) ve burulmaya; Ft kuvveti ile eğilmeye (yatay düzlemde); Fv kuvveti ile de basmaya zorlanır. Ayrıca punta arası tormalamada sıkma kuvveti tarafından basma ve burkulmaya zorlanır. Parça için önemli olan gerilmeler değil de şekil değişimleridir [11].

#### 2.8.6. Kesme gücü ve tezgah gücü

Tornalama işleminde sadece kesme kuvveti için gereken güç önemlidir. Bu güç, Fc (Newton) olarak ve v (m/dak) alınır;

$$P_s = \frac{F_c \cdot v}{60.1000} \text{ (kW)} \quad (2.38)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Kesme ve ilerleme gücü motordan parçaya tezgahın kinematik sistemi ile iletilir. Kinematik sistemin verimi  $\eta_m$  ile gösterilirse, tezgahın motor gücü;

$$P_m = \frac{P_s}{\eta_m} \quad (2.39)$$

olarak hesaplanır. Burada ilerleme için gereken güç, kesme gücüne göre çok küçük (%5 civarında) olduğundan ihmal edilir [11].

### 2.8.7. Takım aşınması

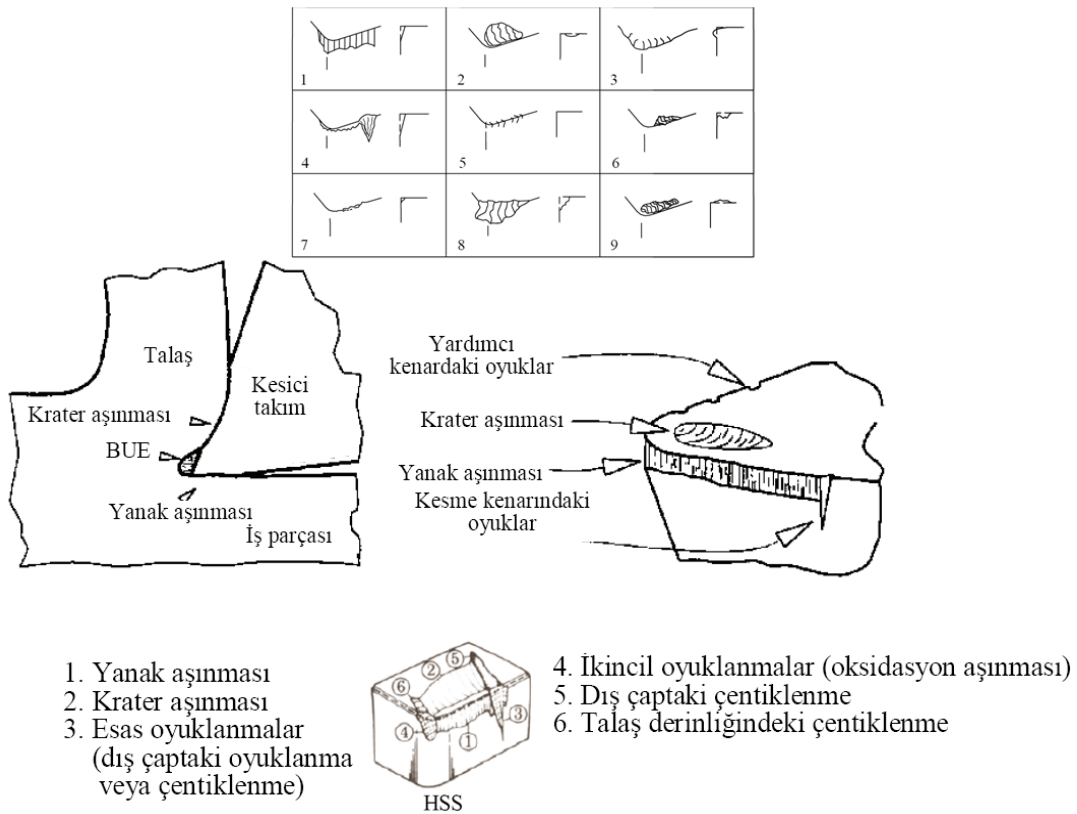
Takım aşınması, kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin (mekanik, kimyasal veya termal) bir birleşiminin ürünüdür. Aşınma, takım - iş parçası işleme şartları arasındaki karşılıklı etkileşimin bir sonucudur. Mekanik yük faktörleri, mekanik yüklerin statik bileşenlerinden başka talaş biçimlenme sürecinin kendisinden oluşan çeşitli dinamik yükler de söz konusudur. Bunların en önemlileri değişen kesme derinliğinden, kesintili işlemeden kaynaklananlar ve frezelemede görülenlerdir. Termal (ısı) yük faktörleri, talaş kaldırma işleminin kesici takım talaş yüzeyinde ve yan yüzeyinde çok miktarda ısı oluşmasına sebep olur. Kimyasal yük faktörleri, talaş oluşum süreci devamlı olarak yeni bir metal ara yüzeyi oluşturulması anlamı taşır ve talaş biçimlenmesi sırasında takım malzemesi boyunca hayli yüksek sıcaklık ve basınçta zorlama vardır. Oluşan bölgeler metallerin kimyasal reaksiyonları ve difüzyon için oldukça uygun bir ortam hazırlar [16].

Talaş kaldırma sırasında kesici kenar üzerindeki etkili olan yük faktörlerinin bir sonucu olarak, bazı temel aşınma mekanizmaları, metalden talaş kaldırma işlemine etki eder. Bu aşınma mekanizmaları; abrasyon aşınma, difüzyon aşınma, oksidasyon aşınma, yorulma ile aşınma (statik veya dinamik) ve yapışma ile aşınma (adhesiv aşınma) şeklinde özetlenebilir [16].

Kesici takım aşınma tiplerinin sınıflandırılması; işleme tipi ve malzeme, doğru işleme şartlarının ve takım sınıfının (grade) elde edilmesiyle; verimliliği optimize etmek ve işleme operasyonunu değerlendirmek için en önemli unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel işleme kriterleri; talaş kaldırma miktarı, ekonomik hassasiyet, yüzey dokusu ve talaş kontrolü takım aşınmasının oluşup gelişmesine bağlıdır. Doğru seçilmiş takımın kesme parametreleri için uygun başlangıç değerleri, uzman desteği, kişisel deneyimler, kalitesi yüksek iş parçası malzemesi ve işleme şartları gibi faktörler ideal aşınma gelişmesinin (oluşumunun) elde edilmesini sağlamak için en önemli bileşenlerdir.

Sınıflandırılmış aşınma tiplerini (Şekil 2.27) ve bunlara sebep olan mekanizmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 1) Yan yüzey (yanak) aşınması, abrasiv aşınma mekanizması ile oluşur.
- 2) Krater aşınması, abrasiv aşınma ve difüzyon aşınma mekanizması ile oluşur.
- 3) Plastik deformasyona, yorulma ile aşınma mekanizması sebep olur.
- 4) Çentik aşınması, oksidasyon ve yapışma aşınması ile mekanik yorulma mekanizmalarıyla oluşur.
- 5) Termal çatlaklar, termal yorulma mekanizması ile oluşur.
- 6) Mekanik yorulma çatlakları, mekanik yorulma mekanizması ile oluşur.
- 7) Çıtlama (çentiklenme), yorulma mekanizması ile oluşur.
- 8) Kırılma (kesici ucun kırılması). Plastik deformasyondan sonra oluşur.
- 9) Yığılma-sıvanma (BUE), adhezyon aşınma mekanizması ile oluşur [16].



Şekil 2.27. Kesici takımında görülen aşınma biçimleri [16]

### 2.8.8. Takım ömrü

Takımın müsaade edilen aşınma değerine erişeceği kadar geçen talaş kaldırma zamanı olarak ifade edilir. Buna bağlı olarak takım ömrü iki bileme arasındaki çalışma zamanı olarak da ifade edilebilir. Esasen takım ömrü aşınma olayına bağlı

olduğundan, aşınmayı etkileyen parça ve takım malzemesi, takım geometrisi, talaş geometrisi, kesme hızı, kesme sıvısı gibi faktörler takım ömrünü etkilerler. Bunların en önemlisi kesme hızının etkisidir [11].

Bu hususta Taylor tarafından yapılan deneylere göre, takım ömrü (T) ile kesme hızı (v) arasında Taylor bağıntısı olarak bilinen;

$$vT^n = C_t \quad (2.40)$$

ifadesi vardır. Burada v (m/dak) olarak kesme hızı, T (dak) olarak ömür, n parça ve takım malzemesine bağlı bir sabite ve  $C_t$  Taylor sabitesidir. Burada “ $n=1/k$ ” ile gösterilirse yukarıdaki bağıntı;

$$Tv^k = C \quad (2.41)$$

olarak yazılır. (2.40) bağıntısının grafik şeklinde gösterilişine “v-T” diyagramı; (2.41) bağıntısının grafik şeklinde gösterilişine “T-v” diyagramı denilir. Şekil 2.28.a’da (2.41) bağıntısı temsil edilmiştir. Görüldüğü gibi kesme hızı büyüdükçe, takım ömrü azalır. (2.40) bağıntısına logaritma işlemi uygulanırsa,

$$\log T = \text{Log } C - k \log v \quad (2.42)$$

bağıntısı bulunur. Burada “ $k=1/n$ ” takım ve parça malzemesine bağlı bir faktör, “C” kesme koşullarına bağlı bir sabitedir ve bir dakikalık takım ömrüne karşılık gelen kesme hızını ifade eder. Geometrik olarak “k” faktörü T-v doğrusunun eğimini göstermektedir. Buna göre şekil 2.28.b’ de gösterilen 1 ve 2 noktaları için ömür ve kesme hızları  $v_1$ ,  $T_1$  ve  $v_2$ ,  $T_2$  şeklinde yazılırsa,

$$T_1 v_1^k = T_2 v_2^k = C \quad (2.43)$$

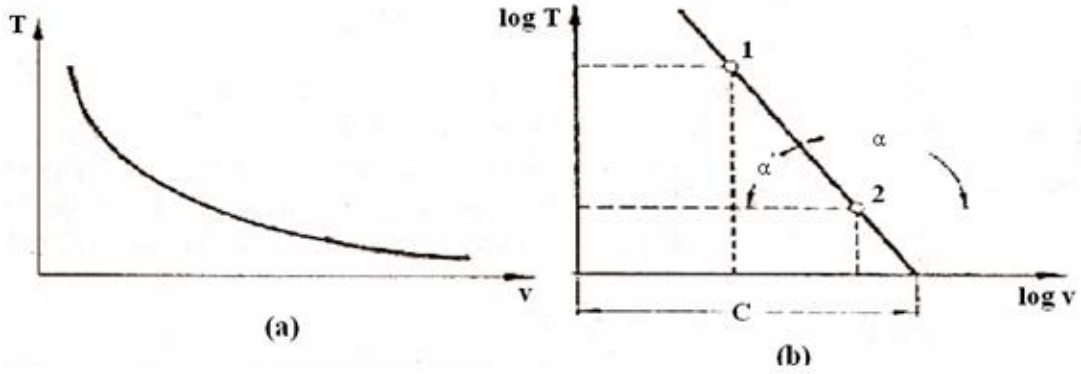
bağıntısı elde edilir ve k faktörü;



$$k = -\tan\alpha' = \frac{\log\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\log\left(\frac{v_2}{v_1}\right)} \quad (2.44)$$

bağıntısından hesaplanır.  $k$  faktörü ne kadar büyük olursa kesme hızının ömür üzerine etkisi daha büyük olur. Çeşitli takım malzemelerine ait  $k$  için, yaklaşık olarak şu değerler verilebilir;

Hız çelikleri (HSS)  $k=12,5\dots5$   $n=0,08\dots0,2$



Şekil 2.28. Ömür kesme hızı bağıntısı [11]

## **BÖLÜM 3. TORNALAMA İŞLEMLERİNDE KESME KUVVETLERİNİN VE SICAKLIKLARIN ÖLÇÜLMESİ**

### **3.1. Tornalama İşlemlerinde Kesme Kuvvetlerinin Ölçme Metotları**

Talaş kaldırma için gereken güç ile kesme kuvvetleri arasında belirli bağıntılar vardır. Kesme kuvvetleri teorik olarak hesaplanabilir veya bir dinamometre ile ölçülebilir. Talaş kaldırma işlemi sırasında sürtünme ve basınçların etkisi ile belirli yönlerde kuvvetler meydana gelmektedir. Tornada talaş kaldırma işlemlerinde kesme kuvvetleri talaş oluşumuna, talaşın şekil değiştirmesine ve takım ile talaş arasında oluşan sürtünmelere bağlıdır [22].

Kesme kuvvetlerinin deney yolu ile tayin edilmesi için mekanik, hidrolik, pnömatik, elektronik, elektrik, optik, piezoelektrik gibi çeşitli dinamometreler kullanılmaktadır. Herhangi bir cihaz gibi bir dinamometre sezgi elemanı (transducer) ve gösterge (display) elemanından meydana gelmektedir. Esasen günümüzde kullanılan dinamometreler karışık yani mekanik-elektronik, mekanik-hidrolik, mekanik-optik şeklindedirler.

Kesme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan mekanik sistemlerde, dinamometreler esasen takım sistemine yerleştirilen birer yaydır. Burada ölçme, yayın yani dinamometrenin elastik şekil-değiştirmesine dayanır. Bu şekil-değiştirmeler direkt kadran ve ibreden oluşan bir gösterge sistemine (mekanik kadran), bir sıvının yardımıyla bir manometreye veya uzar-ölçer (strain-gage) elemanların yardımıyla bir gösterge veya kaydetme cihazına gönderilir. Dinamometrelerde önemli bir işlem kalibrasyon işlemidir. Kalibrasyon ile dinamometrede kuvvet ile şekil-değiştirmeler arasında bağıntılar bulunur [23].

Statik ve dinamik kuvvetlerin ölçülmesinde, kuvveti elastik bir makine elemanına uygulayarak bu elastik elemanda oluşan defermasyon miktarının belirlenmesinde

dinamometreler veya transdüserler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak deformasyonların küçük olması durumunda gerinim ölçerlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Normal kesme kuvvetleri sadece katı cisimler mekaniğinde karşılaşılan büyüklükler değildir. Örneğin, talaş kaldırma işlemi ve talaş oluşumu esnasında oluşan kuvvetler göz önüne alınır ve kesici takımın bir ankastre çubuk gibi davrandığı düşünülürse takımda oluşan yatay ve düşey düzlemde eğilme-burulma ve basma-burkulma kuvvetleri hesaplanabilir. Kuvvet ölçme metotları üç kategoride incelenebilir [19].

### **3.1.1 Bilinen bir yükü dengelenerek kuvvet ölçme**

Bu yöntemde, ölçülecek olan kuvvet, kütlesi bilinen bir karşı ağırlık ile dengelenir. Bu dengelemeye göre kuvvet, karşı ağırlığın kütlesinin yerçekimi ivmesiyle çarpılması sonucu hesaplanır. Bu metot yüksek bir hassasiyet sağlamakla birlikte karmaşık bir yapıya sahiptir. Kullanım alanı sınırlı olup, orta büyüklükteki kuvvetlerin ölçümlerinde kullanılmaktadır [19].

### **3.1.2 Elastik cismin deformasyonu ile kuvvet ölçme**

İkinci kategoride yer alan bu metot, dolaylı kuvvet ölçme olarak da isimlendirilmektedir. Bu metotta ise kalibre edilmiş kütleler veya transdüserler kullanılmaktadır.

Yüksek bir hassasiyet elde etmek için, kaliteli bir elastik cisim deformasyonundan kuvvet ölçülebilmektedir. Yük uygulandığında, elastik cisim elastik bölgede kalacak şekilde ölçüm yapılabilmesi için çevre şartlarına göre, uygun boyut ölçme metotlarından birisi kullanılabilir. Kuvvetin doğru ölçülebilmesi için elastik cisimde ortaya çıkan deformasyonun çok hassas olarak ölçülmesi gerekir. Bu metot, genellikle yüksek hassasiyet sağlar ve tüm yük dönüştürücülerde kullanılabilir [19].

### 3.1.3. Fiziksel özelliklerin değişimi ile kuvvet ölçme

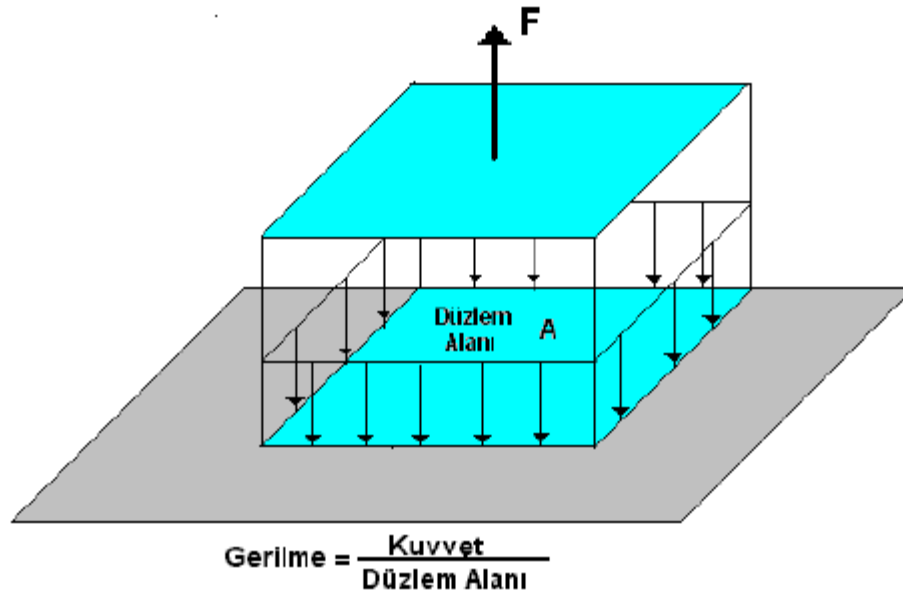
Malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişiminden yararlanma esasına dayanan bu metodun güvenilirliği diğer iki metoda göre daha azdır. Çünkü fiziksel özelliklerdeki değişim her zaman doğrusal olmamaktadır. Ancak elektriksel olarak değerlendirme yapıldığı için, bilimde ve endüstrideki ölçme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, deformasyonla elektriksel direnç değiştiğinden deformasyon özelliği ile fiziksel özelliklerin birlikte kullanılması da mümkündür [19].

## 3.2. Yük Hücreleri

Yük hücresi (load cell), mekanik bir büyüklük olan kuvveti elektriksel büyüklüğe çevirerek ölçmeyi sağlayan bir cihazdır. Yük hücresini bir çeşit transdüser (dönüştürücü) olarak tanımlayabiliriz. Transdüseri ise, her hangi bir büyüklüğü başka bir büyüklüğe dönüştüren veya başka sistemlere ileten bir aygıt olarak tanımlanır. Bu durumda, mekanik bir büyüklük olan yük veya kuvvete karşılık, elektriksel bir çıkış elde ediliyorsa, kuvvet ölçümünde kullanılan bir transdüserin tanımı yapılmış olur. Hücre (cell) kelimesi, belirli bir ölçüm için tasarlanmış transdüserler için kullanılır. Transdüserlerde en önemli olay, mekanik enerjinin elektriksel çıkışa nasıl dönüştürüldüğü ve hangi prensiplerin kullanıldığıdır. Günümüzde en yaygın biçimde kullanılan yük hücresi, direnç değişimi prensibine göre çalışan, uzama ölçer (strain gage) tipinde olanıdır. Bunun nedeni, kolay ve kullanışlı olmasının yanında, aynı zamanda ağır işletme koşullarında da rahatlıkla kullanılmasıdır. Uzama ölçer, yük hücresinin içinde bulunan, elastik sınırlar içinde çalışan bir kirişe yapıştırılır. Yük uygulandığında kirişin boyunda meydana gelen çok küçük değişimler, uzama ölçerler tarafından algılanır [24].

### 3.2.1. Gerilme ve gerinim ilişkisi

Gerilme; bir malzemeye yük uygulandığında, bu yükün malzeme üzerinde oluşturacağı etki olarak bilinir ve birim alana gelen yük olarak tarif edilir. Gerilme  $\sigma$  sembolüyle gösterilip “ $\sigma = F/A$ ” eşitliği ile ifade edilir.



Şekil 3.1. Gerilmenin tanımı [25]

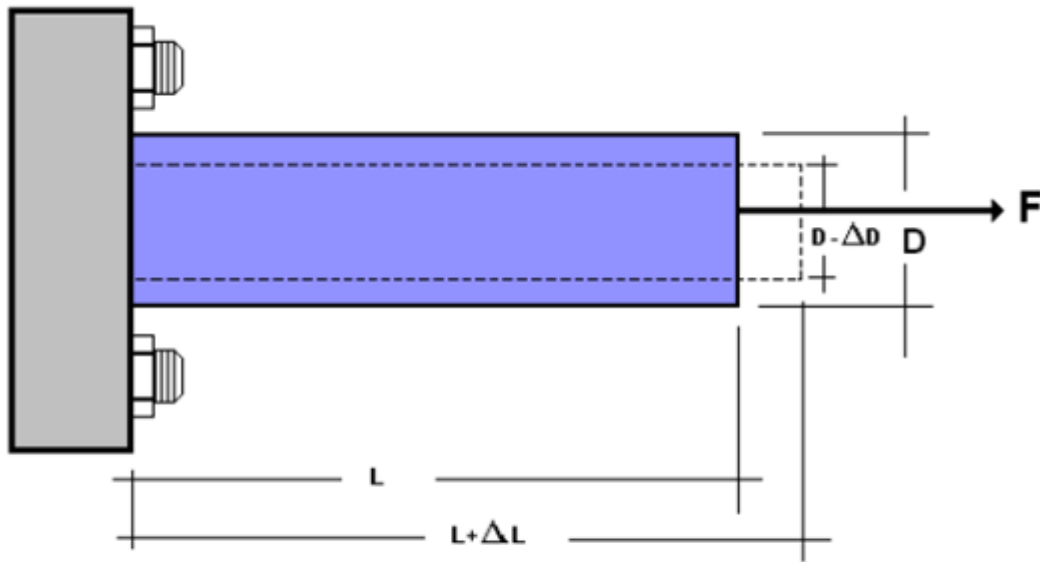
Malzemenin gerilme etkisiyle deformasyona, uzamaya (gerinim) uğradığı ve gerinim ile gerilme arasında bir bağıntı olduğu ilk olarak Hook tarafından bulunmuştur. Elastikiyet sınırı içinde, boyut değişikliği kuvvetle orantılıdır. Gerinim, gerilmeye maruz bir malzemede, elastik bölge sınırlarında şekilde oluşan uzunluk değişiminin, ilk boya oranı olarak bilinmektedir. Burada gerinim  $\varepsilon$  sembolüyle gösterilip mm/mm şeklinde olduğundan birimsizdir. İlk boyu  $L_0$  olan bir çelik çubuk  $F$  kuvveti ile çekildiğinde gerinim,

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

ile gösterilir. Boyutta olabilecek çok küçük değişmelerin belirlenmesi durumunda gerilme; kesitin bilinmesiyle de sistemi etkileyen kuvvetler, büyük bir doğruluk ve hassasiyetle ölçülür. Bu tarz kuvvet ölçümü, otomatik kontrol gerektiren, son derece geniş bir alanda kullanılmaktadır. Çekilerek uzatılan bir çubukta kesit daralması oluşur. Bu uzama ve daralma birbirine bağlıdır. Çubuğun çapı  $D$  boyu  $L$  iken çekilme sonucu çapı  $\Delta D$ , boyu  $\Delta L$  kadar değişir. Elastik bölge içinde kaldığı sürece;

$$\nu_p = \frac{\Delta D / D}{\Delta L / L} \quad (3.2)$$

olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Burada  $\nu_p$ 'ye “poisson oranı” denir [11].



Çapsal Gerilme	: $\Delta D / D$
Boylamsal Gerilme ( $\epsilon_1$ )	: $\Delta L / L$
Poission Oranı ( $\nu_p$ )	: $[ (\Delta D / D) / (\Delta L / L) ] = ( \epsilon_t / \epsilon_1 )$

Şekil 3.2. Çapsal gerilme, boylamsal gerilme ve poisson oranı [25]

### 3.2.2. Uzama ölçer

Mühendisliğin temel olaylarından biride gerinimdir. “Gerinim” ve “doğrusal şekil değiştirme” terimleri eş anlamlı olup, dış kuvvetlerden kaynaklanan doğrusal boyut değişimi için kullanılır. Bir lastik parçası yüklendiğinde, oluşan şekil değişimi (gerinim) gözle görülmesine karşın rijit cisimlerde örneğin, bir tren köprü üzerinden geçerken oluşan gerinim gözle görülemez. Bu şekilde oluşan gerinimi belirlemek için kullanılan elamanlara “uzama ölçer” adı verilir [24].

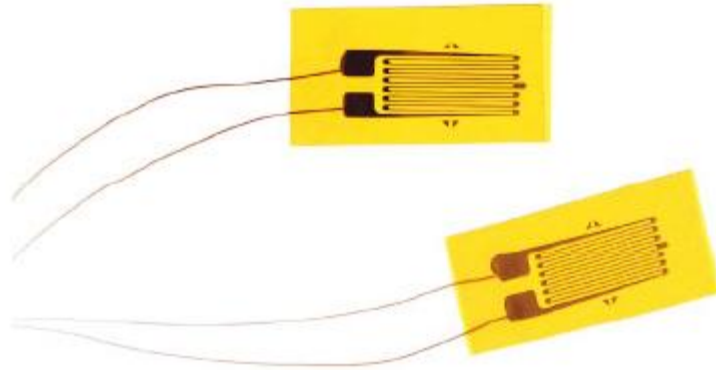
Bir uzama ölçer elastik deformasyona (eğme, bükme, çekme-basma, burulma gibi) maruz kalan malzemelerde gerinmeyi ölçmek üzere tasarlanmıştır. Uzama ölçer, uzaması (gerinmesi) ölçülecek malzemeye özel yapıştırıcılarla yapıştırılır. Malzemede oluşacak boyut değişimleri (sıcaklık veya kuvvet etkisiyle) aynen uzama

ölçere de yansır. Daha doğrusu uzama ölçer deformasyona uğrayan malzemedeki değişimlere uyum sağlar [26].

Gerinim, matematiksel olarak boyutsuzdur, fakat fiziksel olarak, birim uzunluk başına toplam uzunlukta oluşan değişim olarak tarif edilebilir.

### 3.2.3. Dirençli tip uzama ölçer

Dirençli tip uzama ölçerler, elektrik devresinde direnç elemanı olarak görev yaparlar. Uzama ölçerlerin çalışma prensibi, uzayan tellerin direncinin değişmesi ve bu direnç değişikliğinin telin uzamasıyla orantılı olmasıdır. Malzemede meydana gelen birim uzama, eğer bir direnç teline aktarılırsa, direnç değişiminden yararlanarak gerinim ölçümü yapılabilir. Şekil 3.3’ de bir uzama ölçer görülmektedir [25].

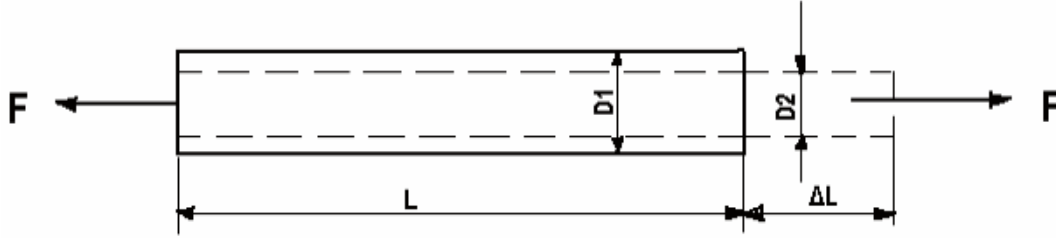


Şekil 3.3. Yük hücresinin seramik film üzerindeki görünümü [25]

Uzama ölçerlerin yan etkilerini en aza indirmek ve test parçasına kolay monte edebilmek için çok küçük boyutta, ihmal edilebilir bir ağırlığa sahip olarak imal edilirler. Uzamadan kaynaklanan direnç değişimi, “Wheatstone Köprüsü” adı verilen elektrik devresi belirlenir. Buna “ölçme köprüsü” adı da verilir. Uygun bir dengeleme devresi oluşturularak sıcaklık değişiminden kaynaklanacak olan hatalar yok edilebilir. Uzama ölçerler bu özelliklerinden dolayı ucuz ve hassas olarak kuvvet ölçümüne imkan sağlarlar [25].

### 3.2.4. Direnç ile gerinim arasındaki bağıntı

Dirençli tip uzama ölçerler test parçasına, bir taşıyıcı vasıtasıyla yapıştırılmış olan ve ızgara şeklinde özel bir form verilmiş iletken telden oluşur. Basma, çekme, kesme, burulma ve eğme gibi gerilmelere maruz test parçasında deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon veya gerinimin kayıpsız olarak uzama ölçerler tarafından hissedilmesi gerekir. Yük uygulandığında gerinimden dolayı uzama ölçerlerin telinde uzama oluşur, bu da telin direncinin değişmesine sebep olur. Direncin, tel boyu ile olan ilişkisi (Şekil 3.4),



Şekil 3.4. F kuvvetinin etkisi altındaki çubuğun şekil değişimi [21]

$$R = \frac{L}{A} \rightarrow R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir [4]. Burada, Direnç R, Özdirenç  $\rho$ , Uzunluk L, A Kesit alanıdır. Dirençteki değişim  $\Delta R$ , boyuttaki değişim  $\Delta L$  olmak üzere,

$$GK = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeye “Gage Faktörü” adı verilir ve uzama ölçerlerin karakteristiğini gösterir. Bir malzemenin direnci ile gerinim arasındaki bağıntı, gage faktörü (GK) ile verildiğinden, kullanılacak olan gage faktörünün bilinmesi, ölçümün yapılması ve sonucun değerlendirilmesi açısından çok önemlidir. Uzama ölçerlerin kullanışlılığı ve performansına etki eden ana faktörlerden biri de iletken tel malzemesinin cinsidir. İdeal bir iletken malzeme en yüksek gage faktörüne sahip olup, çok küçük uzamalara bile cevap vermesini sağlar. Gage faktörü, yükün



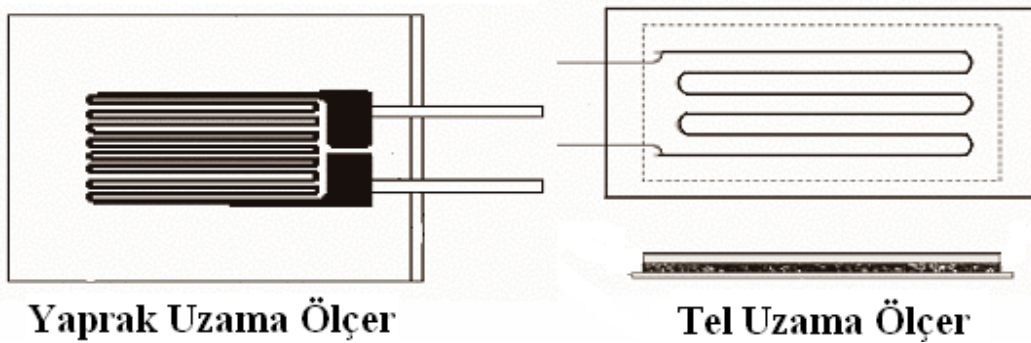
değişimiyle ve zamanla değişmez. Aynı şekilde yükün tekrarlanması direncin değişimine sebep olmaz, yani direnç sabit kalır.

Çekme etkisindeki bir malzemede, boy artacağından direnç de artar, dolayısıyla pozitif değer alır. İletken malzeme sıcaklığın sebep olacağı uzamaya karşı hassas olmamalıdır. Sıcaklıktan kaynaklanacak hataları yok etmek için sıcaklık dengelemesi yapılır [24].

### 3.2.5. Uzama ölçer malzemeleri ve yapıştırıcıları

Dirençli tip uzama ölçerler genel olarak iki sınıfa ayrılır. Biri tel, diğeri ise yaprak tipi uzama ölçerlerdir (Şekil 3.5). Tel tipi uzama ölçerler, bakır-nikel veya krom-nikel alaşımlarından yapılmış olup tel çapı 0,025 mm dir. Izgara şeklinde montaj ile daha büyük bir uzunluk elde edilip, büyük direnç değişimi sağlanır. Aynı zamanda, boyut çok küçük olduğundan, küçük bir alan işgal eder. Boyuna ölçümlerde hassasiyeti iyi olmasına rağmen, enine ölçümlerde iyi değildir. Enine hassasiyet için ayrı bir düzeltme yapılır. Tel tipi uzama ölçerlerde tel malzemesi kağıt taşıyıcı arasına yapıştırılır [24].

Yaprak tipi uzama ölçerlerde ise, yine aynı malzeme kullanılıp, iletken kağıt veya daha çok plastik bir taşıyıcı üzerine kimyasal yöntemle kaplanarak talaşlı veya kimyasal metotlarla ızgara şekli verilir. Metal tel, taşıyıcı üzerinde 0,0025 mm kalınlığındadır.



Şekil 3.5. Yaprak ve tel tip uzama ölçerler [27]

Uzama ölçerler, 80 °C' nin altındaki sıcaklıklarda, özel yapıştırıcılarla güvenli olarak yapıştırılabilirler. Özellikle, 400 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda özel seramik yapıştırıcı malzemeler kullanılır. Taşıyıcı malzemesi olarak kağıt, plastik, mika, seramik gibi malzemelerden faydalanılır.

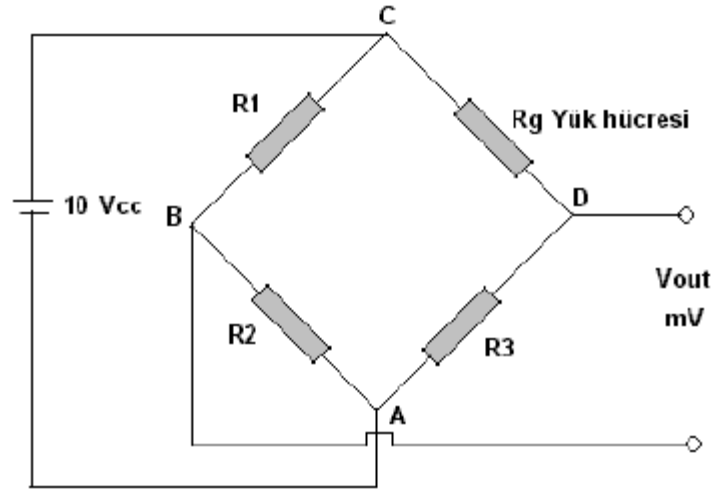
Uzama ölçerler test parçasına yapıştırılmadan önce yüzey, yağ, pas, kir, boya gibi maddelerden temizlenip, taşlanarak veya zımparalanarak düzeltilmelidir. Daha sonra iyi bir temizleyici ile (karbon tetraklor vb.) yüzey silinip kurulanır. Sonra, yüzeye uygun bir yapıştırıcı, uzama ölçerin altına da asetat sürülüp yüzeyler birbiri üstüne hafif bir basınçla yapıştırılır. 8-12 saatlik bir kuruma sonunda uzama ölçer, ölçüm yapmaya hazır duruma gelir [24].

### 3.2.6. Wheatstone köprüsü

Dirençli tip uzama ölçerler, uzama ile değişen elektrik direncini, bir elektrik devresinde ölçerek değerlendirme prensibine göre çalışır. Wheatstone köprüsü endüstride pek çok parametrenin ölçümünde bir referans seviyesi esas alınarak, karşılaştırmalı sinyal üretiminde kullanılan bir devredir. Uygulanan yüke göre, dirençte meydana gelen değişim  $\Delta R$ , uzama ölçerin normal direnci  $R$  ve gage faktörü  $GK$  verilerine dayanarak gerilim bulunabilir. Gerinim,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{GK} \quad (3.5)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. Bu denklemde, bilinmeyen ve uygulanan yüke göre değişen tek değer  $\Delta R'$  dir.  $\Delta R'$  nin ölçülmesiyle oluşan gerilim kolayca bulunabilir.  $\Delta R'$  yi ölçmek için bir cihaza gerek vardır. Klasik ohm metreler  $\Delta R'$  yi yeterli hassasiyette ölçme yeteneğine sahip değildir. Bu yüzden  $\Delta R'$  yi kolay ve hassas olarak ölçecek özel elektrik devresi geliştirilmiş ve bu devreye Wheatstone köprüsü adı verilmiştir. Bu köprü devresinin şematik gösterilişi şekil 3.6' de verilmiştir [24].



Şekil 3.6. Wheatstone köprüsü [25]

Devrede olan olayların anlaşılabilmesi için devrenin çözümlenmesi gerekir.  $V_{cc}$  köprü giriş,  $V_{out}$  köprü çıkış voltajı olmak üzere, Kirchof kanunlarından yararlanarak devre çözümlenebilir. Ohm kanuna göre “ $U=I.R$ ” formülü gereğince her bir koldaki voltaj düşümleri bulunabilir. Başlangıçta  $V_{out}$  gerilimi ve  $I$  akımı sıfır olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu durumda A ve C noktalarındaki gerilimlerin eşit olduğu söylenebilir. Bu duruma köprünün denge hali denir. Eğer köprü dengede ise,

$$\frac{V_{out}}{V_{cc}} = 0 \rightarrow R1 = R2 = R3 = Rg \quad (3.6)$$

Olur. buna göre şu eşitlik yazılır,

$$\frac{R1}{R2} = \frac{Rg}{R3} \quad (3.7)$$

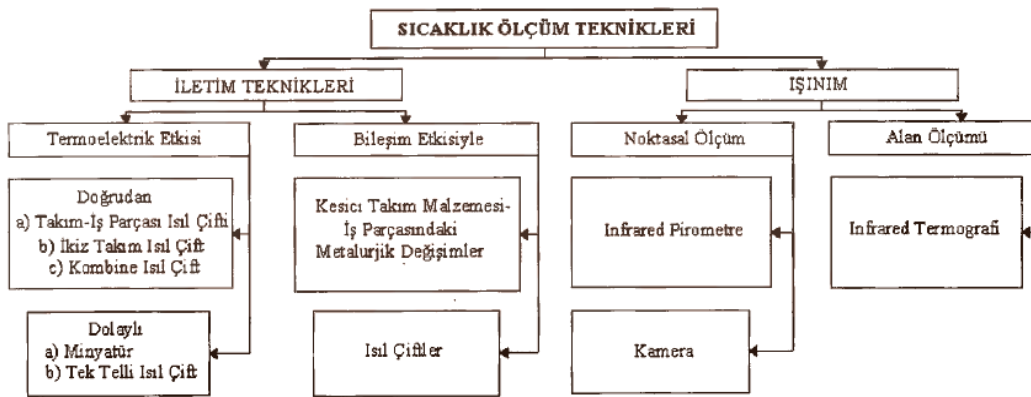
Böylece bilinmeyen bir direnç, bilinen dirençler yardımıyla kolayca bulunabilir.  $V_{out}/V_{cc}$  oranı için genel denklem olarak,

$$\frac{V_{out}}{V_{cc}} = \frac{R1}{R1 + R2} - \frac{Rg}{R3 + Rg} \quad (3.8)$$

formülü geçerlidir.

### 3.3. Tornalama İşlemlerinde Sıcaklık Ölçülmesi

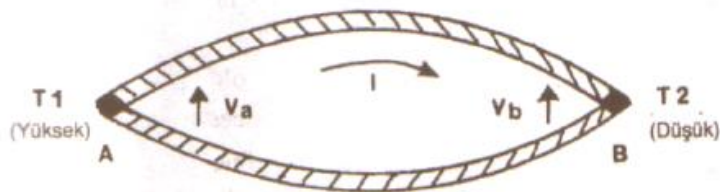
Talaş kaldırma işlemleri esnasında, takım-talaş ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklıkların ölçümü oldukça zordur. Kesme işlemi esnasında oluşan sıcaklıkların ölçümünün zorluğu nedeniyle araştırmacılar tarafından farklı yöntemler geliştirilmiştir. Takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklıklar genel olarak iletim ve infrared yöntemiyle ölçülmektedir. Ancak bu geliştirilen yöntemlerle, takım-talaş ara yüzey sıcaklıktan istenilen tamlıklar arasında ölçülememektedir. Ölçülecek noktanın belirlenmesi, alanın küçük olması ve kesici uç bölgesinde çok aşırı derecede sıcaklık gradyenlerinin oluşması gibi faktörler sıcaklık ölçümünü zorlaştırmaktadır. Araştırmacılar tarafından kesme bölgesindeki sıcaklıktan ölçmek için geliştirilen yöntemler, Şekil 3.7' de tablo halinde verilmiştir [17].



Şekil 3.7. Kesme bölgesindeki sıcaklıkları ölçmek için geliştirilen yöntemler [18]

#### 3.3.1. Termokopullar

Şekil 3.8'de iki farklı metal şekilde görüldüğü üzere iki uçlardan birleştirilmiştir.

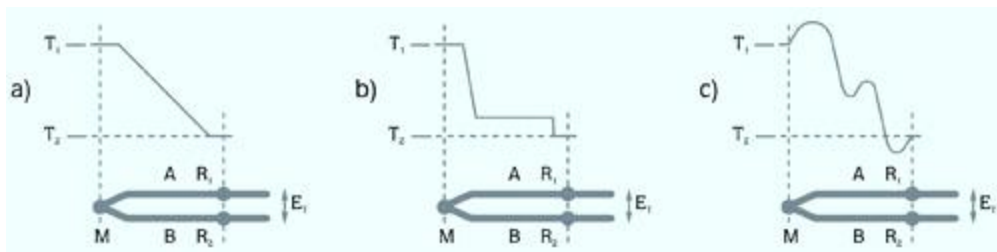


Şekil 3.8. Basit termokopul [28]

Bu durumda iken, eğer uçlardan birisi  $T_1$  sıcaklığına çıkarılır ve diğer uç da daha düşük bir  $T_2$  sıcaklığında bırakılırsa, devre çevresinde bir akım oluşur. Bu akım metallerin cinsi ile  $T_1$  ve  $T_2$  sıcaklıklarına bağlıdır. Victoria devri bilim adamlarından seebeck tarafından keşfedilen bu olay, termoelektrik (veya seebeck) etkisi olarakta bilinmekte ve sıcaklığın hassas bir biçimde ölçülmesinde kullanılabilir. Bu etkinin kullanıldığı tertibata termokopul adı verilir.

Bu etki iki metalin birleşim noktasında bir elektriksel gerilim meydana gelmesinden ötürü oluşur. Bu elektriksel gerilim, birleşim noktasının sıcaklığına bağlı olup, metallerin farklı elektriksel ve termik özelliklerinden ileri gelir. Biraz basite indirgenmiş olarak, daha yüksek bir sıcaklık derecesi olan  $T_1$  de elektronlar daha az sıcak olan uçta bulunan her iki metaldeki elektronlara kıyasla daha yüksek termik (ısı) enerji içermekte ve bu elektronlar  $T_2$  sıcaklık derecesine sahip uca doğru hareket etmektedirler. Gerilimi bu iki metal arasındaki elektron hareketi arasındaki farklılık doğurur. Ancak, bu gerilim çok düşük olup, tipik olarak bir kaç onluk mili volt değerindedir [28].

Termokopullar iki farklı metal alaşımının uçlarının kaynaklanması ile elde edilen sıcaklık ölçülmektedir. Kaynatılan nokta sıcak nokta, açık kalan iki uç soğuk nokta olarak adlandırılır. Termokopul sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından oluşur. Sıcaklık farkına orantılı olarak soğuk nokta uçlarında mV değerinde gerilim üretilir. Sıcak nokta ile soğuk nokta sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkına orantılıdır.

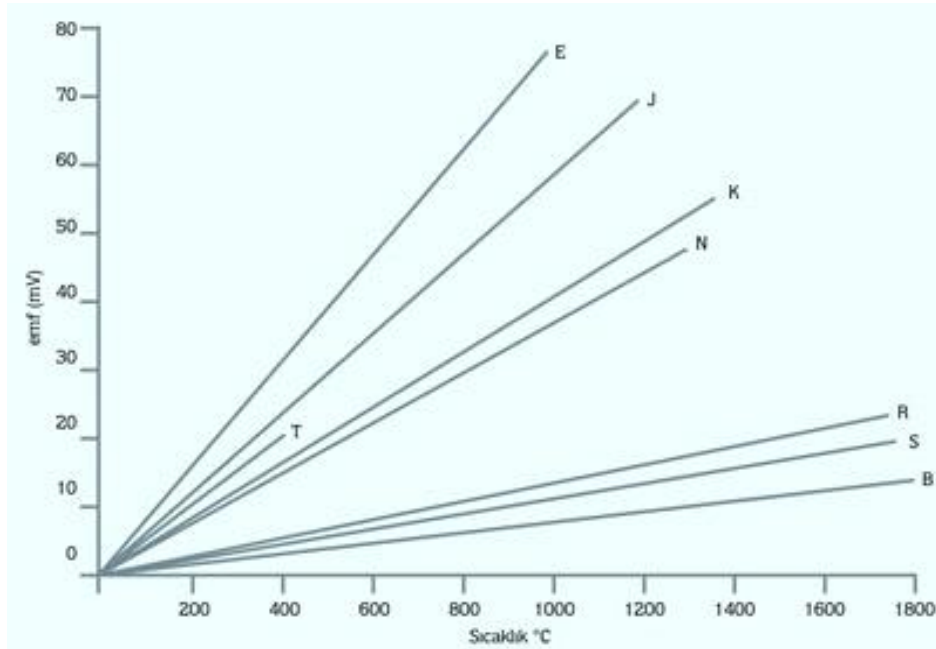


Şekil 3.9. Sıcak nokta ile soğuk nokta sıcaklık dağılımı [29]

Sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkı termokopul üzerinde gerilim (EMF) yaratır. (Şekil 3.10) Sıcak nokta sıcaklığı aynı kalmak koşulu ile soğuk nokta

sıcaklığı değiştiğinde farklı sıcaklıklar okunur. Bu nedenle mV tablolarındaki değerlerde standart sağlamak için ölçülen sıcaklık karşılığı mV değerleri soğuk noktanın 0 °C'de tutulması ile elde edilmiştir.

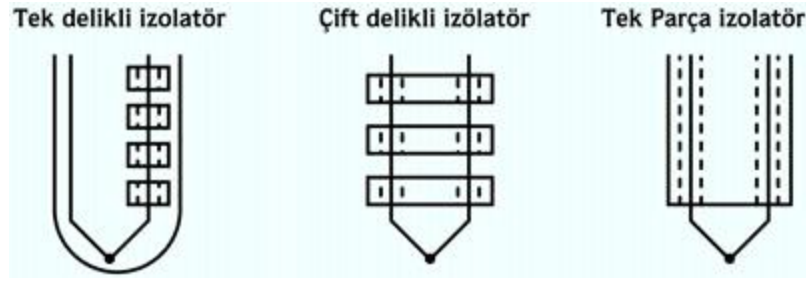
Termokopullar (Isıl çift) iki farklı metal veya alaşım tel olmasına rağmen endüstride genelde çıplak olarak kullanılmazlar. Prosesin şartları (mekanik darbeler, fiziksel ve kimyasal özellikler) göz önüne alınarak özel koruyucu kılıflar içinde kullanılır. Eleman telleri iki farklı kutuplarda olduğundan birbirlerinden seramik izolatörler ile izole edilirler [29].



Şekil 3.10. Termokopul üzerinde mV (EMF) [29]

### 3.3.1.1. Termokopulların eleman tellerinin izole edilmesi

Termokopul eleman telleri ucu kaynatıldıktan sonra herhangi bir dış koruyucu içine yerleştirilsin veya yerleştirilmesin (+) ve (-) bacaklar birbirinden izole edilir. İzolasyon için genelde yaygın olarak seramik izolatörler kullanılır. Ayrıca özel proseslerde (1500 °C'nin üzerinde) saf alümina izolatörlerde kullanılır.



Şekil 3.11. Termokopul izolasyon şeması [29]

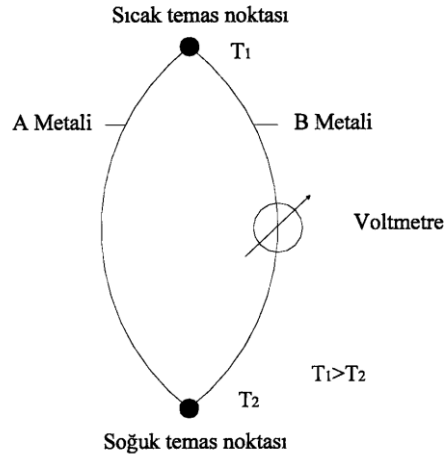
Termokopul eleman tellerinin sürekli ve maksimum çalışabileceği sıcaklık limitleri eleman teli çapına göre değişir. Eleman tel çapı kalınlaştıkça maksimum çıkacağı sıcaklık limiti artar. Kalın Çaplı tel ince tele göre daha uzun ömürlü olur. Ancak seçilecek tel çapı sürekli ve maksimum sıcaklığa bağlı olarak algılama hassasiyeti ve dış koruyucu boru çapları göz önüne alınarak seçilmelidir [29].

### 3.3.2. Isıl çift yöntemi

Bu yöntemin temelinde, iki farklı metalin ara yüzeyinde, ara yüzey sıcaklığı değiştiği zaman elektro motor kuvveti (emk) oluşması bulunmaktadır. Isıl çift, elektrik iletkenliği olan iki farklı malzemenin birleştirilerek elektrik iletir hale getirilmesinden ibarettir. Bir ısı çift, farklı sıcaklıklarda kullanılmak üzere hazırlandığında, termo elektrik potansiyel, farklı her bir ısı çift elemanındaki farklı elektron yayılım oranları sayesinde kullanılabilir. Isıl çift yönteminin şematik gösterimi, Şekil 3.12' de verilmiştir.

Isıl çift yönteminde uygulanan termoelektrik devre kanunları, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Termoelektrik devrede oluşacak emk, sadece sıcak ve soğuk temas noktaları arasındaki sıcaklık farkına bağımlı olup, sistemin tasarımından bağımsızdır.
- Sistemdeki emk, temastaki her bir kısmın direncinden ve boyutundan bağımsızdır.
- Eğer iki metalin bağlantısı, üniform sıcaklıkta ise emk oluşumu, ilk ikisi arasında bağlantı sağlamak için kullanılan ve aynı sıcaklıkta olan üçüncü metal emk oluşumunu etkilemez [17].

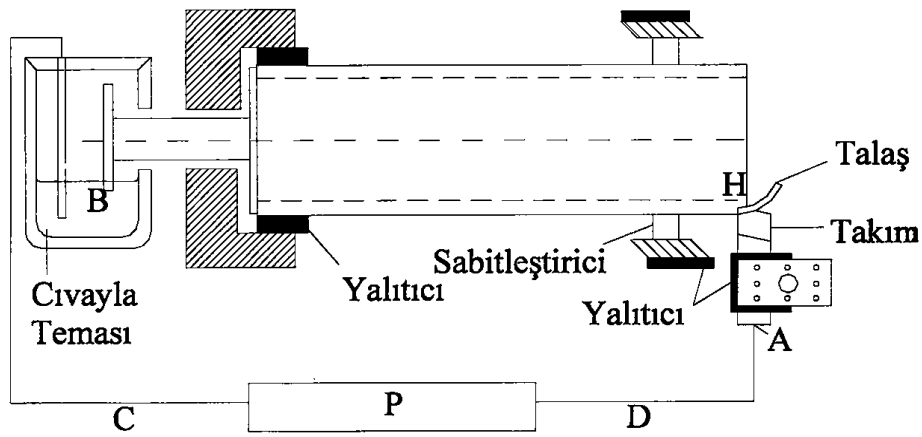


Şekil 3.12. Isıl çift yöntemi [17]

### 3.3.2.1. Takım iş parçası ısıl çift yöntemi

Sıcaklık ölçümünde ısıl çift yöntemi devre kanunlarına bağlı kalınarak, takım-talaş ara yüzey sıcaklığının ölçülmesi için, termoelektrik tekniğinin torna tezgahıyla adapte edilmiş hali Şekil 3.13' de gösterilmiştir. A ve B noktaları oda sıcaklığında soğuk temas durumunda iken, takım ve talaş H noktasında sıcak temas durumundadır. Bu birleşme noktaları arasında bir elektriksel devre oluşturularak "emk" elde edilir. Civa teması, kontak bileziklerinin kullanımıyla sık sık, aynı anda oluşan istenmeyen voltaj tanıtılmaksızın, dönen parçayla elektriksel temas yapmak için kullanılır. C ve D her iki ucu aynı sıcaklıkta olan bakır telleri, P ise ölçüm cihazı potansiyometreyi ifade etmektedir. Tüm bu noktalar deney esnasında oda sıcaklığının üstüne çıkabilmektedir. Bu yöntemde sağlıklı bir ölçüm yapılabilmesi için A ve B soğuk noktaların sıcaklıklarının oda sıcaklıklarında tutulmaları, takım ve iş parçasının tezgahtan elektriksel olarak yalıtılması gerekmektedir.

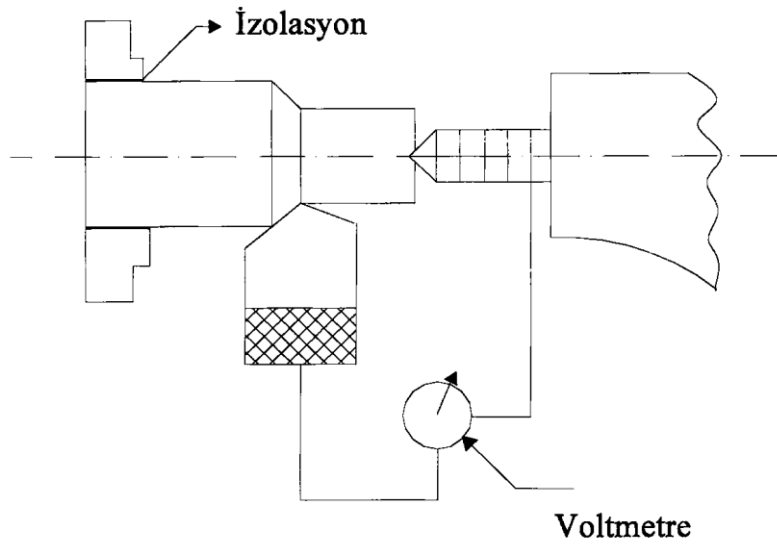




Şekil 3.13. Termoelektrik tekniği ile takım-talaş ara yüzey sıcaklığının ölçümü için geliştirilen ısı çift yöntemi [17]

Bu yöntemde, ısı çift olarak bağlanan takım-iş parçası, kesme işlemi anında sürtünme ve baskı kuvvetine bağlı olarak, takım-talaş ara yüzeyinde sıcak temas söz konusu olmaktadır. Takım-talaş ara yüzey sıcak temas bölgesinde oluşan sıcaklığın ölçümü için, Herbert-Gottwein tarafından geliştirilen takım-iş parçası ısı çift tekniği şematik olarak Şekil 3.14' da görülmektedir.

Takım iş parçası ısı çift uygulamaları oldukça basit olup, sınırlamalar söz konusu değildir. Ölçümde elde edilen değerler, talaşla takım arasında oluşan tüm temas alanındaki sıcaklıktır. Burada ayrıca yığıntı kenar (BUE) oluşumuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü yığıntı kenar söz konusu ise elde edilen sıcaklık değerleri gerçek değerden farklı olacaktır. Bu yöntemde karşımıza çıkabilecek bir diğer durum, kalibrasyonun, statik şartlar altında tatmin edici olmasına rağmen, talaş kaldırma durumunda da bu şartların geçerli olduğu kabulüdür [17].

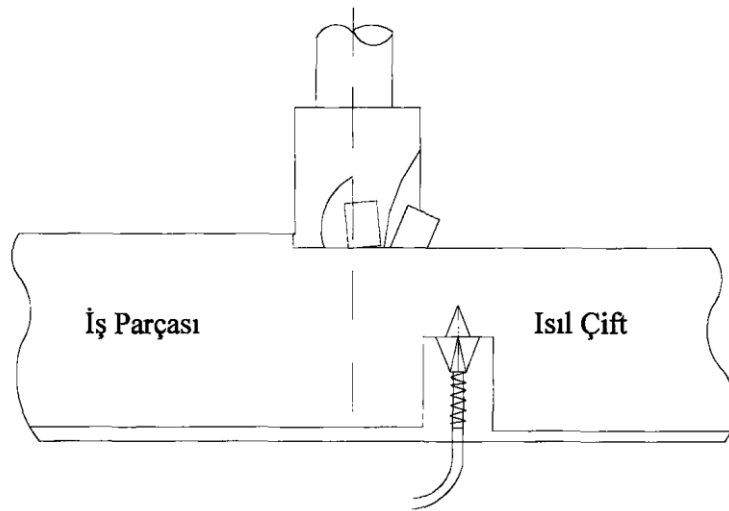


Şekil 3.14. Takım iş parçası ile oluşturulan ısı çifti [6]

### 3.3.2.2. Gömülmüş ısı çift yöntemi

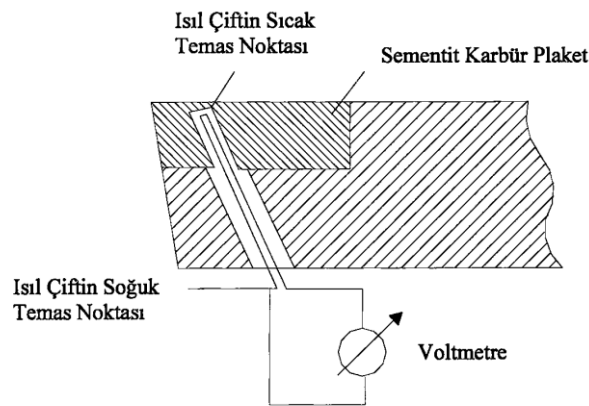
İş parçası veya kesici takım içerisine yerleştirilen gömme standart ısı çiftler, noktasal olarak sıcaklık ölçülmesinde veya farklı noktalara yerleştirilerek, kesici takımdaki sıcaklık dağılımlarını ölçmek için kullanılırlar. Gömülmüş ısı çiftlerin temas noktalarındaki değişimlerden dolayı, özellikle sürtünmeyle ortaya çıkan ısıdaki geçici değişimleri iyi bir şekilde gösterdiği görülmüştür. Isı çiftler iş parçasına, kesici takıma ve mekanik bir talaş kırıcı altına yerleştirilmek suretiyle ölçme işlemi yapılmaktadır [17].

İş parçasına gömülmüş ısı çift yöntemi ısı iş parçasına gömülerek sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. İş parçası üzerine hassas olarak delinen delik içerisine yerleştirilen ısı çifti ile takım-ış parçası ara yüzeyinde oluşan sıcaklığın ölçümü sağlanmaktadır. Yine iş parçası üzerine farklı aralıklarla delinen delikler içerisine yerleştirilen ısı çiftleri vasıtasıyla, sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir [17]. Şekil 3.15' de iş parçasına gömülmüş ısı çift yöntemi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.15. İş parçasına gömülmüş ısı çift yöntemi [6]

Takıma gömülmüş ısı çift yöntemi iş parçasına gömülmüş ısı çift yöntemine benzeyen bu yöntemde, ısı çift kesici takım içine gömülür. Şekil 3.16' da kesici takım içine gömülmüş bir ısı çift uygulaması görülmektedir.



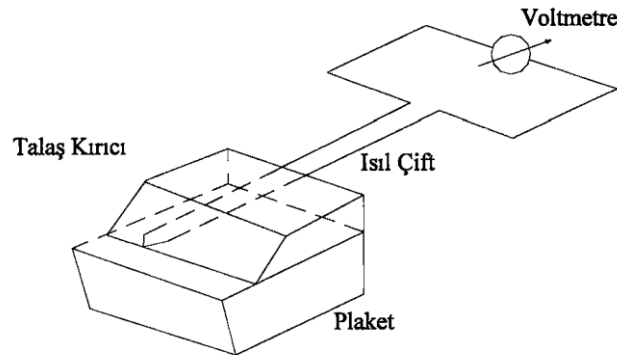
Şekil 3.16. Takıma gömülmüş ısı çift yöntemi [6]

İş parçası üzerinde talaş kaldırma anında oluşan talaşın, kesici takım üst yüzeyine sürtünmesi ve talaşın kesici takım üzerine uygulamakta olduğu baskı kuvveti sonucunda, takımın üst yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklığın yerinin tam olarak belirlenmesi zordur. Bunun için delinen deliğin merkez noktası varsayımla belirlenir ve farklı noktalara ısı çift yerleştirilerek maksimum sıcaklığın tam olarak nerede olduğu bulunur. Delikler kesici kenardan belirli aralıklarla delinerek, kesici takım-talaş ara yüzeyinde oluşan eş sıcaklık gradyanlarını elde etmek mümkündür. Aynı zamanda farklı derinliklerde delinen deliklerle de kesici takımın serbest yüzeyinde

oluşan sıcaklık dağılımı bulunabilir. Bu ısı çiftleri oluşturmak basit ve ucuz olmakla beraber, takım-talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde, doğruluğu yüksek olan bir yöntemdir. Bu yöntemin, ısı çiftlerin yerleştirildiği deliklerin delinmesinin zor ve hassas olması, ısı çiftlerin yerleştiği yerde ısı akışının engellenmesi, sıcaklık gradyenlerinin kesin olarak hesaplanmasının çok sıkıcı ve zaman alıcı olması gibi olumsuz yönleri de vardır [17].

### 3.3.2.3. Mekanik bir talaş kırıcı altına yerleştirilen ısı çift ile sıcaklık ölçme

Bu yöntem, gömülmüş ısı çift tekniğinin farklı bir uygulaması şeklinde, mekanik olarak talaş kırıcı görevi yapan bir plakanın altından sıcaklık değerleri okuma esasına dayanmaktadır. Burada talaş kırıcının altına, onurluk üzerinde belirli mesafeye yerleştirilmiş ısı çift kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalarda tellerin birleştirilmiş ucu, takımın kesici kenarından belli bir mesafeye yerleştirilmektedir. Burada talaşın hemen alt noktasındaki bir yerden (krater aşınması bölgesi yakınından) noktasal sıcaklık alınmaktadır [18]. Şekil 3.17' de talaş kırıcının altına yerleştirilmiş ısı çift yönteminin şematik görünüşü verilmiştir.

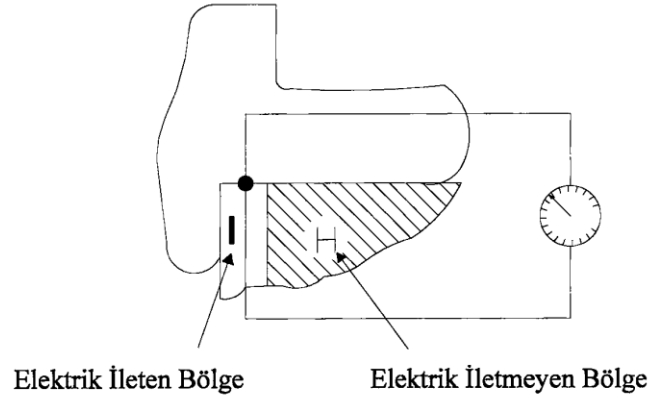


Şekil 3.17. Talaş kırıcının altına yerleştirilmiş ısı çift yöntemi [17]

### 3.3.2.4. Bileşik takım yöntemi

Bileşik takım yöntemi, esas itibariyle bir ısı çift yöntemidir. Bu yöntemle de sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Burada takım-talaş temas bölgesi alanı, elektrik ileten ve elektrik iletmeyen (genellikle seramikten yapılan) olarak, iki kısma bölünmektedir. Bu iki bölgenin genişlikleri birbirine göre değiştirilmekte ve sıcaklık dağılımı elde

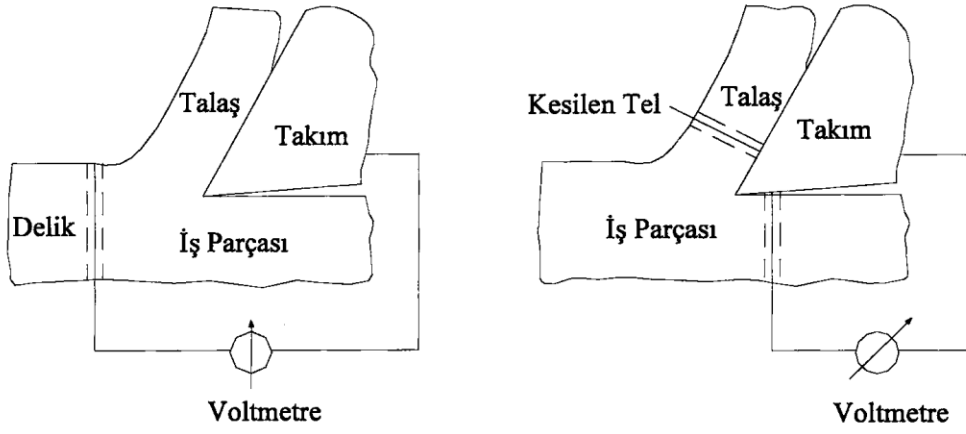
edilebilmektedir [17]. Bileşik bir takımın şematik gösterimi Şekil 3.18'da görülmektedir.



Şekil 3.18. Birleşik takım yöntemi [17]

### 3.3.2.5. Kesilen tek tel-takım ısı çift (hareketli ısı çift) yöntemi

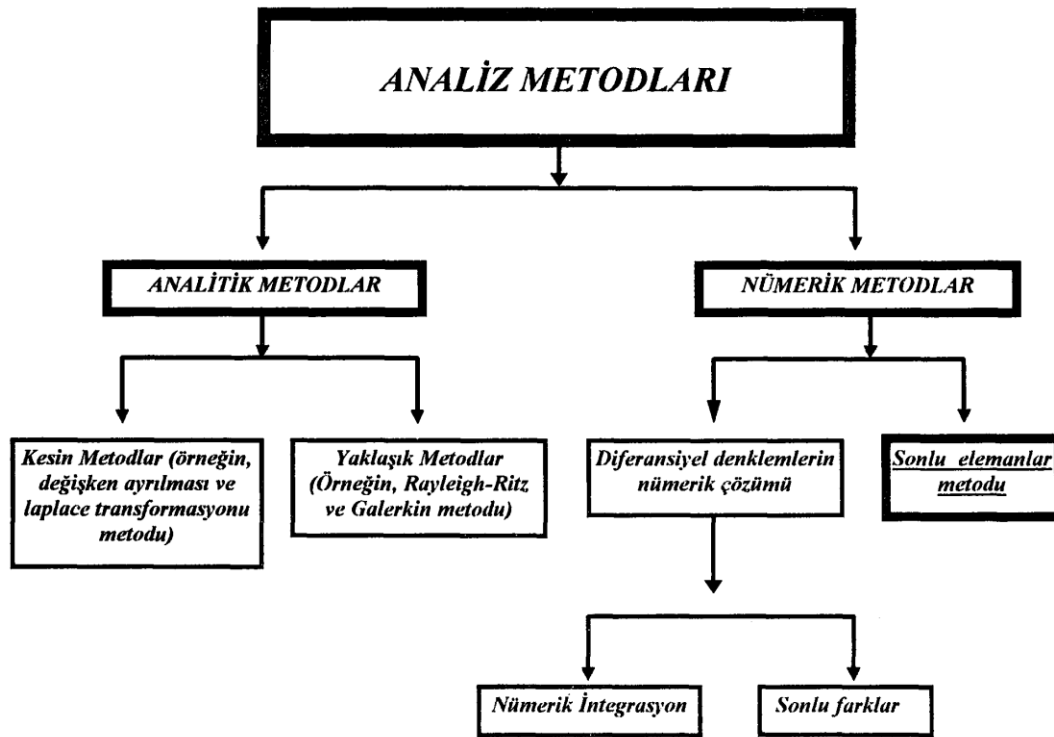
Kesilen tek tel-takım ısı çift yönteminin temeli, sıcaklığı tespit etmede kullanılacak olan ısı çift tellerinden birinin, işlenecek iş parçasının talaş kaldırılacak yüzeyinden bir delik açılarak yerleştirilmesidir. Sıcaklığın ölçülebilmesi için bu telin talaş kaldırma esnasında, takım tarafından kesilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, talaş kaldırma öncesi delik içerisine ısı çift telinin uygun boyda yerleştirilmesi gerekmektedir. İş parçası üzerinde talaş kaldırma işlemi başladıktan sonra ve yeni iş yüzeyleri elde edilmeye devam edildikçe ısı çift teli de kesilmektedir. Kesilen telin ucu, takımın serbest yüzeyi ile temas eder ve devre tamamlanarak bir emk oluşur. Bu emk'nın tespit edilmesiyle takımın serbest yüzeyindeki sıcaklık elde edilebilmektedir. Kesilen tek tel-takım ısı çift yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.19' de görülmektedir. Bu yöneme "Hareketli ısı çift yöntemi" de denilmektedir [17].



Şekil 3.19. Kesilen tek tel-takım ısı çift (hareketli ısı çift) yöntemi [17]

## BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR METODUNUN GENEL ANLATIMI

Analiz metotları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bunlar içerisinde sonlu elemanlar metodu mühendislik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.1. Analiz metotlarının gösterilişi [30]

Mühendislikte karşılaşılan fiziksel olaylar diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Bu diferansiyel denklemlerin klasik analitik yollarla çözümü çok zor ve de karmaşıktır. Bu nedenle diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümleri için sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin en belirgin özelliği, tüm bölgeyi ihtiva edecek bir çözüm bulmak yerine, bölgeyi küçük alt bölgelere ayırarak bu küçük bölgeler için çözümler geliştirmektir. Bu alt bölgelere sonlu elemanlar denir [19].

Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, tam çözüm imkansız kabul edilerek yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Sonlu elemanlar metodu, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır; İlk olarak geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır [19].

Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir:

- 1) Cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- 2) Bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- 3) Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.
- 4) Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- 5) Sınır şartları kolayca uygulanabilir [19].

Bu metotta cisim sonlu boyutta çok sayıda elemana ayrıldığı tasavvur edilir. Metottaki temel fikir, karmaşık bir problemin çözümünü, onu daha basit bir problemle değiştirerek bulmaktır. Gerçek problem basitiyle değiştirildiği için kesin çözüme çok yaklaşık bir çözüm bulmak mümkün olacaktır. Çözülmesi imkansız gibi görülen bir problemin yaklaşık çözümü sonlu elemanlar metodu kullanılarak



mümkün olacaktır. Sonlu eleman metodunda çözüm bölgesi, sonlu eleman denilen birbirine bağlı alt parçalardan oluşturulur. Daha sonra cismi temsil eden elemanların her birinin eleman direngenlik matrisini tanımlamaktır. Eleman direngenlik matrisleri parçalara ayrılmış cismin tümüne ait tümel direngenlik matrisini oluşturmak üzere toplanır. Bu ifade Eş. 4.1 deki gibi formülize edilebilir.

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (4.1)$$

Burada;  $[K]$  cismin tümel direngenlik matrisini tanımlar. Tümel kuvvet vektörü  $\{P\}$  bütün düğümlere uygulanan dış kuvvetleri,  $\{\delta\}$  ise bütün düğümlerin yer değiştirmelerini göstermektedir. Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek, sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir [19].

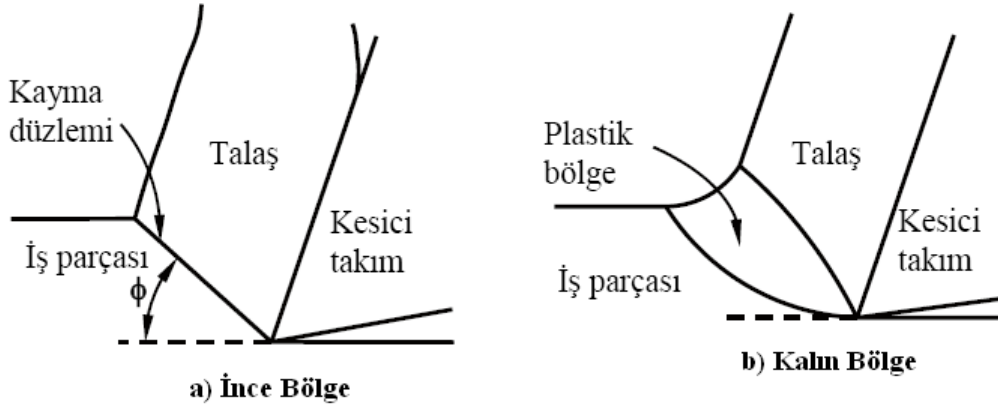
Verilen herhangi bir problemin sonlu eleman metodu ile çözümünü yapabilmek için aşağıdaki sıra takip edilmelidir.

- 1) Cismi bir sonlu elemanlar sistemi halinde "parçalama" (bölme)
- 2) Cismi temsil eden elemanların her birinin "eleman direngenlik matrisi" ve diğer özelliklerinin çıkarılması
- 3) "Tümel direngenlik matrisi"  $[K]$  ve "tümel kuvvet vektörü"  $\{P\}$  nin toplama işlemi
- 4)  $\{\delta\}$  yi tayin etmek için belirlenmiş sınır şartlarıyla "Eş.4.1"nin çözümü
- 5) Hesaplanan düğüm yer değiştirmeleri  $\{\delta\}$  dan elemanın zorlanmalarının ve gerilmelerinin hesaplanması [30].

#### 4.1. Analitik Yaklaşımlar

Talaş kaldırmadaki deformasyon bölgesinin yapısı hakkında farklı görüşler bulunmaktadır. Analizlerde 2 temel yaklaşım göze çarpmaktadır. Piispanen, Merchant, Koboyashi ve Thomsen gibi pek çok araştırmacı Şekil 4.2a'da gösterilen ince düzlemi (veya ince bölge) tercih ederken; Palmer ve Oxley, Okushima ve

Hitomi gibi araştırmacılar da Şekil 4.2b'de gösterilen kalın deformasyon bölgesine dayalı analizler yapmışlardır [16].



Şekil 4.2. Talaş kaldırma analizlerinde kullanılan iki temel model [16]

Uygulanabilir deneysel kanıtlar; kalın bölge modelinin çok düşük kesme hızlarında kesme işlemine tanımlayabildiğine işaret ederken, yüksek kesme hızlarında da ise ince bir kayma düzlemine işaret etmektedir. Bu yüzden ince bölge modeli, gerçek kesme Şartları için daha kullanışlı görünmektedir.

Buna ilave olarak, ince bölge modeli, kalın bölge modeline göre daha basit matematik işlemlere neden olur. Bu iki sebepten dolayı, kalın bölgenin analizine göre ince bölgenin analizi daha bütündür ve daha elverişlidir. İki model arasında bazı farklılık ve benzerlikler yer almaktadır.

#### 4.1.1 Analitik yaklaşımların değerlendirilmesi

İlk analitik kesme modellerinin (ortogonal kesme modeli) temel araştırma konusunu kayma açısının ( $\phi$ ) tahmin edilmesi oluşturmaktadır (izelge 4.1). Ernst ve Merchant, başlangıç kayma düzlemi açısıyla ( $\phi$ ) bir malzemenin dinamik davranışını tahmin eden eşitliğin türetilmesinde, minimum enerji yaklaşımını kullanmışlardır. Ernst ve Merchant modeli kesici takımın talaş açısına ve takımla talaş ara yüzeyi arasındaki sürtünmeye dayanmaktadır. Lee ve Schaffer, daha detaylı bir model geliştirmişlerdir. nemli modellerden biri de Merchant tarafından 1945 yılında geliştirilen modeldir. Bu model; kayma açısının, kayma düzleminde yapılan toplam

işi minimum yapacak bir değere sahip olması gerektiğini ifade etmektedir. Kesme kuvvetleri kayma bölgesinde yapılan işle orantılı olduğundan kesme kuvveti minimize edilmiş ve çok iyi bilinen bir kayma açısı türetilmiştir. Merchant tarafından yapılan çalışma Black ve Huang tarafından türetilmiş ve kayma açısını bulmak amacıyla minimum enerji prensibi kullanılmıştır [16].

Tablo 4.1. Ortogonal kesme ile ilgili yapılan analitik çalışmalar [16]

Yazarlar	Önerilen Geometri
Ernst ve Merchant (1941)	$\phi = 45^\circ - \frac{\gamma}{2} + \frac{\beta_s}{2} + \frac{\beta_s'}{2}$
Merchant (1945)	$\phi = 45^\circ - \frac{\gamma}{2} + \frac{\beta_s}{2}$
Stabler (1951)	$\phi = 45^\circ - \beta_s + \frac{\gamma}{2}$
Lee ve Schaffer (1951)	$\phi = 45^\circ - \beta_s + \gamma$
Hucks (1951)	$\phi = 45^\circ - \frac{\tan^{-1}(2\mu)}{2} + \gamma$
Hucks (1951)	$\phi = 45^\circ - \frac{\cot^{-1}(K) - \tan^{-1}(2\mu) + 2\gamma}{2}$
Shaw, Cook, Finnie (1953)	$\phi = 45^\circ - \beta_s + \gamma + \eta'$
Black ve Huang (1995)	$\psi = 45^\circ - \phi + \frac{\gamma}{2}$

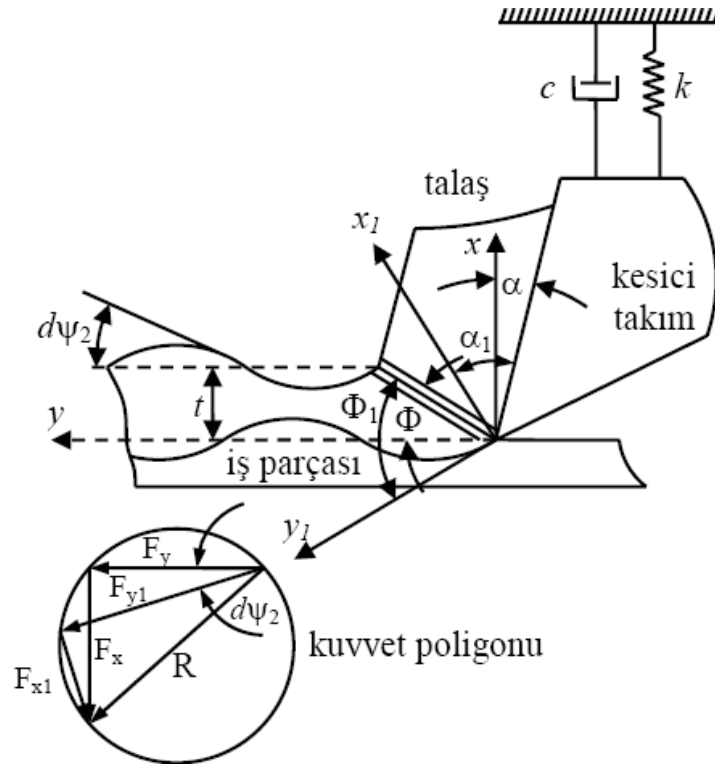
#### 4.2. Nümerik Yaklaşımlar

Son yirmi yılda talaş kaldırma işlemini analiz etmek amacıyla Eulerian ve geliştirilmiş Lagrangian formülasyonlarına dayalı sonlu eleman metotları geliştirilmiştir. Nümerik metotlar ve özellikle de sonlu elemanlar metodu, bilgisayar teknolojisindeki ve kompleks kodlardaki gelişmeler nedeniyle artan bir ilgiye sahip olmuştur. Ortogonal talaş kaldırmayı modellemek amacıyla kullanılan modellerin bir kısmında Eulerian formülasyonu kullanılmakla beraber başlangıçtan denge durumuna kadar talaşın modellenmesine imkan veren Lagrangian formülasyonu daha yaygın olarak kullanılmıştır. Talaş kaldırmayı FEM kullanarak incelemenin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir [16]:

- 1) Gerinme, gerinme hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olmak malzeme özelliklerinin ele alınabilmesi,
- 2) Talaş-takım etkileşiminin yapışma ve kayma olarak modellenebilmesi,
- 3) Doğrusal olmayan geometrik sınırların talaşın serbest yüzeyi gibi ifade edilebilmesi ve kullanılabilmesi,
- 4) Kesme ve ilerleme kuvvetleri ile talaş geometrisinin genel değişkenlerine ek olarak yerel gerilmeler, gerinmeler ve sıcaklıkların elde edilebilmesidir.

### **4.3. Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi**

Hayajneh ve arkadaşları, ortogonal kesmedeki dinamik kesme kuvvetlerini değerlendirmek için paralel sınırları olan bir kayma bölgesi modelini kullanmışlardır. Kesme sistemi; kesme kuvvetlerindeki sinüsoidal biçimli değişimler, bunların toplam farkları biçiminde gösterilmiş ve serbestlik derecesi bir olan dinamik bir sistem kullanarak modellemişlerdir. Kesme kuvvetlerindeki dinamik dalgalanmaları deneylerle ölçmüş ve model sonuçları ile gerçek ölçme değerleri arasında çok iyi uyum gösteren sonuçlar almışlardır. Hayajneh ve arkadaşları tarafından dinamik kesme kuvvetlerini değerlendirmek amacıyla kullanılan paralel sınırları olan kayma bölgesi modeli Şekil 4.3’da gösterilmiştir [16].



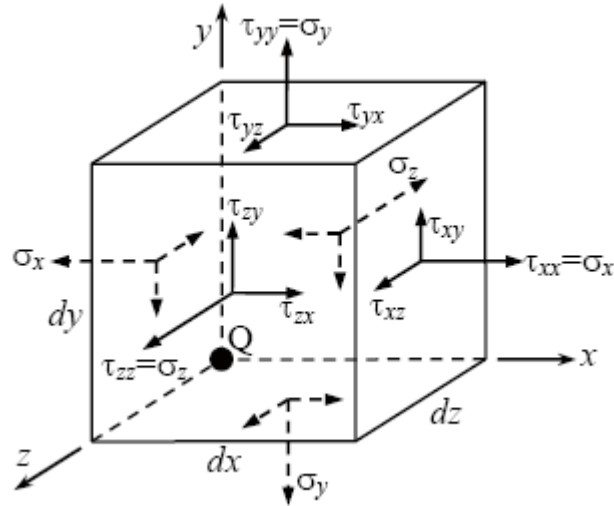
Şekil 4.3. Dinamik kesme kuvvetlerini değerlendirmek amacıyla kullanılan paralel sınırlı kayma bölgesi modeli [16]

#### 4.4. Üç Boyutlu Gerilme ve Sonlu Elemanlar Analizi

Gerilme bileşenleri (gerilme tensörü) üç boyutlu (3B) bir gerilme durumunu ifade etmek üzere Şekil 4.4’de gösterilen bir küp kullanılabilir. Şekil 4.4’de gösterilen tüm gerilmeler pozitif işaretli olup; küp üzerindeki Q ve Q’ noktalarında gerilmelerin bulunduğunu ve küpün her bir yüzeyi boyunca düzgün bir şekilde dağıldığı kabul edilirse, toplam 9 adet gerilme bileşeni tanımlanır. Gerilme bileşenleri matris formunda ifade edildiğinde (gerilme tensörü); her bir satır, Q(x,y,z)’den geçen bir düzlem üzerindeki gerilme elemanlarını göstermektedir. Buna göre gerilme tensörü,

$$[\tau_{ij}] = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

ile gösterilir.



Şekil 4.4. Üç boyutlu gerilme elemanı [16]

Eş. 4.2’de ilgili gerilme bileşenine ait birinci indis, gerilme bileşeninin yer aldığı düzlemi (veya yüzeye dik olan yüzeyin normalinin yönünü) gösterirken, ikinci indis de gerilmenin etki ettiği yönü göstermektedir (Şekil 4.4). Buna göre  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$  ve  $\tau_{zz}$  gerilme bileşenleri sırasıyla  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  ve  $\sigma_z$  şeklinde normal gerilmeler olarak gösterilebilir. Ayrıca gerilme tensöründe bulunan kayma bileşenleri için de  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$  ve  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$  yazılabilir.

Bir noktadaki 3 boyutlu gerilme; Şekil 4.5a’daki  $ABC$  düzleminin oryantasyonu, Şekil 4.5b’deki düzleme dik olan  $n$  birim vektörü ile  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönleri arasındaki açılarla belirtilebilir. Buna göre bu açıların kosinüs ilişkileri (direction cosines) için;

$$\cos \alpha = \cos (n, x) = l$$

$$\cos \beta = \cos (n, y) = m \quad (4.3a)$$

$$\cos \gamma = \cos (n, z) = n$$

olmak üzere  $x$   $y$   $z$  koordinat sistemi ile

$$l_1 = \cos(x', x), \quad m_1 = \cos(x', y), \quad n_1 = \cos(x', z),$$

$$l_2 = \cos(y', x), \quad m_2 = \cos(y', y), \quad n_2 = \cos(y', z), \quad (4.3b)$$

$$l_3 = \cos(z', x), \quad m_3 = \cos(z', y), \quad n_3 = \cos(z', z),$$

açıları yapan bir  $x'y'z'$  koordinat sistemindeki kosinüs yönlerini belirten elemanlar için

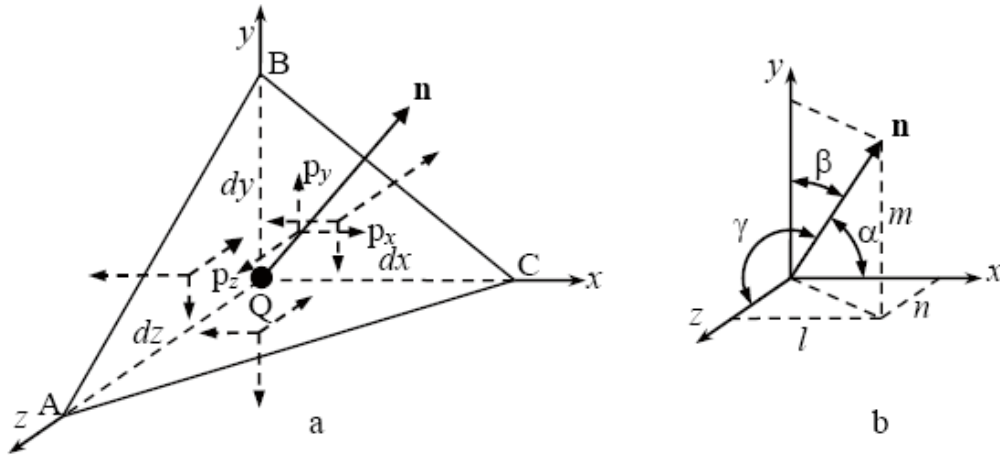
$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1 \quad i = 1,2,3 \quad (4.3c)$$

$$l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2 = 0$$

$$l_2 l_3 + m_2 m_3 + n_2 n_3 = 0 \quad (4.3d)$$

$$l_1 l_3 + m_1 m_3 + n_1 n_3 = 0$$

ilişkileri yazılabilir.



Şekil 4.5. Üç yüzeyli eleman üzerindeki gerilme bileşenleri [16]

Şekil 4.5a'da gösterilen küçük bir üç yüzeyli eleman ele alındığında, kütle kuvvetleri ihmal edildiği takdirde;  $x y z$  koordinat sistemi ile Eş. 4.3b'de gösterilen açıları yapan bir  $x'y'z'$  koordinat sistemindeki normal ve kayma gerilmesi bileşenleri,

$$\begin{aligned} \sigma_{x'} &= \sigma_x l_1^2 + \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2(\tau_{xy} l_1 m_1 + \tau_{yz} m_1 n_1 + \tau_{xz} l_1 n_1) \\ \sigma_{y'} &= \sigma_x l_2^2 + \sigma_y m_2^2 + \sigma_z n_2^2 + 2(\tau_{xy} l_2 m_2 + \tau_{yz} m_2 n_2 + \tau_{xz} l_2 n_2) \\ \sigma_{z'} &= \sigma_x l_3^2 + \sigma_y m_3^2 + \sigma_z n_3^2 + 2(\tau_{xy} l_3 m_3 + \tau_{yz} m_3 n_3 + \tau_{xz} l_3 n_3) \end{aligned} \quad (4.4a)$$

$$\begin{aligned} \tau_{x'y'} &= \sigma_x l_1 l_2 + \sigma_y m_1 m_2 + \sigma_z n_1 n_2 + \tau_{xy}(l_1 m_2 + m_1 l_2) + \tau_{yz}(m_1 n_2 + n_1 m_2) + \tau_{xz}(l_1 n_2 + n_1 l_2) \\ \tau_{y'z'} &= \sigma_x l_2 l_3 + \sigma_y m_2 m_3 + \sigma_z n_2 n_3 + \tau_{xy}(l_2 m_3 + m_2 l_3) + \tau_{yz}(m_2 n_3 + n_2 m_3) + \tau_{xz}(l_2 n_3 + n_2 l_3) \\ \tau_{x'z'} &= \sigma_x l_1 l_3 + \sigma_y m_1 m_3 + \sigma_z n_1 n_3 + \tau_{xy}(l_1 m_3 + m_1 l_3) + \tau_{yz}(m_1 n_3 + n_1 m_3) + \tau_{xz}(l_1 n_3 + n_1 l_3) \end{aligned} \quad (4.4b)$$

biçiminde elde edilebilir.

Üç boyutlu durum için asal gerilmeler; 3B durum için karşılıklı olarak birbirine dik durumdaki üç düzlemde sıfır kayma gerilmelerinin olduğu ve normal gerilmelerin ise maksimum veya minimum değerlere sahip olduğu düşünülürse; bu normal gerilmeler asal gerilmeler ( $\sigma_p$ ) olarak adlandırılır ve büyükten küçüğe sırasıyla  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  şeklinde gösterilir.

Üç asal gerilme ve üç asal düzlem için asal gerilmeler

$$\begin{aligned}(\sigma_x - \sigma_p)l + \tau_{xy}m + \tau_{xz}n &= 0 \\ \tau_{xy}l + (\sigma_y - \sigma_p)m + \tau_{yz}n &= 0 \\ \tau_{xz}l + \tau_{xy}m + (\sigma_z - \sigma_p)n &= 0\end{aligned}\tag{4.5}$$

ile bulunur. Bu ifade, karakteristik determinantın kosinüs ilişkileri yardımıyla düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_p & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_p \end{bmatrix} = 0\tag{4.6}$$

şeklindeki matris gösterim elde edilir. Eş. 4.6, genişletildiğinde asal gerilmeler için,

$$\sigma_p^3 - I_1\sigma_p^2 - I_2\sigma_p - I_3 = 0\tag{4.7}$$

ifadesi bulunur. Eşitlikte yer alan  $I_1$ ,  $I_2$  ve  $I_3$  katsayıları ise

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z\tag{4.8.a}$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2\tag{4.8.b}$$



$$I_3 = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} = 0 \quad (4.8.c)$$

ile bulunur [16].

Eş. 4.7'da gösterilen kübik gerilme eşitliğinin kökleri asal gerilmeleri vermekle beraber, asal gerilmeler  $\tau_{ij}$  gerilme tensörünün karakteristik değerleri veya öz değerleridir (eigenvalues). Gerilme tensörünün simetrik bir tensör olması sebebiyle bütün elemanları gerçektir ve gerçektir öz değerlere sahiptir.  $l$ ,  $m$  ve  $n$  bileşenleri de  $\tau_{ij}$  gerilme tensörünün öz vektörleridir (eigenvectors).

Maksimum distorsiyon enerjisi teorisi (von Mises kriteri); kırılma kriterlerinden maksimum distorsiyon enerjisi teorisine (von Mises teorisi olarak da bilinir) göre kırılma, malzemedeki akmanın bileşik gerilme halindeki birim hacme gelen distorsiyon enerjisinin, basit çekme deneyindeki akma noktasına ( $\sigma_{yp}$ ) eşit olması halinde gerçekleşmektedir ( $\sigma_{VM} \leq \sigma_{yp}$ ).

Buna göre von Mises teorisi, normal ve asal gerilmeler cinsinden sırasıyla,

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.10)$$

biçiminde ifade edilir.

#### 4.4.1. Gerilme – gerilme ilişkileri

Şekil 4.4'de gösterilen  $dx$ ,  $dy$  ve  $dz$  boyutlarındaki küpün hacmi  $dV$  ve  $x$ ,  $y$ ,  $z$  yönlerinde etki eden kuvvetler de sırasıyla  $fx$ ,  $fy$  ve  $fz$  olmak üzere; her bir gerilme, buna karşılık gelen alan ile çarpılır ve  $\Sigma F_x = 0$ ,  $\Sigma F_y = 0$  ve  $\Sigma F_z = 0$  yazılacak olursa,  $dV = dx dy dz$  için denge denklemleri,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0
\end{aligned} \tag{4.11}$$

biçiminde yazılabilir.

$u$ ,  $v$ ,  $w$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerindeki yer değiştirme bileşeni olmak üzere; normal ve kayma gerinmeleri için

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \tag{4.12}$$

elde edilir.  $\gamma_{xy}$  kayma gerinmesi için  $x$  ve  $y$  yönleri veya  $y$  ve  $x$  yönleri arasındaki açılma değişim aynı olup;  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ ,  $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$ ,  $\gamma_{xz} = \gamma_{zx}$  yazılabilir.

Eş. 4.12, süreklilik mekaniğindeki gerinme–yer değiştirme ilişkilerini ifade etmektedir.  $i, j = x, y, z$  olmak üzere, Eş. 4.12'un tensör cinsinden ifadesi de

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{4.13}$$

biçimindedir. Buna göre  $u_x = u$ ,  $u_y = v$ ,  $u_z = w$ ,  $\epsilon_{xx} = \epsilon_x$ ,  $\epsilon_{xy} = 2I \gamma_{xy}$ ,  $\epsilon_{yz} = 2I \gamma_{yz}$ ,  $\epsilon_{xz} = 2I \gamma_{xz}$  ve  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$  olur. Bir noktadaki gerilme, dokuz terimli gerilme tensörü ile gösterildiğinden; Eş. 4.13'e göre dokuz bileşenli gerinme tensörü de,

$$[\epsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \epsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \epsilon_z \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Küçük gerinmeler için gerinme ve yer değiştirmeler arasındaki ilişki,

$$\{u\} = [u \ v \ w]^T \quad (4.15.a)$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T \quad (4.15.b)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}^T \quad (4.15.c)$$

olmak üzere

$$\{\varepsilon\} = [D] \{u\} \quad (4.16)$$

biçiminde de tanımlanabilir [16].

Lineer elastik malzemeler için gerilme–gerinme ilişkileri Hooke kanunundan gelmektedir. Buna göre izotropik malzemeler için Young modülü, E (veya elastisite modülü) ve Poisson oranı,  $\nu$  olmak üzere iki malzeme özelliği söz konusudur. Kayma modülü (G),  $G = E / [2(1+\nu)]$  ile gösterilirse, Hooke kanuna göre izotropik homojen malzemeler için x, y ve z yönlerindeki gerilme ile gerinme arasındaki ilişkiler,

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z) & \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x + \sigma_z) & \text{ve } \gamma_{yz} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{yz} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_x + \sigma_y) & \gamma_{xz} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xz} \end{aligned} \quad (4.17)$$

biçiminde tanımlanabilir. Buna göre 3B için gerilme–gerinme ilişkileri

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

şeklinde veya

$$\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]^T \quad (4.19a)$$

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4.19b)$$

$$\{\varepsilon\} = \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right]^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T \quad (4.19.c)$$

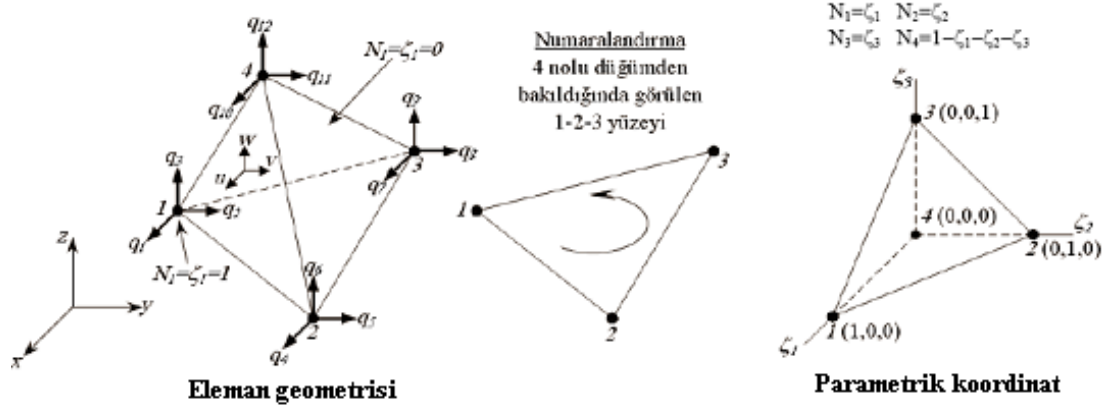
olmak üzere

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (4.20)$$

biçiminde tanımlanabilir [16].

#### 4.5. Dörtüzlü Sonlu Elemanların Formülasyonu

Çözümlemede kullanılan eleman şekillerinden en yaygın olanı dörtüzlü ve dikdörtgen prizmadır. Şekil 4.6'de görüldüğü gibi dörtüzlü bir elemanda dört tane uç olduğundan yer değiştirmesinin her bir bileşeninin değişimi dört sabitli bir polinom olarak yazılabilir.



Şekil 4.6. Lineer dört yüzlü [16]

$$u(x, y, z) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3z \quad (4.21)$$

$$v(x, y, z) = A_4 + A_5x + A_6y + A_7z \quad (4.22)$$

$$w(x, y, z) = A_8 + A_9x + A_{10}y + A_{11}z \quad (4.23)$$

Burada;

$A_0$ ,  $A_4$  ve  $A_8$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri boyunca rijit cisim ötelemelerini göstermektedir. Genelde olduğu gibi  $u$ ,  $v$  ve  $w$  matris formunda;

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\{A\} = \{A_0 A_1 \dots A_{10} A_{11}\}^T \quad (4.25)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Uç değişmeler  $u_{ai}, v_{ai}$  vb. “Eş. 4.21”, “Eş. 4.22” ve “Eş. 4.23” lerde yer değiştirilerek elde edilir. Böylece,

$$u_{ri} = u(x_r, y_r, z_r) \quad (4.27)$$

$$v_{ri} = v(x_r, y_r, z_r) \quad (4.28)$$

$$w_{ri} = w(x_r, y_r, z_r) \quad (4.29)$$

Burada,  $r = a, b, c, d$  ve  $x_r, y_r$  ve  $z_r$ ;  $r$  ucunun koordinatlarıdır. Genel olarak bu yer değiştirmeleri aşağıdaki matris formunda yazabiliriz.

$$\{\delta\} = [c]\{A\} \quad (4.30)$$

Burada,

$$\{\delta\} = \{u_{a1}v_{a1}w_{a1} \dots u_{d1}v_{d1}w_{d1}\}^T \quad (4.31)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} 1 & x_a & y_a & z_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_a & y_a & z_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_a & y_a & z_a \\ 1 & x_b & y_b & z_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_b & y_b & z_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_b & y_b & z_b \\ 1 & x_c & y_c & z_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_c & y_c & z_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_c & y_c & z_c \\ 1 & x_d & y_d & z_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_d & y_d & z_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_d & y_d & z_d \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Eleman zorlanmalarının bileşenleri;

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad e_{yy} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad ve \quad e_{zz} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4.33)$$

$$e_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad e_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad ve \quad e_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4.34)$$

Şeklinde yazıldığında yazılan bu altı elastik zorlanma bileşenlerini matris formunda yazılırsa

$$\{e\} = \begin{Bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{xy} \\ e_{yz} \\ e_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (4.35)$$

Şeklini alır. Şimdi “Eş. 4.21”, “Eş. 4.22”, “Eş. 4.23” ve “Eş. 4.35” eşitliklerinin sırasına göre türevi alınırsa,

$$[N] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

olduğu görülür. [C], [M] ve [N] birincil matrislerin açık formülü böylece tanımlanmış olduğundan eleman dirençlik matrisi;

$$[K_1] = [c^{-1}]^T [\bar{K}] [c^{-1}] \quad (4.36)$$

Eşitliğinden elde edilir.

Burada;

$$[K] = \int [N]^t [d][N] d_x d_y d_z \quad (4.37)$$

İfade edilir.

İntegral, elemanın tüm hacminde alınmıştır. [N] nin kullanılan koordinatlarda bağımsız olduğuna dikkat ederek elemanın bütün hacminde integral alınırsa,

$$\int d_x d_y d_z = V \text{ Dört yüz lünün hacmi}$$

$$[\bar{K}] = V[N]^t [d][N] \quad (4.38)$$

yazılabilir.

“Eş. 4.37” de kullanılacak [d] matrisi, üç boyutlu Hooke kanunu ifade eden eşitliğin kompakt sembolik formda yazılan

$$\{\sigma\} = \{\varepsilon\}[d] \quad (4.39)$$

eşitliğindeki matris olduğundan tüm cismin tümel direngenlik matrisi, alışıldığı şekilde tümel direngenlik matrisi toplanmış ve problem

{P}=[K]{δ} cinsinden çözülebilir. {P} ve toplamları aşağıdaki gibidir:

$$\{P\} = \{F_1 Q_1 H_1 \quad F_2 Q_2 H_2 \quad \dots \quad F_N Q_N H_N\}^T \quad (4.40)$$

$$\{\delta\} = \{u_1 v_1 w_1 \quad u_2 v_2 w_2 \quad \dots \quad u_N v_N w_N\}^T \quad (4.41)$$

Burada N; parçalara ayrılmış cisimdeki k düğümünde ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ), düğümlerin toplam sayısıdır.

$F_k, Q_k, H_k = k$  düğümünde sırasıyla; x, y ve z yönleri boyunca dış kuvvetler,  $u_k, v_k, w_k$  sırasıyla x, y ve z yönleri boyunca  $k$  düğümünün yer değiştirmeleridir.

Elemandaki gerilmeler; üç boyutlu izotropik ve homojen bir cisim gerilme zorlanma bağıntısı olan "Eş 4.42" eşitliğinde yerine konulacak olursa

$$\{\sigma\} = [d]\{\varepsilon\} - \{\sigma\}_t - [d]\{e_i\} \quad (4.42)$$



$$\{\varepsilon\} = [N][c^{-1}] \begin{Bmatrix} u_n \\ v_n \\ w_n \\ u_k \\ v_k \\ w_k \\ u_m \\ v_m \\ w_m \\ u_j \\ v_j \\ w_j \end{Bmatrix} \quad (4.43)$$

"Eş.4.43" elde edilir. Burada n, k, m ve j'nin sırasıyla a, b, c ve d uçlarına bağlandığı varsayılmıştır.

[N], konumun fonksiyonu olmadığından, zorlanmalar ve bunun sonucu olarak elemandaki gerilmeler bütün hacimde sabit kalır. Sonuç olarak; gerilme denge denklemleri özdeş olarak hesaplanır. Aynı zamanda komşu elemanlar arasındaki ara yüzelerde "Eş.4.21", "Eş.4.22" ve "Eş.4.23" eşitliklerinde varsayılan yer değiştirmelerin sürekli olduğunu düzlem problemlerin çözümlerindeki sırayı izleyerek gösterebiliriz. Bununla birlikte, her bir elemanın farklı zorlaması olduğundan dik yüzeyler boyunca eğimlerde bir süreksizlik vardır. Dörtüzlünün bu özellikleri gerçekte düzlem problemlerin çözümündeki üçgen elemanın özelliklerine özdeştir.

Eğer kütle kuvveti ivmeleri, tüm eleman hacminde sabit veya sabit olduğu varsayılırsa, tipik bir üçgen elemanın üç ucu bulunduğu, uç kuvvetlerin meydana getirdiği uç yer değiştirmelerin hesaplanmasındaki işlem sırasını izleyerek; toplam kütle kuvvetlerinin dörtte biri, elemana bağlı her bir düğüm tarafından taşınacaktır. Bu basit sonucun dikkate değer bir önemi vardır.

$$\int x d_x d_y d_z, \quad \int y d_x d_y d_z \quad \text{ve} \quad \int z d_x d_y d_z,$$

integralleri; elemanın merkezini koordinatların orijini olarak almak şartıyla, tüm eleman hacminde alındığında sıfır olduğuna dikkat ederek çıkarılabilir [30].

#### 4.6. Sonlu Elemanlar Analizi

FEM, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak, her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm metodudur. Bir anlamda, bilgisayar çözümüne uyarlanarak matris formunda ifade edilen denklemlerin kullanıldığı sayısal bir tekniktir. FEM'in temeli uçakların yapısal analizindeki gelişmelere dayanmaktadır [16].

Temel olarak FEM'de üç ana unsur bulunmaktadır:

Birincisi, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi, her elemandaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncüsü ise aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerlerin elde edilmesi problemin çözümünde yeterli olur [16].

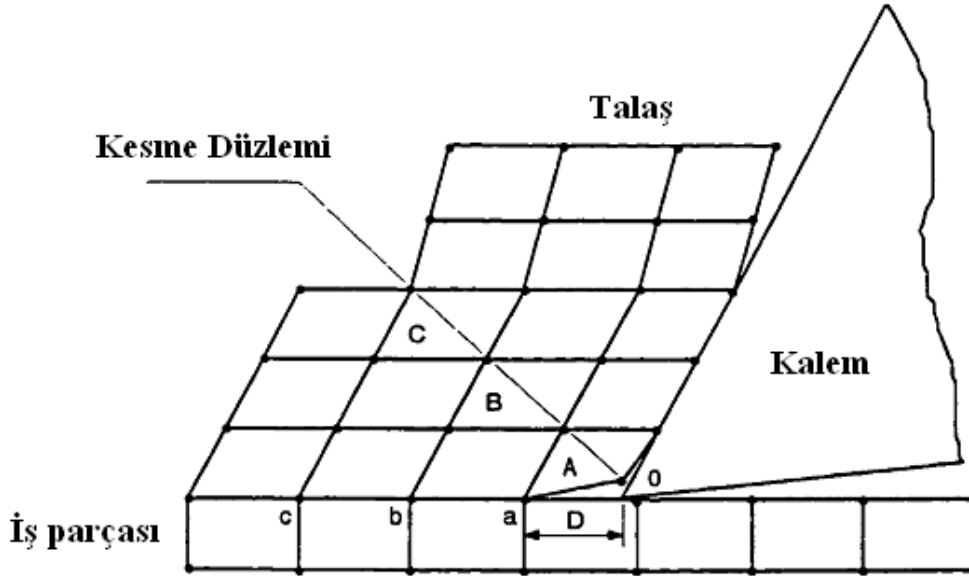
Genel olarak bir FEM uygulamasında temel olarak izlenen adımlar şu şekilde sıralanabilir [24]:

- 1) Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- 2) İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- 3) Eleman dirençlik matrislerinin oluşturulması,
- 4) Sistem dirençlik matrisinin hesaplanması,
- 5) Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- 6) Sınır şartlarının belirlenmesi,
- 7) Sistem denklemlerinin çözümü

#### 4.7. Sonlu Elemanlarda Kesme Simülasyonu

FEM kesme simülasyonu kriterleri geometriksel ve fiziksel olmak üzere iki ayrılmaktadır. Şekil 4.7 de gösterilen ikiz – düğüm modelinde, sonlu elemanlar düğümleri iş parçasında önceden belirlenmiş bir ayrılma çizgisi boyunca düğümler

tarafından yukarıya doğru bölünür. Geometriksel temel alınan kriterlerde kalem ucu (o), düğüm (a) ve o – a arasındaki mesafesine dayalı D başta belirlenir (Şekil 4.7). Fiziksel temel alınan kriterlerde, mesela gerinim, gerilme, gerilme enerjisini değişkenleri eleman (A) için seçilen değerlerdir [31].



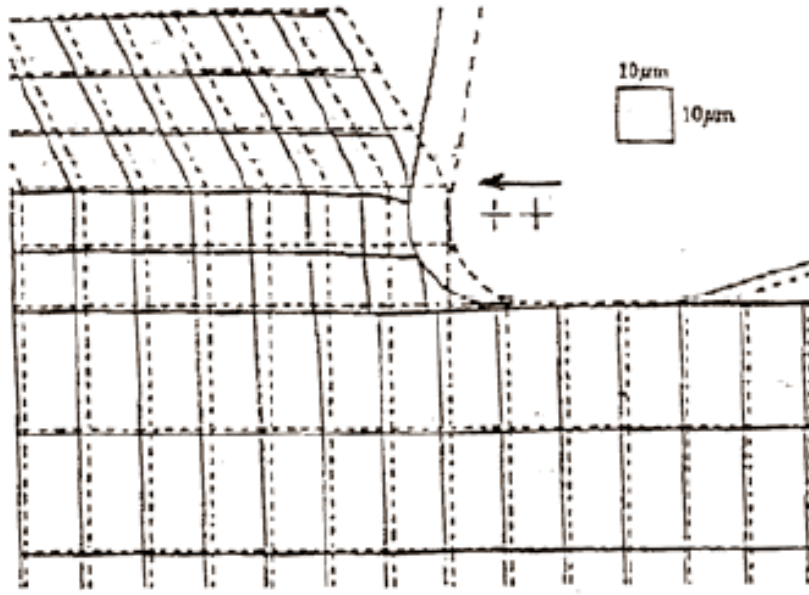
Şekil 4.7. Talaş kaldırma işlemi için ikiz düğüm modeli [31]

Geometriksel temel alınan kriterlerin esas dezavantajı talaş kaldırmada fiziksel şartlara dayalı olmamasıdır. Iwata (1984) Gerilim hesaba katarak kesme modeli önermiştir. Deneysel sonuçlar ile simülasyon değerleri arasındaki farklar kabul edilebilir aralıklardadır. Strenkowski ve Carroll (1985) etkili plastik gerilimi temel alan bir model önermiştir. Lin ve Lin (1992) Talaş kaldırma simülasyonunda enerjiyi göz önünde tutmuştur. Tablo 4.2. talaş kaldırma işleminde FEM simülasyonlarında kullanılmış olan bazı talaş kaldırma kriterleri listelenmiştir.

Tablo 4.2. Talaş ayrılması kriterleri [9]

Talaş Ayrılması Kriteri Tipi		Referanslar
Geometrisel	Mesafe	Usui & Shirakashi, 1982
	Mesafe	Shil, Chandrasekar, & Yang, 1990
	Mesafe	Komvopoulos & Erpenbeck, 1991
	Mesafe	Zhang and Bagchi, 1992
	Mesafe / DOC	Zhang and Bagchi, 1994
Fiziksel	Gerilim	Iwata, Osakada, & Terasaka, 1984
	Etkili plastik gerilme	Strenkowski & Carroll, 1985
	Etkili plastik gerilme	Mitchum, 1987
	Etkili plastik gerilme	Carroll and Strenkowski, 1988
	Enerji yoğunluğu	Lin and Lin, 1992

Arola ve Ramulu, sonlu eleman metodunu kullanarak fiber takviyeli polimer kompozitlerin ortogonal kesme işlemini analiz etmişlerdir. talaş oluşumunu simüle etmek için en büyük gerilme ve Tsa–Hill kriterini kullanarak çift kırılma işlemini kullanmışlardır. Talaş açısı, boşluk açıları, kesici takımın burun yarıçapı ve kesici takım aşınmasını ihtiva etmişlerdir. Kesici takım geometrisini ve takımla iş parçası arasındaki sürtünmeyi de ele almışlardır. Kırılma gerilmesi üzerindeki fiber yönelimi ve kesici takım geometrisinin etkilerini incelemişlerdir (Şekil 4.8). Talaş ayrılmasını, birincil ve ikincil kırılmalar için uygun dayanım bileşenleri ile gerilme kriteri yaklaşımını kullanarak simule etmişlerdir [16].



Şekil 4.8. Arola ve Ramulu'nun FEM çalışması [12]

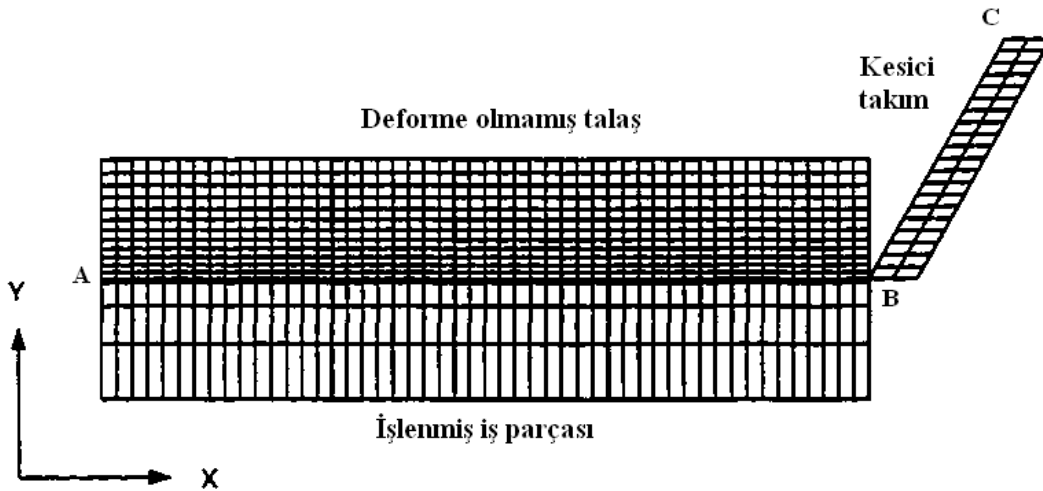
Wince tarafından yapılan çalışmada ise, oksijensiz yüksek iletken bakır ve Alüminyum 6061 T6 ve 2024 T351 alaşımlarına ait literatürden alınan talaş kaldırma verilerini kullanarak talaş kaldırma sırasında talaş oluşumunun modellenmesi amacıyla Lagrangian formülasyonuna dayalı DYNA 3D sonlu eleman kodu kullanılmıştır. Wince, çözülecek problemin sınır ve yükleme şartlarının tanımlanmasında aşağıdaki kabulleri yapmıştır:

- Kesme hızı sabittir.
- Kesme genişliği ilerlemeden daha büyüktür ve her ikisi de sabittir.
- Kesici takım mükemmel bir şekilde keskindir.
- Kesme hızı vektörü ( $VC$ ) kesme kenarına diktir.
- İş parçası malzemesi homojen çok kristalli, izotropik ve sıkıştırılmaz bir katıdır.
- İş parçası oda sıcaklığındadır.
- Kesme, kesme sıvısı olmadan yapılmaktadır.
- Hiçbir takım aşınması gerçekleşmez.
- Kesici takım rijittir (deformasyon yoktur).
- İşlem süresince kesmenin denge durumuna ulaşılır.

Wince'in çalışmasında ortogonal kesme modeli, farklı iki malzeme (kesici takım ve iş parçası) ile modellenmiştir. Kesici takım mükemmel şekilde keskin (hiçbir

aşınmanın olmadığı) ve rijit kabul edilmiş olup elastik bir katı (mükemmel) olarak modellenmiştir. Kesici takımın rijitliğini sağlamak için de elastikiyet modülü çok yüksek seçilmiştir (yaklaşık olarak takım çeliğinin 10 katı). Seçilen deney malzemelerinin malzeme davranışını modellemek için gerinme, gerinme hızı ve sıcaklığın sebep olduğu gerilme değişimlerini ihtiva etmesi amacıyla Johnson ve Cook eşitliğini kullanmıştır [16].

Johnson ve Cook Eşitliği'nin deneylerle belirlenen 5 parametresi vardır. akma gerilmesi sabiti, gerinme pekleşme sertleşmesi sabiti, gerinme pekleşme sertleşmesi üssü, gerinme hızı pekleşme sertleşme üssü ve sıcaklığa bağlı sabit. Ayrıca eşitlikte hesaplanan gerilme için gerinme hızını, referans gerinme hızını, deney parçasının sıcaklığı, referans sıcaklık ve numunenin ergime sıcaklığıdır. İş parçasının modellenmesi; deforme olmamış talaş ve işlenmiş yüzey şeklinde iki parça halinde modellenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Sonlu eleman modelinin şematik gösterimi [31]

Simule edilen kesme süreci boyunca kesici takım, iş parçasına dalmakta ve kaldırılacak talaşı kesmektedir. AB hattı boyunca talaş ayrılmasını ve BC takım – talaş ara yüzeyi boyunca kaymayı simule etmek amacıyla bir temas yüzeyi tanımlanmıştır. Etkileşim halindeki iki cismin başlangıçta ayrı veya temasta olduğuna karar vermek amacıyla büyük bağıl hareketlere imkan veren Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır [16].

Talaş kaldırma işleminde FEM simülasyonlarında en önemlisi talaş kaldırma kriterini seçmektir.

#### 4.8. Sonlu Elaman Modeli

Genel süreklilik probleminin sonlu elemanlar metoduyla çözümü her zaman düzenli, adım adım bir işlemlerle olur. Bu statik yapı problemleri için aşağıdaki gibi açıklanabilir.

##### 1.Adım: Yapının ayrıştırılması (Bölünmesi)

Sonlu eleman metodunda ilk adım yapı ya da çözüm bölgesini alt bölümlere ya da elemanlara ayırmaktır. Dolayısıyla analiz edilen yapı sonlu elemanlarla modellendirilmek zorundadır. Elemanın sayısı, tipi, boyutu ve dizilişine karar verilmelidir.

##### 2.Adım: Uygun interpolasyon ya da yer değiştirme modelinin seçilmesi

Belirli yük koşulları altındaki karmaşık yapıların yer değiştirme çözümü tam olarak belirlenemeyeceğinden, bilinmeyen çözüme yaklaşabilmek için uygun bir çözüm varsayılır. Varsayılan çözüm hesaplama açısından basit olmalı, ancak belli yaklaşım gerekliliklerini de karşılamalıdır. Genelde çözüm ya interpolasyon ya da polinom şeklinde alınır.

##### 3.Adım: Eleman katılık matrislerinin ve yük vektörlerinin çıkarılması

Varsayılan yer değiştirme modelinin "e" elemanının katılık matrisi  $[K^{(e)}]$  ve yük vektörü  $p^{(e)}$  eşitlik koşulları veya uygun bir değişim kuralı kullanılarak çıkarılmalıdır.

##### 4.Adım: Bütünde denge eşitliklerini elde etmek için eleman eşitliklerinin bir araya getirilmesi

Yapı birçok sonlu elemandan meydana geldiği için katılık matrisleri ve yük vektörleri uygun bir şekilde bir araya getirilmeli ve bütündeki denge eşitlikleri "Eş. 4.1"de olduğu gibi formüle edilmelidir,

5.Adım: Bilinmeyen düğümsel yer değiştirmeler için çözüm

Genel denge eşitlikleri problemin sınır koşullarını sağlayacak şekilde yenilenmelidir. Lineer problemler için 8 vektörü çözülebilir fakat Lineer olmayan problemler için çözüm, her basamağı katılık matrisi  $[K]$  ve yük vektörü  $P$ 'nin geliştirilmesini esas alan bir basamaklar dizisi ile elde edilmelidir.

6.Adım: Eleman ve gerilmelerin hesaplanması:

Bilinen düğümsel yer değiştirmeden  $S$ , eğer gerekirse gerekli katı veya yapı mekanikleri eşitlikleri kullanılarak elemanın gerilmeleri hesaplanabilir.

Yukarıdaki altı basamakta kullanılan terminoloji, konuyu başka alanlara yaymak istenirse genişletilebilir. Örneğin yapı yerine bölge, yer değiştirme yerine alan değiştirme, katılık matrisi yerine eleman bileşkesi terimlerini kullanmamız mümkündür [19].

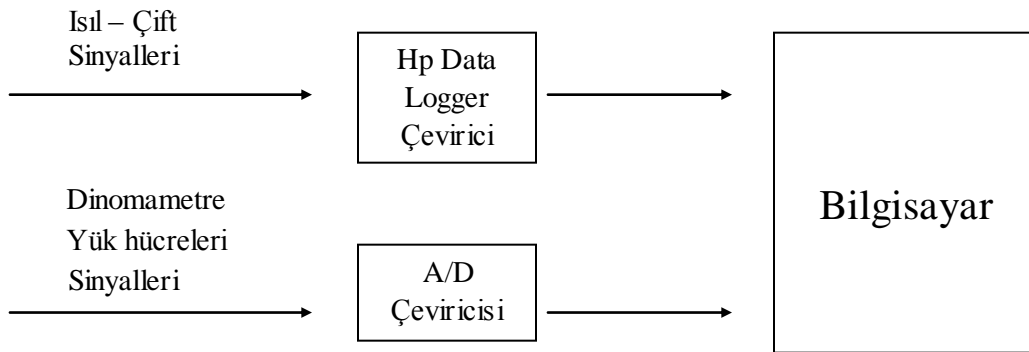


## BÖLÜM 5. MATERYAL VE METOD

### 5.1. Giriş

Bu çalışmada, tasarlanmış ve imalatı yapılmış farklı uç geometrilerine sahip HSS torna kalemlerinde soğutma sıvısız dik kesme yaparken, kesicinin uç micro geometrisinin talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetlerine ve takım – talaş ara yüzey sıcaklığına etkilerinin analiz edilmesi için bir dizi kesme deneyleri ve sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

Kesme esnasında takım – talaş ara yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi için takıma gömülmüş ısı çift yöntemi esasına göre bir deney düzeneği kurulmuş ve TM04 K110 – 25 – 1mt K tipi termokup kullanılmıştır. Talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetlerini ölçülmesinde yük hücresiyle ölçüm yapan bir dinamometre kullanılmıştır. Tasarlanan deney düzeneğinde bilgisayar ile bağlantı kurularak deney sonuçları bilgisayar ortamında alınmıştır. Verilerin elde edilmesi süreci şematik olarak Şekil 5.1’ de görülmektedir.

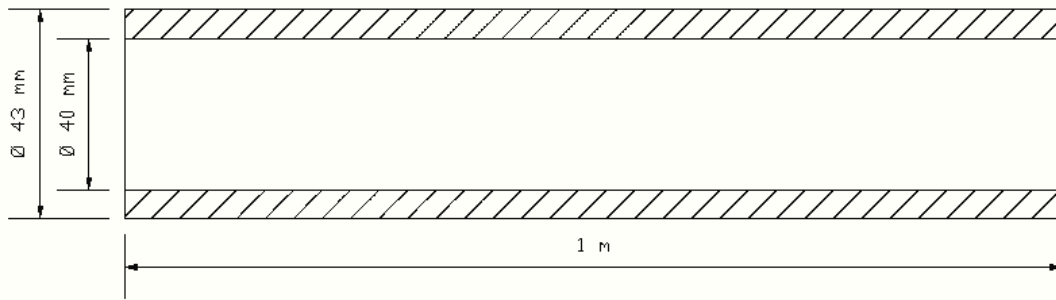


Şekil 5.1. Verilerin elde edilmesi süreci şematik gösterimi

Deneylerde HSS DIN 1.3207 kare kesitli kesici torna kalemi ve iş parçası olarak CuZn37 pirinç boru malzeme kullanılmıştır. Deneylerde universal tornada farklı kesme parametreler kullanılarak yapılmıştır.

## 5.2. İş Parçası Malzemesi

Deney numunesi olarak talaş kaldırma sırasında yıgıntı kenar oluşmaması ve takım aşınmasını en az seviyede tutabilmek için CuZn37 piriñ boru malzeme seçilmiştir. Deney numunesi 43 mm dış çapında 40 mm iç çapında et kalınlığı 1,5 mm olan dikışsiz boru malzemedir (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. İş parçası ölçüleri

Deneyleerde kullanılan CuZn37 piriñ malzemenin kimyasal birleşimi Tablo 5.1’de termofiziksel özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Piriñ malzemenin kimyasal bileşimi

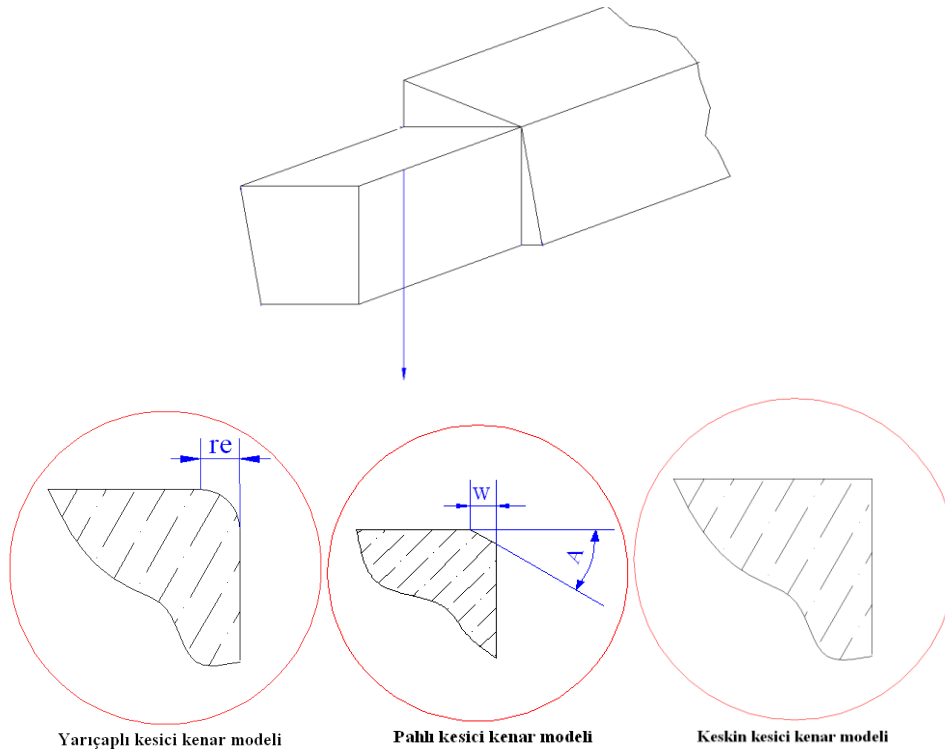
Malzeme Numarası (DIN)	%Cu	%Zn	%Al	%Fe	%Ni	%Pb	Diğer	Özgül Ağırlık kg/dm <sup>3</sup>
2.0321	62.0 64.0	Kalan	Max 0.03	Max 0.01	Max 0.03	Max 0.01	Max 0.01	8.4

Tablo 5.2. Pirinç malzemenin termofiziksel özellikleri

Malzeme Numarası (DIN)	Anma Dayanımı	Çekme Dayanımı Kg/mm <sup>2</sup>	%0.2 Uzamada Akma Sınırı Kg/mm <sup>2</sup>	Kopma Uza ması (mm)	Brinel Sertliği (HB)
2.0321	F37	44 – 54	min.20	27	110

### 5.3. HSS Torna Kalem Kesici Kenar Mikro Geometrilerinin Elde Edilmesi

Şekil 5.3’de görülen kesici kenar modelleri tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Kesici kenar modelleri keskin, yarıçaplı ve pahlı olarak 3 değişik modelden oluşturulmuştur (Şekil 5.3).



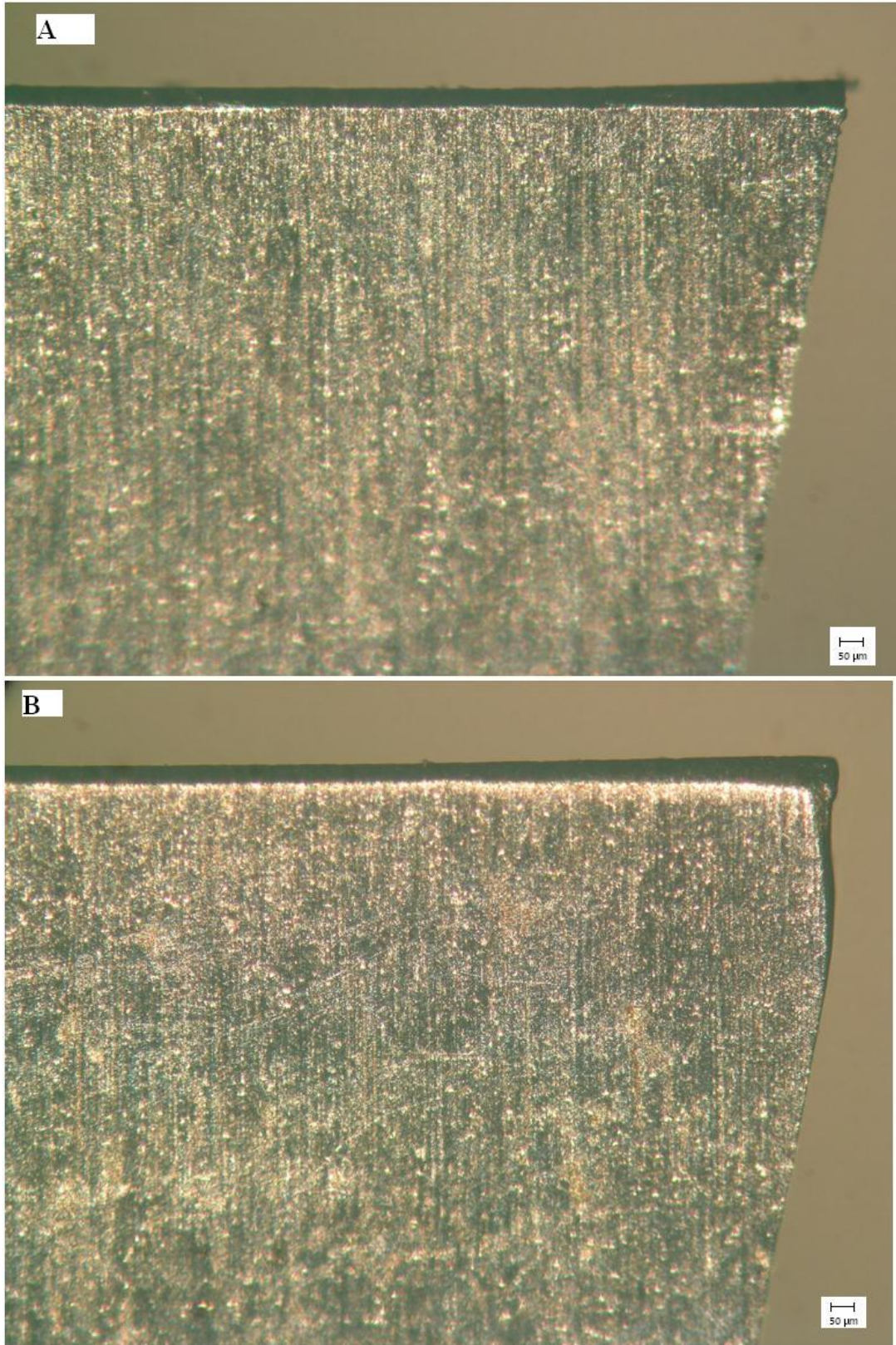
Şekil 5.3. HSS torna kalemi kesici kenar mikro geometri modelleri

Kesici kenar geometrilerinin tasarım aşamasında belirlenen ölçüleriyle imalatta elde edilen gerçek ölçüleri arasında farklılıklar gözlenmiştir (Tablo 5.3.). Sonlu elemanlar analizi yapılırken imalattan sonra elde edilen gerçek ölçüler dikkate alınmıştır.

Tablo 5.3. Kesici kenar geometrilerinin tasarlanmış ve gerçek ölçüleri

<b>Tasarlanan model ölçüsü</b>	<b>İmalat Edilmiş Gerçek Ölçüsü</b>
<b>YARIÇAPLI KALEM KENAR UÇLARI</b>	
40 $\mu\text{m}$	55 $\mu\text{m}$
100 $\mu\text{m}$	135 $\mu\text{m}$
150 $\mu\text{m}$	155 $\mu\text{m}$
<b>PAHLI KALEM KENAR UÇLARI</b>	
40 $\mu\text{m} \times 30^\circ$	30 $\mu\text{m} \times 30^\circ$
100 $\mu\text{m} \times 30^\circ$	50 $\mu\text{m} \times 30^\circ$
200 $\mu\text{m} \times 30^\circ$	150 $\mu\text{m} \times 30^\circ$

Bu geometrinin elde edilmesinde takım bileme tezgâhı kullanılmıştır. Hassas geometri elde edilmesi için bileme tezgâhındaki taş yerine 1200 zımpara kağıdından yapılan bileme diski kullanılmıştır. Şekilde 5.4'de gösterilen kalem kenar uçları siyah olan yerleri yarıçaplı ve pahlıdır.



Şekil 5.4. Kesici takım talaş yüzeyi ve kesici kenarın üst görünüşü

- A. Pahlı kesici kenar 50 µm
- B. Yarıçaplı kesici kenar 35 µm

Deneylerde kullanılan HSS torna kalemlerinin kimyasal birleşimi Tablo 5.4’de termo fiziksel özellikleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

Tablo 5.4. HSS torna kaleminin kimyasal bileşimi

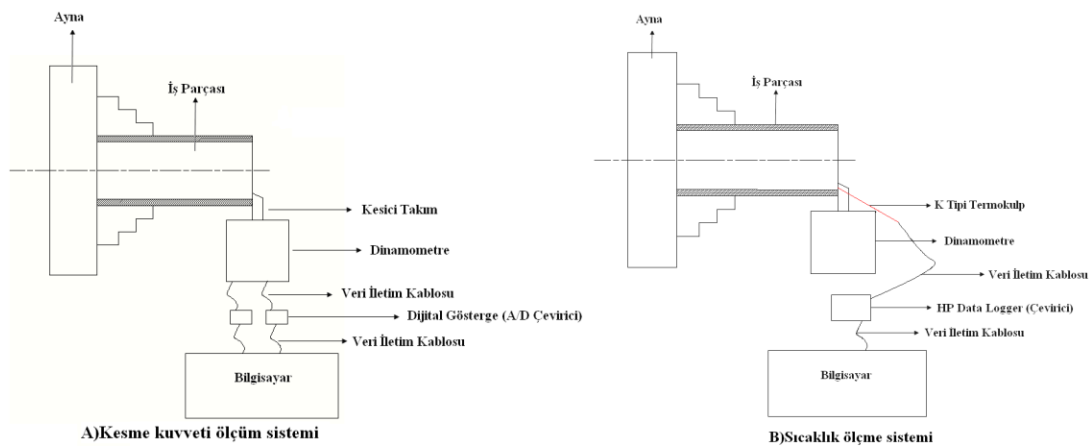
Malzeme Numarası (DIN)	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%W	%Co
1.3207	1.26	0.25	0.30	4	3.6	3.2	9.3	10

Tablo 5.5. HSS torna kaleminin termo fiziksel özellikleri

Malzeme Numarası (DIN)	Yoğunluk $\text{kg/dm}^3$	Isı İletkenliği $\text{W/(m.K)}$	Özgül Isı $\text{J/(kg.K)}$	Sıcaklık Genleşme katsayısı $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Elastikiyet modülü $\text{N/mm}^2$
1.3207	8.3	19	460	9.6	217000

#### 5.4.Sistem Donanımı

Bu çalışmada kullanılan kesme kuvvetleri ölçüm sistemi Şekil 5.5. A’da ve takım – talaş ara yüzey sıcaklığı ölçme donanımı ise Şekil 5.5.B’de şematik olarak görülmektedir. Şekil 5.6’da deney düzeneğinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.5. Sistem donanımı



Şekil 5.6. Deney düzeneği

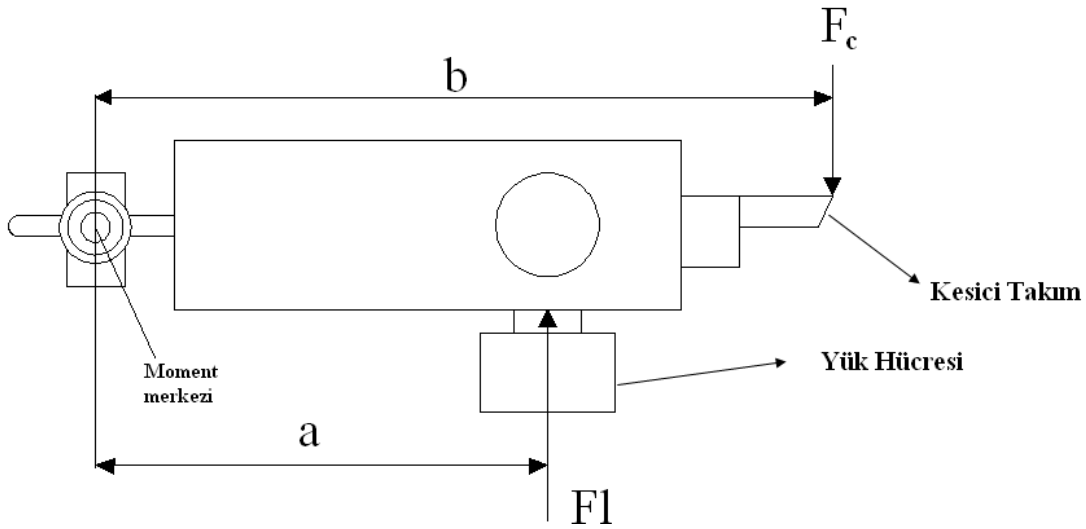
## 5.5. Sistem Kalibrasyonları

### 5.5.1. Kesme kuvveti ölçüm sistemi kalibrasyonu

Deneylere başlamadan önce yük hücreleri (dinamometre) kalibre edilmiştir. Yük hücrelerinin kalibrasyonu için bilinen ağırlıklar metodu kullanılmıştır. Dengeli bir şekilde yük hücrelerinin üzerlerine yerleştirilen bu ağırlıklar ile yük hücrelerinin okuduğu değerler mukayese edilerek göstergeler üzerinden kalibrasyonları yapılmıştır. Çeviricilerin ayarları, firmadan temin edilen katalog yardımıyla yapılmış ve okuma hassasiyeti ayarlanmıştır [21].

Yük hücrelerinin deney düzeneğine yerleştirilmesinden sonra civatalar ile sabitleme işlemi yapılmış, kesici takımın ağırlığı ölçülmüş ve göstergelerden sıfırlamalar yapılarak denemeler gerçekleştirilmiştir [21].

Kesme kuvveti etkime noktası ve yük hücresi mesnet noktasının moment eksenine kesici takım ile yük hücreleri aynı eksende olmamasından dolayı meydana gelen farklı uzaklıklarda olmasından kaynaklanan ölçüm farkı hesaplanarak aynı oranda telafi edilmiştir. Böylece gerçek kesme kuvvet farklılıkları moment hesabıyla giderilmiştir [21].



Şekil 5.7. Kesici takım ile yük hücrelerinin konumları [21]

Şekil 5.7’ de görüldüğü üzere yük hücrelerinin okuduğu kuvvete  $F_l$ , kesicinin ucuna gelen kuvvete  $F_c$ , hareketli mafsal ile kesici uç arasındaki mesafeye “a” yük hücresi ile hareketli mafsal arasındaki mesafeye  $b$  denilirse moment hesabından;

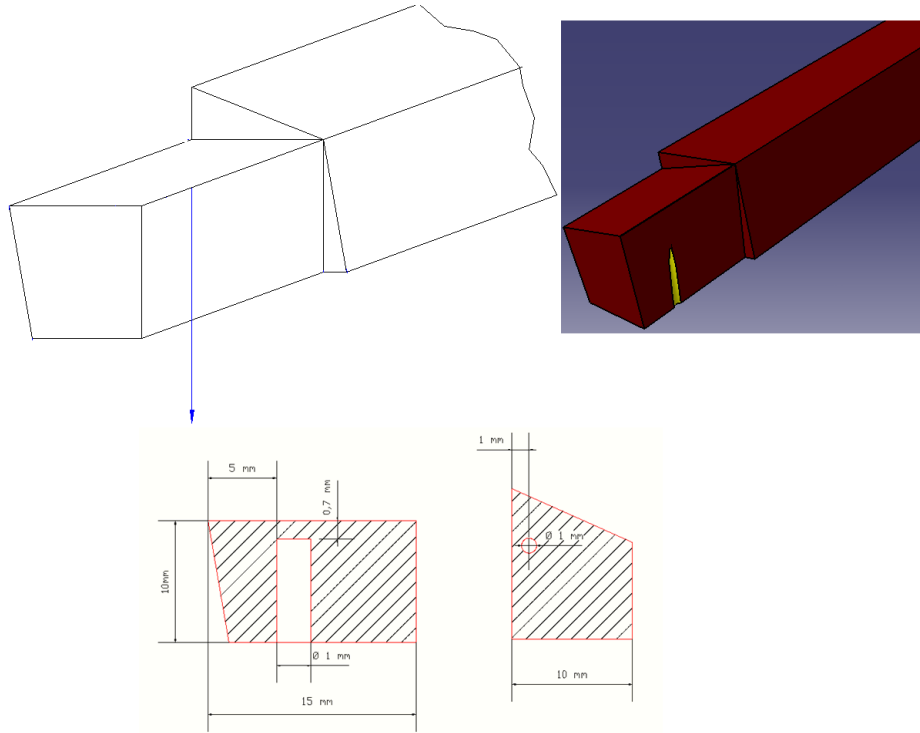
$$F_c = F_l \frac{a}{b} \quad (5.1)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı, hazırlanan yazılımında kullanılmış ve kesme, ilerleme kuvvetleri bilgisayara kaydedilmesi sağlanmıştır. Bu işlem için yazılım ara yüzünün ilgili kısmında “a” ve “b” mesafelerinin girilmesi gerekmektedir.

### 5.5.2. Sıcaklık ölçme sistemi kalibrasyonu

Talaş kaldırma esnasında takımların takım – talaş ara yüzey sıcaklık farklarının bulunması için takıma gömülmüş ısı çift yöntemi kullanılmıştır. bu yöntemde takımlara belirlenen mesafede kör delik açılmış ve bu deliklerden ısı çift (K tipi) yardımıyla ölçüm alınmıştır (Şekil 5.8.). Dalma erozyon tezgahında kaleme deformasyon yapılarak kör delik açılmıştır. Buda kalemin deformasyona uğramış kör delik yüzeyinden ölçülen sıcaklık, kalemin deformasyona uğramamış yüzeyden farklıdır. Bu deneydeki fark deformasyona uğramamış yüzeylerden  $5 - 7^\circ$  arasında düşük sıcaklık ölçülmektedir.

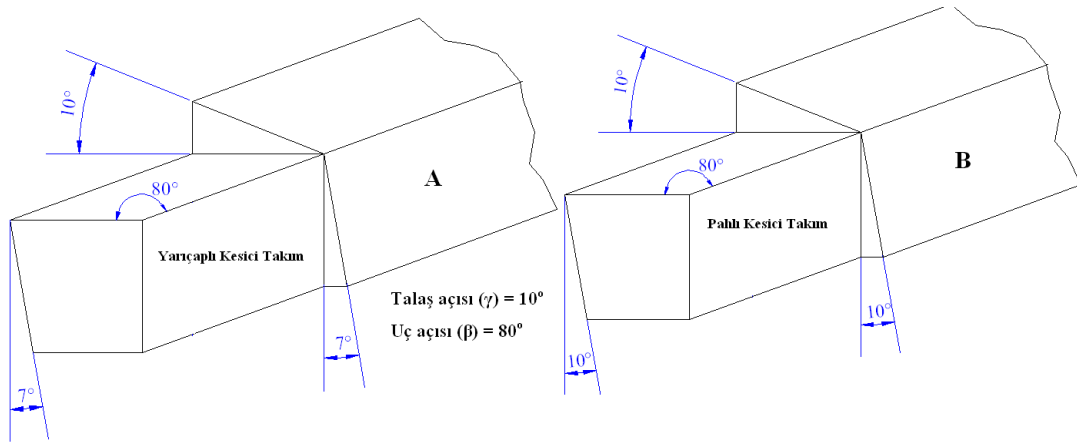




Şekil 5.8. HSS torna kalemlerinin sıcaklık ölçme sistemi için kör delik ölçüleri

## 5.6. Deneysel Çalışmalar

Deneylerde HSS DIN 4964 kare kesitli torna kalemleri kullanılmıştır. Farklı ölçülerde 3 pahlı, 3 yarıçaplı ve 2 tanede keskin kenarlı olmak üzere 8 ayrı kesici takım kullanılmıştır. Kalem geometrilerinde yarıçaplı kenar uçlarda boşluk açısı  $7^\circ$ , pahlı kenar uçlarda boşluk açısı  $10^\circ$ 'dir. Kullanılan pahlı ve yarıçaplı modellerin keskin kenar uçlarla kıyaslanması, kendileriyle aynı açılara sahip 2 ayrı keskin kenarlı takımla yapılmıştır. Deneyler aynı kesme şartlarında iki kere tekrar edilmiştir.



Şekil 5.9. HSS torna kalemlerinin açıları

Kalem aşınmasının belirlenmesi için kesici takımların serbest yüzey ve talaş yüzeylerinden optik mikroskop altında bakılarak fotoğrafları çekilmiştir.

Tablo 5.6'de deneylerde kullanılan kesme şartları verilmiştir. Deneylerde soğutma sıvısı kullanılmamıştır.

Tablo 5.6. Kesme şartları

Kesme Hızları ( $v = \text{m/dk}$ )	İlerleme Hızları ( $s = \text{mm/dev}$ )	İş Parçası Çapı ( $D, D_0 = \text{mm}$ )
47,93	0,08	$D = 40$
67,51	0,11	$D_0 = 43$
95,86	0,14	

### 5.7. Sonlu Elemanlar Analizi

Karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözümleyerek tam çözümün bulunduğu bir analizdir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok makine elemanının kolayca incelenebilmesi, tasarım esnasında mukavemet analizlerin yapılarak optimum tasarımın gerçekleşmesi mümkün olabilmektedir.

Belirli kesme şartlarında torna kalemlerinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin zaman göre artışlarını belirlemek için FEM simülasyonu yapılmıştır. FEM simülasyonu için DEFORM – 2D paket program kullanılmıştır.

### 5.7.1. Deform – 2d programın yapısı

Deform programında 2 ve 3 boyutlu metal şekillendirme simülasyonları yapılabilmektedir. Deform dövme, talaşlı imalat, bükme, ekstrüzyon, tel erezyon, derin çekme gibi birçok soğuk ve sıcak şekil verme simülasyonu da oluşturulur. İşlenecek olan parçanın CAD dataları oluşturulduktan sonra deform yazılımı içerisinde gerçek şartlara yakın olarak simülasyonunu gerçekleştirmektedir.

Bu çalışmada, iki boyutlu olarak kesme kuvvetleri analizleri için DEFORM – 2D içerisinde Machining – 2D cutting modülü kullanılmıştır.

#### 5.7.1.2. Kesme simülasyonu oluşturulması

DEFORM – 2D programında kesme simülasyonu aşağıda gösterilen işlem basamaklarına göre yapılmaktadır.

- 1) İşlem tipi belirlenir.
- 2) Kesme şartları iki türlü programa giriş yapılabilir.
  - a) Kesme hızı, talaş kalınlığı, ilerleme hızı programa girilir.
  - b) Devir sayısı, iş parçası çapı, talaş kalınlığı, ilerleme hızı programa girilir.
- 3) İşleme şartları
  - a) Ortam sıcaklığı
  - b) Takım – iş parçası ara yüzeyinde kesme sürtünme katsayısı belirlenir;

$$\tau = m_f k_{talaş} = m_f \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

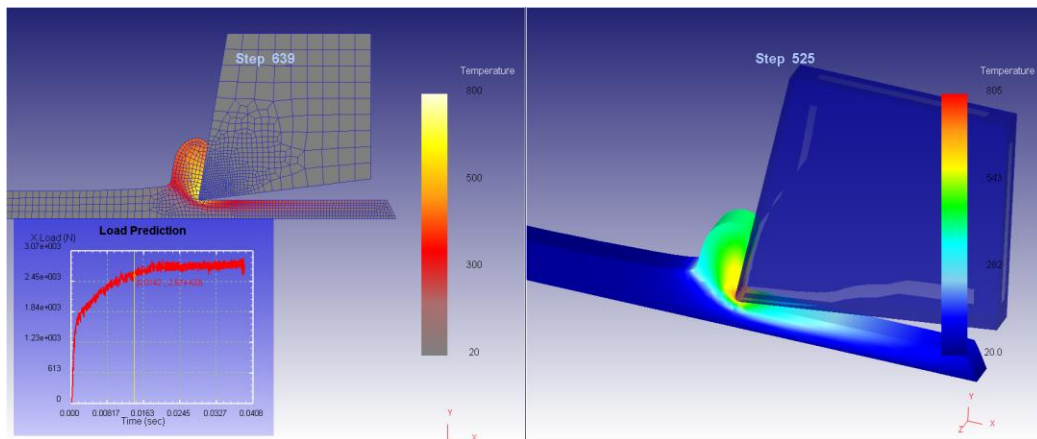
$\tau$  = Sürtünme gerilmesi

$m_f$  = Kesme sürtünme katsayısı

$k_{\text{talaş}} = \text{İş parçası malzemesinde kesme yield gücü}$

$\sigma = \text{Etkili gerilim}$

- c) Isı transfer katsayısı
- 4) Takım şartlarının belirlenmesi
  - a) Takımın ilk sıcaklığı
  - b) Geometrisinin oluşturulması
  - c) Mesh sayısının belirlenmesi
  - d) Sınır şartlarının belirlenmesi
  - e) Takım malzemesinin belirlenmesi
- 5) İş parçası şartlarının belirlenmesi
  - a) İş parçasının tipi ve ilk sıcaklığı
  - b) Geometrisinin oluşturulması
  - c) Mesh sayısının belirlenmesi
  - d) Sınır şartlarının belirlenmesi
  - e) İş parçası malzemesinin belirlenmesi
- 6) Takımın iş parçası üzerindeki pozisyonu; belirlenen kesme şartlarına göre varsayılan pozisyonu almaktadır.
- 7) Simülasyon kontrolü
  - a) Kaç adımda kayıt edilecek
  - b) Simülasyon adım sayısı
  - c) Parçadan kesilecek boy
- 8) Veri tabanını oluşturularak kesme simülasyonu başlatılır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Kesme simülasyonu

DEFORM – 2D programında kesme simülasyonu yapılabilmesi için istenilen problem sonuçlarına göre programa belirli giriş parametreleri girilmektedir. Bu parametreler;

- 1) Mekanik özellikler
  - a) Sertlik
  - b) Kimyasal birleşimi
  - c) Akış gerilimi
  - d) Elastikiyet modülü
- 2) Sıcaklık özellikleri
  - a) Isı iletkenliği
  - b) Özgül ısı
  - c) Ara yüzey ısı transferi katsayısı
- 3) Sürtünme
  - a) Kesme sürtünmesi
  - b) Coulomb sürtünmesi
  - c) Normal gerilim fonksiyonunun non – linear sürtünmesi
  - d) Temas bölgesi sürtünme modeli
- 4) Sınır şartları
  - a) Sıcaklık sınır şartları
  - b) Zoraki ısı yayılımı
- 5) Mesh tanımlaması
  - a) Element sayısı
  - b) Mesh sıklığı
  - c) Mesh tipi
- 6) Kesme şartları
  - a) Kesme hızı
  - b) Talaş kalınlığı
  - c) Devir sayısı
  - d) Talaş kalınlığı
  - e) İlerleme hızı
  - f) Parça çapı
- 7) FEM geometrik modeli

- a) İş parçası genişliği ve uzunluğu
- b) Takım genişliği ve uzunluğu
- c) Takım talaş ve boşluk açıları

FEM simülasyonu sonucunda programa girilen parametrelere göre; kesme kuvvetleri, sıcaklıklar, talaş geometrisi, artan gerilim, takım aşınması, hız, gerilim, gerinim, gerinim oranı dağılımı verileri elde edilir.

## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Giriş

Bu çalışmada, tasarımı ve imalatı özel olarak farklı kesici uç geometrisine sahip HSS torna kalemlerinin dik (ortogonal) kesme esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve takım – talaş ara yüzey sıcaklığına etkileri incelenmiştir. Kesme deneyleri kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler 2 defa tekrar edilerek ortalama değerler dikkate alınmıştır. Her bir takımda belirlenen kesme şartlarında et kalınlığı 1,5 mm olan CuZn37 pirinç boru malzeme üzerinde 5 mm boyunda talaş kaldırılarak veriler elde edilmiştir.

### 6.2. Deneysel Sonuçlarının Kıyaslanması

Kullanılan takımlar dört açıdan birbiriyle kıyaslandı.

1. Aynı kesme şartlarında takım geometrisinin etkisi
2. Farklı ilerleme hızlarının takım geometrisinin etkisi
3. Farklı kesme hızlarının takım geometrisinin etkisi
4. Yarıçaplı ve pahlı takımların bütün kesme şartları için karşılaştırılması

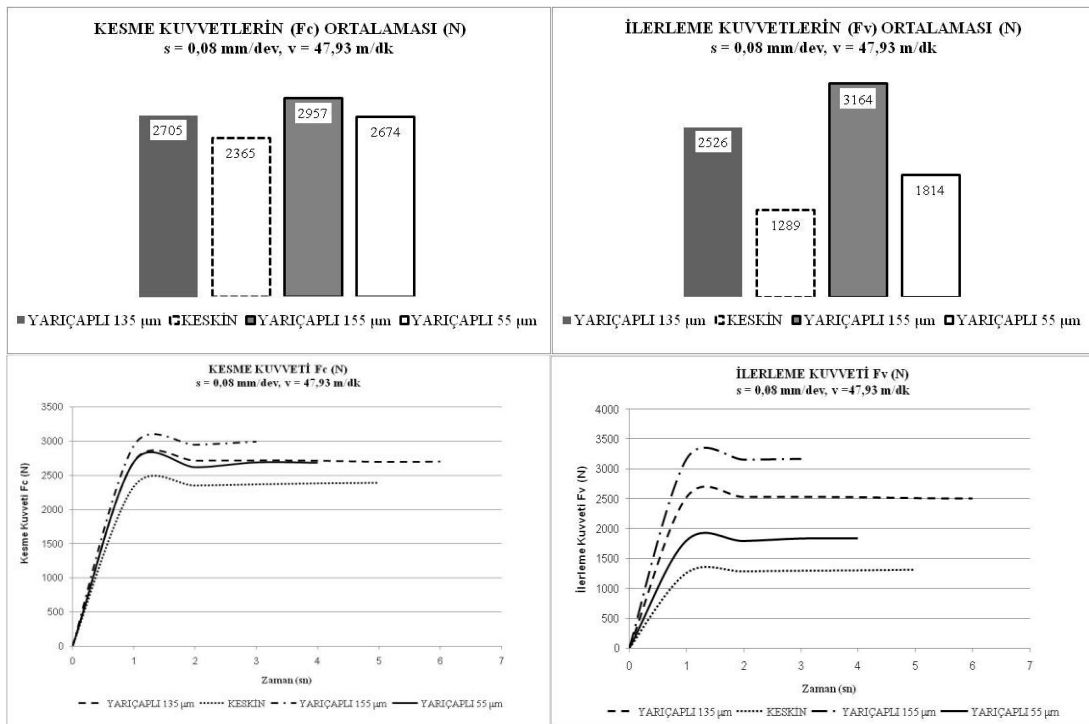
#### 6.2.1. Aynı kesme şartlarında takımların kesme kuvveti açısından karşılaştırılması

Kesme şartları aynı olan yarıçaplı, pahlı ve keskin kalem kenar uçlarının deneysel sonuçları ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar kesme işlemi başlamasından bitişine kadar alınan kesme ve ilerleme kuvvetlerinin değerlerinin ortalamaları alınarak grafiksel olarak gösterilmiştir. Deneyler 2 kere tekrar edilmiştir. Yarıçaplı ve pahlı kesici kenar geometrilerinde boşluk açıları birbirinden farklıdır ( $10^\circ - 7^\circ$ ). Bu

yüzden, her iki takım kendisiyle aynı açılara sahip keskin kenarlı takım ile kıyaslanmıştır.

### 6.2.1.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar

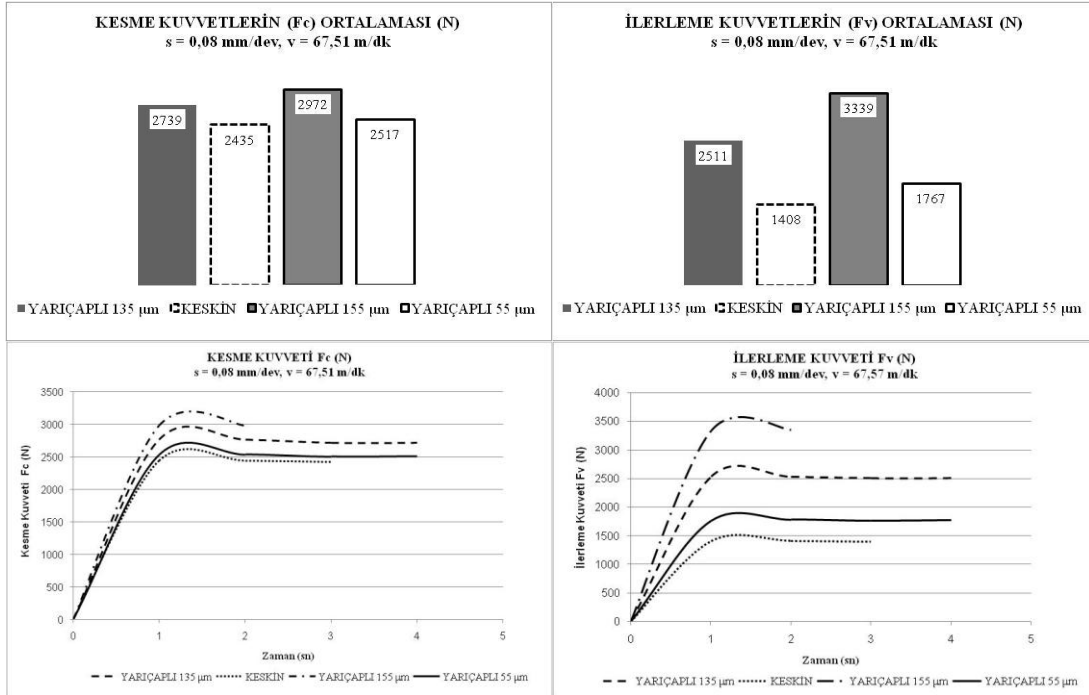
İlerleme 0,08 mm/dev, kesme hızı 48 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük kesme ve ilerleme kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Yarıçaplı takımın kesme ve ilerleme kuvvetleri ( s = 0,08 mm/dev, v = 47,93 m/dk)

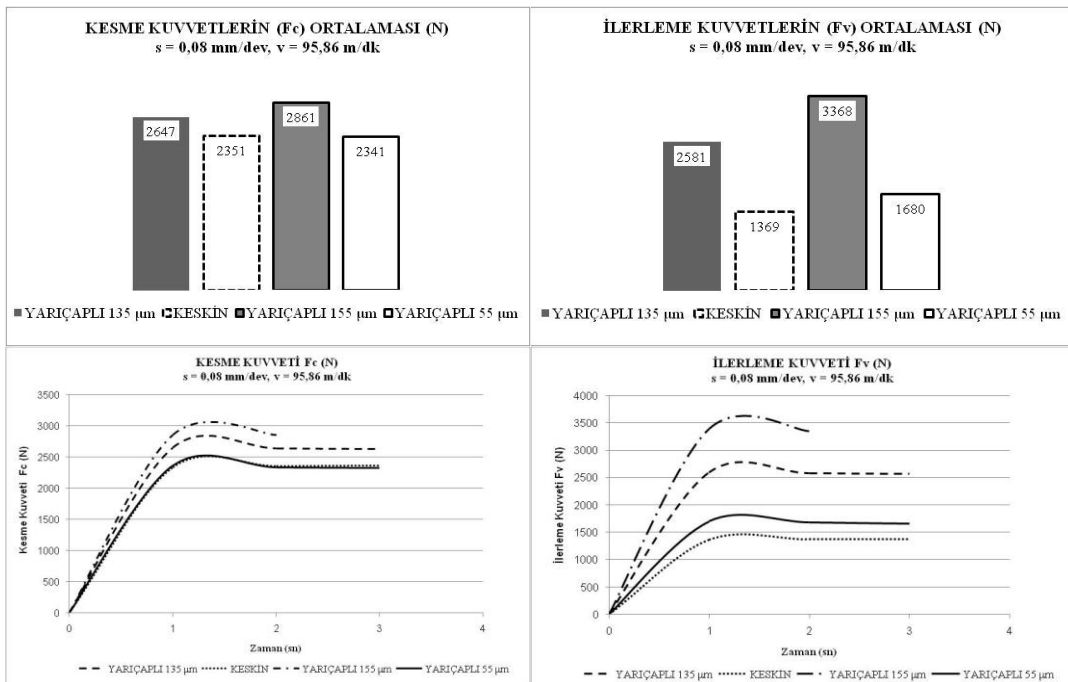
İlerleme 0,08 mm/dev, kesme hızı 67 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük kesme ve ilerleme kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.2).





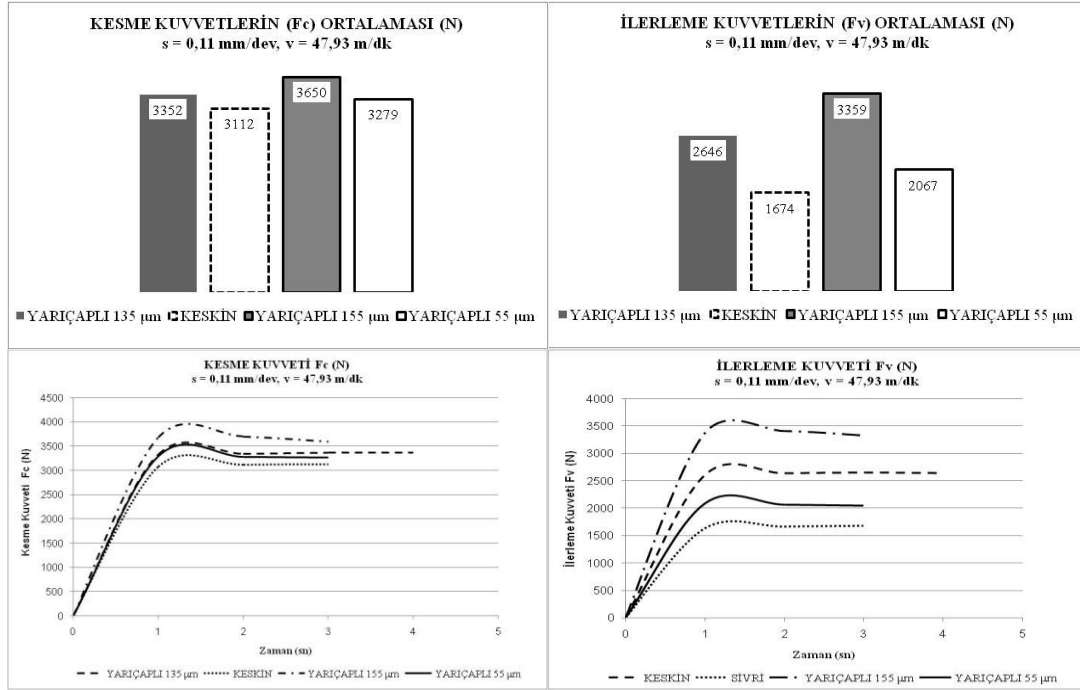
Şekil 6.2. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,08 mm/dev, v = 67,51 m/dk)

İlerleme 0,08 mm/dev, kesme hızı 96 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenar, 55 µm yarıçaplı kenara kıyasla daha büyük bir kesme kuvveti oluşturmuştur. Fakat en düşük ilerleme kuvvetine sahiptir (Şekil 6.3).



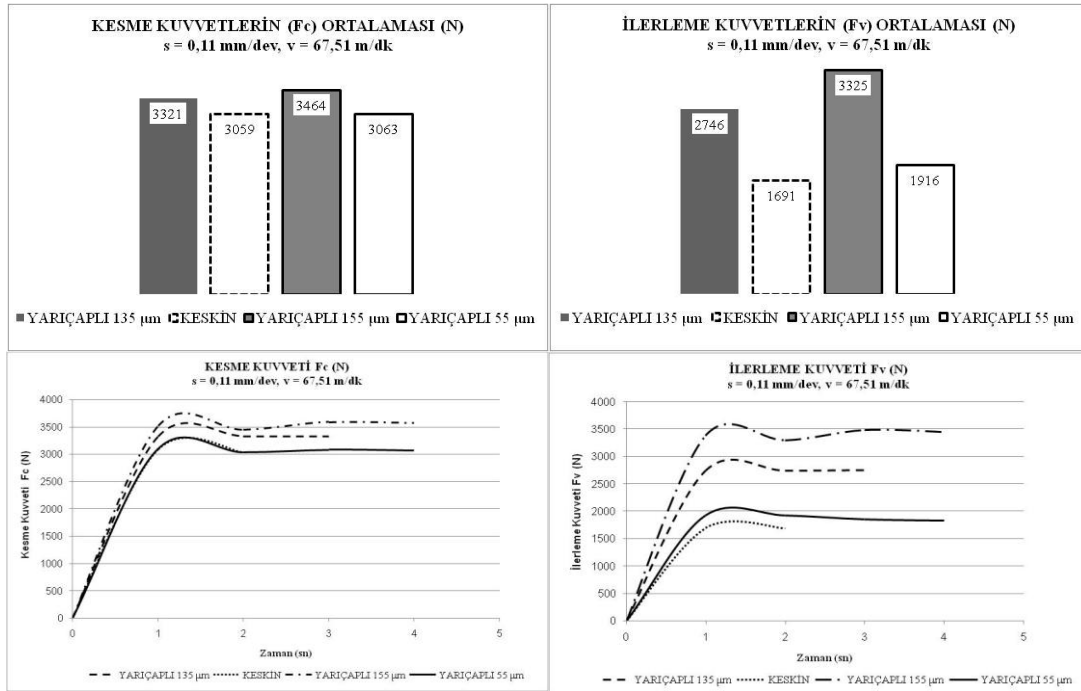
Şekil 6.3. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,08 mm/dev, v = 95,86 m/dk)

İlerleme 0,11 mm/dev, kesme hızı 48 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük kesme ve ilerleme kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.4).



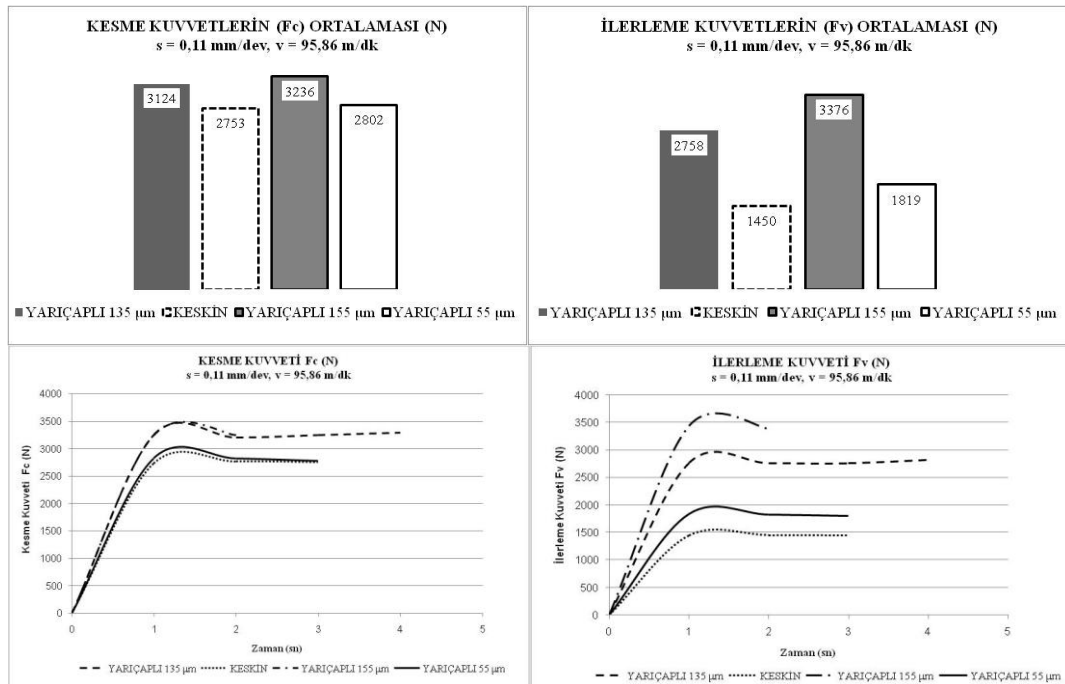
Şekil 6.4. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,11 mm/dev, v = 47,93 m/dk)

İlerleme 0,11 mm/dev, kesme hızı 67 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük kesme ve ilerleme kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.5).



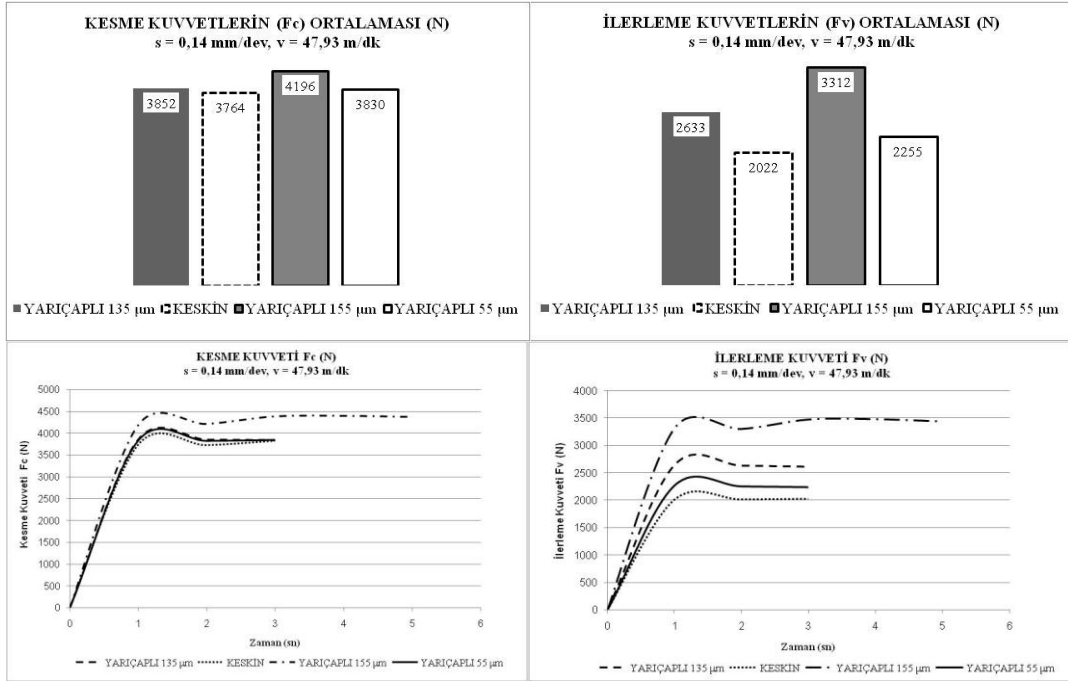
Şekil 6.5. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( s = 0,11 mm/dev, v = 67,51 m/dk)

İlerleme 0,11 mm/dev, kesme hızı 96 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük kesme ve ilerleme kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.6).



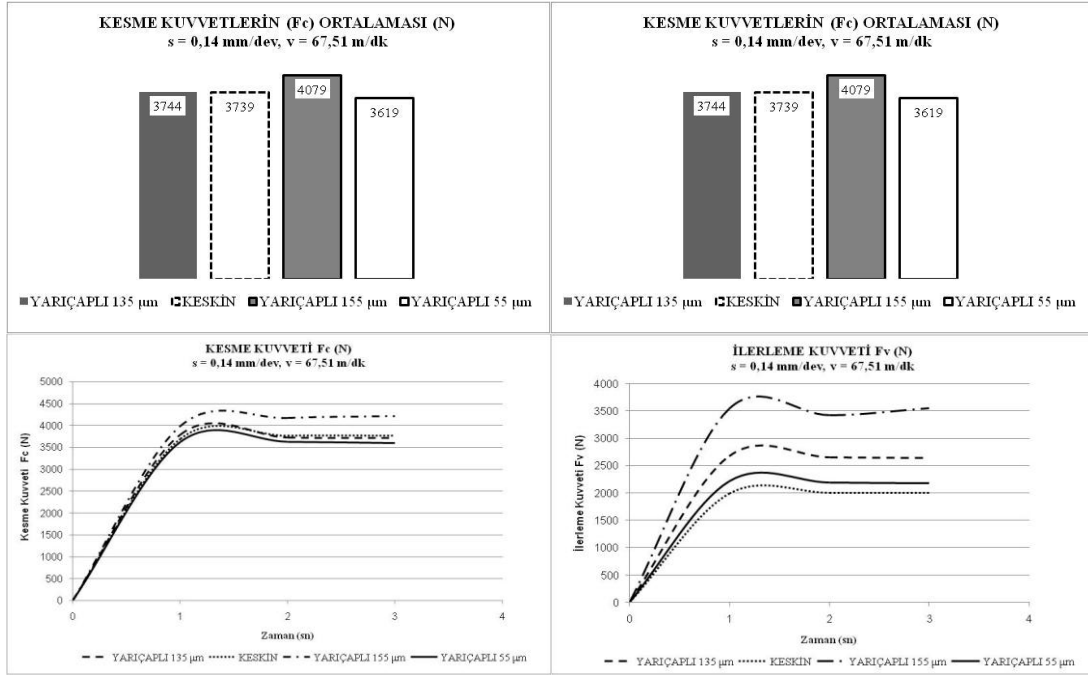
Şekil 6.6. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( s = 0,11 mm/dev, v = 95,86 m/dk)

İlerleme 0,14 mm/dev, kesme hızı 48 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük kesme ve ilerleme kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.7).



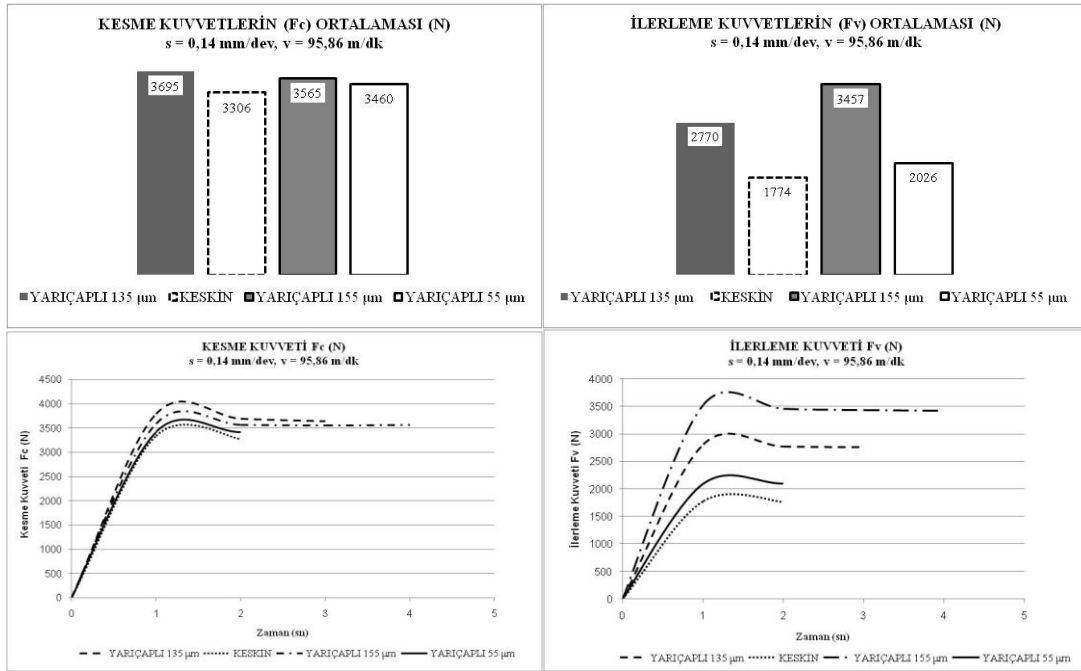
Şekil 6.7. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (  $s = 0,14$  mm/dev,  $v = 47,93$  m/dk)

İlerleme 0,14 mm/dev, kesme hızı 67 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar yarıçapı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenar, 55 µm yarıçaplı kenarının kesme ve ilerleme kuvvetlerinden büyüktür (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( s = 0,14 mm/dev, v = 67,51 m/dk)

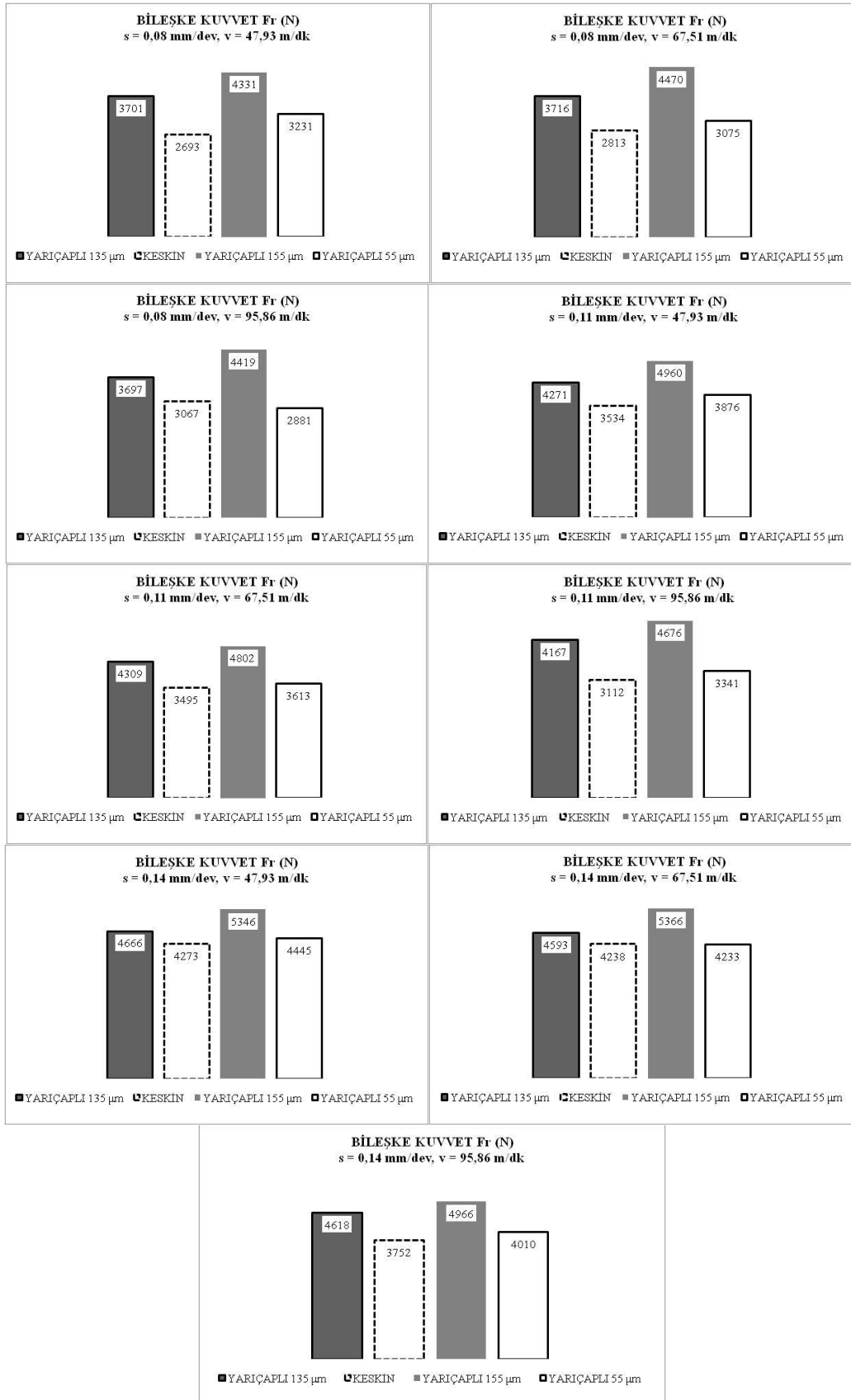
İlerleme 0,14 mm/dev, kesme hızı 96 m/dk kesme şartlarında yarıçaplı kenar geometrilerinde kesme kuvvetleri 135 µm, 155 µm, 55 µm, keskin olarak büyükten küçüğe doğru sıralandığı görülmektedir. Yarıçaplı uç kenar geometrileri arttıkça ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takımın diğer geometrilerine göre en düşük kesme ve ilerleme kuvvetlerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Yarıçaplı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( s = 0,14 mm/dev, v = 95,86 m/dk)

Ortogonal kesme işleminde aynı kesme şartlarında, genel olarak yarıçaplı takımlarda yarıçap ölçüsüne paralel olarak kesme ve ilerleme kuvvetleri artmaktadır. Keskin kenarlı takımın diğer geometrilere göre en düşük kesme ve ilerleme kuvvetleri sahip olduğu görülmektedir.

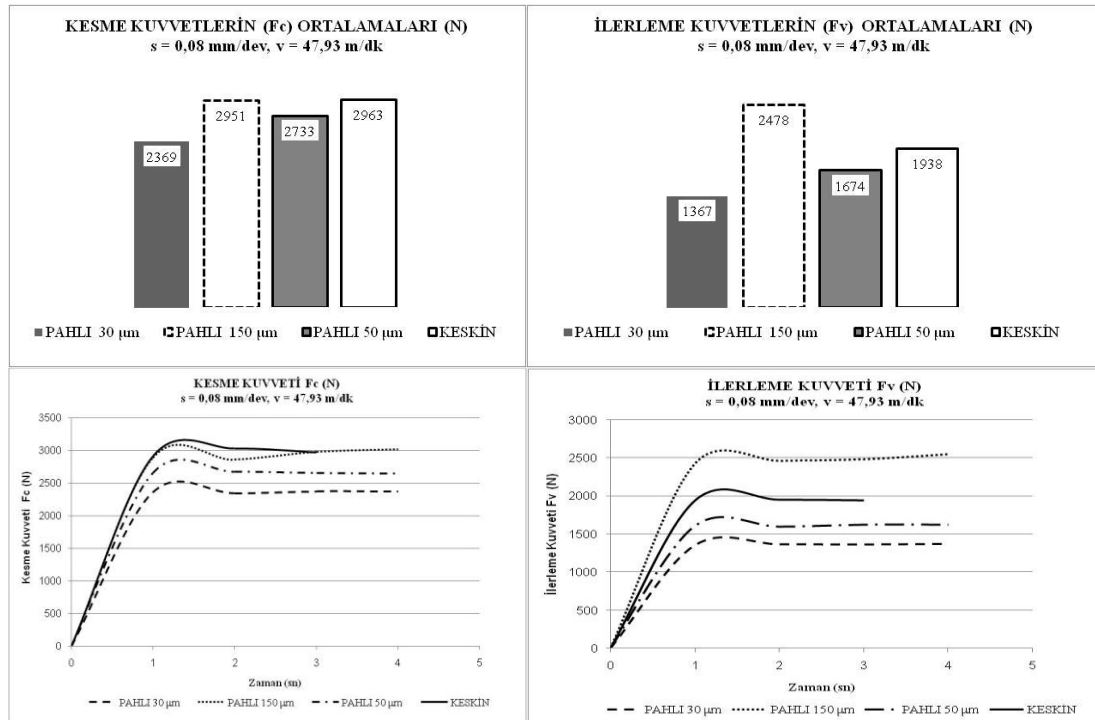
Aynı kesme şartlarında kesme ve ilerleme kuvvetlerinin bileşke kuvvetlerine bakıldığında kesici kenar yarıçapı arttıkça bileşke kuvvet artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha düşük bileşke kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Yarınçaplı takımların aynı kesme şartlarında bileşke kuvvetleri

### 6.2.1.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar

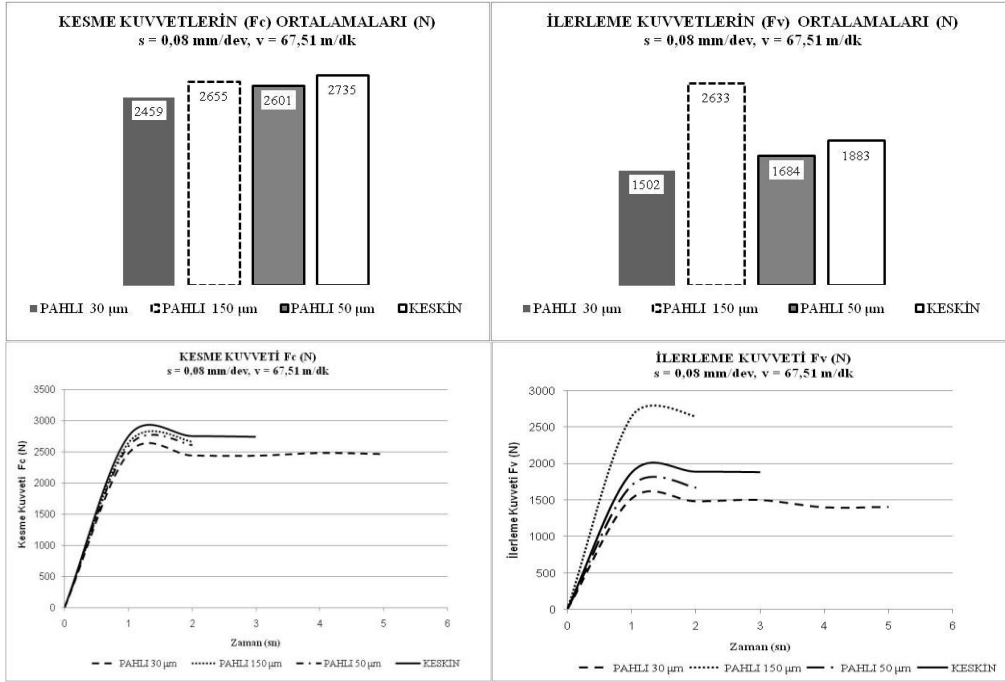
İlerlemenin 0,08 mm/dev, kesme hızı 48 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar pahlı artıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha yüksek kesme kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetinde ise 150  $\mu\text{m}$ , keskin, 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,08 mm/dev, v = 47,93 m/dk)

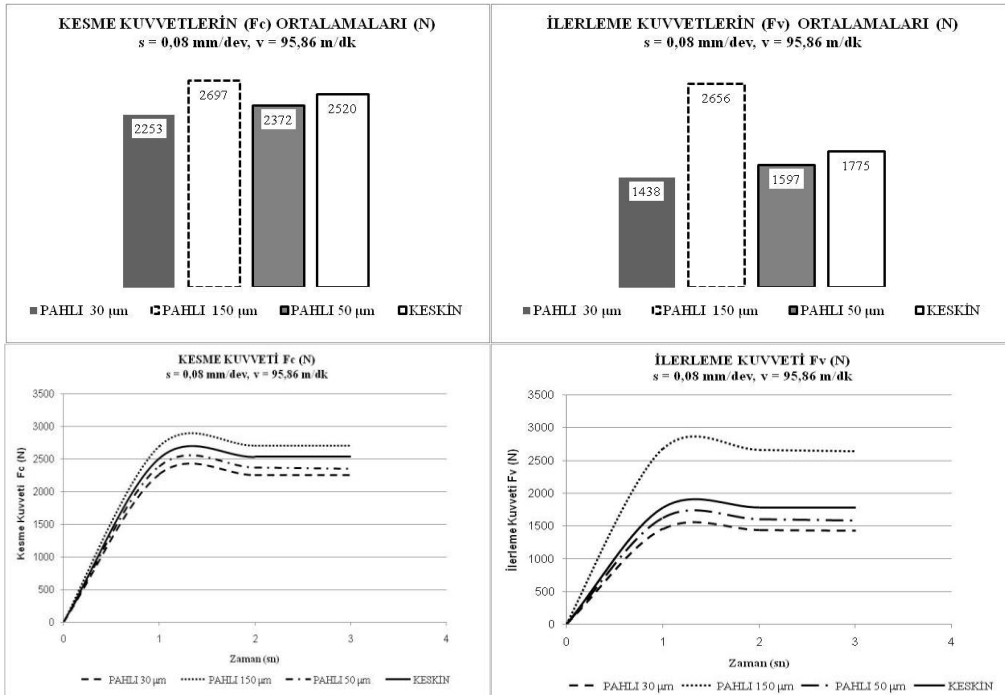
İlerleme 0,08 mm/dev, kesme hızı 67 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar pahlı artıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha yüksek kesme kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetinde ise 150  $\mu\text{m}$ , keskin, 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.12).





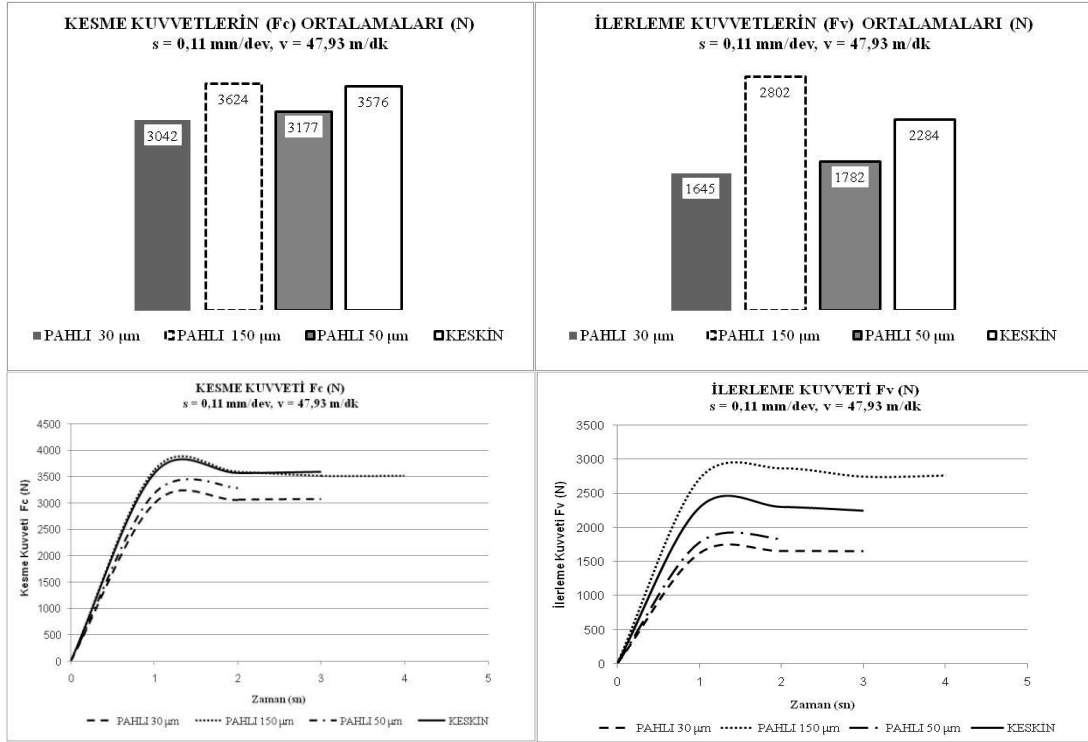
Şekil 6.12. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08 \text{ mm/dev}$ ,  $v = 67,51 \text{ m/dk}$ )

İlerleme  $0,08 \text{ mm/dev}$ , kesme hızı  $96 \text{ m/dk}$  kesme şartlarında, kesici kenar pahı artıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Kesme ve ilerleme kuvvetine  $150 \mu\text{m}$ , keskin,  $50 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.13).



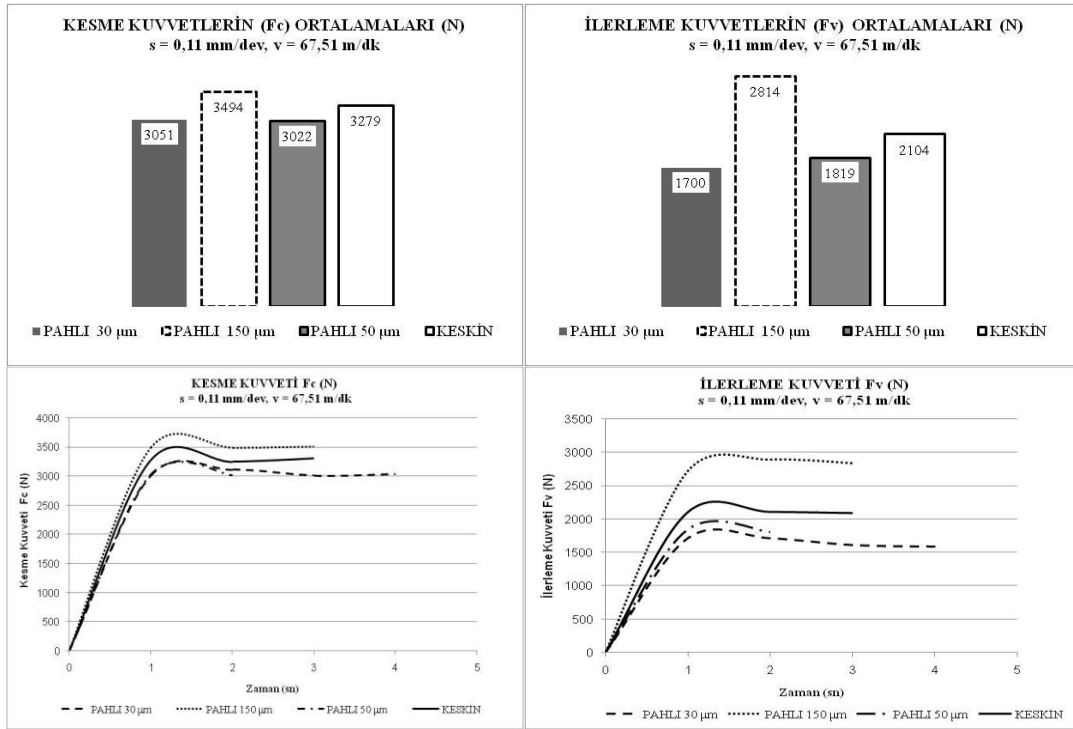
Şekil 6.13. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,08 \text{ mm/dev}$ ,  $v = 95,86 \text{ m/dk}$ )

İlerleme 0,11 mm/dev, kesme hızı 48 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar pahı artıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Kesme ve ilerleme kuvvetine 150  $\mu\text{m}$ , keskin, 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.14).



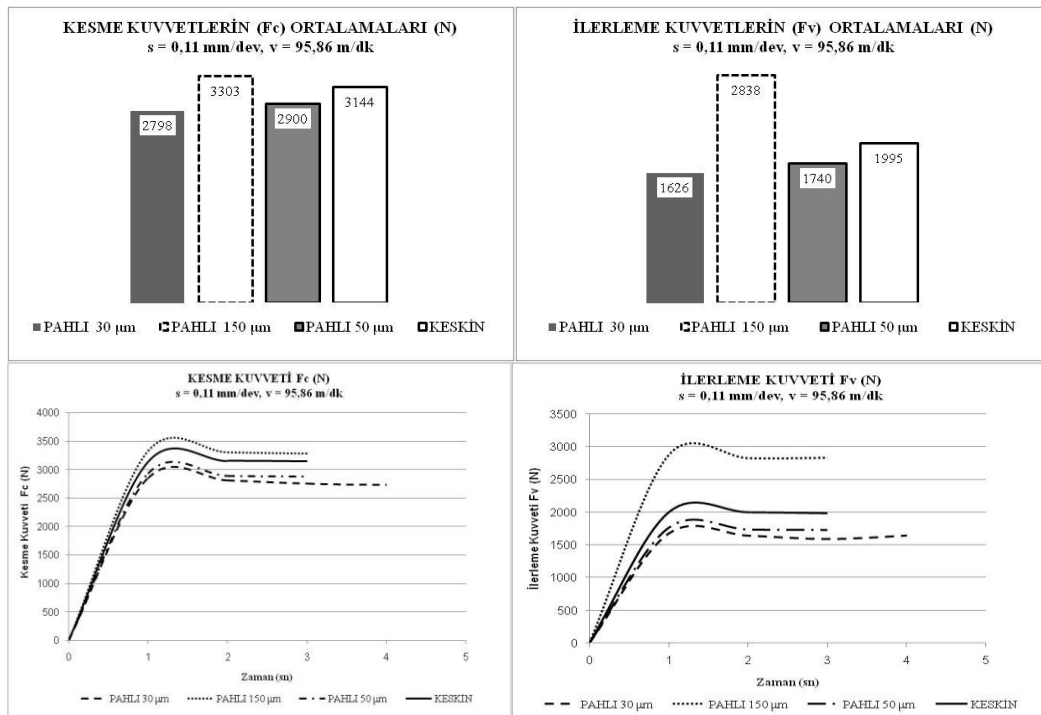
Şekil 6.14. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,11 mm/dev, v = 47,93 m/dk)

İlerleme 0,11 mm/dev, kesme hızı 67 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar pahı artıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Kesme ve ilerleme kuvvetine 150  $\mu\text{m}$ , keskin, 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.15).



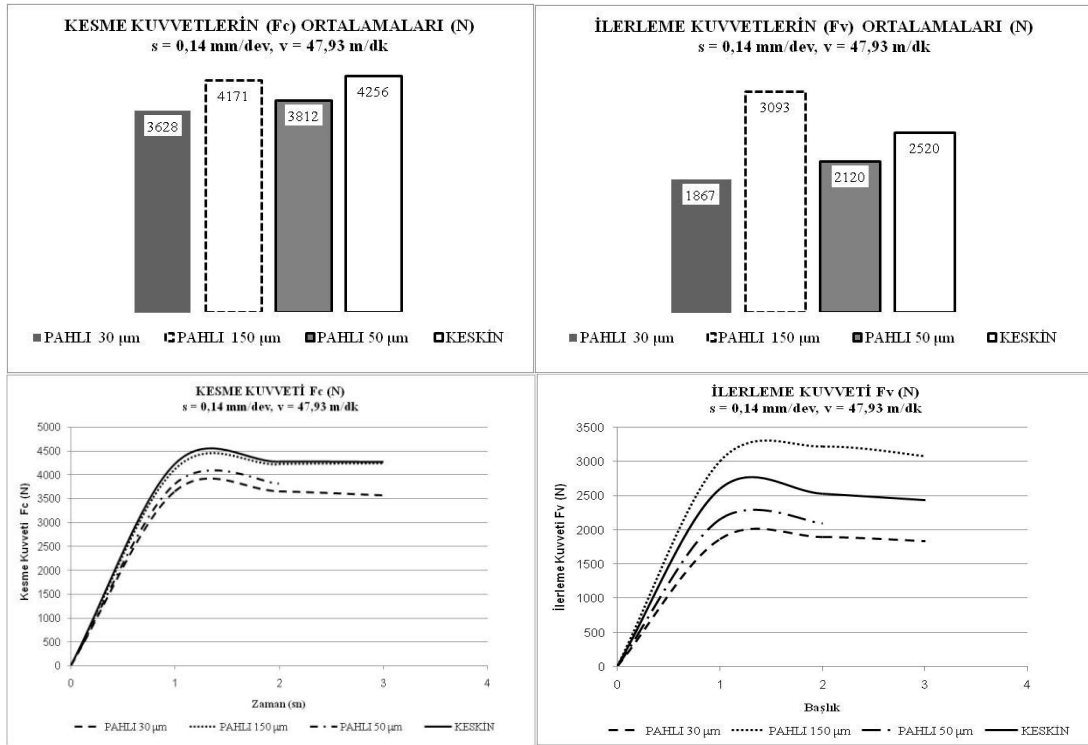
Şekil 6.15. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11 \text{ mm/dev}$ ,  $v = 67,51 \text{ m/dk}$ )

İlerleme  $0,11 \text{ mm/dev}$ , kesme hızı  $96 \text{ m/dk}$  kesme şartlarında, kesici kenar pahlı artıça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Kesme ve ilerleme kuvvetine  $150 \mu\text{m}$ , keskin,  $50 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.16).



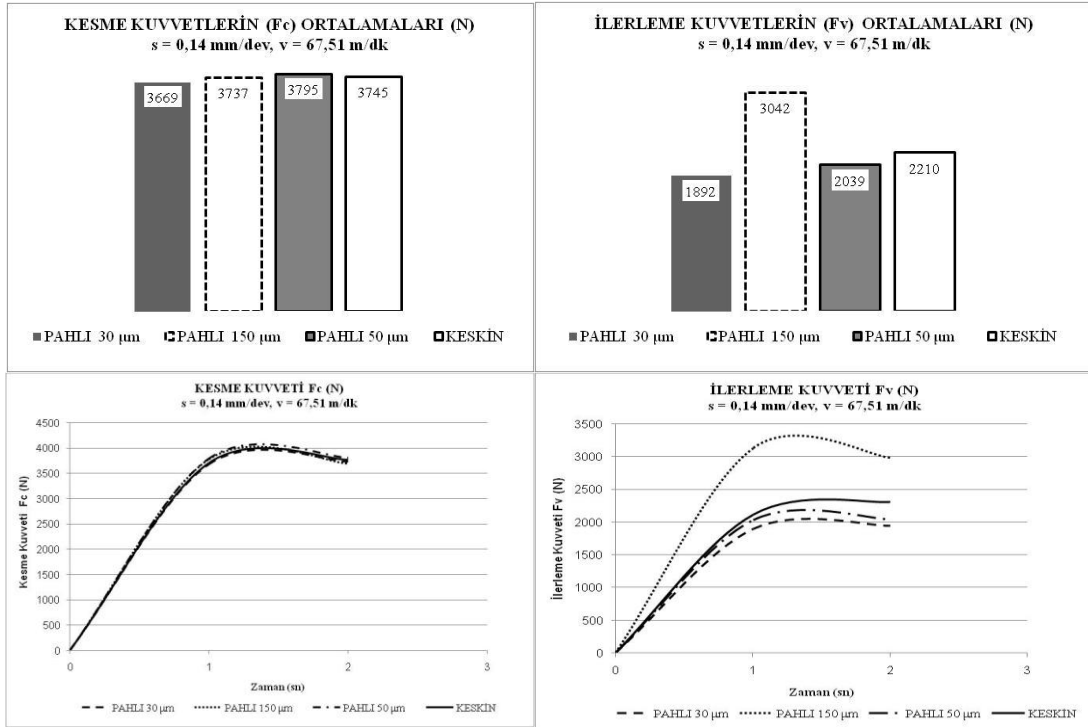
Şekil 6.16. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,11 \text{ mm/dev}$ ,  $v = 95,86 \text{ m/dk}$ )

İlerleme  $0,14 \text{ mm/dev}$ , kesme hızı  $48 \text{ m/dk}$  kesme şartlarında, kesici kenar pahı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre daha yüksek kesme kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetinde ise  $150 \mu\text{m}$ , keskin,  $50 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.17).



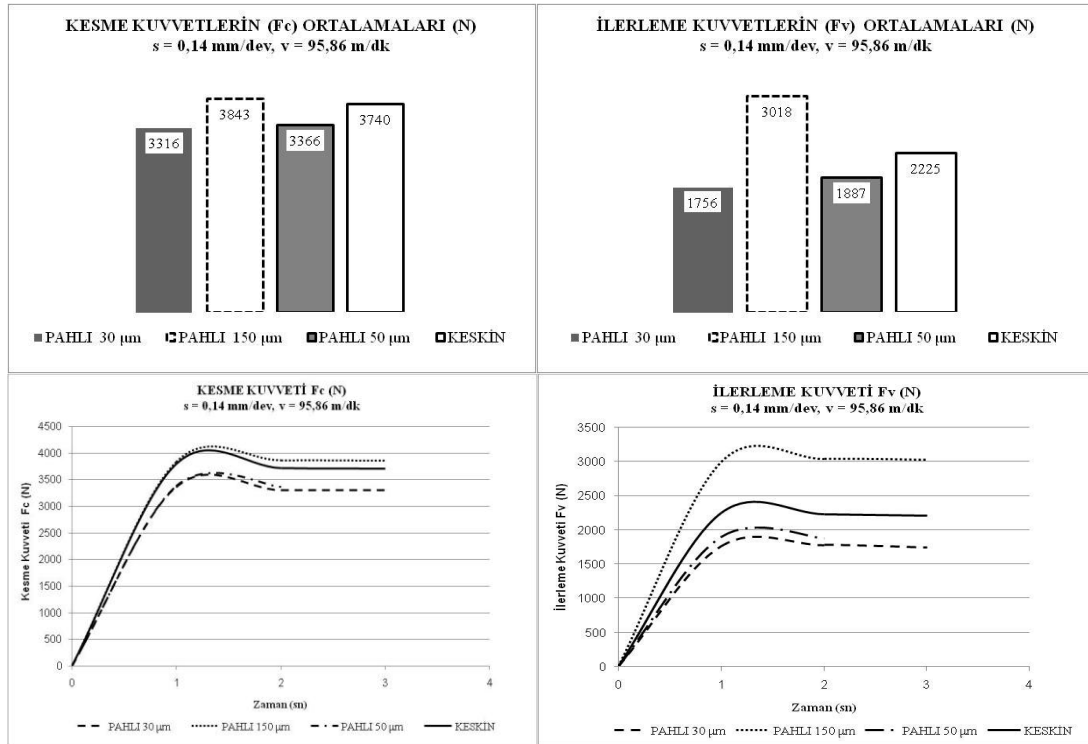
Şekil 6.17. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri ( $s = 0,14 \text{ mm/dev}$ ,  $v = 47,93 \text{ m/dk}$ )

İlerleme  $0,14 \text{ mm/dev}$ , kesme hızı  $67 \text{ m/dk}$  kesme şartlarında pahlı takımlar  $50 \mu\text{m}$ , keskin,  $150 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  kesme kuvvetleri, İlerleme kuvvetinde ise  $150 \mu\text{m}$ , keskin,  $50 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$  olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,14 mm/dev, v = 67,51 m/dk)

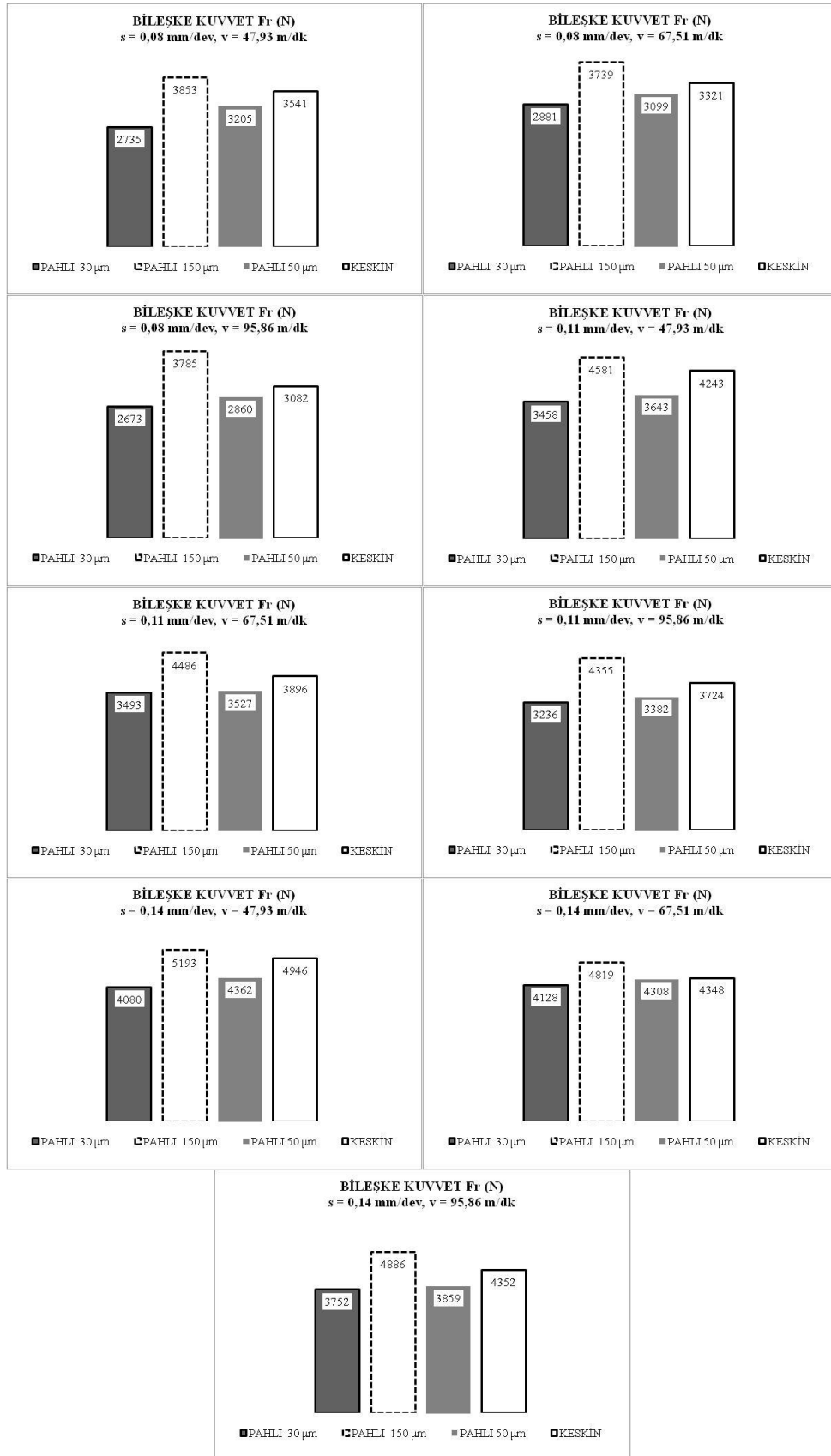
İlerleme 0,14 mm/dev, kesme hızı 96 m/dk kesme şartlarında, kesici kenar pahlı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Kesme ve ilerleme kuvvetine 150 µm, keskin, 50 µm, 30 µm olarak büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır (Şekil 6.19).



Şekil 6.19. Pahlı takımların kesme ve ilerleme kuvvetleri (s = 0,14 mm/dev, v = 95,86 m/dk)

Ortogonal kesme işleminde aynı kesme şartlarında genel olarak kesici kenar pahlı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre en büyük ikinci kesme ve ilerleme kuvvetleri sahip olduğu görülmektedir.

Aynı kesme şartlarında kesme ve ilerleme kuvvetlerinin bileşke kuvvetlerine bakıldığında kesici kenar pahlı arttıkça bileşke kuvvet artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre ikinci büyük bileşke kuvveti oluşturmuştur (Şekil 6.20).



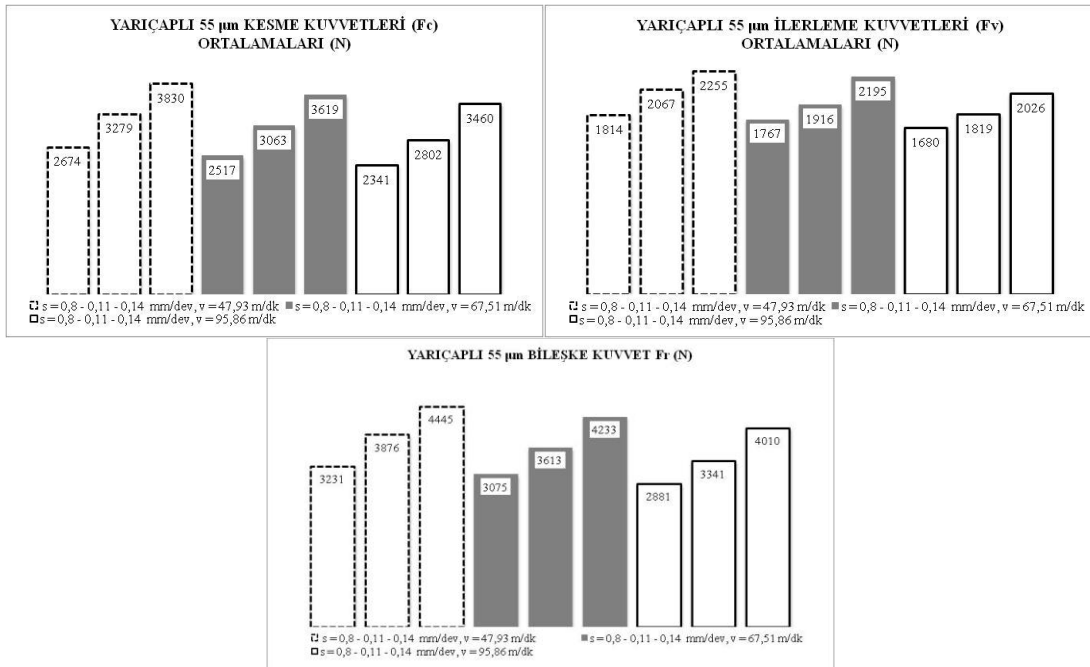
Şekil 6.20. Pahli takımların aynı kesme şartlarında bileşke kuvvetleri

## 6.2.2. Farklı ilerleme hızlarında takımların kesme kuvveti açısından karşılaştırılması

Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı olarak yarıçaplı, pahlı ve keskin kenarlı takımların deneysel sonuçları kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar kesme işlemi başlamasından bitişine kadar alınan kesme ve ilerleme kuvvetlerinin değerlerinin ortalamaları alınarak grafiksel olarak gösterilmiştir. Buradaki grafiklerden yararlanarak ilerleme hızlarının  $F_c$  ve  $F_v$  kuvvetlerine etkilerine incelenmiştir.

### 6.2.2.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar

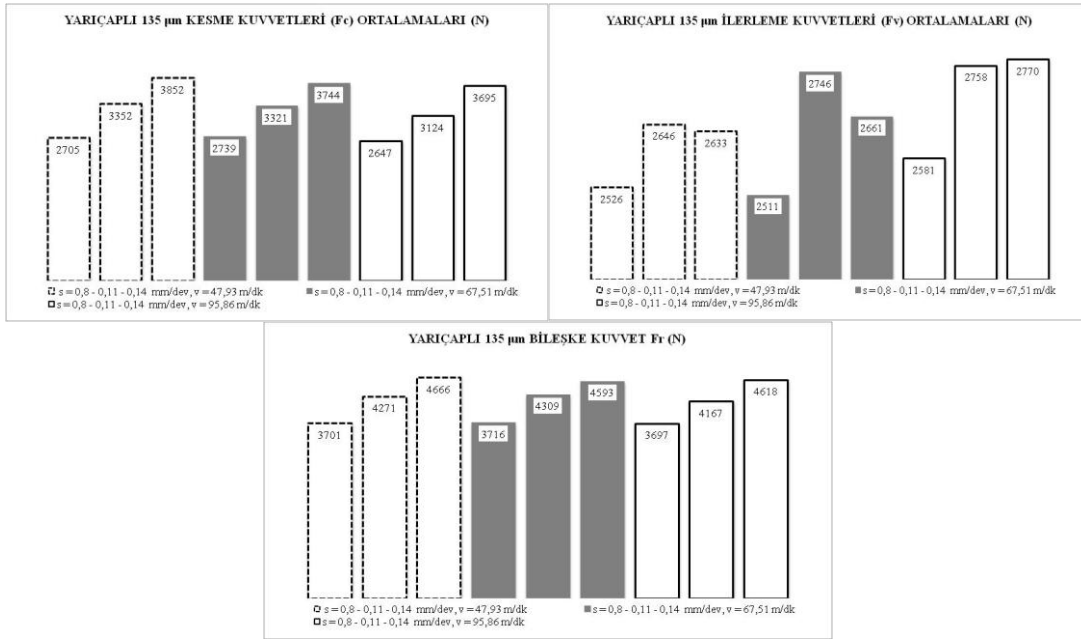
Ortogonal kesme işleminde yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  kesici kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıkça arttığı görülmektedir. (Şekil 6.21).



Şekil 6.21. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

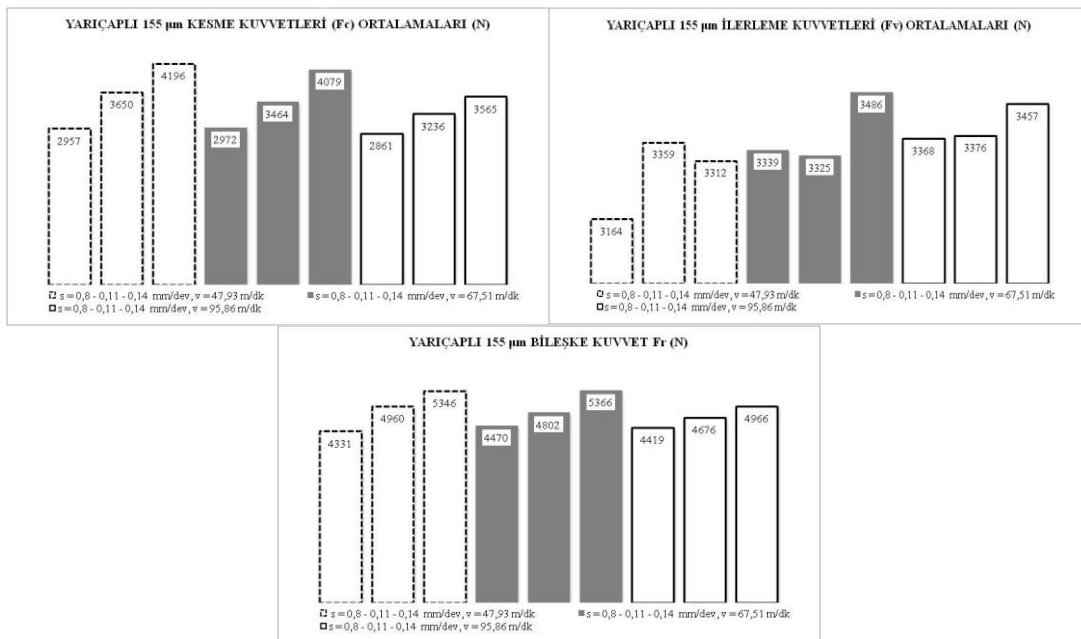
Yarıçaplı 135  $\mu\text{m}$  takımın, kesme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıkça arttığı görülmektedir. 48 – 67 m/dk kesme hızlarında 0,11 mm/dev ilerleme hızlarının ilerleme kuvvetleri en büyük değere ulaşmıştır (Şekil 6.22).





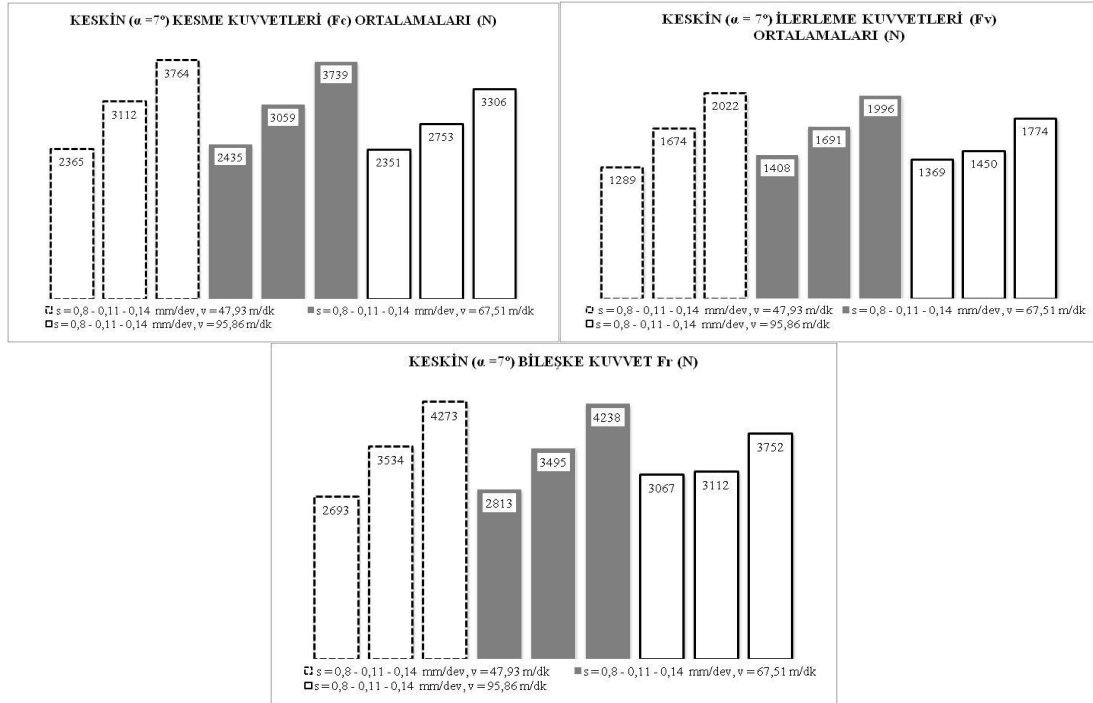
Şekil 6.22. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı yarıçaplı 135 μm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Yarıçaplı 155 μm takımın, kesme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı arttıkça arttığı görülmektedir. 48 kesme hızlarında 0,11 mm/dev ilerleme hızında en büyük, 67 kesme hızlarında 0,11 mm/dev ilerleme hızında en küçük değere ulaşmıştır (Şekil 6.23).



Şekil 6.23. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı yarıçaplı 155 μm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Keskin kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıkça arttığı görülmektedir (Şekil 6.24).

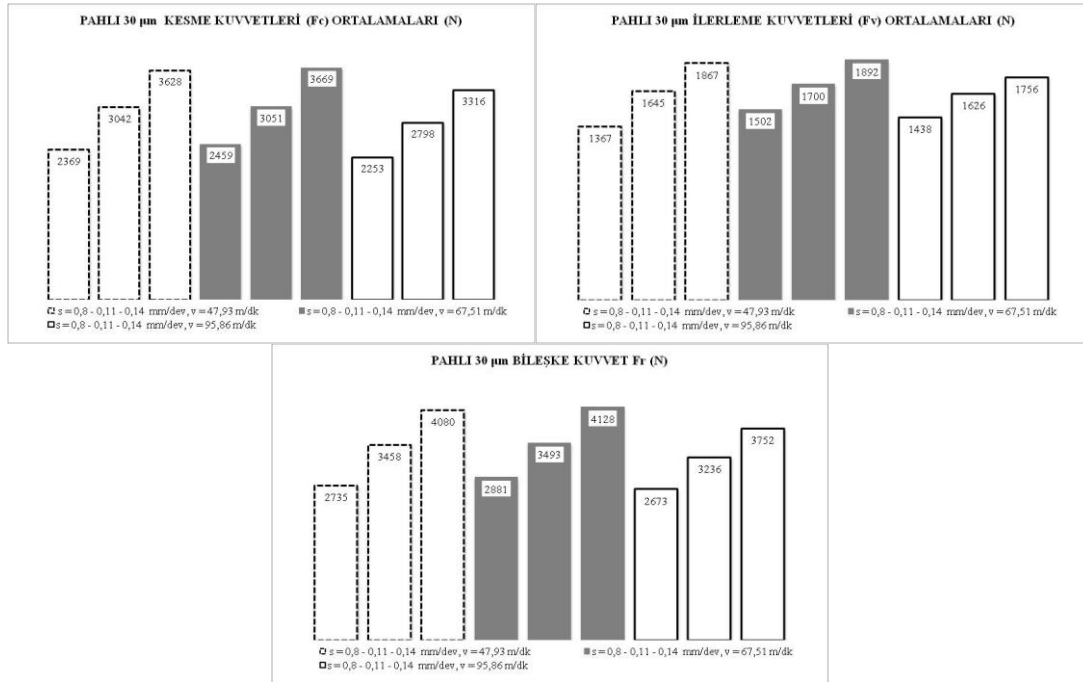


Şekil 6.24. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Ortogonal kesme işleminde kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı kesme şartlarında 55  $\mu\text{m}$ , 135  $\mu\text{m}$ , 155  $\mu\text{m}$ , keskin kenarlı takımların genel olarak ilerleme hızı artıkça kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri arttığı görülmektedir.

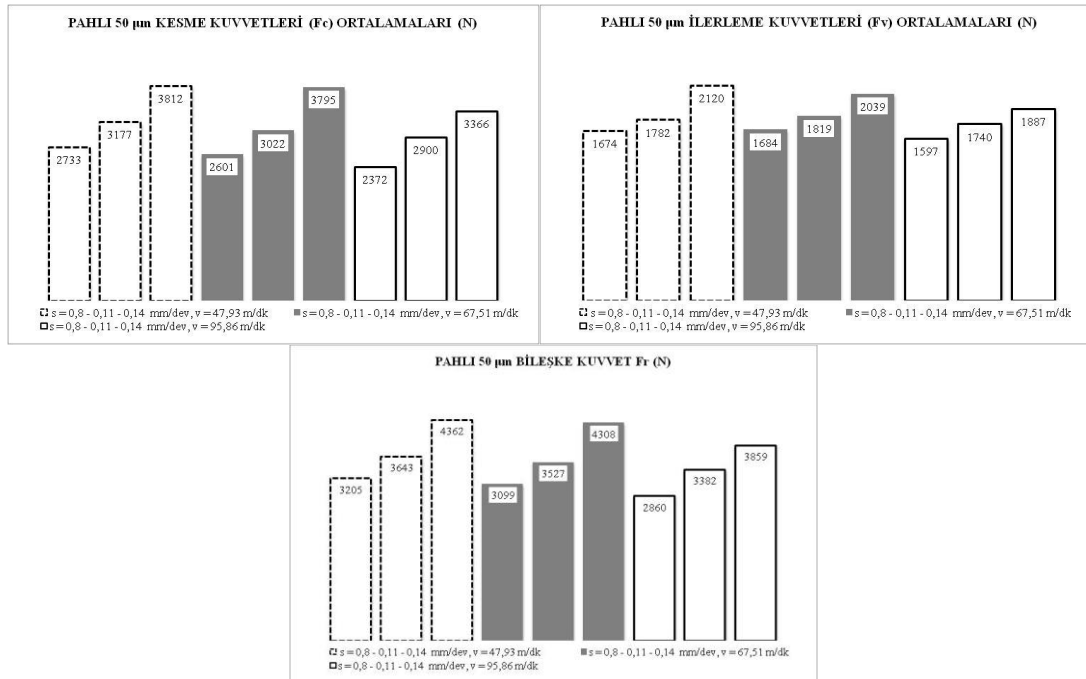
### 6.2.2.2. Pahlı kalem kenar uçları

Ortogonal kesme işleminde pahlı 30  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıkça arttığı görülmektedir (Şekil 6.25).



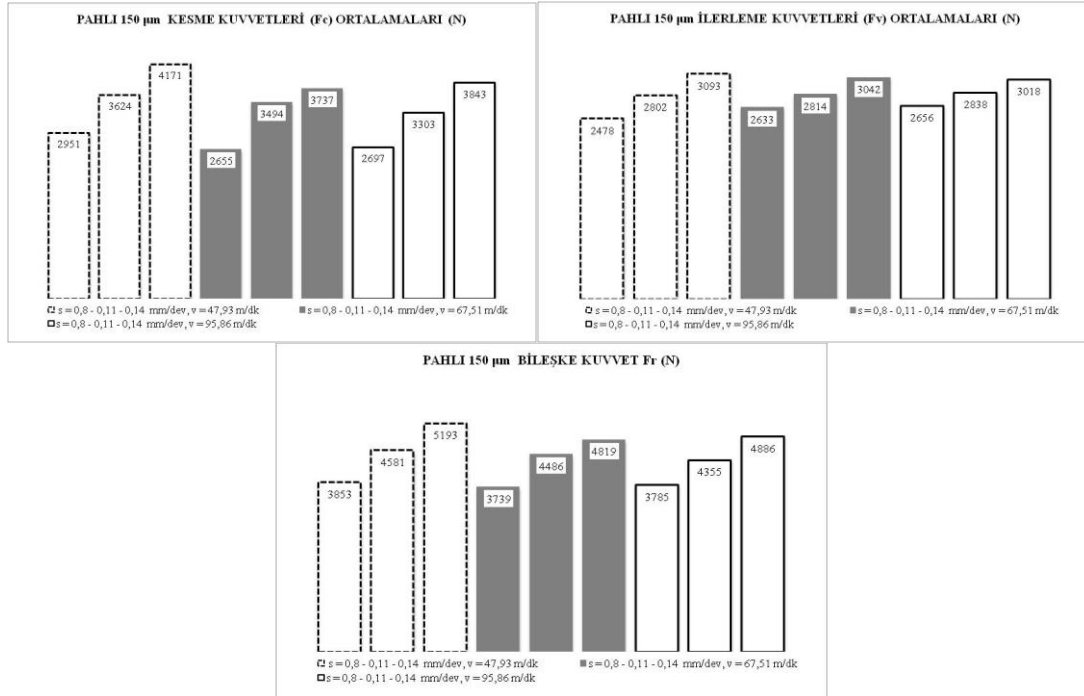
Şekil 6.25. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı pahlı 30 µm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Pahlı 50 µm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıktıkça arttığı görülmektedir (Şekil 6.26).



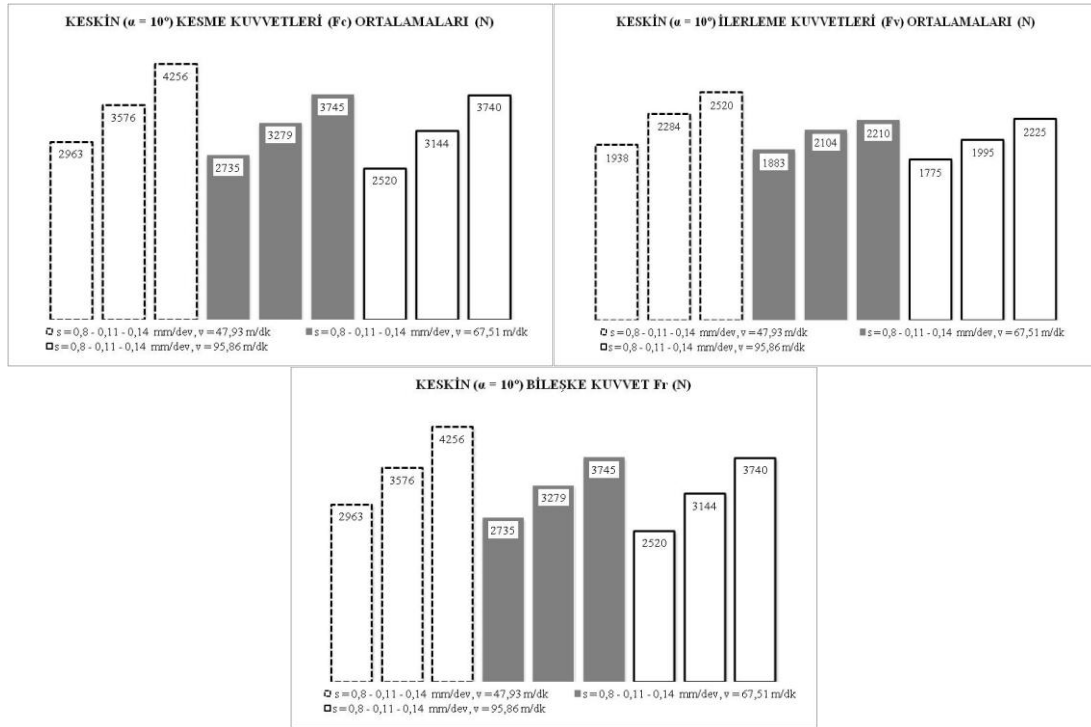
Şekil 6.26. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı pahlı 50 µm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Pahlı 150  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıka artığı görülmektedir (Şekil 6.27).



Şekil 6.27. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı pahlı 150  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Keskin kenar takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı kesme hızlarında ilerleme hızı artıka artığı görülmektedir (Şekil 6.28).



Şekil 6.28. Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

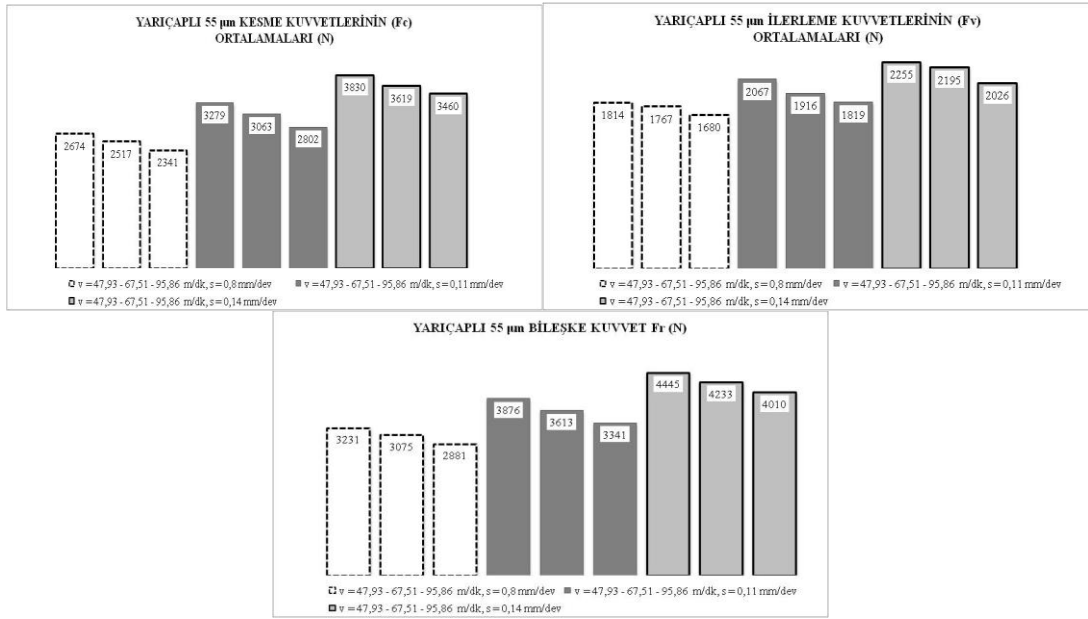
Ortogonal kesme işleminde kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı kesme şartlarında  $30 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $150 \mu\text{m}$ , keskin kenarlı takımların genel olarak ilerleme hızı arttıkça kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri arttığı görülmektedir.

### 6.2.3 Farklı kesme hızlarında takımların kesme kuvveti açısından karşılaştırılması

İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı olarak yarıçaplı, pahlı ve keskin kenarlı takımların deneysel sonuçları kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar kesme işlemi başlamasından bitişine kadar alınan kesme ve ilerleme kuvvetlerinin değerlerinin ortalamaları alınarak grafiksel olarak gösterilmiştir. Buradaki grafiklerden yararlanarak kesme hızlarının  $F_c$  ve  $F_v$  kuvvetlerine etkisi incelenmiştir.

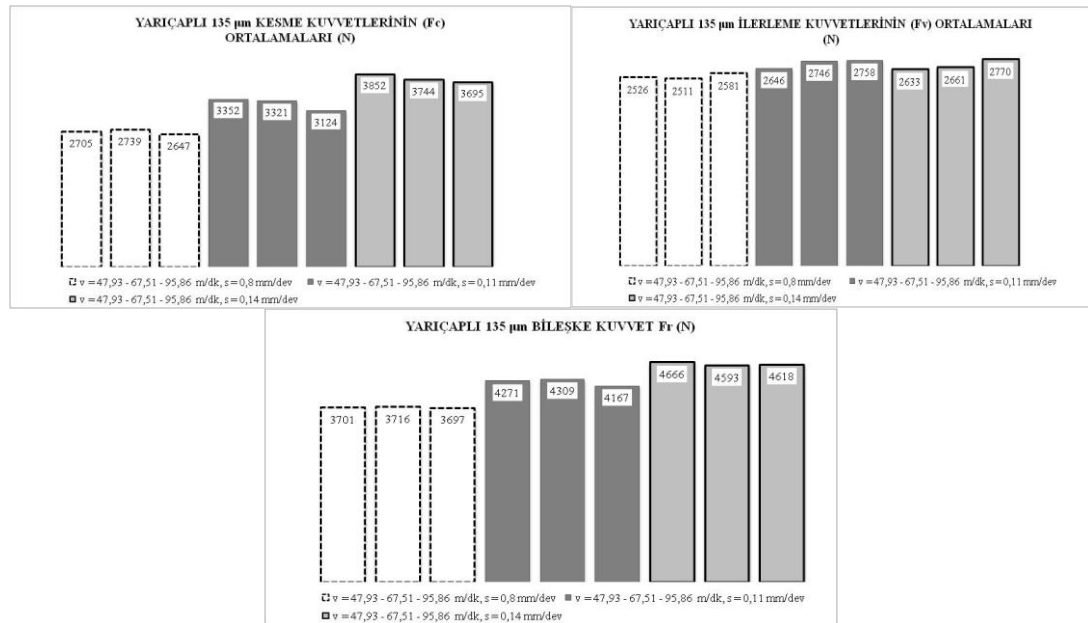
#### 6.2.3.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar

Yarıçaplı  $55 \mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında kesme hızı arttıkça azaldığı görülmektedir (Şekil 6.29).



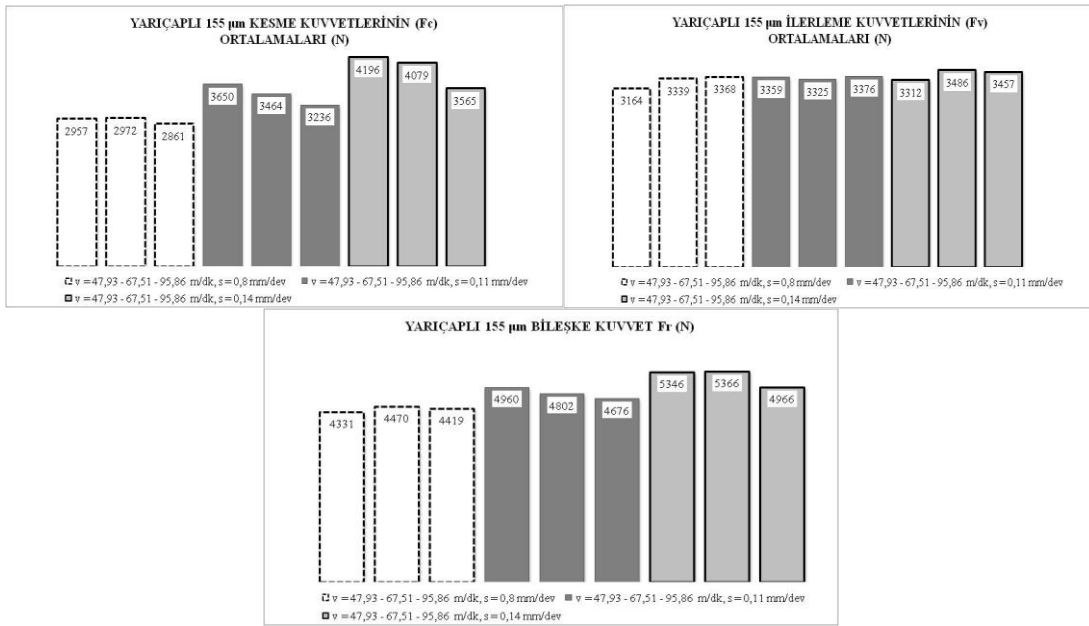
Şekil 6.29. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı yarıçaplı 55 µm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Yarıçaplı 135 µm takımın kesme kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında kesme hızı arttıkça azaldığı görülmektedir. 67 kesme hızında 0,08 mm/dev ilerleme hızında en yüksek kesme kuvvetine sahiptir. İlerleme kuvvetlerine bakıldığında düzenli bir eğilim görülmez (Şekil 6.30).



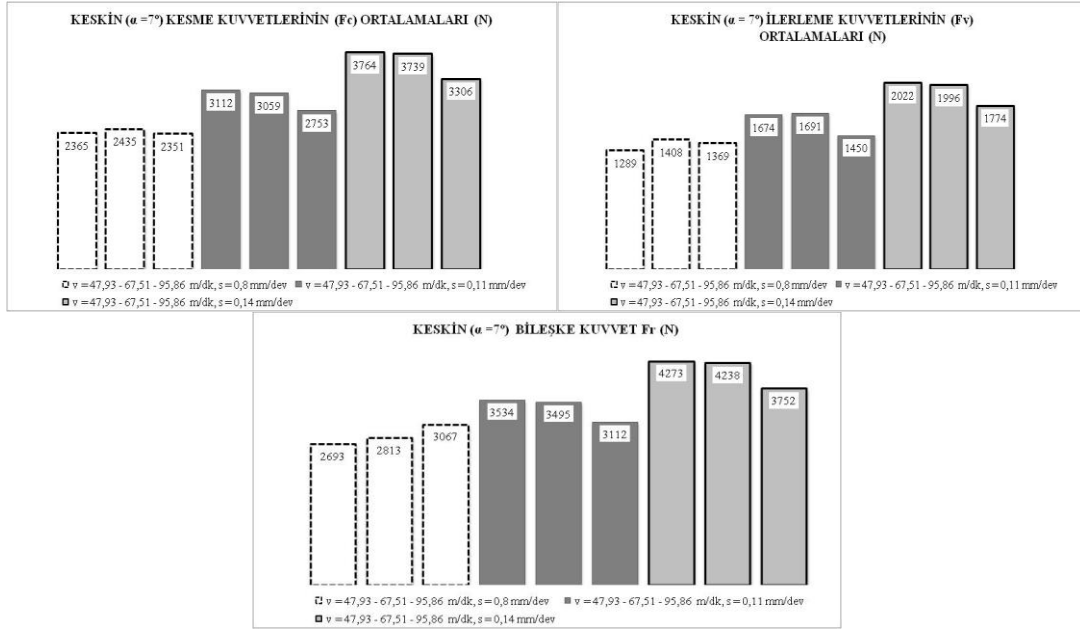
Şekil 6.30. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı yarıçaplı 135 µm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Yarıçaplı 155 µm takımın kesme kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında kesme hızı artkça azaldığı görülmektedir. 67 kesme hızında 0,08 mm/dev ilerleme hızında en yüksek kesme kuvvetine sahiptir. İlerleme ve bileşke kuvvetlerine bakıldığında düzenli bir eğilim görülmez (Şekil 6.31).



Şekil 6.31. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı yarıçaplı 155 µm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Keskin kenarlı takımın kesme kuvvetlerinin, aynı ilerleme hızlarında kesme hızı artkça azaldığı görülmektedir. 67 kesme hızında 0,08 mm/dev ilerleme hızında en yüksek kesme kuvvetine sahiptir. İlerleme ve bileşke kuvvetlerine bakıldığında düzenli bir eğilim görülmez (Şekil 6.32).



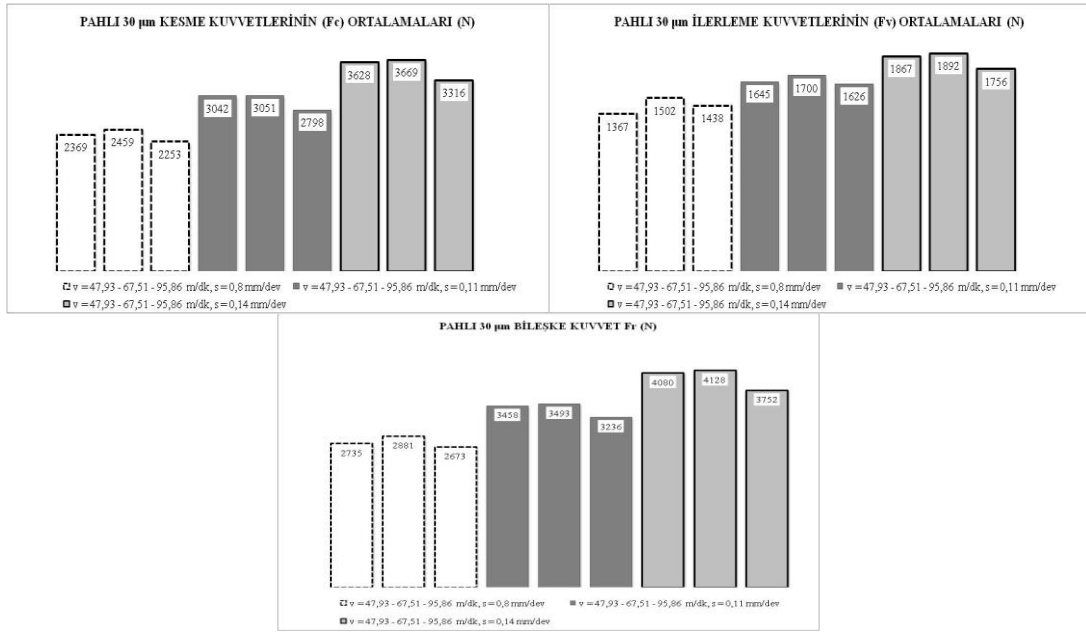
Şekil 6.32. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Ortogonal kesme işleminde ilerleme hızları aynı kesme hızları farklı kesme şartlarında 55  $\mu\text{m}$ , 135  $\mu\text{m}$ , 155  $\mu\text{m}$ , keskin kesici kenarlı takımların genel olarak kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerin azalmaktadır. Sadece 55  $\mu\text{m}$  takımın kesme hızı arttıkça ilerleme ve bileşke kuvvetlerin azalmakta diğer uçlar düzenli bir dağılım görülmektedir.

### 6.2.3.2 Pahlı kesici kenarlı takımlar

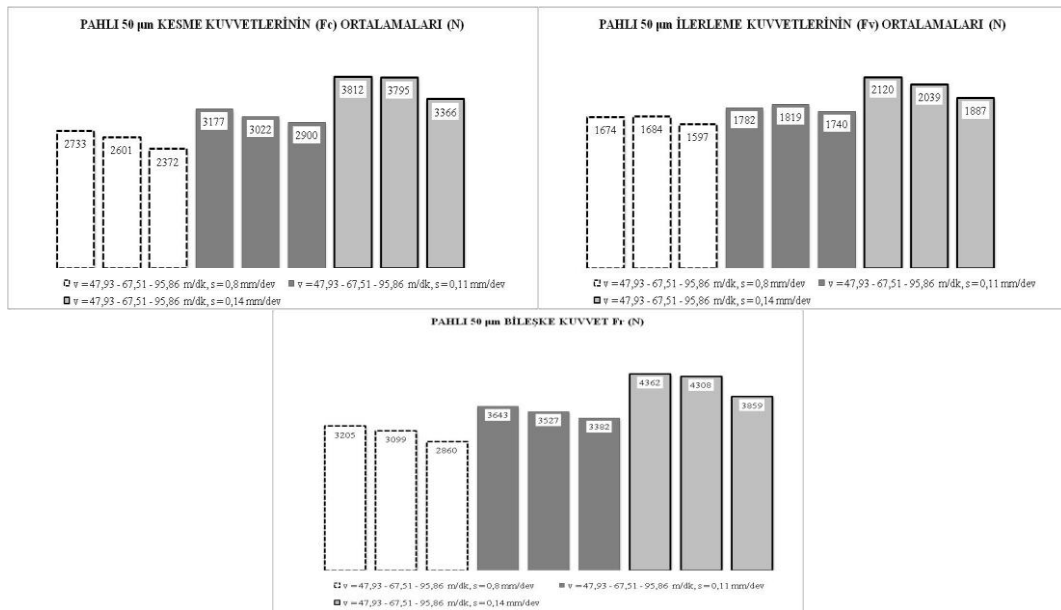
Pahlı 30  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında 67 kesme hızlarında en büyük değerde olduğunu görülmektedir (Şekil 6.33).





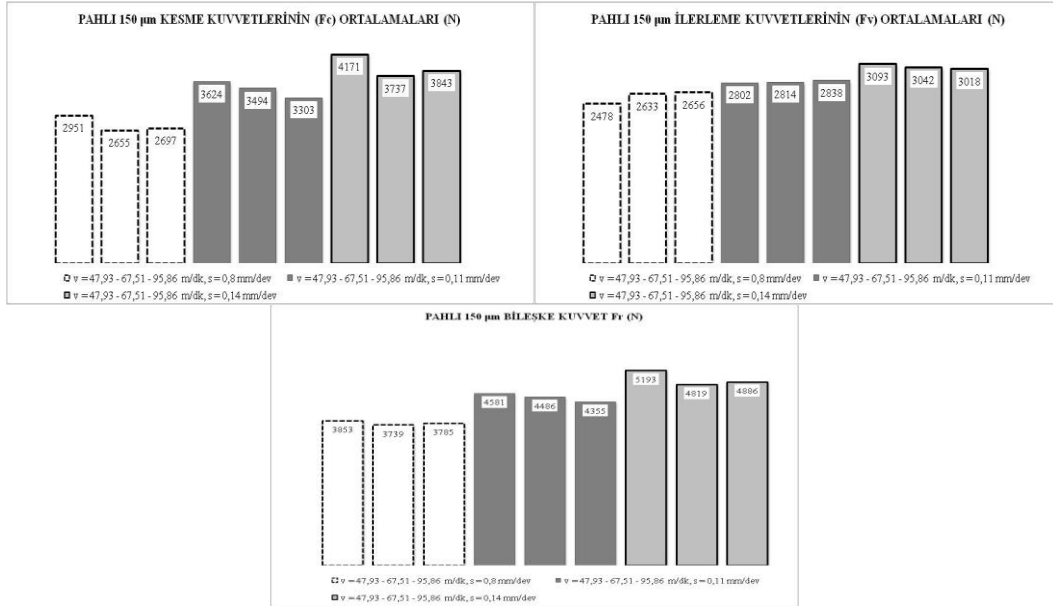
Şekil 6.33. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı pahlı 30 μm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Pahlı 50 μm takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında kesme hızı artıçça azaldığı görülmektedir. 67 m/dak kesme hızında 0,14 mm/dev ilerleme hızında en yüksek kesme kuvvetine sahiptir. 67 m/dak kesme hızında 0,11 – 0,14 mm/dev ilerleme hızında en büyük ilerleme kuvvetine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.34).



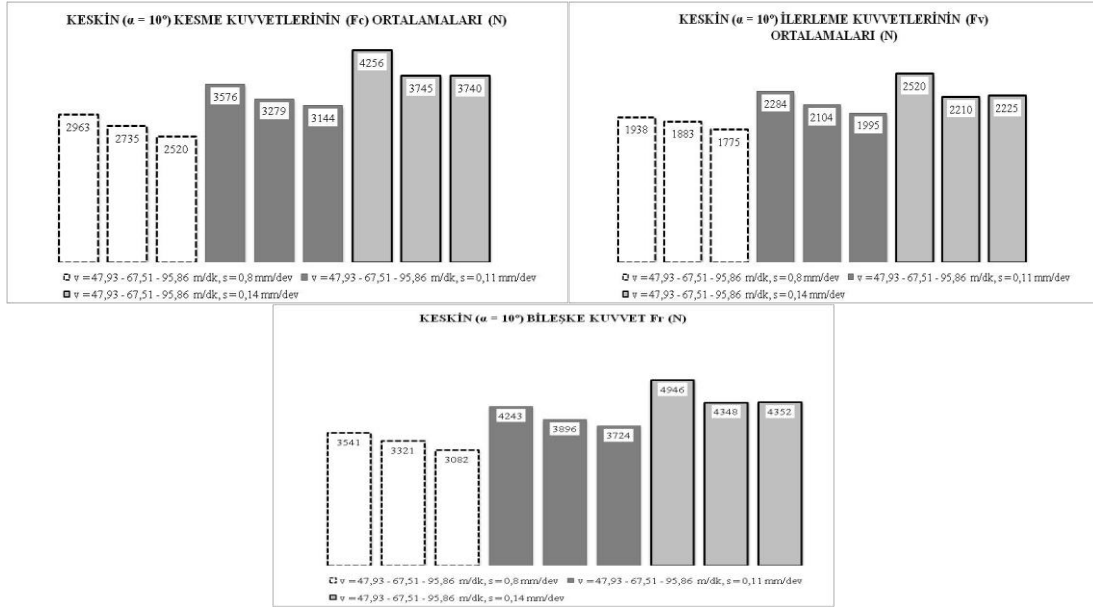
Şekil 6.34. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı pahlı 50  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Pahlı 150  $\mu\text{m}$  kenar uçlu kalemin kesme ve ilerleme kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında kesme hızı artıkça düzenli bir eğilim göstermemiştir (Şekil 6.35).



Şekil 6.35. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı pahlı 150  $\mu\text{m}$  takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Keskin kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin aynı ilerleme hızlarında kesme hızı artıkça azaldığı görülmektedir. 96 m/dak kesme hızında 0,14 mm/dev ilerleme hızında en büyük ilerleme ve bileşke kuvvetine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.36).



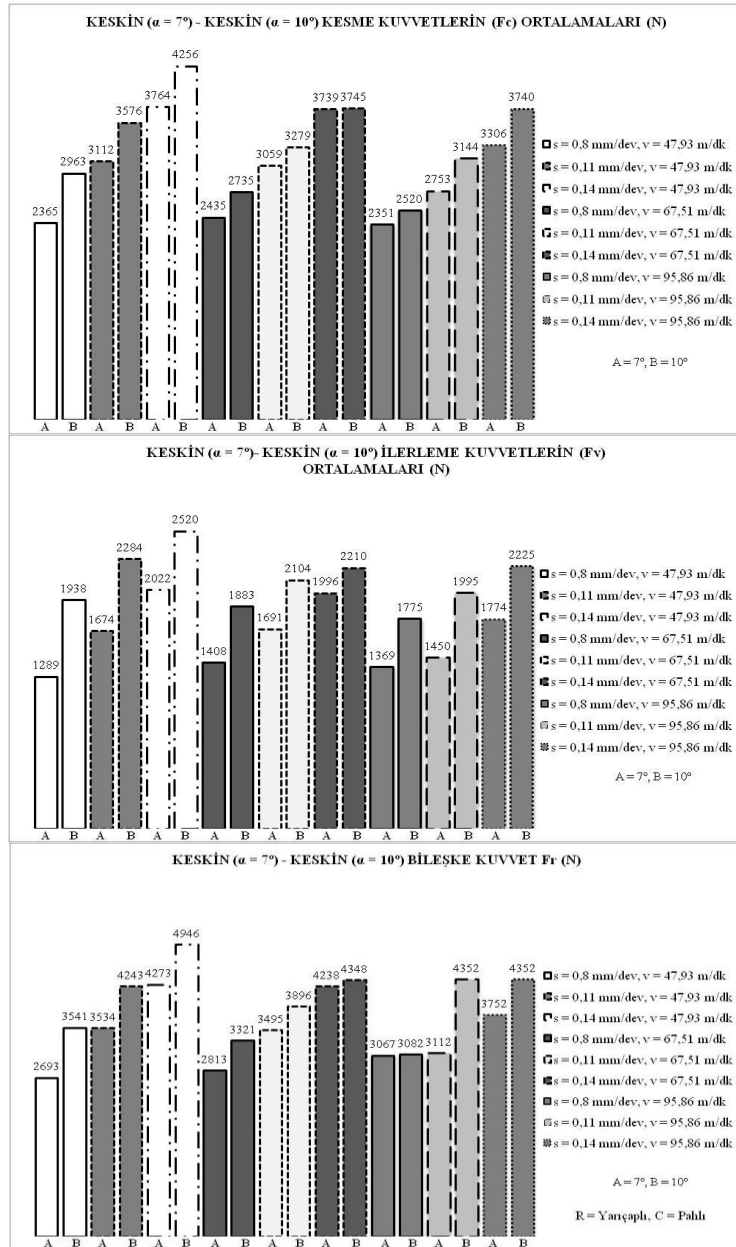
Şekil 6.36. İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kenarlı takımın kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri

Ortogonal kesme işleminde ilerleme hızları aynı kesme hızları farklı kesme şartlarında  $30 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $150 \mu\text{m}$ , keskin kenarlı takımlarda genel olarak kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerin azalmaktadır.

#### 6.2.4. Yarıçaplı ve pahlı kesici kenarlı takımların bütün kesme şartları için karşılaştırılması

Kesme şartları aynı olan yarıçaplı, pahlı ve keskin kenarlı takımların deneysel sonuçları kıyaslanmıştır. Yarıçaplı  $55 \mu\text{m}$  – pahlı  $50 \mu\text{m}$ , yarıçaplı  $155 \mu\text{m}$  – pahlı  $150 \mu\text{m}$  kıyaslanmıştır. Kalemlerin açılarında sadece boşluk açıları (yarıçaplı  $\alpha = 7^\circ$ , pahlı  $\alpha = 10^\circ$ ) farklıdır. Boşluk açıların farklı olduğu için keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) – keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kıyaslanması yapılmıştır.

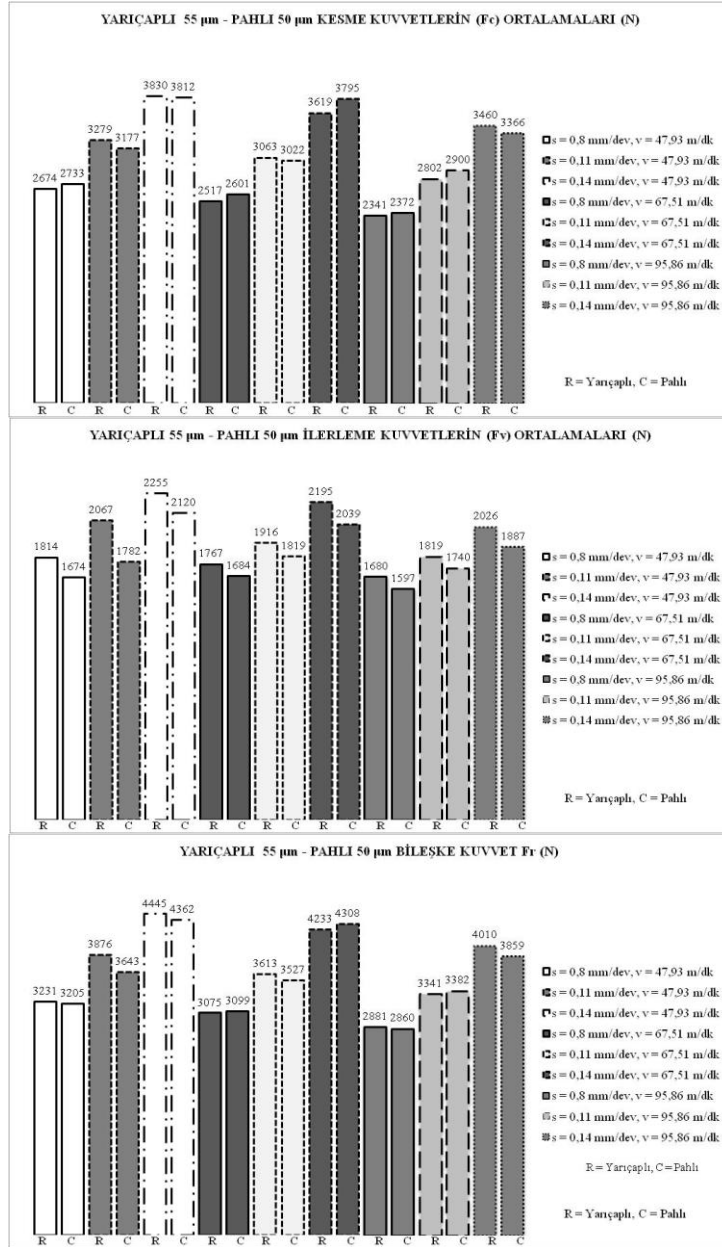
Keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) – keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kenarlı takımların aynı kesme ve ilerleme hızlarında deney sonuçlarında kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinde keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) en büyük kuvvetlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.37).



Şekil 6.37. Keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) - keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin karşılaştırılması

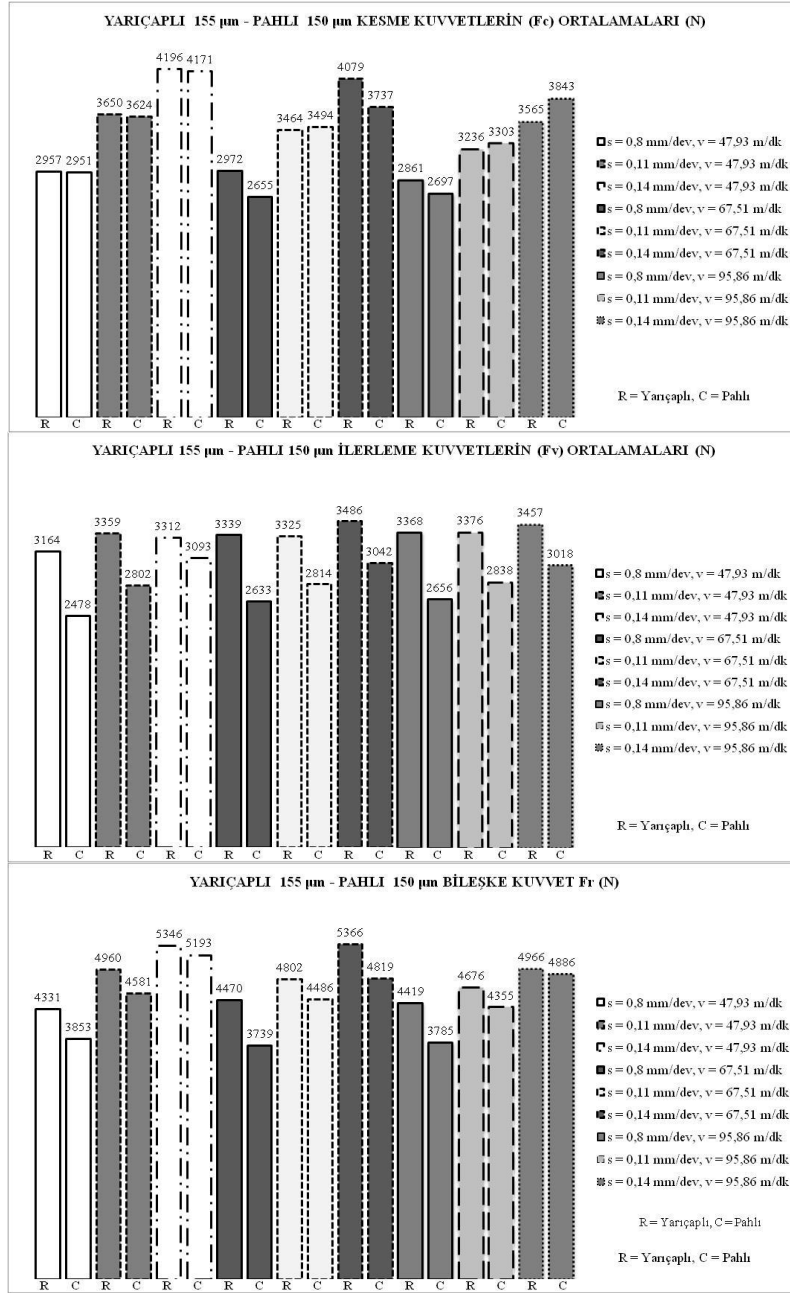
Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  – pahlı 50  $\mu\text{m}$  kenarlı takımların aynı kesme ve ilerleme hızlarında deney sonuçlarında 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında, pahlı 50  $\mu\text{m}$  en büyük kesme kuvvetlerine sahiptir. Diğer şartlarda düzgün bir eğilim görülmemektedir. İlerleme kuvvetlerinde ise yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  en büyük kuvvetlere sahip olduğu görülmektedir. Bileşke kuvvetlerinde 67 m/dak – 0,08 mm/dev, 67 m/dak – 0,11 mm/dev, 96 m/dak – 0,11 mm/dev şartlarında pahlı 50  $\mu\text{m}$  en büyük bileşke kuvvetlerine sahiptir. Diğer

şartlarda yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  en büyük bileşke kuvvetlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.38).



Şekil 6.38. Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  – pahlı 50  $\mu\text{m}$  kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin karşılaştırılması

Yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  – pahlı 150  $\mu\text{m}$  kenarlı takımların 0.11 mm/dev – 67 m/dk, 0.11 mm/dev – 96 m/dk, 0.14 mm/dev – 96 m/dk şartlarında pahlı 150  $\mu\text{m}$  en büyük kesme kuvvetlerine sahiptir. Diğer şartlarda yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  en büyük kesme kuvvetlerine sahiptir. İlerleme ve bileşke kuvvetlerinde ise yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  en büyük kuvvetlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.39).



Şekil 6.39. Yarıçaplı 155 µm – pahlı 150 µm kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetlerinin karşılaştırılması

### 6.3. Kesme Kuvvetlerinin Deneysel ve FEM Sonuçlarının Kıyaslanması

Yarıçaplı, pahlı ve keskin kalem kenar uçlarının deneysel sonuçları ile DEFORM – 2D programında elde edilen FEM simülasyon sonuçları kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar kesme kuvvetlerinin ortalamaları alınarak yapılmıştır.

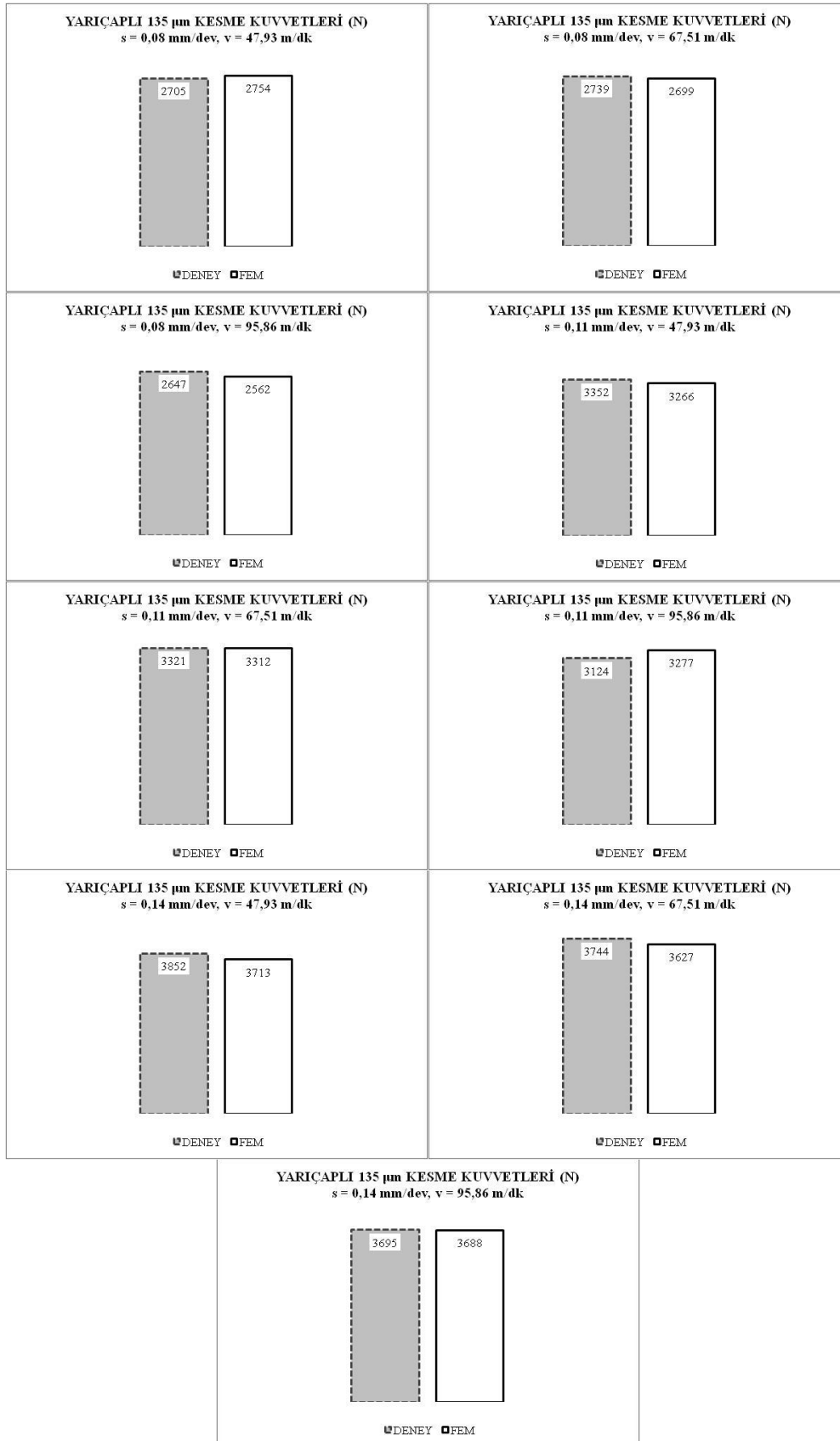
### 6.3.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar

Yarıçaplı takımların kesme kuvvetlerinin deney ile FEM simülasyonu sonuçlarının kıyaslamaları kesme kuvvetlerinin ortalamaları alınarak yapılmıştır.

Yarıçaplı 135  $\mu\text{m}$  kenarlı takımında genel olarak FEM simülasyonları elde edilen kesme kuvvetleri deney sonuçlarına göre düşük çıkmıştır (Şekil 6.40). Yarıçaplı takımların kesme kuvvetlerinin FEM simülasyonu elde edilen verilerin hataları Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Yarıçaplı 135  $\mu\text{m}$  FEM simülasyonlarının hataları

Takım	Kesme Şartları	% Hata
135 $\mu\text{m}$	$s = 0,08 \text{ mm/dev} - v = 47,93 \text{ m/dak}$	2
	$s = 0,08 \text{ mm/dev} - v = 67,51 \text{ m/dak}$	1
	$s = 0,08 \text{ mm/dev} - v = 95,86 \text{ m/dak}$	3
	$s = 0,11 \text{ mm/dev} - v = 47,93 \text{ m/dak}$	2
	$s = 0,11 \text{ mm/dev} - v = 67,51 \text{ m/dak}$	0,2
	$s = 0,11 \text{ mm/dev} - v = 95,86 \text{ m/dak}$	5
	$s = 0,14 \text{ mm/dev} - v = 47,93 \text{ m/dak}$	3
	$s = 0,14 \text{ mm/dev} - v = 67,51 \text{ m/dak}$	3
	$s = 0,14 \text{ mm/dev} - v = 95,86 \text{ m/dak}$	0,01



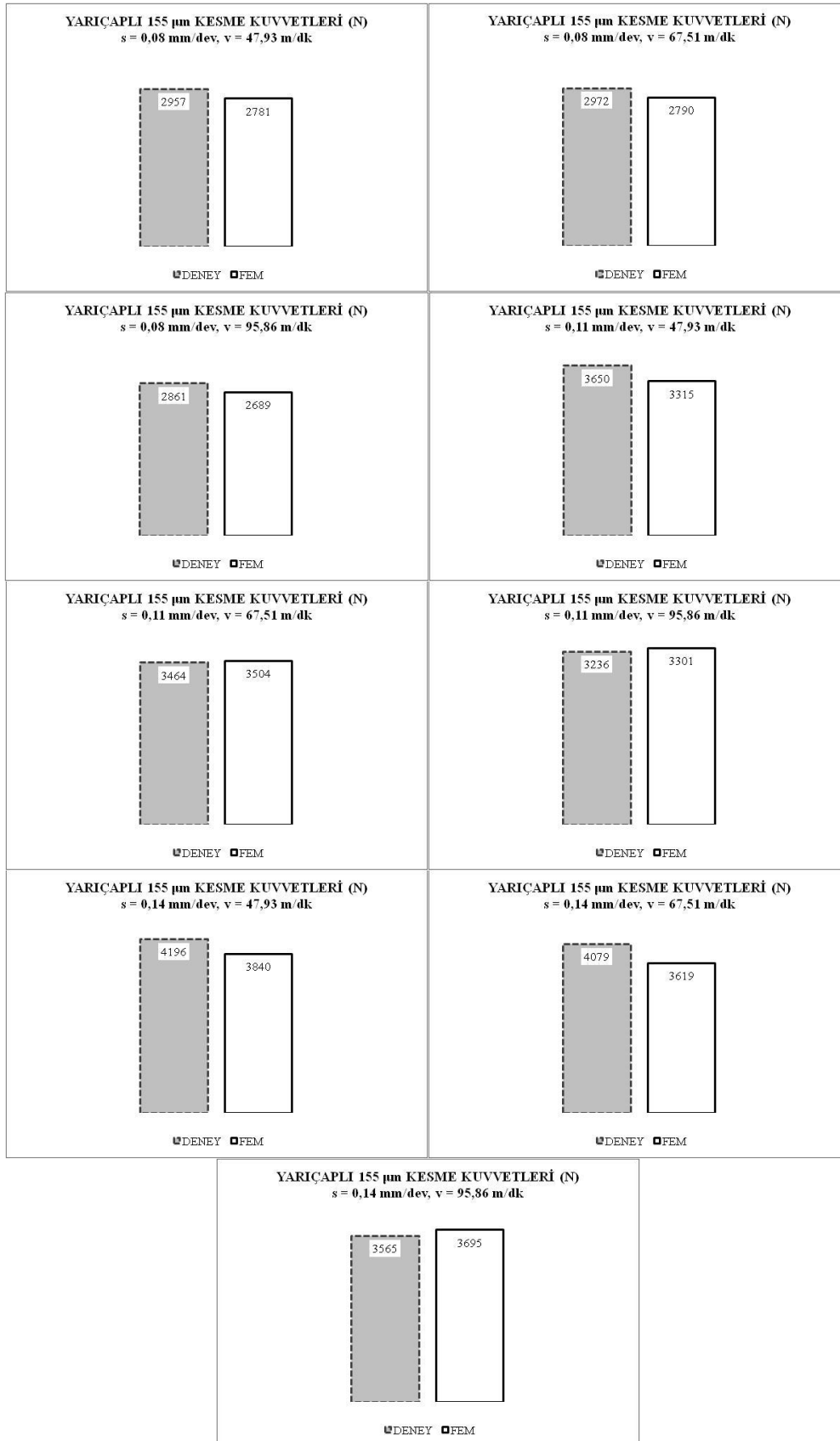
Şekil 6.40. Yarıçaplı 135 µm deney ve FEM ortalamaları



Yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  kenarlı takımda genel olarak FEM simülasyonları elde edilen kesme kuvvetleri deney sonuçlarına göre düşük çıkmıştır (Şekil 6.41). Yarıçaplı takımların kesme kuvvetlerinin FEM simülasyonu elde edilen verilerin hataları Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  FEM simülasyonlarının hataları

<b>Takım</b>	<b>Kesme Şartları</b>	<b>% Hata</b>
155 $\mu\text{m}$	s = 0,08 mm/dev - v = 47,93 m/dak	6
	s = 0,08 mm/dev - v = 67,51 m/dak	6
	s = 0,08 mm/dev - v = 95,86 m/dak	6
	s = 0,11 mm/dev - v = 47,93 m/dak	10
	s = 0,11 mm/dev - v = 67,51 m/dak	2
	s = 0,11 mm/dev - v = 95,86 m/dak	2
	s = 0,14 mm/dev - v = 47,93 m/dak	9
	s = 0,14 mm/dev - v = 67,51 m/dak	5
	s = 0,14 mm/dev - v = 95,86 m/dak	4

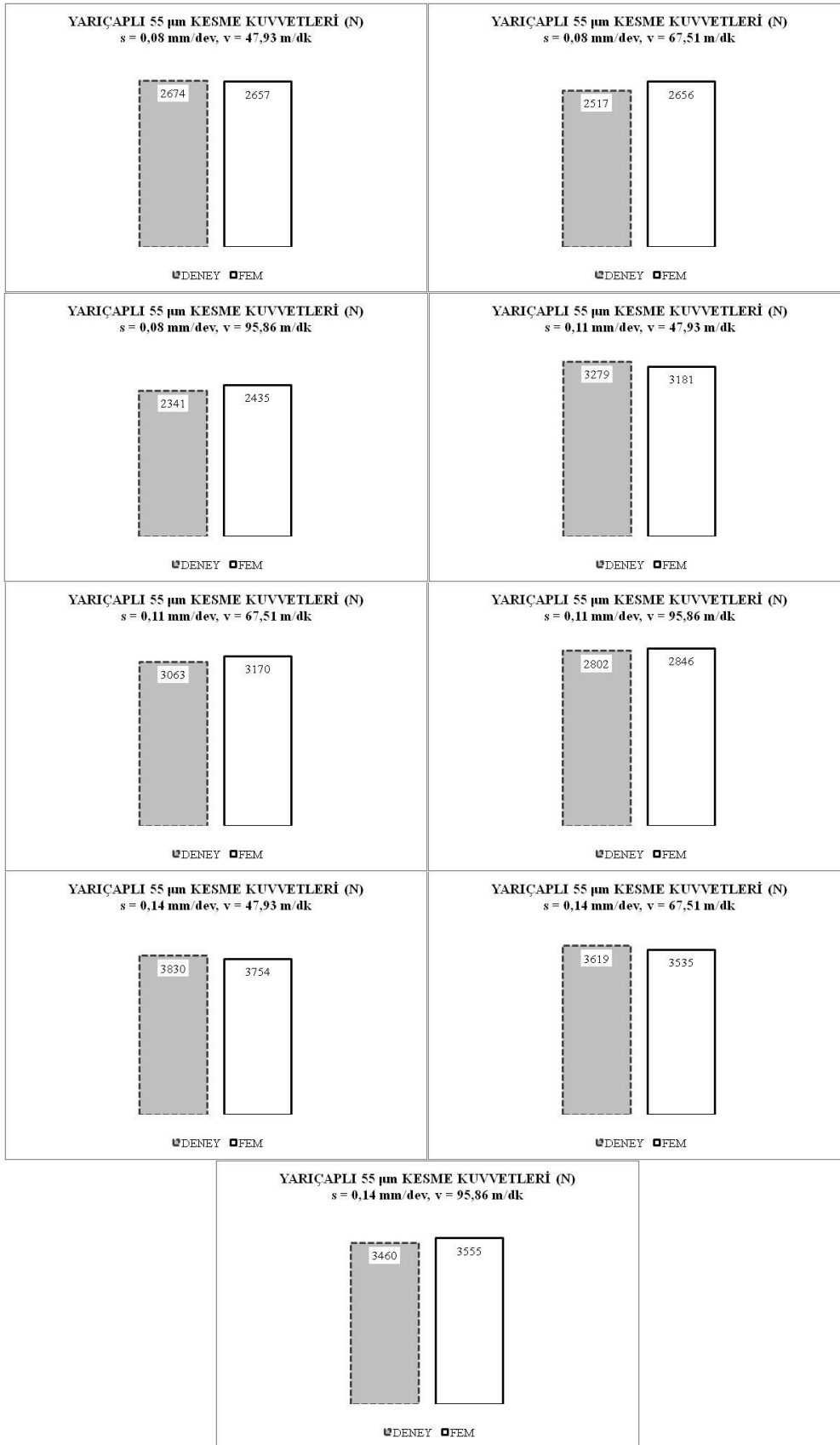


Şekil 6.41. Yarıçaplı 155 µm deney ve FEM ortalamaları

Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  kenarlı takımda kesme kuvvetlerinin deney ile FEM simülasyonu sonuçlarının Şekil 6.42’de kıyaslanmıştır. Yarıçaplı takımların kesme kuvvetlerinin FEM simülasyonu elde edilen verilerin hataları Tablo 6.3’de gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  FEM simülasyonlarının hataları

<b>Takım</b>	<b>Kesme Şartları</b>	<b>% Hata</b>
55 $\mu\text{m}$	s = 0,08 mm/dev - v = 47,93 m/dak	1
	s = 0,08 mm/dev - v = 67,51 m/dak	6
	s = 0,08 mm/dev - v = 95,86 m/dak	4
	s = 0,11 mm/dev - v = 47,93 m/dak	3
	s = 0,11 mm/dev - v = 67,51 m/dak	4
	s = 0,11 mm/dev - v = 95,86 m/dak	2
	s = 0,14 mm/dev - v = 47,93 m/dak	2
	s = 0,14 mm/dev - v = 67,51 m/dak	2
	s = 0,14 mm/dev - v = 95,86 m/dak	3



Şekil 6.42. Yarıçaplı 55 µm deney ve FEM ortalamaları

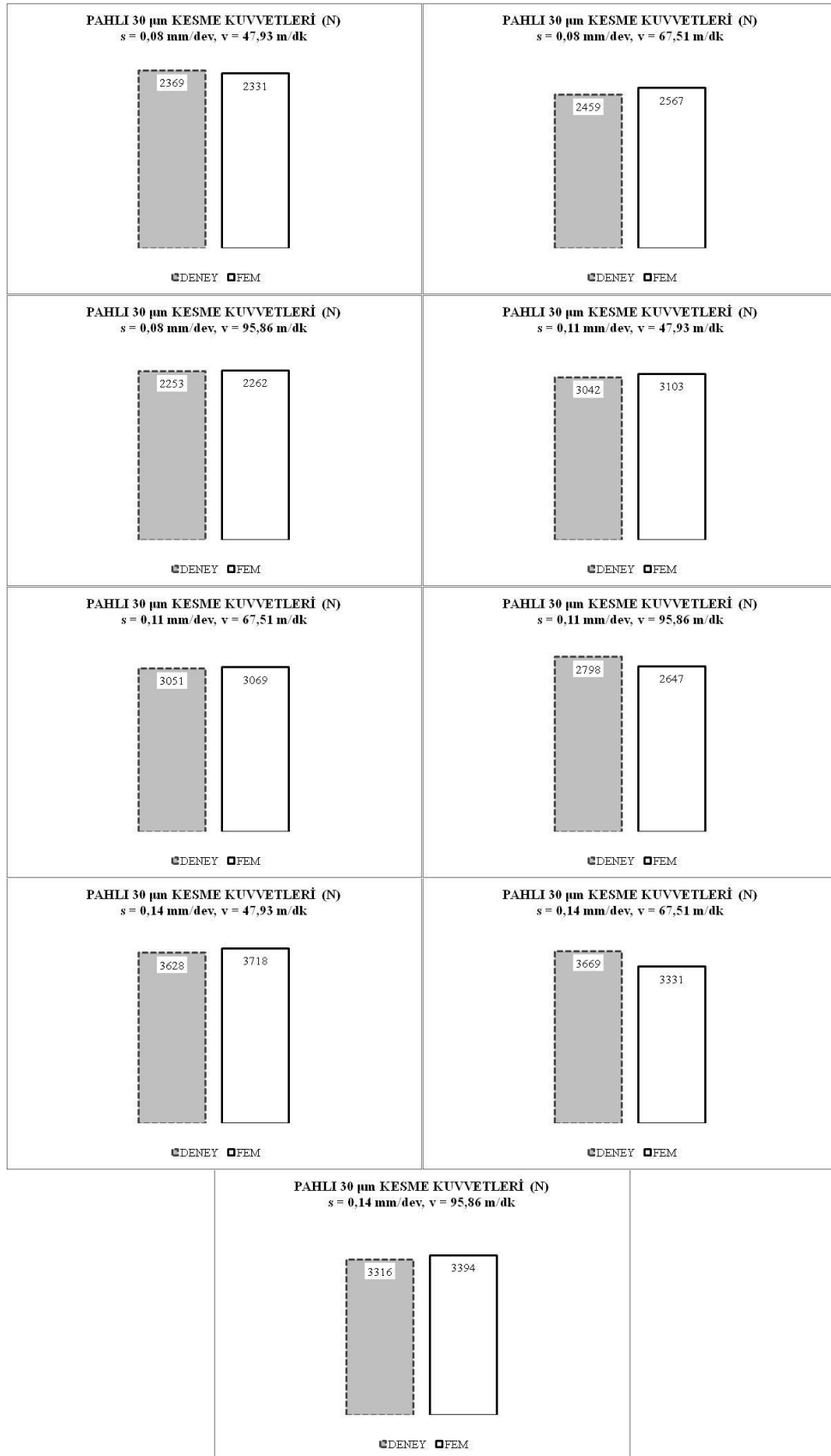
### 6.3.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar

Pahlı takımların kesme kuvvetlerinin deney ile FEM simülasyonu sonuçlarının kıyaslamaları kesme kuvvetlerinin ortalamaları alınarak yapılmıştır.

Pahlı 30  $\mu\text{m}$  kenarlı takımda kesme kuvvetlerinin deney ile FEM simülasyonu sonuçlarının Şekil 6.43’de gösterilmiştir. Pahlı takımların kesme kuvvetlerinin FEM simülasyonu elde edilen verilerin hataları Tablo 6.4’de gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Pahlı 30  $\mu\text{m}$  FEM simülasyonlarının hataları

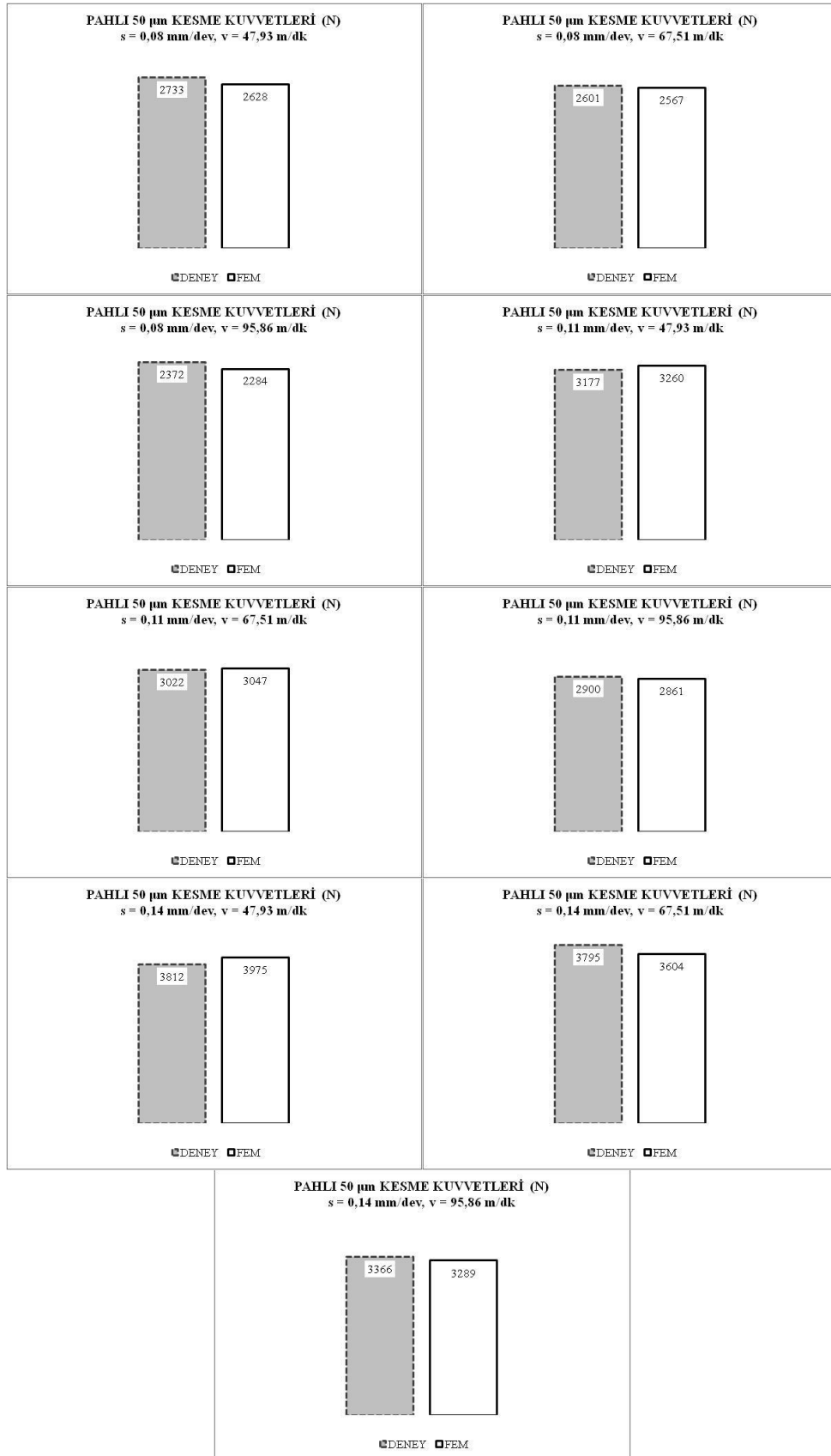
Takım	Kesme Şartları	% Hata
30 $\mu\text{m}$	$s = 0,08 \text{ mm/dev} - v = 47,93 \text{ m/dak}$	1
	$s = 0,08 \text{ mm/dev} - v = 67,51 \text{ m/dak}$	5
	$s = 0,08 \text{ mm/dev} - v = 95,86 \text{ m/dak}$	0.4
	$s = 0,11 \text{ mm/dev} - v = 47,93 \text{ m/dak}$	2
	$s = 0,11 \text{ mm/dev} - v = 67,51 \text{ m/dak}$	0.6
	$s = 0,11 \text{ mm/dev} - v = 95,86 \text{ m/dak}$	5
	$s = 0,14 \text{ mm/dev} - v = 47,93 \text{ m/dak}$	3
	$s = 0,14 \text{ mm/dev} - v = 67,51 \text{ m/dak}$	10
	$s = 0,14 \text{ mm/dev} - v = 95,86 \text{ m/dak}$	3

Şekil 6.43. Pahlı 30  $\mu\text{m}$  deney ve FEM ortalamaları

Pahlı 50  $\mu\text{m}$  kenarlı takımda kesme kuvvetlerinin deney ile FEM simülasyonu sonuçlarının Şekil 6.44’de gösterilmiştir. Pahlı takımların kesme kuvvetlerinin FEM simülasyonu elde edilen verilerin hataları Tablo 6.5’de gösterilmiştir.

Tablo 6.5. Pahlı 50  $\mu\text{m}$  FEM simülasyonlarının hataları

<b>Takım</b>	<b>Kesme Şartları</b>	<b>% Hata</b>
50 $\mu\text{m}$	s = 0,08 mm/dev - v = 47,93 m/dak	3
	s = 0,08 mm/dev - v = 67,51 m/dak	1
	s = 0,08 mm/dev - v = 95,86 m/dak	3
	s = 0,11 mm/dev - v = 47,93 m/dak	3
	s = 0,11 mm/dev - v = 67,51 m/dak	1
	s = 0,11 mm/dev - v = 95,86 m/dak	1
	s = 0,14 mm/dev - v = 47,93 m/dak	4
	s = 0,14 mm/dev - v = 67,51 m/dak	5
	s = 0,14 mm/dev - v = 95,86 m/dak	2



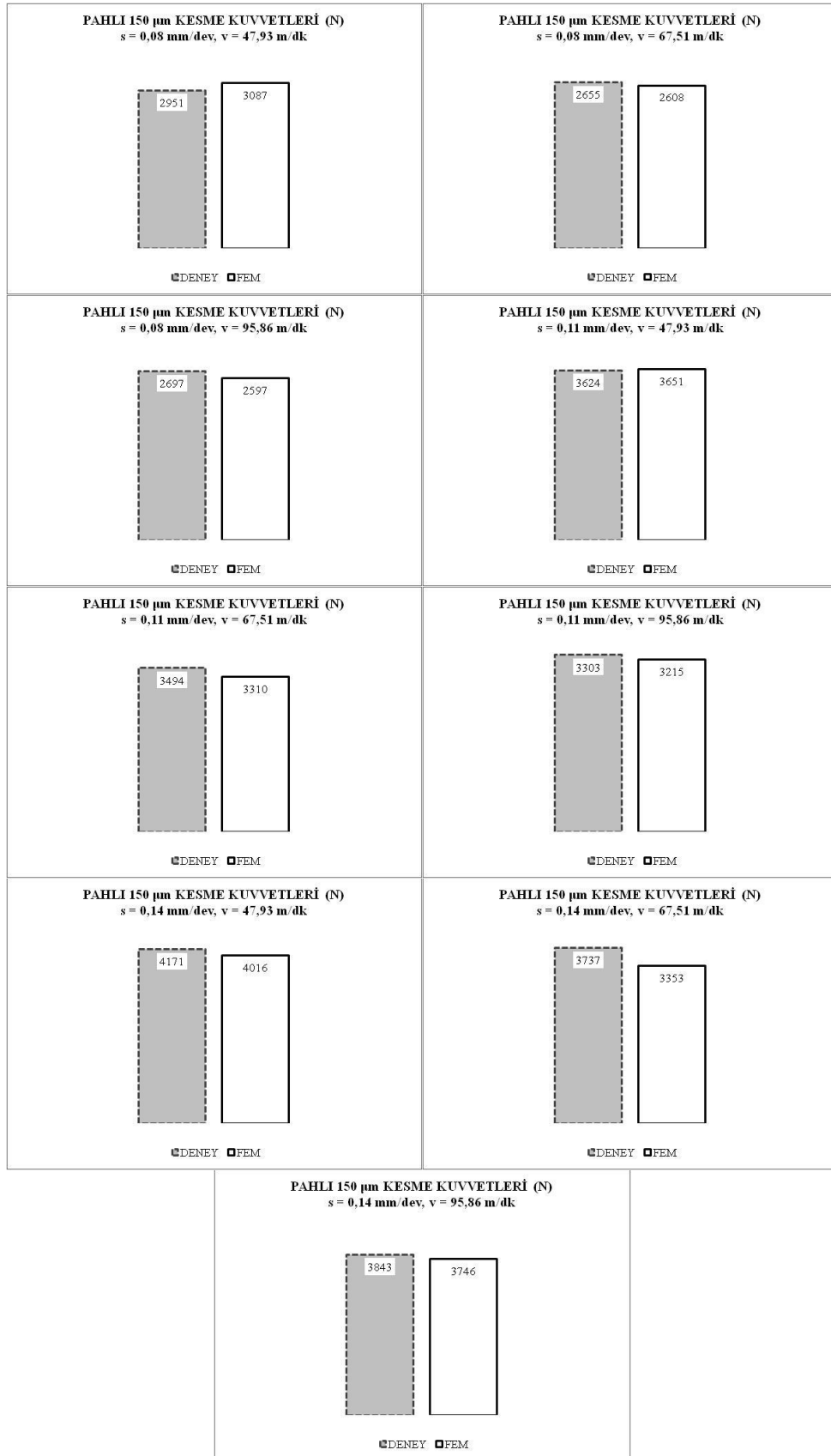
Şekil 6.44. Pahlı 50 µm deney ve FEM ortalamaları



Pahlı 150  $\mu\text{m}$  kenarlı takımda kesme kuvvetlerinin deney ile FEM simülasyonu sonuçlarının Şekil 6.45’de gösterilmiştir. Pahlı takımların kesme kuvvetlerinin FEM simülasyonu elde edilen verilerin hataları Tablo 6.6’de gösterilmiştir.

Tablo 6.6. Pahlı 150  $\mu\text{m}$  FEM simülasyonlarının hataları

<b>Takım</b>	<b>Kesme Şartları</b>	<b>% Hata</b>
150 $\mu\text{m}$	s = 0,08 mm/dev - v = 47,93 m/dak	5
	s = 0,08 mm/dev - v = 67,51 m/dak	1
	s = 0,08 mm/dev - v = 95,86 m/dak	3
	s = 0,11 mm/dev - v = 47,93 m/dak	1
	s = 0,11 mm/dev - v = 67,51 m/dak	5
	s = 0,11 mm/dev - v = 95,86 m/dak	2
	s = 0,14 mm/dev - v = 47,93 m/dak	3
	s = 0,14 mm/dev - v = 67,51 m/dak	11
	s = 0,14 mm/dev - v = 95,86 m/dak	2

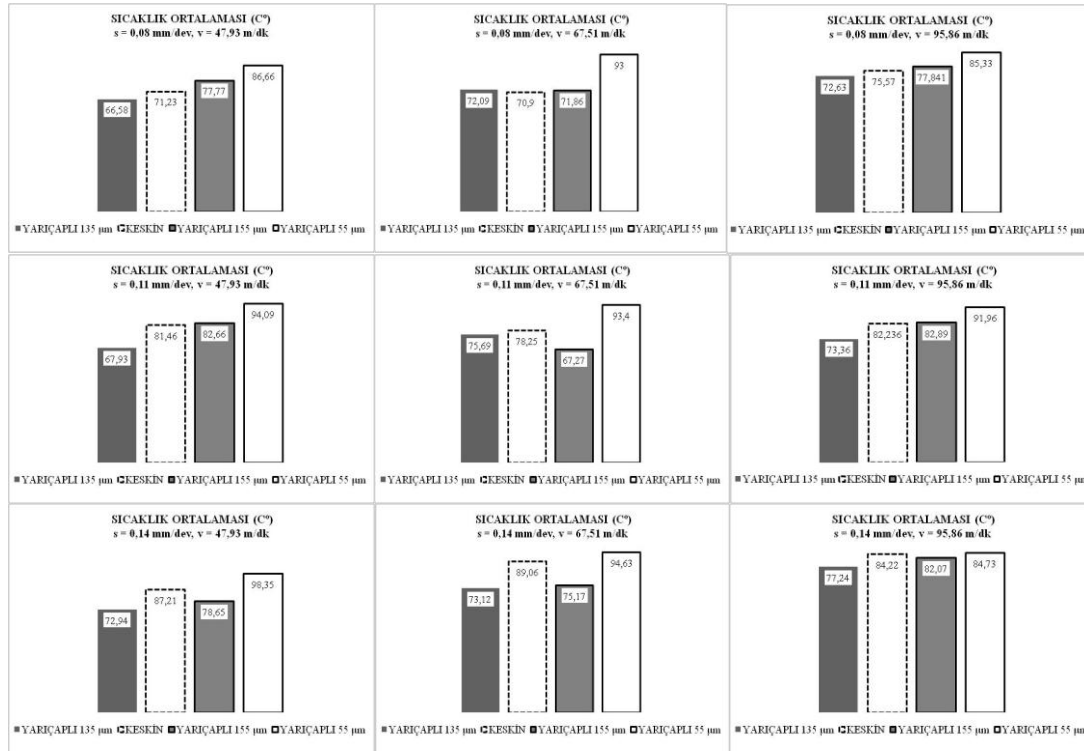
Şekil 6.45. Pahlı 150  $\mu$ m deney ve FEM ortalamaları

## 6.4. Takım Talaş Ara Yüzeydeki Sıcaklıkların Deneysel Sonuçlarının Kıyaslanması

Takımların takım – talaş ara yüzeylerinin sıcaklık farklarını belirlemek için takıma gömülmüş ısı çift yöntemi kullanıldı. Kesme şartları aynı olan yarıçaplı, pahlı ve keskin kenarlı takımların deneysel sonuçları ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar kesme işlemi başlamasından bitişine kadar alınan sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak grafiksel olarak gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar saniyede 5 veri alınmış ve 2 kez tekrar edilmiştir. Sıcaklık ölçülmesinde takıma gömülmüş ısı çifti kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü kesici kenara 0,7 mm uzaklıktan (Şekil 5.9) alınmıştır. Bütün deney kalemleri için aynı ölçüler geçerlidir.

### 6.4.1. Yarıçaplı kesici kenarlı takımlar

Ortogonal kesme işleminde aynı kesme ve ilerleme hızlarında yarıçaplı takımların sıcaklık ortalamalarının sıralanması Şekil 6.46’da gösterilmektedir.



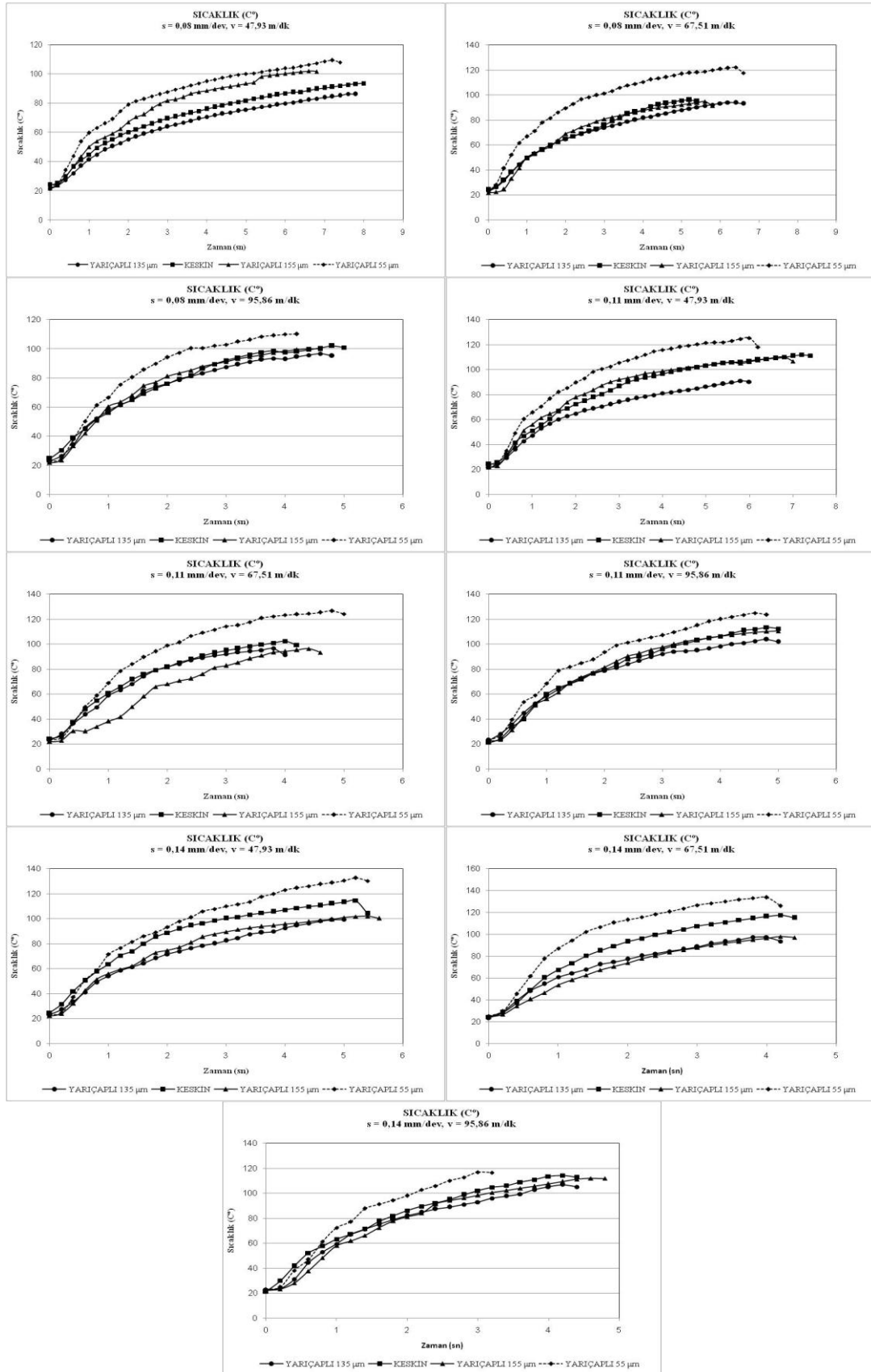
Şekil 6.46. Yarıçaplı takımların sıcaklıklarının karşılaştırılması

Ortogonal kesme işleminde aynı kesme ve ilerleme hızlarında yarıçaplı takımların büyükten küçüğe doğru sıcaklıkları sıralamaları tablo 6.7’de sıralanmıştır.

Tablo 6.7. Yarıçaplı takımların sıcaklıklarının sıralamaları

<b>Kesme Şartları</b>	<b>Sıcaklık Sıralamaları (Büyükten küçüğe doğru)</b>
0,08 mm/dev – 47,93 m/dk	55 $\mu$ m – 155 $\mu$ m – keskin – 135 $\mu$ m
0,11 mm/dev – 47,93 m/dk	55 $\mu$ m – 135 $\mu$ m – 155 $\mu$ m – keskin
0,14 mm/dev – 47,93 m/dk	55 $\mu$ m – 155 $\mu$ m – keskin – 135 $\mu$ m
0,08 mm/dev – 67,51 m/dk	55 $\mu$ m – 155 $\mu$ m – keskin – 135 $\mu$ m
0,11 mm/dev – 67,51 m/dk	55 $\mu$ m – keskin – 135 $\mu$ m – 155 $\mu$ m
0,14 mm/dev – 67,51 m/dk	55 $\mu$ m – 155 $\mu$ m – keskin – 135 $\mu$ m
0,08 mm/dev – 95,86 m/dk	55 $\mu$ m – keskin – 155 $\mu$ m – 135 $\mu$ m
0,11 mm/dev – 95,86 m/dk	55 $\mu$ m – keskin – 155 $\mu$ m – 135 $\mu$ m
0,14 mm/dev – 95,86 m/dk	55 $\mu$ m – keskin – 155 $\mu$ m – 135 $\mu$ m

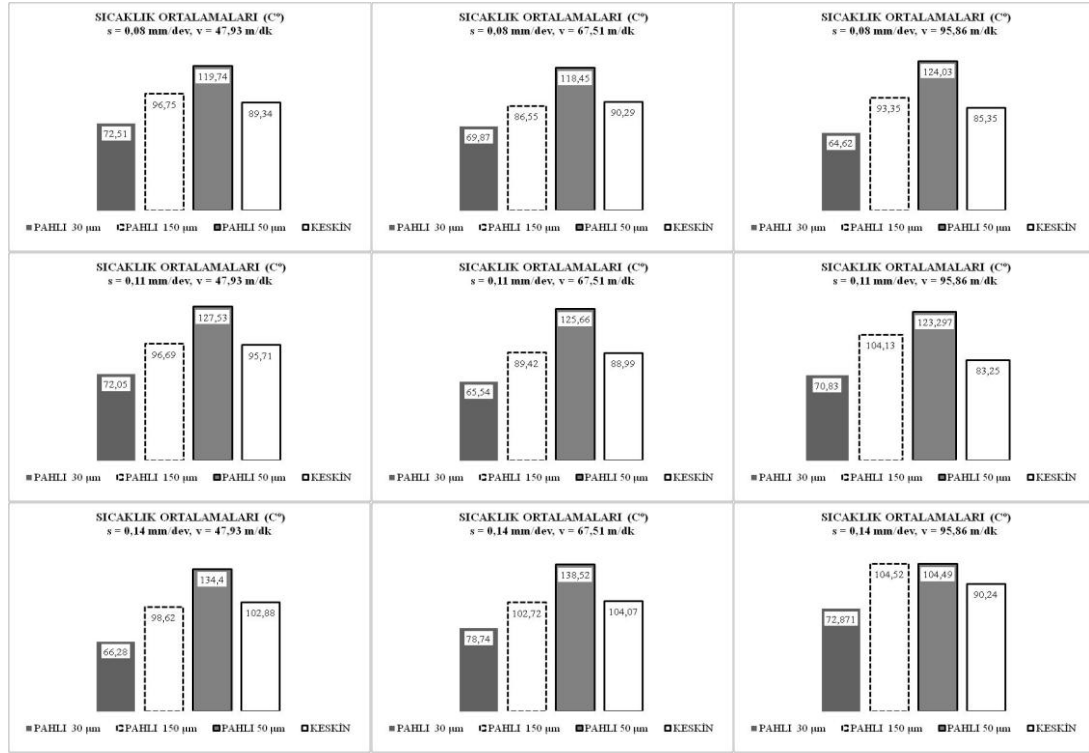
Aynı kesme ve ilerleme hızlarında yarıçaplı takımların sıcaklık dağılımları Şekil 6.47’ gösterilmektedir.



Şekil 6.47. Yarıçaplı takımların sıcaklık dağılımı

### 6.4.2. Pahlı kesici kenarlı takımlar

Ortogonal kesme işleminde aynı kesme ve ilerleme hızlarında pahlı takımların sıcaklık ortalamalarının sıralanması şekil 6.48’de gösterilmektedir.



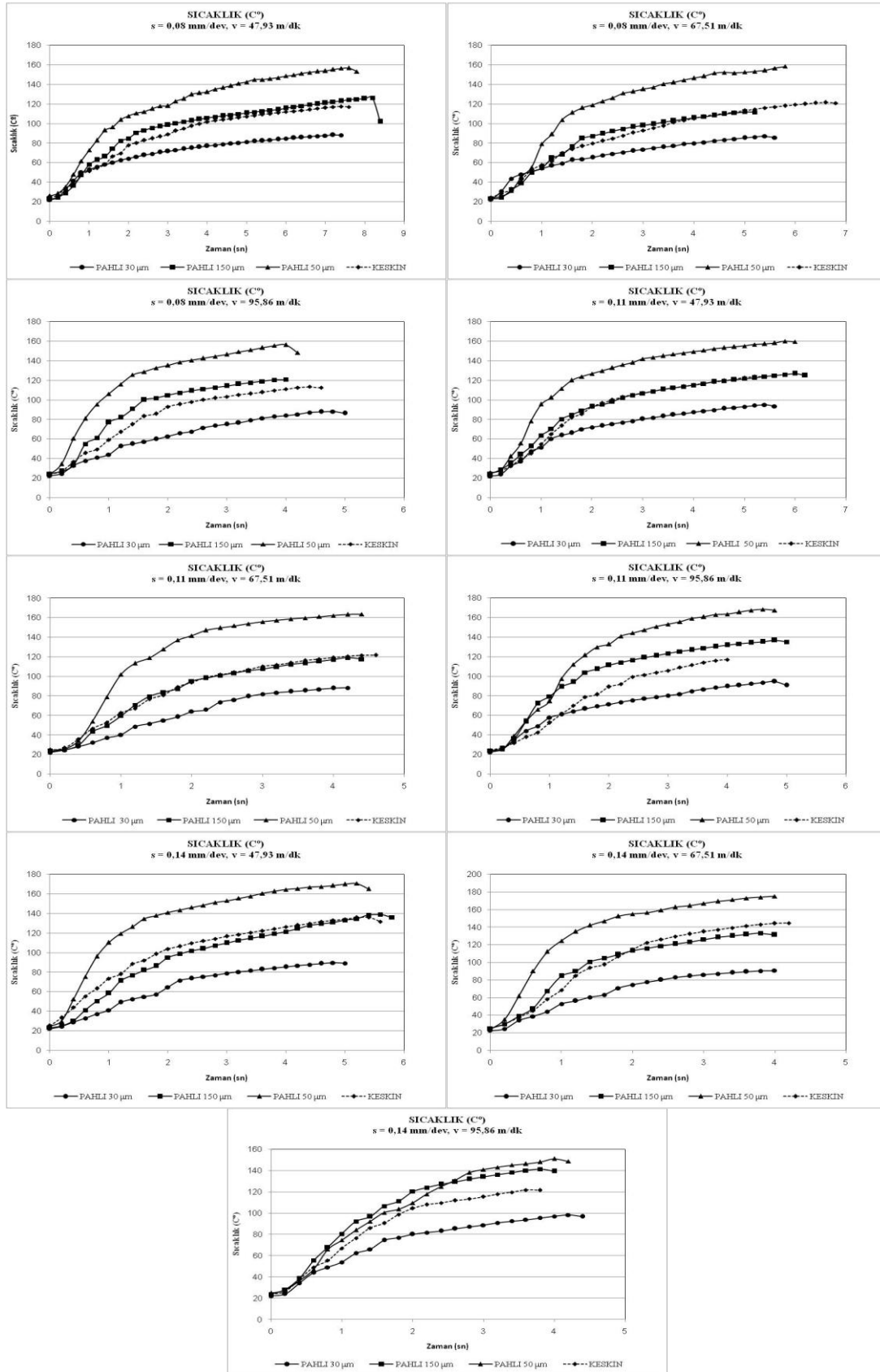
Şekil 6.48. Pahlı takımların sıcaklıklarının karşılaştırılması

Ortogonal kesme işleminde aynı kesme ve ilerleme hızlarında pahlı takımların büyükten küçüğe doğru sıcaklıkları sıralamaları tablo 6.8’de sıralanmıştır.

Tablo 6.8. Pahlı takımların sıcaklık sıralamaları

<b>Kesme Şartları</b>	<b>Sıcaklık Sıralamaları (Büyükten küçüğe doğru)</b>
0,08 mm/dev – 47,93 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,11 mm/dev – 47,93 m/dk	50 $\mu$ m – keskin – 150 $\mu$ m – 30 $\mu$ m
0,14 mm/dev – 47,93 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,08 mm/dev – 67,51 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,11 mm/dev – 67,51 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,14 mm/dev – 67,51 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,08 mm/dev – 95,86 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,11 mm/dev – 95,86 m/dk	50 $\mu$ m – 150 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m
0,14 mm/dev – 95,86 m/dk	150 $\mu$ m – 50 $\mu$ m – keskin – 30 $\mu$ m

Aynı kesme ve ilerleme hızlarında pahlı takımların sıcaklık dağılımları Şekil 6.49'da gösterilmektedir.



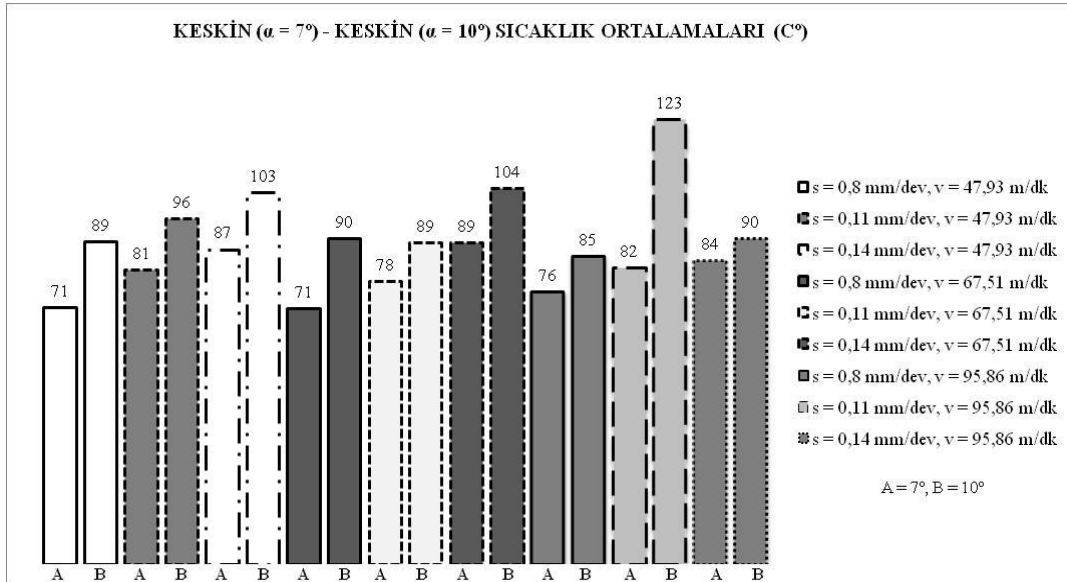
Şekil 6.49. Pahlı takımların sıcaklık dağılımı



### 6.4.3. Yarıçaplı ve pahlı kesici kenarlı takımların sıcaklıklarının kıyaslanması

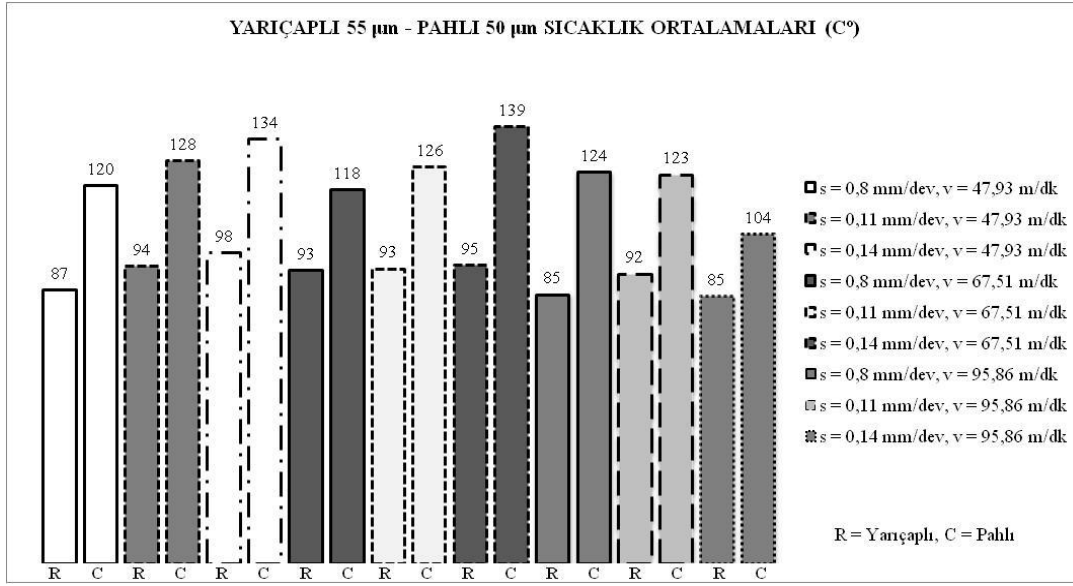
Kesme şartları aynı olan yarıçaplı, pahlı ve keskin kenarlı takımların deneysel sonuçları kıyaslanmıştır. Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  – pahlı 50  $\mu\text{m}$ , yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  – pahlı 150  $\mu\text{m}$ , keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) – keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) kıyaslanmıştır.

Keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) – keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) takımların aynı kesme ve ilerleme hızlarında sıcaklıkları keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) en büyük sıcaklıklara sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.50).



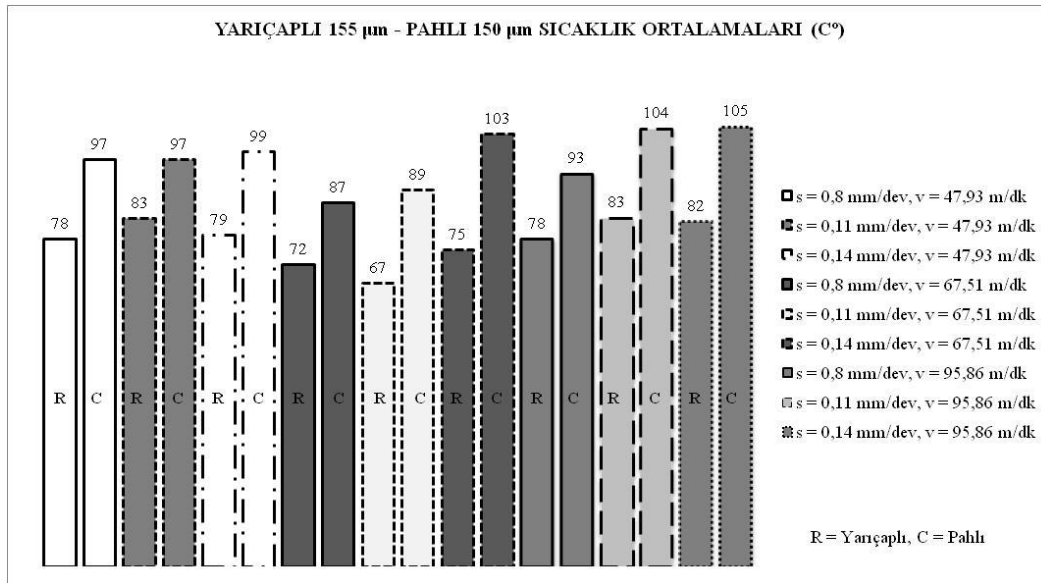
Şekil 6.50. Keskin ( $\alpha = 7^\circ$ ) - keskin ( $\alpha = 10^\circ$ ) sıcaklıkları karşılaştırılması

Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  – pahlı 50  $\mu\text{m}$  takımların aynı kesme ve ilerleme hızlarında sıcaklıkları pahlı 50  $\mu\text{m}$  en büyük sıcaklıklara sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.51).



Şekil 6.51. Yarıçaplı 55 µm – pahlı 50 µm sıcaklıkları karşılaştırılması

Yarıçaplı 155 µm – pahlı 150 µm takımları aynı kesme ve ilerleme hızlarında sıcaklıkları pahlı 150 µm en büyük sıcaklıklara sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.52).



Şekil 6.52. Yarıçaplı 155 µm – pahlı 150 µm sıcaklıkları karşılaştırılması

## 6.5. Sonuç ve Öneriler

### 6.5.1. Sonuçlar

- a) Ortogonal kesme işleminde aynı kesme şartlarında, genel olarak yarıçaplı takımlarda yarıçap ölçüsüne paralel olarak kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri artmaktadır. Keskin kenarlı takımın diğer geometrilere göre en düşük kesme ve ilerleme kuvvetleri sahip olduğu görülmektedir.
- b) Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı kesme şartlarında yarıçap kenarlı takımların genel olarak ilerleme hızı arttıkça kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri arttığı görülmektedir.
- c) İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı kesme şartlarında yarıçap kenarlı takımların genel olarak kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerin azalmaktadır. Sadece yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  takımın kesme hızı arttıkça ilerleme ve bileşke kuvvetlerin azalmakta diğer uçlar düzenli bir dağılım görülmemektedir.
- d) Takım – talaş ara yüzey sıcaklıklarında, yarıçap kenarlı takımlarda bütün kesme şartları için en yüksek sıcaklık 55  $\mu\text{m}$  takımda görülmüştür. Genel olarak en düşük takım – talaş ara yüzey sıcaklığı 135  $\mu\text{m}$  takımda görülmektedir.
- e) Ortogonal kesme işleminde aynı kesme şartlarında genel olarak kesici kenar pahı arttıkça kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri artmıştır. Keskin kenarlı takım diğer uç geometrilerine göre en büyük ikinci kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri sahip olduğu görülmektedir.
- f) Kesme hızları aynı ilerleme hızları farklı kesme şartlarında pah kenarlı takımların genel olarak ilerleme hızı arttıkça kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri arttığı görülmektedir.

- g) İlerleme hızları aynı kesme hızları farklı kesme şartlarında pah kenarlı takımlarda genel olarak kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerin azalmaktadır.
- h) Takım – talaş ara yüzey sıcaklıklarında, pah kenarlı takımlarda genel olarak 50  $\mu\text{m}$  – 150  $\mu\text{m}$  – keskin – 30  $\mu\text{m}$  büyükten küçüğe doğru sıcaklıkları sıralandığı görülmektedir.
- i) Yarıçaplı 55  $\mu\text{m}$  – pahlı 50  $\mu\text{m}$  kesici kenarlı takımlar karşılaştırılmıştır. Genel olarak pah kenarlı takım kesme kuvvetleri ve takım – talaş ara yüzey sıcaklıkları daha büyük olduğu görülmektedir. Yarıçap kenarlı takım ise ilerleme ve bileşke kuvvetleri pah kenarlı takıma göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.
- j) Yarıçaplı 155  $\mu\text{m}$  – pahlı 150  $\mu\text{m}$  kesici kenarlı takımlar karşılaştırılmıştır. Genel olarak yarıçap kenarlı takım kesme, ilerleme ve bileşke kuvvetleri daha büyük olduğu görülmektedir. Pah kenarlı takım ise takım – talaş ara yüzey sıcaklıkları yarıçap kenarlı takıma göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- k) Yarıçap kenarlı takımların FEM simülasyonlarında, deneysel sonuçlara yarıçaplı 135  $\mu\text{m}$  %2, 155  $\mu\text{m}$  %5, 55  $\mu\text{m}$  %3 ortalama hata paylarıyla hesaplanmıştır.
- l) Pahlı kenarlı takımların FEM simülasyonlarında, deneysel sonuçlara yarıçaplı 150  $\mu\text{m}$  % 4, 50  $\mu\text{m}$  %3, 30  $\mu\text{m}$  %3 ortalama hata paylarıyla hesaplanmıştır.

### 6.5.2. Öneriler

Farklı takım geometrilerinin kesme işleminde takım – talaş ara yüzey sıcaklık farklarını, kesme ve ilerleme kuvvetleri incelenmiştir. Bu incelemelerin daha da geliştirilebileceğini düşünülerek bir takım öneriler aşağıda belirlenmiştir.

- a) Farklı kesici takım malzemeleri ve kesici kenarlar kullanılarak işlenebilirliğe etkileri incelenebilir.

- b) Farklı takım geometrilerine kaplama yapılarak işlenebilirliğe etkileri incelenebilir.
- c) Kesme ve ilerleme kuvvetlerinin dışında radyal kuvvetlerde ölçülebilir.
- d) Takım – talaş ara yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi için başka yöntemler kullanılabilir.
- e) Takıma gömülmüş ısı çift ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak takım – talaş ara yüzeyindeki oluşan sıcaklıkları tahmin edilmesi için model oluşturulabilir.
- f) Farklı talaş kalınlıkları kullanılarak takımların aşınması ve iş parçasının yüzey kalitesine olan etkileri incelenebilir.
- g) Kesme simülasyonunda (FEM) farklı modeller ve programlar kullanılarak hata oranları karşılaştırılabilir.

**KAYNAKLAR**

- [1] SAOUBİ, M. R., CHANDRASEKARAN, H., Investigation of The Effects of Tool Micro-Geometry and Coating On Tool Temperature During Orthogonal Turning of Quenched and Tempered Steel, Swedish Institute for Metals Research, Drottning Kristinas Vag 48, Sweden 2003
- [2] YUNG-CHANG, Y., ANURAG, J., TAYLAN, A., A Finite Element Analysis Of Orthogonal Machining Using Different Tool Edge Geometries, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM), The Ohio State University, 1971 Neil Avenue, Columbus, OH 43210, USA 2004
- [3] FANG, N., WU, Q., The Effects Of Chamfered and Honed Tool Edge Geometry İn Machining Of Three Aluminum Alloys, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Utah State University, Logan, UT 84322-4130, USA 2005
- [4] JIANG, H., DOMENICO, U., RAJIV, S., Investigation of Cutting Conditions and Cutting Edge Preparations For Enhanced Compressive Subsurface Residual Stress in The Hard Turning of Bearing Steel, Department of Mechanical Engineering, University of Calabria, Rende, CS 87036, Italy 2005
- [5] SANTOSH, R., ALBERT, B. C., DANİEL, W. G., A Model To Calibrate and Predict Forces in Machining With Honed Cutting Tools Or Inserts, Delphi Research Labs, 51786 Shelby Pkwy, MI 48307, USA 2006
- [6] MOHAMED, N.A. N., E.-G. Ng, ELBESTAWI, M.A., Modelling The Effects of Tool Edge Radius on Residual Stresses When Orthogonal Cutting AISI 316L, Department of Mechanical Engineering, McMaster University, 1280 Main St. W., Hamilton, Ontario, Canada L8S 4L7 2006
- [7] ŞAHİN, Y., Talaş Kaldırma Prensipleri, Cilt 2, Nobel Yayınları, İstanbul 2001
- [8] TOSUN, N., ÖZEK, C., Tornalama İşleminde Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığının belirlenmesi, On Birinci Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Antalya 13 - 15 Ekim 2004

- [9] [www.koumakina2001.8m.com](http://www.koumakina2001.8m.com) İnternet Sitesi (11.2007)
- [10] KÜÇÜK, H., Torna Tezgahında Talaş Kaldırma İşlemine Etki Eden Faktörlerin Bilgisayar Destekli Optimizasyonu, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul 2001
- [11] AKKURT, M., Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Kesici Takımlar, Birsen Yayınevi, İstanbul 1996
- [12] IŞIK, Y., Torna Tezgahında Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi ve Analizi İçin Bir Kuvvet Ölçer Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa 1995
- [13] GÜNAY, M., Talaş Kaldırma İşlemlerinde Kesici Takım Talaş Açısının Kesme Kuvvetlerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 2003
- [14] AKKURT, M., Talaş Kaldırma Yöntemleri ve takım tezgahları, Birsen Yayınevi, İstanbul 2000
- [15] POTDER, Y. K., Measurements and Simulations Of Temperature and Deformation Fields İn Transient Orthogonal Metal Cutting, Cornell University, 2001
- [16] KURT, A., Talaş Kaldırma Sırasında Oluşan Kesme Kuvvetleri ve Mekanik Gerilmelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Matematiksel Modellerinin Oluşturulması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 2006
- [17] GÖKKAYA, H., Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığının Isıl Çift Yöntemiyle Ölçülmesi ve Kesici Takım ile Takım Tutucu Üzerindeki Etkilerinin Sonlu Elemanlarla İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 2004
- [18] SİĞİRTMAÇ, T., Kalıp Çeliklerinin Ortogonal Tornalanması İşlemlerinde Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi ve Kesici Uç Kaplama Malzemelerinin Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa 2000
- [19] MERGEN, R., HSS Kalemdeki Talaş Açısının Kesmeye Etkisinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 2005
- [20] Milli Eğitim Bakanlığı Megep (Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), Makine Teknolojisi Temel Tornalama İşlemleri 1, Ankara 2005

- [21] ÖZDEMİR, H., Tornalama İşleminde Kesme Kuvveti Ölçümünde Kullanılacak Dinamometre Tasarımı ve Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya 2006
- [22] ÇAKIR, M. C., IŞIK, Y., Takım Çeliklerinin Talaşlı İmalatında Kesme Kuvvetleri ile Takım Ömrü Arasındaki İlişkinin Deneysel Olarak İncelenmesi, 9. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara 2000, 397-403.
- [23] ÖZKÖK, A., Kesme Kuvvetlerinin Belirlenmesinde Bilgisayar Desteği, Yüksek lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa 1999
- [24] KORKUT, İ., Torna Tezghasında Strain Gage İle Ölçüm Yapan Bilgisayar Bağlantılı Dinamometre Tasarımı ve İmalatı, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 1996
- [25] [www.bilimfeneri.gen.tr/kitaplik/pdf/yuk\\_hucreleri.pdf](http://www.bilimfeneri.gen.tr/kitaplik/pdf/yuk_hucreleri.pdf) İnternet Sitesi (01.2008)
- [26] YALDIZ S., BIYI M. T., Strain Gauge Esaslı Üç Boyutlu Tornalama Dinamometresi Tasarımı ve İmalat Yöntemi, Makina Mühendisleri Odası Konya Şubesi II. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya 26-27 Eylül 2003
- [27] [www.makine.balikesir.edu.tr/ay/dersnotu/OlcmeTeknigi](http://www.makine.balikesir.edu.tr/ay/dersnotu/OlcmeTeknigi) İnternet Sitesi (02.2008)
- [28] [www.uzak.mersin.edu.tr/UserFiles/EndOto/e1o-210/so4.pdf](http://www.uzak.mersin.edu.tr/UserFiles/EndOto/e1o-210/so4.pdf) İnternet Sitesi (02.2008)
- [29] [www.tetcis.com/termo.html](http://www.tetcis.com/termo.html) İnternet Sitesi (05.2008)
- [30] DURAN, A., Tornalamada Kesici Kenar Ayar Açısının Kesmeye Etkisinin Sonlu Elemanlarla Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara 1998
- [31] JINGMING, (Jimmy) H., Theoretical and Numerical Studies Of Machining, Auburn University, Alabama 1996



## ÖZGEÇMİŞ

Fatih BATMAN, 22.09.1984 de Sakarya' da doğdu. İlkokulu Erenler ilçesinde 50. Yıl ilköğretimde tamamladı. Ortaokulu Adapazarı merkezde Sabiha Hanım orta öğretimde tamamladı. 2001 yılında Ferizli Recep Bey Endüstri Meslek Lisesi, Tesviye Bölümünden mezun oldu. 2001 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği bölümünde lisans eğitime başladı ve 2005 bahar döneminde mezun oldu. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve halen öğrenimine devam etmektedir.