



**DIŞ YÜZEYE KANAL AÇMA SIRASINDA
KESİCİ TAKIMA ETKİYEN GERİLMELERİN İNCELENMESİ**

Serkan BAKIR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2014

SERKAN BAKIR tarafından hazırlanan “DIŞ YÜZEYE KANAL AÇMA SIRASINDA KESİCİ TAKIMA ETKİYEN GERİLMELERİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Abdullah KURT
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan : Prof. Dr. İhsan KORKUT
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye : Doç. Dr. Adnan AKKURT
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 25 / 06 / 2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Serkan BAKIR
01.07.2014

DIŞ YÜZEYE KANAL AÇMA SIRASINDA
KESİCİ TAKIMA ETKİYEN GERİLMELERİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Serkan BAKIR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2014

ÖZET

Bu çalışma; torna tezgahında dış kanal açma sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesini ve kesme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar metoduna dayalı çözüm yapan Ansys programı kullanılarak analizini içermektedir. Bu amaçla, değişik kesme parametreleri kullanılarak 2 mm, 4 mm ve 6 mm uç/kanal genişliğine sahip kesici takımlarla AISI 1050 iş parçası malzemesi üzerinde çeşitli kesme deneyleri yapılmıştır. Kanal açma sırasında oluşan kesme kuvvetleri Kistler 9257B dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Deneysel olarak belirlenen kesme kuvvetlerinin takım üzerindeki gerilme etkileri, analiz edilmiştir. Kanal açma kesici takımının performansını iyileştirmek amacıyla, kesme parametrelerindeki değişime göre kesme parametreleri ile gerilmeler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde; kesme kuvvetlerinin büyüklüğü bakımından ilerleme değerinin kesme hızına göre daha belirleyici olduğu ve pasif kuvvetlerin esas kesme kuvvetlerinden daha büyük ve eksenel kuvvetin diğer kesme kuvvetlerine göre ihmal edilebilecek seviyede olduğu görülmüştür. İlerleme değerindeki artışla birlikte kesici takımda oluşan toplam deformasyon ve en büyük asal gerilme yükselirken en küçük asal gerilme ile eşdeğer gerilme ise belirgin bir biçimde azalmaktadır. Toplam deformasyon, en büyük ve en küçük asal gerilme ile eşdeğer gerilmenin kesme hızındaki artışla kısmen azaldığı görülmüştür. Kesici takım çekme gerilmesinden ziyade basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. En küçük asal gerilme ile eşdeğer gerilmenin büyüklüğü açısından uç genişliği 2 mm olan kesici ucun daha büyük zorlamalara maruz kaldığı gözlenmiştir. Gerilme dağılımlarından, kesici uçtaki muhtemel aşınmanın; daha ziyade talaş yüzeyinde krater aşınması biçiminde olduğu, ayrıca kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu kesme kenarının hemen altındaki ucun alın yüzeyinde ise yanak aşınmasının oluşabileceği söylenebilir.

Bilim Kodu : 708.3.028

Anahtar Kelimeler : Kesme kuvvetleri, kesici takım gerilmeleri, Ansys, kanal açma

Sayfa Adedi : 79

Danışman : Doç . Dr. Abdullah KURT

INVESTIGATION OF THE STRESSES AFFECT CUTTING TOOL ON GROOVING TO THE OUTER SURFACE

(M.Sc. Thesis)

Serkan BAKIR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2014

ABSTRACT

In this study focuses on the experimental determination of the cutting forces during grooving operation to the outer surface and the analysis of the effects of cutting force on the cutting tool using Ansys software based on the finite element method. For this purpose; a variety of experiments were carried out the AISI 1050 work-piece material with grooving insert widths have 2 mm, 4 mm, and 6 mm using different cutting parameters. The cutting forces that occur during grooving operation were measured by Kistler 9257B dynamometer. The effects of the cutting forces experimentally measured depending on different grooving insert widths were analyzed. In order to improve the performance of grooving cutting tools, the relationship between the cutting parameters and the stresses were examined according to the variation of cutting parameters. The study results showed that the feeding rate value is more decisive than the cutting speed in terms of the magnitude of the cutting forces, the passive forces are greater than the primary cutting forces and the axial forces are negligible compared to other cutting forces. Total deformation and maximum principal stress increase with the increase of the feed rate, but minimum principal stress and equivalent stress decrease significantly. It has been shown that total deformation, maximum and minimum principal stresses and equivalent stress decrease partially with the increase of the cutting speed. The cutting tool is subjected to the compressive stresses rather than the tensile stress. It has been observed that the cutting inserts have width of 2 mm are subjected to greater stresses in terms of the magnitude of minimum principal and equivalent stresses. From the stress distributions it can be said that possible wear on the cutting insert is rather in the form of a crater wear on the rake face, furthermore flank wear may occur on the surface, contacting with work-piece surface, just below the cutting edge.

Science Code : 708.3.028

Key Words : Cutting forces, cutting tool stresses, Ansys, grooving

Page Number : 79

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Abdullah KURT

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, çalışmayla ilgili sıkıntılı anlarımda sürekli benimle beraber olan, değerli görüşleriyle beni yönlendiren ve bilim adamı olma yolunda kendime bir model olarak esas aldığım kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah KURT'a, kanal açma deneyleri ve kesme kuvvetleri ölçümleri için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü CNC Atelyesinde bulunan torna tezgâhı ve kuvvet ölçme düzeneğinin kullanılmasına izin veren Bölüm Başkanı kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, kanal açma deneyleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Gültekin UZUN'a ve böyle bir çalışmayı tamamlamak için sabrını esirgemeyen sevgili eşime ve bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleşmesinde finansman desteği sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje Kodu: 07/2012-36) teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Kesme ve Talaş Kaldırma İşlemi.....	3
2.1.1. Kesme kuvvetleri ve ortogonal kesme.....	4
2.2. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler.....	7
2.3. Kanal Açma	9
2.3.1. Tek kesimli kanal açma	10
2.3.2. Çoklu kanal açma.....	11
2.3.3. Kanal açma işleminde talaş kontrolü	12
2.4. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ve Ansys Yazılımı.....	14
2.4.1. Sonlu Elemanlar Analizi.....	14
2.4.2. Eşdeğer gerilme (von Mises gerilmesi)	20
2.4.3. Ansys yazılımı	21
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27
3.1. Kanal Açma İşlemini İçeren Çalışmalar	27
3.2. Kanal Açma İşlemine Benzer FEM Çalışmaları.....	33
3.3. Kanal Açma ve Kesici Takım Gerilmelerini İçeren Çalışmalar	38

	Sayfa
3.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	40
4. MATERYAL VE METOT	43
4.1. Deneysel Çalışmalar	43
4.1.1. İş parçası malzemesi	43
4.1.2. Kesici takımlar	43
4.1.3. Takım tezgâhı.....	44
4.1.4. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi.....	45
4.1.5. Kesme parametreleri	47
4.1.6. Deneylein yapılışı	47
4.2. Analiz Çalışmaları	49
4.2.1. Kesici takımların modellenmesi	49
4.2.2. Kesici takımlara ait malzeme özellikleri.....	51
4.2.3. Elemanlara ayırma ve temas çiftleri	51
4.2.4. Yükleme durumu ve sınır şartları	53
4.2.5. Çözüm prosedürü ve incelenen sonuçlar	55
5. DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA	57
5.1. Kesme Kuvvetleri	57
5.2. Analiz Sonuçları.....	61
5.2.1. Kesme parametrelerinin toplam deformasyona etkisi.....	61
5.2.2. Kesme parametrelerinin en büyük asal gerilmeye etkisi	64
5.2.3. Kesme parametrelerinin en küçük asal gerilmeye etkisi.....	66
5.2.4. Kesme parametrelerinin eşdeğer gerilmeye etkisi	69
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	43
Çizelge 4.2. Deney numunelerinin mekanik özellikleri.....	43
Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan kesici takımlar	44
Çizelge 4.4. Kesici uçların geometrik özellikleri [43].....	44
Çizelge 4.5. Kartuş ve takım tutucu için geometrik özellikler [43].....	44
Çizelge 4.6. JOHNFORD T35 CNC torna tezgahının özellikleri.....	45
Çizelge 4.7. Kistler 9257B tipi dinamometrenin teknik özellikleri [44]	45
Çizelge 4.8. Kistler Type 5019B130 yükseltecinin özellikleri [44]	46
Çizelge 4.9. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri	47
Çizelge 4.10. Kesici takımların malzeme özellikleri	51
Çizelge 4.11. Kesici takımlar için kullanılan eleman ve düğüm sayıları.....	53

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ortogonal ve eğik kesme metotları [1]	4
Şekil 2.2. Tornalamada oluşan kesme kuvvetleri	4
Şekil 2.3. Ortogonal kesmede oluşan kuvvetler ve deformasyon bölgeleri [4, 5]	5
Şekil 2.4. Talaş kaldırma analizlerinde kullanılan iki temel model [1]	6
Şekil 2.5. Talaş yüzeyi üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri [11]	7
Şekil 2.6. Kanal açma takımlarıyla yapılan işlemler [13]	9
Şekil 2.7. Tek kesimli kanal işlemi [13]	10
Şekil 2.8. Geniş (çoklu) kanal açma işlemi [13]	11
Şekil 2.9. Kanalların ince işlenmesi [13]	12
Şekil 2.10. Kanal açma ve dilimleme işlemlerinde kesme kuvvetleri [14, 15]	13
Şekil 2.11. FEM’de kullanılan bazı elemanlar [1]	16
Şekil 2.12. On düğümlü kuadratik dört yüzlü eleman	17
Şekil 3.1. Chern tarafından geliştirilen hızlı durdurma takımı [22]	27
Şekil 3.2. Kontrollü bir yağ buharı yönüne sahip kesici takım düzeneği [23]	28
Şekil 3.3. Daghini et al. [27] tarafında geliştirilen kesici takım modeli	31
Şekil 3.4. Mahnama ve Movahhedy [33] tarafından yapılan kesme işlemi ve önerilen FEM modeli	35
Şekil 3.5. Mahnama ve Movahhedy tarafından önerilen FEM modeli [36]	36
Şekil 3.6. Mahnama ve Movahhedy’nin simülasyon sonuçları [36]	36
Şekil 3.7. Deng et al. [38] tarafından önerilen model ve talaş kırıcı parametreleri	37
Şekil 3.8. Taşgetiren ve arkadaşlarının [41] takım ve yükleme modeli	39
Şekil 3.9. Kesici takım üzerindeki Tresca eşdeğeri etkin gerilme dağılımı [41]	39
Şekil 4.1. Kanal açma takımları [43]	44
Şekil 4.2. Kesme deneyleri için hazırlanan deney düzeneği	46
Şekil 4.3. Kesici takım üreticisi firmanın önerdiği kesme hızı ve ilerleme [43]	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Dinamometre yardımıyla ölçülen kesme kuvvetleri.....	48
Şekil 4.5. Kesici takımlar için oluşturulan katı modeller.....	50
Şekil 4.6. Kesici takımlar için analizlerde kullanılan ağ yapısı.....	52
Şekil 4.7. Kesici takımlar için temas bölgeleri	53
Şekil 4.8. Kesici takımlar için seçilen sınır şartı ve yükleme durumu.....	55
Şekil 5.1. Kesici takım genişliğine göre esas kesme kuvveti değişimleri	58
Şekil 5.2. Kesici takım genişliğine göre pasif kuvvet değişimleri.....	59
Şekil 5.3. Kesici takım genişliğine göre toplam deformasyon değişimleri	62
Şekil 5.4. Kesici takım genişliğine göre toplam deformasyon dağılımları.....	63
Şekil 5.5. Kesici takım genişliğine göre en büyük asal gerilme değişimleri	65
Şekil 5.6. Kesici takım genişliğine göre en büyük asal gerilme dağılımları.....	66
Şekil 5.7. Kesici takım genişliğine göre en küçük asal gerilme değişimleri	67
Şekil 5.8. Kesici takım genişliğine göre en küçük asal gerilme dağılımları.....	68
Şekil 5.9. Kesici takım genişliğine göre eşdeğer gerilme değişimleri.....	70
Şekil 5.10. Kesici takım genişliğine göre eşdeğer gerilme dağılımları	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

$[\dots]^T$	Matrisin transpozu
a	Kesme derinliği
a'	Çıkan talaş kalınlığı
A_0	Talaş kesit alanı
[B]	Gerinme-deplasman matrisi
E	Elastikiyet modülü
[E]	Malzeme özellikleri matrisi
f	İlerleme değeri (veya hızı)
F_a	Eksenel kuvvet
F_C	Esas kesme kuvveti
F_f	İlerleme kuvveti
F_p	Pasif (radyal) kuvvet
{F}	Genel yük vektörü
{f _(e) }	Eleman kütle kuvvetleri vektörü
G	Kayma modülü
[J]	Jacobian matrisi
[K]	Genel rijitlik (direngenlik) matrisi
[k _(e)]	Eleman rijitlik matrisi
l_c	Takım-talaş temas uzunluğu
[N]	Şekil fonksiyonları matrisi
{P _i }	Tekil kuvvetler vektörü
{q}	Eleman deplasman (yer değiştirme) vektörü
{Q}	Genel deplasman vektörü
r	Kesici takım burun yuvarlatma yarıçapı
{T _(e) }	Eleman yüzey kuvvetleri (yayıllı yük) vektörü

Simgeler U $\{u\}$ V W α β $\{\epsilon\}$ ϕ γ λ ν Π $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ σ_{VM} $[\sigma]$ **Açıklamalar**

İç kuvvetlerin şekil değiştirme enerjisi

 x, y, z koordinatlarındaki deplasman vektörü

Kesme hızı

Dış kuvvetlerin işi

Boşluk açısı/serbest aç

Sürtünme açısı

Gerinme vektörü

Kayma (kesme) düzlemi açısı

Talaş açısı

Talaş yığılma faktörü

Poisson oranı

Potansiyel enerji

Normal gerilmeler

Kayma gerilmeleri

Asal gerilmeler

von Mises gerilmesi

Gerilme matrisi

Kısaltmalar**FE****FEM****CAD****AW****DM****CFD****BUE****AISI****ALE****CNC****Açıklamalar**

Sonlu eleman

Sonlu eleman metodu

Bilgisayarlı destekli tasarım

*Ansys Workbench**Design Modeler*

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Kesici kenar üzerinde talaş yığılması

Amerikan Demir Çelik Enstitüsü

Keyfi Lagrangian-Eulerian

Bilgisayarlı sayısal denetim

1. GİRİŞ

Makine imalatı sanayinde kullanılan makine ve sistemleri oluşturan parçaların nihai şekli farklı imal usullerinden biri veya bir kaçını kullanılarak elde edilir. İş parçasının nihai şekli, iş parçası üzerindeki ilgili malzemenin takım tezgâhlarında talaş kaldırılarak şekillendirilmesi/işlenmesi ile elde edilir. Değişik takım tezgâhlarında ise genel olarak tornalama, frezeleme, delme, taşlama vb. talaş kaldırma işlemleri için kesici bir takım kullanılır. Ham haldeki iş parçasındaki fazlalıklar takım tezgâhına bağlanmış bu takım ile talaş kaldırmak suretiyle iş parçasının nihai şekli elde edilir. İş parçasından talaş kaldırma, takım kesici ucunun/kenarının iş parçası yüzeyine belirli bir kuvvetle temas etmesi ve bu temas bölgesindeki talaş kaldırma enerjisinin talaş kaldırılan takım tezgâhından iş parçasına iletilmesiyle sağlanır. Bu yüzden takım tezgâhı, kesici takım ve iş parçası malzemesi arasındaki ilişki çok iyi kurulmalı ve bu ilişkiyi şekillendiren değişkenler olarak ifade edilebilen kesme parametreleri iyi seçilmelidir [1].

Günümüz piyasa koşullarında rekabet edebilmek için imalatın, maksimum emniyet ve minimum maliyetle yapılması gerekmektedir. Genel olarak, üretilen iş parçası için istenen işlevsel toleransların en uygun işleme şartlarıyla gerçekleştirilmesi gerekir. Bu işlevsel toleransların gerçekleşmesi kesici takım/takım tezgâhı/iş parçası ilişkilerinin doğru kurulmasıyla mümkündür. Doğru seçilmemiş işleme parametreleri ve titreşimler işlevsel toleransları engelleyen ölçü ve yüzey hatalarına sebep olur. Bu yüzden hatasız (veya en az hata ile) iş için talaş kaldırma işlemlerinde ekonomikliği simgeleyen en önemli unsurların minimum takım aşınması ve düşük güç sarfıyatı olduğu düşünülebilir. Özellikle takım ömrü ve takım değiştirme sıklığı, takım tezgâhlarının verimli kullanılması için en önemli parametrelerden biridir. Uygun kesme parametreleri için gerekli olan bilgiler ise genellikle deneysel çalışmalarla belirlenmektedir.

Talaş kaldırma sırasında oluşan gerilmeler sebebiyle kesme işleminde kullanılan takımların kesici kenarları yeterince keskin olmasına rağmen oldukça fazla zorlanırlar. Kesici takımın bu gerilmeleri karşılayabilecek optimum kesiti ve kesmeyi kolaylaştıracak kesme parametrelerini belirlemek için pek çok araştırma yapılmıştır ve halen de yapılmaktadır.

Talaş kaldırma yöntemleri arasında torna tezgâhında en zor işlemlerden biri de kanal açma işlemidir. Verilen tolerans aralığında kanal genişliği elde etmenin zorluğu yanında kesici takımın yüzeylerine gelen yükler sebebiyle yüzey kalitesinin de istenen seviyede olmaması, kanal açma işleminde karşılaşılan en büyük zorluklardandır [2].

Bu çalışmanın amacı;

- iş parçası malzemesinden; farklı genişlikte kanal açma kesici takımları kullanarak talaş kaldırma (kanal açma) sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin, kesme hızı ve ilerlemeye bağlı değişimlerinin deneysel olarak belirlenmesi,
- deneysel olarak belirlenen kesme kuvvetlerinin takım üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar metoduna (*Finite Element Method*, FEM) dayalı bir yazılım olan Ansys kullanılarak analiz edilmesi ve
- imalatta yaygın olarak kullanılan kanal açma kesici takımının performansını iyileştirme

olarak özetlenebilir. Literatür çalışmaları dikkate alındığında, tornada dış kanal açma işlemleriyle ilgili çalışmaların azlığı ve sanayinin gereksinimleri de göz önüne alınarak; bu çalışma doğrultusunda tornada dış kanal açma işleminde kesici takıma etki eden yüklerin kesici takım ve işlenebilirlik üzerindeki etkileri incelenmiştir.

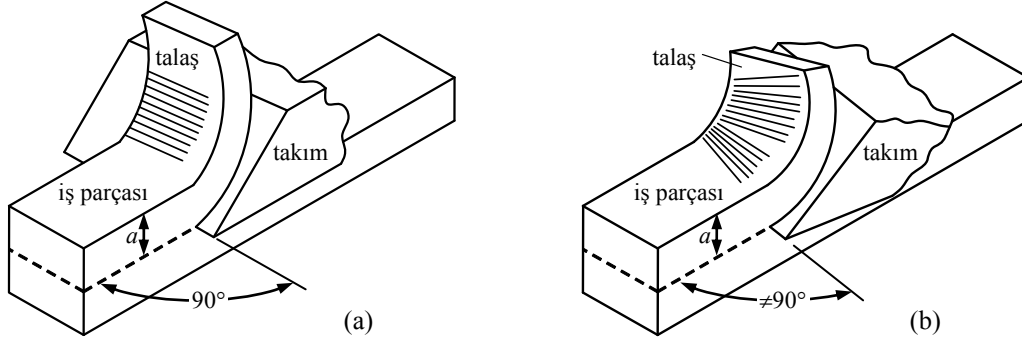
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kesme ve Talaş Kaldırma İşlemi

Talaş kaldırma; belirli boyut, şekil ve yüzey kalitesine sahip bir parça meydana getirmek için ucu keskin bir takım ile ve güç kullanarak, iş parçası üzerinden tabaka şeklinde malzeme kaldırma işlemidir. Fiziksel bakımdan talaş kaldırma işlemi, elastik ve plastik şekil değiştirmeye dayanan, sürtünme ısı oluşumu, talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parça yüzeyinin sertleşmesi, takım ucunun aşınması gibi olayların meydana geldiği karmaşık bir fiziksel olaydır [3]. Bir parça üzerinden belirli bir malzeme tabakası kaldırılması için takımın o malzemeye nüfuz etmesi gerekir; bu ise ancak takıma uygulanan kuvvetlerin yeterli ve takım malzemesinin parça malzemesinden daha sert olması halinde gerçekleşir. Ayrıca takım ucunun kama şeklinde yapılması, kesme olayını kolaylaştıran bir etkidir. Kesme olayı sırasında; belirli bir kesite ve geometriye sahip kesici takım yardımıyla talaşın iş parçasından ayrılmaya zorlanmasından dolayı, talaşın gövdeden ayrıldığı yerde yüksek ısı meydana gelir ve kesici takım ile iş yüzeyinde aşınmalar gerçekleşir. Bu sebeple takım ömrü ve kaldırılan talaş oranıyla ilgili pratik problemler yalnızca takım-talaş yüzeyi boyunca hareket eden talaşın ve işlenen malzemenin davranışları incelenerek ortaya konur.

Kesme olayının analizi için yaygın olarak kullanılan iki kesme metodu vardır: Ortogonal/dik (*orthogonal*) (Şekil 2.1a) ve eğik (*oblique*) kesme (Şekil 2.1b). Dik kesme, üç boyutlu problemden ziyade iki boyutlu bir problem davranışı gösterdiğinden kesme mekaniğini oluşturan eşitliklerin çıkarılmasındaki deneysel ve teorik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir metottür.

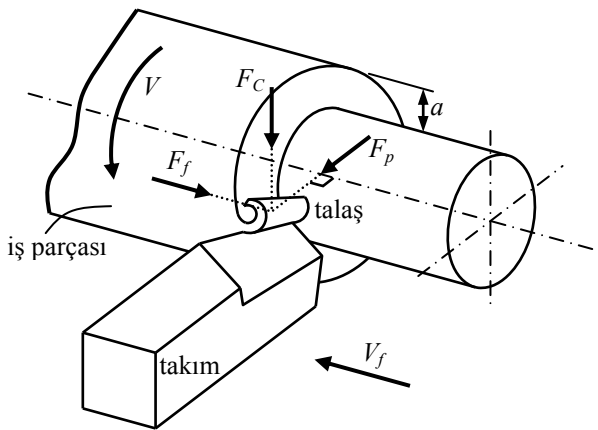
Kesici etkisiyle kaldırılan talaşın kesme derinliği, genellikle düzgün talaş kalınlığı olarak bilinir ve pratik kesme operasyonlarında ve yapılan çalışmalarda kolaylık olması açısından genellikle sabit olarak alınır.



Şekil 2.1. Ortogonal ve eğik kesme metotları [1]

2.1.1. Kesme kuvvetleri ve ortogonal kesme

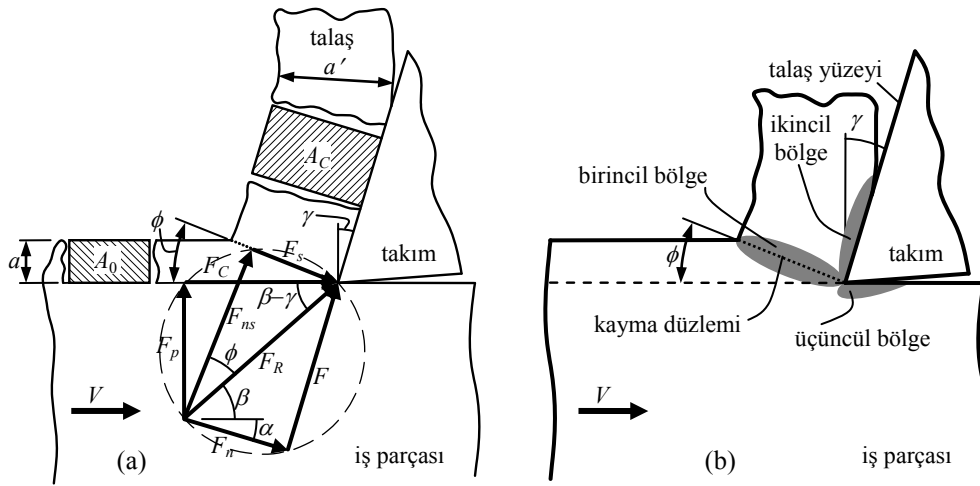
Endüstride uygulanan neredeyse tüm kesme işlemleri üç boyutlu (eğik kesme) olmasına rağmen, eğik kesme mekaniğini analiz etme açısından yeterli bilgi sunması bakımından iki boyutlu ortogonal (dik) kesme önemli bir işlemdir. Tornalama operasyonlarında, işlemin ortogonal veya eğik olmasını belirleyen parametre ise kesici takımın kesme kenarı ile iş parçasının yüzeyi arasındaki eğim açısıdır. Bu eğim açısı ortogonal kesmede 0° iken eğik kesmede 0° değildir (Şekil 2.1). Şekil 2.2’de tornalama işleminin 3 boyutlu şematik bir gösterimine yer verilmiştir. Aşağıda detayları açıklanan ortogonal kesmedeki F_C esas kesme kuvveti (veya teğetsel kuvvet) ve F_p pasif (radyal) kuvvete ilave olarak kesici takımın V_f ilerleme doğrultusunda F_f ilerleme kuvvetinin oluşacağına dikkat ediniz.



Şekil 2.2. Tornalamada oluşan kesme kuvvetleri

Ortogonal kesmede kesici takımın kesme kenarı boyunca kesmenin üniform olduğu kabul edilir, başka bir deyişle malzemede düzlem gerinme deformasyonu geçerlidir [4]. Bu yüzden V kesme hızı ve kesilmemiş talaş derinliği doğrultusundaki kesme kuvvetleri F_C

esas kesme kuvveti (veya teğetsel) ve F_p pasif (radyal) kuvvet olarak isimlendirilir (Şekil 2.3a). Et kalınlığı en fazla 3 mm olan silindirik boru profillerin alın yüzeylerinin işlenmesi, silindirik kanal yüzeylerinin işlenmesi veya kanal açma işlemleri ortogonal kesme olarak düşünülebilir (deformasyon işleminin iki boyutlu olduğu kabul edilebilir). Şekil 2.3a'da F_R bileşke kuvvetinin üç farklı kuvvet bileşenine ayrıldığına dikkat ediniz: *i*) F_C esas kesme kuvveti ve F_p pasif kuvvet bileşenleri, *ii*) F_s kayma kuvveti ve buna dik F_{ns} bileşenleri ile *iii*) F sürtünme kuvveti ve buna dik F_n bileşenleri. Analizlerde daha ziyade ortogonal kesme deneyleriyle dinamometrelerce doğrudan ölçülebilen F_C ve F_p kuvvet bileşenleri kullanılmaktadır.

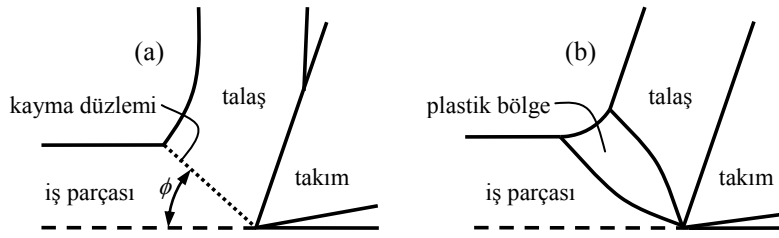


Şekil 2.3. Ortogonal kesmede oluşan kuvvetler ve deformasyon bölgeleri [4, 5]

Esas itibariyle ortogonal kesme işleminde üç deformasyon bölgesi vardır (Şekil 2.3b). Birincil deformasyon bölgesinde iş parçası malzemesi, bu bölge yapılan plastik bir işle talaş biçimini almak üzere kayar (ayrılır). İkincil deformasyon bölgesinde, birincil bölgede kısmen kayan malzeme takım-talaş ara yüzeyi boyunca hareket ederek kayma sürtünmesiyle deforme olur. Üçüncül deformasyon bölgesinde ise takımın yan yüzeyi ile iş parçasının işlenen yeni yüzeyi arasında bir sürtünme oluşur. Ortogonal kesme mekaniği hakkında bazı önemli parametreleri formüle etmek için bazı kabuller yapılır: *i*) Birincil bölgedeki deformasyon, sonsuz kalınlıktaki kayma düzleminde oluşur. *ii*) Takım-talaş ara yüzeyi boyunca ortalama sürtünmenin sabit olduğu kabul edilir. *iii*) Kayma düzleminde üniform gerilme dağılımı olduğu kabul edilir. Ortogonal kesmeyle ilgili en kritik parametrelerden biri de takımın γ talaş açısı olup Şekil 2.3'te pozitif talaş açısı gösterilmiştir. Talaşın iş parçasından uzaklaştırılmasına yardımcı olması sebebiyle pozitif talaş açısı daha iyi bir yüzey kalitesi vermekle birlikte; kesme kenarının zayıflaması, talaş

yüzeyindeki temasla talaş tarafından sağlanan basınç ve sürtünme yüküne dayanımı güçleştirir. Negatif talaş açılı takımlar ise çok sert malzemelerin işlenmesinde kullanılır (negatif talaş açısı için bazen pah açısı tabiri de kullanılır). Ortogonal kesmeyle ilgili bir diğer önemli parametre de V kesme hızı ile kayma düzlemi arasındaki ϕ kayma açısıdır (Şekil 2.3). Kesme işlemindeki kuvvetler ve güç kayma açısındaki artışla birlikte azalır. Kayma açısının belirlenmesine yönelik literatürde değişik çalışmalar yapılmış olup bu çalışmalar halen de devam etmektedir.

Deformasyon bölgesinin analizinde ince ve kalın bölge olmak üzere iki temel yaklaşım göze çarpmaktadır [1]. Piispanen [6], Merchant [7], Koboyashi ve Thomsen [8] gibi pek çok araştırmacı Şekil 2.4a'da gösterilen ince düzlemi (ince bölge) tercih ederken; Palmer ve Oxley [9], Okushima ve Hitomi [10] gibi araştırmacılar da Şekil 2.4b'de gösterilen kalın deformasyon bölgesine dayalı analizler yapmışlardır.

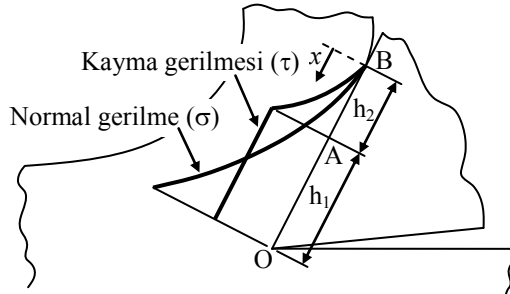


Şekil 2.4. Talaş kaldırma analizlerinde kullanılan iki temel model [1]

Uygulanabilir deneysel kanıtlar; kalın bölge modelinin çok düşük kesme hızlarında kesme işlemini tanımlayabildiğine; buna karşılık yüksek kesme hızlarında da ise ince bir kayma düzlemine işaret etmektedir. İnce bölge modelinin gerçek kesme şartları için daha kullanışlı görünmesi ve kalın bölge modeline göre daha basit matematik işlemlere ihtiyaç duyması sebebiyle; kalın bölgenin analizine göre ince bölgenin analizi daha bütündür ve daha elverişlidir.

Talaş yüzeyi üzerindeki Zorev'in [11] gerilme dağılımı ise Şekil 2.5'te göstermiştir. OA uzunluğu boyunca normal gerilme çok yüksek olduğundan metal, talaş yüzeyine yapışır; iş parçası malzemesinde plastik akış başlar. Sürtünmenin yapışma bölgesi olarak bilinen bu bölgedeki kayma gerilmesi (veya sürtünme gerilmesi) normal yükten bağımsızdır. AB uzunluğunda ise normal gerilme değeri daha küçüktür. Yapışma bölgesindeki sürtünme katsayısı sabit değildir, normal yükün büyüklüğüne bağlıdır ve değeri kayma sürtünmesi şartları altındaki değerden daha düşüktür. Talaş kaldırmada ölçülen sürtünme katsayısı;

yapışma ve kayma bölgelerine bağlı olan ortalama bir değerdir. Bu yüzden h_1 ve h_2 uzunluklarının sürtünme katsayısının ölçülen değerini değiştirmesi sebebiyle kesme şartlarında değişiklikler beklenir.



Şekil 2.5. Talaş yüzeyi üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri [11]

Talaş kaldırma işleminde kesiciye etki eden gerilme dağılımları ve talaş akışı üzerinde önemli bir etkisi olan parametre ise takım-talaş temas boyudur. Şekil 2.5'te gösterilen yapışma ve kayma bölgelerinin uzunluklarının (sırasıyla h_1 ve h_2) toplamı olarak ifade edilebilen takım-talaş temas boyu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [1]:

$$l_c = h_1 + h_2 = 2 \cdot \lambda \cdot a \quad \Rightarrow \quad l_c = 2 \cdot [\cos(\phi - \gamma) / \sin\phi] \cdot a \quad (2.1)$$

Eşitlikte yer alan λ talaş yığılma faktörünün kayma açısı (ϕ) ve talaş açısı (γ) yardımıyla hesaplanabildiğine dikkat ediniz.

2.2. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler

Yüksek verimle üretim yapabilmek için üretim esnasında optimum işleme şartlarının sağlanması gerekir. Talaş kaldırma işleminde kesme parametresi olarak isimlendirilen kesme hızı (V), ilerleme miktarı (f) ve kesme derinliğinin (a) takım ömrüne ve talaş kaldırma miktarına önemli etkisi vardır.

Kesmede genel kural olarak, ideal kesme şartlarının belirlenmesinde düşünülmesi gereken en önemli faktör uygun kesme hızı seçiminin yapılmasıdır. Kesme hızı düşük seçilirse az parça üretilir ve çok düşük kesme hızlarında takım ucunda talaş sıvanması meydana gelebilir. Bu durum, kesici takım değişikliğini gerekli kılabilir. Ancak kesme hızı gereğinden yüksek seçildiğinde, takım hızla bozulacak ve daha sık takım değişikliği

gerekecektir. Bu nedenle her hangi bir talaş kaldırma işlemi için optimum kesme hızı, kesici takım ömrü ve talaş kaldırma miktarını dengeleyecek şekilde seçilmelidir. Kesme hızı, iş parçası malzemesi, kesme sıvısı, kesme derinliği, ilerleme ve takım geometrisi sıcaklığın oluşmasını etkileyen faktörlerdir. Bunlardan en önemlisi kesme hızının büyümesi, sıcaklığın önemli ölçüde artmasına neden olur. Bu nedenle sertliklerini sertleştirme yolu ile kazanan takımların kesme hızları sınırlıdır. Kesme sıvılarının kullanılması, sıcaklığın azalmasına ve daha büyük kesme hızlarının kullanılmasına izin verir [3].

Kesme işlemi mekaniği, dolayısıyla takım ömrü açısından değerlendirme yapıldığında; talaş kaldırma miktarı, bitirilmemiş iş parçasından kaldırılan malzeme miktarıdır. V , f , a değişkenlerinden herhangi biri değiştirildiği zaman bunun sonucu olarak talaş kaldırma miktarı da değişir. Her bir parametredeki değişiklik, kesici takım ömrüne farklı olarak yansır. Takım ömrü üzerinde V 'den daha az bir etkiye sahip olduğundan; en uygun f ve a düşünüldüğünde zaman, mümkün olan en derin talaş ve düşük ilerleme miktarı seçilir. Optimum f , kesici takım ömrü ve talaş kaldırma miktarını dengelemelidir [12]. Herhangi bir iş parçası malzemesi yüzeyinden belirli miktarda malzeme tabakasının kaldırılması için kesici takımın malzeme içine batması gerekir. Bu sebeple; kesicinin, işlenecek iş parçasından daha sert/dayanıklı olması, takıma yeteri derecede bir kuvvetin uygulanmasıyla kesme olayının gerçekleşmesi için kesici takımın belirli bir takım geometrisine sahip olması ve belirli kesme şartlarının uygulanması gerekir. Tornalamada yapılan kesme işleminin sürekliliğinden ve talaş kaldırma işlemini en iyi şekilde temsil etmesinden dolayı, tek noktalı kesme işlemi olarak ele alınabilir. Aynı şekilde diğer takım tezgâhlarında da benzer olaylar daha basit olarak ortaya konmaktadır [12].

Talaş kaldırma mekaniğinde kesici takım geometrisi büyük önem taşır. Kesici takımda bulunan γ talaş açısı, β kama açısı ve α serbest yüzey ile parçanın işlenmiş yüzeyi arasında serbest açı veya boşluk açısı kesici takımın geometrisini oluşturur. $+\gamma$, yüksek kayma açısı sağlar ve kesme kuvvetlerinin azalmasına yardımcı olur; talaşın iş parçasından akarak uzaklaşmasına yardımcı olduğu için iyi bir yüzey kalitesi sağlar. $-\gamma$ ise kayma açısını azalttığı için aynı kesme şartlarında $+\gamma$ açılı takımlardan daha yüksek kesme kuvvetleri meydana getirir. Kesintili kesmede negatif talaş açılı takımlar pozitif talaş açılı takımlardan

daha büyük darbe direnci sağlar [1]. Takım üzerindeki bir diğer önemli geometrik parametre ise r takım burun yuvarlatma yarıçapıdır.

2.3. Kanal Açma

Tornalama işlemi, otomotiv, uzay, havacılık, savunma, medikal, kalıpcılık ve diğer uygulama endüstrilerinde çok yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat işlemlerinden en yaygın kullanılanlardan işlemlerden biridir. Tornalama işleminde boyuna ve alın tornalama, dış ve iç kanal açma, dilimleme (radyal doğrultuda kesme), delik tornalama, vida açma vb. işlemler yapılmaktadır.

Tornada yapılan işlerin pek çoğunda kanal açma işlemi uygulanır. Bir vidanın diş dibine, taşlama için kademeli millerin kademe diplerine, segmanlar, sızdırmazlık amacıyla kullanılan oring, nutring, kompakset gibi keçe yuvaları gibi vb. işler için kanalların açılması gerekmektedir. Şekil 2.6'da kanal açma takımlarıyla yapılan dilimleme (1), genel kanal açma (2), tornalama (3), segman kanalı açma (4), dip boşatma (5) alın kanal açma (6) ve profil çıkarma (7) işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kanal açma takımlarıyla yapılan işlemler [13]

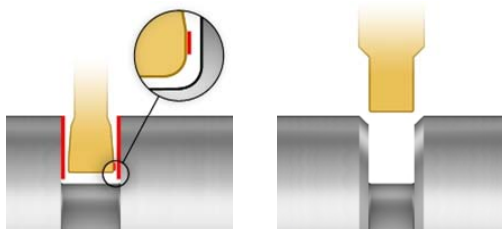
İşlenecek kanal veya alının kesme derinliği ve genişliği ile köşe yarıçapı ve tolerans, yüzey kalitesi gibi kalite ihtiyaçları analiz edilerek uygulama tipine karar verilir. Ancak malzemenin talaş kırma özellikleri, parti boyutu (tek veya seri kanal üretimi), parçanın güvenli bir biçimde bağlanması, talaş boşaltma/kontrolü ve kanal açma için kullanılan takım tezgâhının stabilite, güç ve tork özellikleri, kesme/soğutma sıvısı beslemesi ile takım değiştirme sıklığı gibi faktörler de göz önüne alınması gereken hususlardır.

Kanal açma işlemlerinden özellikle derin kanal açma işlemleri, kesme işlemleriyle pek çok benzerlik gösterir. Genelde kesme ve kanal açma işlemleri için aynı takım tutucu sistemleri kullanılmasına rağmen; uygun performans ve sonuç elde etmek amacıyla kesici uç geometrileri özel olarak tasarlanır. Sığ kanallar, derin kanallar, geniş kanallar, dış çap kanalları, delik kanalları ve alın kanalları olmak üzere farklı kanal tipleri mevcuttur [2].

Kanal açma genelde dilimlemeye göre daha az tokluk gerektirir ve bu sayede uygulama güvenliğine daha kolay ulaşılır. Bu durum, küçük bir kanala göre parçanın toplam işleme süresinde daha fazla etkiye sahip olan ve daha fazla zaman alan geniş kanallarda verimlilik artışına daha fazla talep anlamına gelmektedir [13]. Derin kanallarda uzun kullanma mesafeleri, talaş boşaltma problemleri ve kesme kenarına soğutma sıvısı sağlama zorluğu sebebiyle uygulama güvenliği sıkıntılı bir süreç olabilmektedir.

2.3.1. Tek kesimli kanal açma

Şekil 2.7’de gösterilen tek kesimli kanal açma, kanal açmada en ekonomik ve verimli yöntemdir. Ancak, kanal derinliği kesici uç genişliğinden büyük olduğu takdirde, kanal açmak için çoklu kanal açma, dalarak tornalama, açılı tornalama veya profil işleme yöntemleri uygulanabilir. Yüksek hassaslıkta kesme sıvısına sahip takımlar ise dış kanal açmada ilk tercih edilen takımlardır.

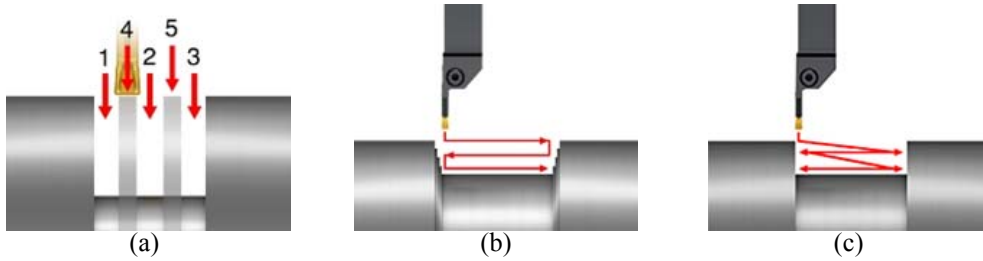


Şekil 2.7. Tek kesimli kanal işleminin [13]

Tek kesimli kanal için arzu edilen ölçü sınırlarına göre bir kesici uç kullanılırken, daha geniş ölçüye sahip kanallar farklı şekillerde işlenebilir. Farklı ilerleme uygulamaları için tasarlanan özel kesici uç geometrileri, kanal açma işlemlerinde en iyi sonuçlar alınmasında katkıda bulunurlar.

2.3.2. Çoklu kanal açma

Geniş kanalların kaba talaş işlemlerinde veya omuzlar arası tornalamada genel olarak; kanalın eni derinliğinden küçükse çoklu kanal açma yöntemi (Şekil 2.8a), kanalın eni derinliğinden büyükse dalma tornalama yöntemi (Şekil 2.8b) ve işlenecek çubuk/parça ince veya narinse rampa tornalama yöntemi (Şekil 2.8c) en sık kullanılan metotlar olarak düşünülebilir [2]. Geniş kanalların işlenmesindeki genel kural; kanalın genişliği derinliğinden küçükse Şekil 2.8’de gösterilen çoklu kanal açma yöntemi tercih edilir [13]. Aksi durumda dalarak tornalama yapılır, ancak ince parçalar için açılı tornalama yöntemi de kullanılabilir.



Şekil 2.8. Geniş (çoklu) kanal açma işlemi [13]

Geniş bir kanal açmak için kesme işlemi yapılır, mümkün olan en geniş kesici uç alternatifli daldırma sırasıyla kullanılır. Şekil 2.8a’da görülen daha sonra ortadan kaldırılacak halkalar için en uygun kesici uç genişliğinin seçilmesiyle en iyi talaş kontrolü ve takım ömrü sağlanmış olur. Kesici ucun köşesi korunur ve talaşlar doğrudan talaş kırıcının ortasına yönlendirilir. Çoğunlukla küçük parti üretimi ve alına kanal açma işlemleri için daha uygundur [2].

Şekil 2.8b’de gösterilen dalma tornalama yönteminde; geniş ve daha dar kanallar için (genişlik derinlikten fazla) radyal doğrultudaki tornalama derinliği, kesici uç genişliğinin $\approx 0,75$ katından büyük seçilmez [2]. Kesme sürecini ve takım ömrünü iyileştirme ve aynı zamanda titreşim eğilimini de asgari seviyeye indirmek için ilerleme yönü değiştirilmeden önce köşelerde beklenir ve sonra radyal doğrultudaki dalma hareketiyle işlem tekrarlanır.

Şekil 2.8c’de gösterilen rampa tornalama yöntemi; radyal doğrultudaki kuvvetlerin daha küçük ve bunun sonucunda da titreşim eğiliminin daha az olması sebebiyle ince veya zayıf olan çubuk veya parçalarda tercih edilen bir yöntemdir. İyi bir talaş kontrolü sağlamakla

birlikte; daha düşük işlenebilirliğe sahip iş parçası malzemelerine kanal açmada takımın çentik aşınması azalır [2].

Geniş kanalların kaba talaş işlemlerinden sonra genel olarak ölçü sapmalarını önlemek amacıyla; kesici uç burun yarıçapından büyük bir kesme derinliği kullanılarak, Şekil 2.9’da gösterilen ince işleme uygulanır.



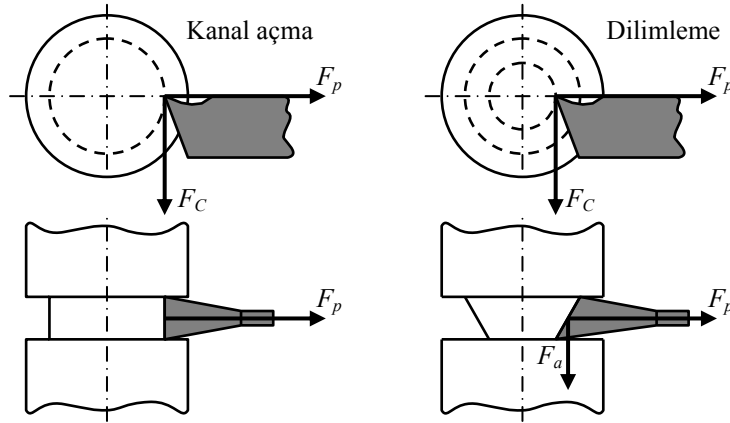
Şekil 2.9. Kanalların ince işlenmesi [13]

2.3.3. Kanal açma işleminde talaş kontrolü

Kanal açma ve dilimleme işlemleri, tüm kesme operasyonları içindeki en sorunlu yöntemlerden biridir [14, 15]. Diğer tornalama operasyonlarıyla karşılaştırıldığında bu işlemlerin temel karakteristikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i) Kanal açma ve özellikle de dilimleme süresince kesme hızı, iş parçasının üst çapında en büyük değerde olurken iş parçasının merkezine doğru gidildikçe sifira yaklaşır. Ancak bu durum sadece sabit devir sayısı (rpm) ile işlemede geçerlidir.
- ii) Dilimleme işleminde kesici takıma F_C esas kesme kuvveti (veya teğetsel kuvvet), F_p pasif (radyal) kuvvet ve F_a aksel kuvvetleri etki etmesine rağmen; kanal açma işleminde F_C esas kesme kuvveti (veya teğetsel kuvvet) ve F_p pasif (radyal) kuvvet etki eder (Şekil 2.10). Kanal açmanın kesme kenarı düz (kesme kenarı iş parçasının boyuna eksenine paralel) olan kesici takımın radyal doğrultudaki dalma hareketiyle yapılması sebebiyle; F_a aksel kuvveti diğer kesme kuvvetlerinin büyüklüğüne göre ihmal edilebilecek seviyededir. Dilimleme işleminde ise kesme kenarı iş parçasının boyuna eksenine paralel olmadığından, üç boyutlu bir kesme gerçekleşir.

Kanal açma ve dilimleme işlemlerinde kesme (veya kanal) genişliği genelde kesici takımın kesme kenarı genişliğine eşit olduğundan ölçü ve boyutsal toleranslar için ilerleme (radyal doğrultudaki) ve kesme hızı uygun değerlerde seçilmelidir.



Şekil 2.10. Kanal açma ve dilimleme işlemlerinde kesme kuvvetleri [14, 15]

Gelişen teknolojiyle daha üstün niteliklerde kesici takımlar üretilmesi ve gelişen malzeme bilgilerinin yanında kesici uç geometrilerinin de geliştirilmesi sonucunda ilerleme değerlerinde önemli ölçüde verimlilik sağlanabilir. Kesici kenar üzerindeki özel olarak tasarlanmış talaş kırıcı profilleri sayesinde; talaş, daha kolay boşaltılır. Kesme/dilimleme işlemlerinde kullanılan kesici takımların verimliliği, takım ömrü ve yüzey kalitesi açısından işlem esnasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi tavsiye edilir [2].

- İşlem için kesici takım üretici firmaların kataloglarında tavsiye edilen kesici takımların ve bu takımlara uygun kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme, dalma derinliği, vb.) kullanılmasına dikkat edilmelidir. Oluşan kesme kuvvetleri ve titreşim açısından, işlemler; kesici takıma göre uygun kesme hızı, ilerleme ve dalma derinliği kullanılarak yapılmalıdır.
- Kesici takıma etkiyen yükler dikkate alınarak; kesici takım kesme kenarı ile iş parçasının boyuna eksenine, herhangi bir sapma olmayacak biçimde ayarlanmalıdır.
- Kesici takım kesme kenarının iş parçasının boyuna eksenine paralelliği (kesici takımın iş parçası eksenine dik olması), herhangi bir sapma olmayacak biçimde ayarlanmalıdır.
- Kesme işlemi sırasında oluşan ısının kesme bölgesinden uzaklaştırılması için yeteri derecede soğutma sıvısı kullanılmalıdır.

2.4. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ve Ansys Yazılımı

2.4.1. Sonlu Elemanlar Analizi

FEM, karmaşık problemlerin daha basit alt problemler biçiminde ele alınarak, bu alt problemlerin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Esas itibariyle FEM’de; geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesinin sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılması, her elemandaki süreklilik fonksiyonlarının cebirsel polinomlarla tanımlanması ve her eleman için sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) sınır ve başlangıç şartlarının uygulanmasıyla problemde aranan değerlerin çözümü olmak üzere üç ana unsur bulunmaktadır [1]. Bir FEM uygulamasında genel olarak *i*) problem modelinin sonlu elemanlara bölünmesi, *ii*) interpolasyon fonksiyonlarının seçimi, *iii*) eleman rijitlik matrislerinin oluşturulması, *iv*) sistem rijitlik matrisinin hesaplanması, *v*) sisteme etki eden kuvvetlerin gösterilmesi, *vi*) sınır şartlarının belirlenmesi ve *vii*) sistem denklemlerinin çözümü olarak sıralanabilen adımlar izlenir [16].

FEM’de karşılaşılan problemler genellikle kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen fiziksel problemlerdir. Örneğin mukavemet probleminde aranan sonuç cismin yaptığı deplasman/yer değiştirmedir. Bu ise gerilme ve deplasman arasında kurulan ikinci dereceden bir kısmi diferansiyel denklemin çözümüyle elde edilir. Ancak eğrisel kenar/yüzey içeren geometriye sahip karmaşık problemlerde gerçek çözümden ziyade yaklaşık çözümler elde edilecektir. Yaklaşık çözümlerinde ise genellikle potansiyel enerji yaklaşımı kullanılır. Potansiyel enerji yönteminde, konservatif sistemlerde yapılan işin gidilen yoldan bağımsız olarak sadece yapılan yüklemelerle ilgili olması sebebiyle; iç kuvvetlerin potansiyel enerjisi şekil değiştirme enerjisi ile kütle, yüzey, tekil kuvvetler gibi dış kuvvetlerin potansiyel enerjisi de uygulanan kuvvetlerin yaptığı iş biçiminde ele alınır [16]. Potansiyel enerji, sistemin konumunu belirleyen koordinatlara bağlı olarak integral ifadeyle gösterilir ve sınır şartlarını sağlayan durumlarda cismin dengede kalabilmesi için minimize edilir. dV ve dA sırasıyla ilgili hacim ve yüzey alanı olmak üzere;

$$\{\sigma\} = \left[\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx} \right]^T \quad (2.2a)$$

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \text{ olup } \begin{cases} \lambda_1 = (1-\nu) \\ \lambda_2 = \nu \\ \lambda_3 = \frac{1}{2} \cdot (1-2\nu) \end{cases} \quad (2.2b)$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T \quad (2.2c)$$

$$\{u\} = [u \quad v \quad w]^T \quad (2.2d)$$

$$\{f\} = [f_x \quad f_y \quad f_z]^T \quad (2.2e)$$

$$\{T\} = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T \quad (2.2f)$$

$$\{P_i\} = [P_x \quad P_y \quad P_z]^T_i \quad (2.2g)$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot \int_V [\sigma]^T \cdot \{\varepsilon\} \cdot dV \quad (2.3a)$$

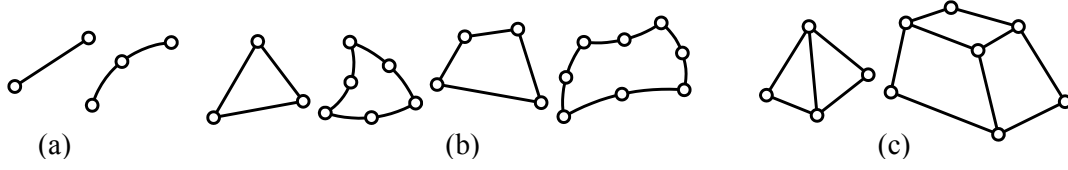
$$W = -\int_V \{u\}^T \cdot \{f\} \cdot dV - \int_A \{u\}^T \cdot \{T\} \cdot dA - \sum_i \{u_i\}^T \cdot \{P_i\} \quad (2.3b)$$

$$\Pi = U + W \quad (2.4)$$

olarak elde edilir [17]. Daha sonra ise sınır şartlarına göre minimizasyon yapılır:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{u\}} = 0 \quad (2.5)$$

Sonlu eleman problemlerinin çözümünde; çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek, bu geometrik yapıya en uygun elemanlar seçilir. FEM’de temel olarak Şekil 2.11a, b,c’de gösterilen sırasıyla tek, iki (dörtgen ve üçgen) ve üç boyutlu (dört yüzlü/*tetrahedron*, kama/*wedge*, altı yüzlü/*hexahedron* veya tuğla/*brick*) elemanlar kullanılır. Topolojik olarak düzenli ağ oluşturmak için elemanın uç, köşe veya kenarlarında ise düğümler kullanılır. Çözüm bölgesi sınırlarının eğrisel geometrilere sahip olması durumunda; çözüm bölgesini gerekli hassasiyette tanımlamak için kullanılan eleman boyutları küçültülür (dolayısıyla eleman sayıları arttırılır, ancak çözüm için ilave bilgisayar kapasitesi ve zaman gerektirir) veya eğri denklemleriyle tanımlanan sınırlara uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlar kullanılır.



Şekil 2.11. FEM'de kullanılan bazı elemanlar [1]

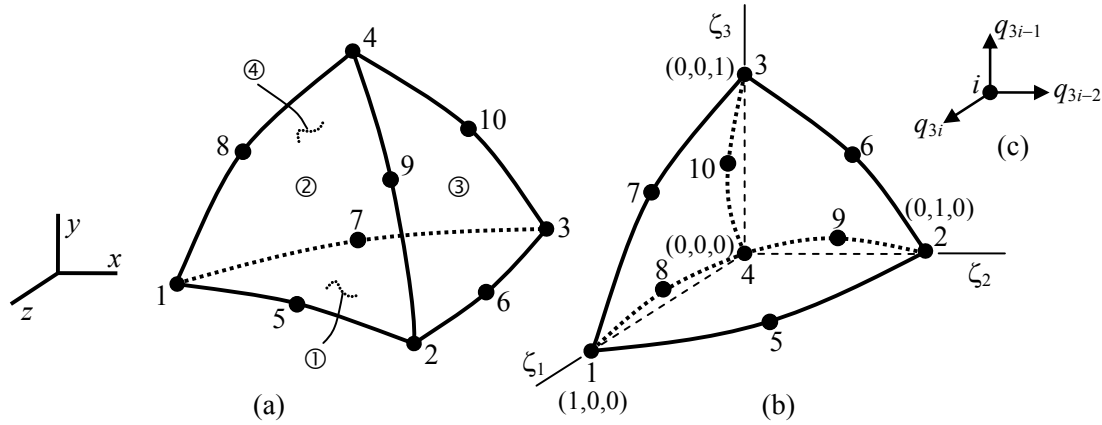
Çözüm bölgesini daha az sayıda eleman kullanarak daha iyi tanımlamak amacıyla; Felippa ve Clough [18] tarafından ifade edilen, eleman üzerindeki her bir düğüm için gerekli serbestlik derecelerine ait benzer bilgileri daha iyi gösteren izoparametrik tanımlama yapılıır. İzoparametrik tanımlamada ise elemanın düğüm sayısı n olmak üzere Eş. 2.6a'daki bir noktanın koordinatları (x, y, z) ve bu noktaya karşılık gelen u, v, w deplasmanlarından oluşan Eş. 2.6b'deki problemin bütünlük şartları; elemandaki düğüm koordinatları $(x_i, \dots, x_n; y_i, \dots, y_n; z_i, \dots, z_n)$ ve düğüm deplasmanları $(u_i, \dots, u_n; v_i, \dots, v_n; w_i, \dots, w_n)$ yardımıyla N_i şekil fonksiyonlarıyla ifade edilir [1].

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_{n-1} & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{n-1} & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_{n-1} & z_n \\ u_1 & u_2 & \dots & u_{n-1} & u_n \\ v_1 & v_2 & \dots & v_{n-1} & v_n \\ w_1 & w_2 & \dots & w_{n-1} & w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ \vdots \\ N_{n-1} \\ N_n \end{bmatrix} \quad (2.6a)$$

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{i=1}^n N_i \quad ; \quad x = \sum_{i=1}^n x_i \cdot N_i \quad ; \quad y = \sum_{i=1}^n y_i \cdot N_i \quad ; \quad z = \sum_{i=1}^n z_i \cdot N_i \\ u &= \sum_{i=1}^n u_i \cdot N_i \quad ; \quad v = \sum_{i=1}^n v_i \cdot N_i \quad ; \quad w = \sum_{i=1}^n w_i \cdot N_i \end{aligned} \quad (2.6b)$$

Şekil fonksiyonları ise daha ziyade doğal/parametrik koordinatlar yardımıyla tanımlanır. Şekil 2.12a'da, kuadratik (ikinci dereceden polinom) yer değiştirme davranışı sergileyen ve özellikle üç boyutlu modellerde düzenli olmayan ağ (*mesh*) yapılarına uygulanabilen; 10 düğümlü kuadratik dört yüzlü eleman gösterilmiştir (bu eleman, Ansys Workbench'te SOLID 187 olarak adlandırılır). Elemanın 4 köşesinde ve 6 kenarının üzerinde düğümler bulunmakla birlikte; dört yüzünün her bir yüzeyi, hepsi de bir düzlemde bulunması gerekmeyen 6 ara düğümle tanımlanır. Başka bir deyişle eleman; ara düğüm konumlarıyla tanımlanan parabolik (eğri biçimli) kenarlara, dolayısıyla da eğrisel yüzeylere sahip

olabilir. İzoparametrik dört yüzlü ailesinin tam polinomlu bir elemanı olan dört yüzlü, her bir düğümünde x, y, z doğrultularında toplam 3 serbestlik derecesi bulunan 10 düğümlle tanımlanır (eleman için toplam serbestlik derecesi 30 olur). Özellikle plastisite, hiperelastisite, sürünme, büyük deformasyon ve büyük gerinme özellikleri gösteren problemler için elverişlidir.



Şekil 2.12. On düğümlü kuadratik dört yüzlü eleman

$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ dört yüzlünün doğal/parametrik koordinatları olmak üzere (Şekil 2.12b); 10 düğümlü kuadratik dört yüzlünün şekil fonksiyonları ise

$$\left. \begin{array}{ll} N_1 = \zeta_1 \cdot (2 \cdot \zeta_1 - 1) & N_6 = 4 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_3 \\ N_2 = \zeta_2 \cdot (2 \cdot \zeta_2 - 1) & N_7 = 4 \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_3 \\ N_3 = \zeta_3 \cdot (2 \cdot \zeta_3 - 1) & N_8 = 4 \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_4 \\ N_4 = \zeta_4 \cdot (2 \cdot \zeta_4 - 1) & N_9 = 4 \cdot \zeta_2 \cdot \zeta_4 \\ N_5 = 4 \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_2 & N_{10} = 4 \cdot \zeta_3 \cdot \zeta_4 \end{array} \right\} \text{ olup } \begin{cases} \zeta_4 = 1 - \zeta_1 - \zeta_2 - \zeta_3 \\ \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

şeklinde tanımlanır [1, 18-20]. Şekil 2.12b'den ζ_i değeri ($i=1,2,3,4$) için i köşesinde 1 ve diğer 3 köşede ise 0 olduğuna dikkat ediniz. Şekil 2.12c'de ise düğüm deplasmanları için gösterim verilmiştir. Bu gösterime göre toplam serbestlik derecesi 30 olan dört yüzlü elemanın x, y, z doğrultularındaki düğüm deplasmanları sırasıyla $q_{3i-2}, q_{3i-1}, q_{3i}$ biçimde tanımlanır. Örneğin 1 numaralı düğüm için q_1, q_2, q_3 ve 10 numaralı düğüm için q_{28}, q_{29}, q_{30} . $\{q\}$ ve $[N]$ kullanılarak elemanın $\{u\}$ deplasman vektörü

$$\left. \begin{aligned} \{q\} &= [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad \dots \quad q_{28} \quad q_{29} \quad q_{30}]^T \\ N_i &= \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \text{ olup } i = 1, 2, 3, \dots, 9, 10 \\ [N] &= [N_1 \mid N_2 \mid N_3 \mid N_4 \mid N_5 \mid N_6 \mid N_7 \mid N_8 \mid N_9 \mid N_{10}] \end{aligned} \right\} \quad (2.8a)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N_1 \mid N_2 \mid N_3 \mid N_4 \mid N_5 \mid N_6 \mid N_7 \mid N_8 \mid N_9 \mid N_{10}] \cdot \begin{Bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{30} \end{Bmatrix} \quad (2.8b)$$

$$\{u\} = [N] \cdot \{q\} \quad (2.8c)$$

biçiminde yazılabilir. Benzer mantıkla, Eş. 2.6a'daki x, y, z koordinatları da aynı şekil fonksiyonları kullanılarak düğüm koordinatları cinsinden ifade edilebilir.

Bir sonraki FEM aşamasında ise Eş. 2.8c ile deplasman tanımlaması yapılan elemandaki gerinmelerin interpolasyonu ile elde edilen düğüm koordinatları cinsinden 6×30 boyutlu $[B]$ gerinme-deplasman matrisi elde edilir:

$$[D] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}^T \quad (2.9a)$$

$$\{\varepsilon\} = [D] \cdot \{u\} = [D] \cdot [N] \cdot \{q\} \Rightarrow [B] = [D] \cdot [N] \Rightarrow \{\varepsilon\} = [B] \cdot \{q\} \quad (2.9b)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} q_{x_1} & \dots & q_{x_{10}} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & q_{y_1} & \dots & q_{y_{10}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & q_{z_1} & \dots & q_{z_{10}} \\ q_{y_1} & \dots & q_{y_{10}} & q_{x_1} & \dots & q_{x_{10}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & q_{z_1} & \dots & q_{z_{10}} & q_{y_1} & \dots & q_{y_{10}} \\ q_{x_1} & \dots & q_{x_{10}} & 0 & \dots & 0 & q_{z_1} & \dots & q_{z_{10}} \end{bmatrix} \quad (2.9c)$$

elde edilir. Burada $q_{x_i} = \frac{\partial N_i}{\partial \zeta_j} \cdot \frac{\partial \zeta_j}{\partial x}$, $q_{y_i} = \frac{\partial N_i}{\partial \zeta_j} \cdot \frac{\partial \zeta_j}{\partial y}$, $q_{z_i} = \frac{\partial N_i}{\partial \zeta_j} \cdot \frac{\partial \zeta_j}{\partial z}$ olmak üzere $i = 1,$

$2, 3, \dots, 9, 10$ ve $j = 1, 2, 3, 4$.

Eş. 2.2a, b, c yardımıyla üç boyutlu durum için gerilme-gerinme ilişkileri

$$\{\sigma\} = [E] \cdot \{\varepsilon\} \quad (2.10a)$$

biçiminde tanımlanabildiğinden [17]; Eş 2.9b'deki $\{\varepsilon\}$, Eş 2.10a'da yerine yazılır:

$$\{\sigma\} = [E] \cdot [B] \cdot \{q\} \quad (2.10b)$$

Eş. 2.10b doğrultusunda, Eş 2.3a'daki şekil değiştirme (gerinme) enerjisi ifadesi aşağıda gibi yazılabilir:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \int_V [\sigma]^T \cdot \{\varepsilon\} \cdot dV \Rightarrow U_{(e)} = \frac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot [B]^T \cdot [E] \cdot [B] \cdot \{q\} \cdot \int_{(e)} dV \quad (2.11)$$

Eş 2.11'deki 10 düğümlü kuadratik dört yüzlü elemanın $V_{(e)}$ hacmi için $|J|$, Eş 2.9c'deki $[B]$ matrisinin elde edilme sürecinde bir dizi kısmi türev işlemlerinde doğal koordinatları geometrik koordinatlara dönüştürmek amacıyla kullanılan $[J]$ Jacobian matrisinin determinantını göstermek üzere

$$dx \cdot dy \cdot dz = dV_{(e)} = |J| \cdot d\zeta_1 \cdot d\zeta_2 \cdot d\zeta_3 \Rightarrow V_{(e)} = \frac{1}{6} \cdot |J| \quad (2.12)$$

yazılabilir [16, 17]. Eş 2.12, Eş 2.11'de yazılarak kuadratik dört yüzlü elemanın 30×30 boyutlu $[k_{(e)}]$ eleman rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$U_{(e)} = \frac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot \left(V_{(e)} \cdot [B]^T \cdot [E] \cdot [B] \right) \cdot \{q\} = \frac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot [k_{(e)}] \cdot \{q\} \text{ olmak üzere}$$

$$[k_{(e)}] = V_{(e)} \cdot [B]^T \cdot [E] \cdot [B] = \frac{1}{6} \cdot |J| \cdot [B]^T \cdot [E] \cdot [B] \quad (2.13)$$

Eş 2.8c'ye göre Eş 2.2e, f 'deki kuvvet terimlerinin Eş 2.3b'de gösterilen işi ise sırasıyla aşağıdaki gibi olur ($A_{(e)}$, yüzey kuvveti uygulanan alanı göstermektedir):

$$\int_V \{u\}^T \cdot \{f\} \cdot dV_{(e)} = \{q\}^T \cdot \iiint [N]^T \cdot \{f\} \cdot |J| \cdot d\zeta_1 \cdot d\zeta_2 \cdot d\zeta_3 = \{q\}^T \cdot \{f_{(e)}\} \quad (2.14a)$$

$$\int_A \{u\}^T \cdot \{T\} \cdot dA = \{q\}^T \cdot \int_A [N]^T \cdot \{T\} \cdot dA_{(e)} = \{q\}^T \cdot \{T_{(e)}\} \quad (2.14b)$$

Buraya kadar anlatılan ve sadece bir eleman için geçerli olan prosedür, sistemde kullanılan diğer tüm elemanların her biri için tekrarlanır. Sonraki aşamada ise elemanların düğüm numaraları dikkate alınarak, aynı düğümlere karşılık gelen bilgiler; rijitlik matrisi, kütle kuvvetleri vektörü ve yüzey kuvvetleri vektöründe bir araya getirilir (toplanır):

$$\sum_e [k_{(e)}] \rightarrow [K] \quad (2.15a)$$

$$\sum_e (\{f_{(e)}\} + \{T_{(e)}\}) + \{P_i\} \rightarrow [F] \quad (2.15b)$$

Başka bir deyişle genel (sistemin tamamı için) deplasman vektörü $\{Q\}$ olmak üzere; Eş. 2.3a ve Eş. 2.3b doğrultusunda yazılan Eş. 2.4'teki potansiyel enerji ifadesi sistemin tamamı için toplam potansiyel enerji olarak yazılır:

$$\{Q\} = [Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3 \quad \dots \quad Q_{N-2} \quad Q_{N-1} \quad Q_N]^T \quad (2.16)$$

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot [k_{(e)}] \cdot \{q\} = \frac{1}{2} \cdot \{Q\}^T \cdot [K] \cdot \{Q\} \quad (2.17a)$$

$$W = -\sum_e \{q\}^T \cdot \{f_{(e)}\} - \sum_e \{q\}^T \cdot \{T_{(e)}\} - \sum_i \{Q_i\} \cdot \{P_i\} = -\{Q\}^T \cdot \{F\} \quad (2.17b)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot \{Q\}^T \cdot [K] \cdot \{Q\} - \{Q\}^T \cdot \{F\} \quad (2.18)$$

Eş. 2.5'te gösterildiği üzere sistemin tamamı için toplam potansiyel enerji minimizasyon yapılarak ($\partial\Pi/\partial\{Q\}=0$) nihai durum elde edilir:

$$\frac{\partial\Pi}{\partial\{Q\}} = 0 = [K] \cdot \{Q\} - \{F\} \Rightarrow [K] \cdot \{Q\} = \{F\} \quad (2.19)$$

Eş. 2.19'un çözülmesiyle (örneğin $\{Q\}=[K]^{-1} \cdot \{F\}$ olarak) sistemde kullanılan elemanların düğümlerine ait deplasmanlar belirlenmiş olur.

2.4.2. Eşdeğer gerilme (von Mises gerilmesi)

FEM hesaplamalarında düğüm deplasmanları belirlendikten sonraki aşamada problemde aranan sonuçlar görüntülenir (veya listelenir). Örneğin bir gerilme analizi probleminde normal gerilmeler ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), kayma gerilmeleri ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$), asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), eşdeğer gerilme (veya von Mises gerilmesi, σ_{VM}) ile toplam deformasyon gibi.

Üç boyutlu bir durumda birbirine dik durumdaki üç düzlemde sıfır kayma gerilmelerine karşılık normal gerilmelerin ise en büyük veya en küçük değerlere sahip olduğu düşünülürse; bu durumdaki normal gerilmeler asal gerilmeler olarak adlandırılır ve büyükten küçüğe sırasıyla $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ şeklinde gösterilir.

Gerilme analizi probleminde kullanılan malzemenin belirtilen yüklemelere (veya gerilmelere) dayanıp dayanmayacağı ise genelde malzemedeki en büyük biçim değiştirme (çarpılma) enerjisi teorisine (von Mises kriteri) göre kontrol edilir. Bu durumda genel haldeki biçim değiştirme (çarpılma) enerjisi teorisine aşağıdaki gibi yazılabilir [21]:

$$U_g = \frac{1}{12G} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \quad (2.20a)$$

$$U_g = \frac{1}{12G} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.20b)$$

$$U_g \leq [\sigma_Y^2 / (6G)] \quad (2.21)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (2.22a)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.22b)$$

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_Y \quad (2.23)$$

Bu teoriye göre (Eş. 2.23); basit çekme deneyindeki akma noktasından (σ_Y) daha büyük gerilmelere maruz kalındığı takdirde malzemedeki hasar (kırılma/kopma) görülür. Dolayısıyla malzemedeki hasar oluşmaması için von Mises gerilmesi, malzemenin akma noktası gerilmesine eşit veya küçük olmalıdır ($\sigma_{VM} \leq \sigma_Y$).

2.4.3. Ansys yazılımı

Ansys yazılımı; mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiriyle olan etkileşimleri simüle etmekte kullanılabilen FEM'dayalı genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Başka bir deyişle Ansys; ürünlerin henüz prototip aşamasında iken sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlayan, birçok platform ve üründen (Classic, Workbench, CFX, Autodyn&LS Dyna, Fluent, vb.) oluşan modüler bir yazılımdır. Böylece sanal ortamda yapılan üç

boyutlu simülasyonlarla, yapıların zayıf noktalarının belirlenmesi ve bu kısımların iyileştirilerek ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin üretim öncesinde öngörülmesi mümkün olmaktadır.

Ansys'in modüler yapısı sayesinde sadece ihtiyaç duyulan özellikler (veya ürünler) kullanılabilir, kendi içindeki *preprocessing* bölümü dışında diğer CAD yazılımlarından da geometri/model oluşturulabilir, arzu edilen sonuçlar grafik veya sayısal olarak elde edilebilir, değişik temas durumları tanımlanabilir ve zaman bağlı yükleme özellikleri ile nonlineer malzeme özellikleri kullanılabilir. Böylece mühendislik seviyeleri yüksek analizler; hızlı, güvenilir ve pratik bir biçimde gerçekleştirilebilir.

Amacı, sanal ortamdaki ürünün doğrulanmasını ve iyileştirmesini sağlamak olan Ansys Workbench (AW) platformu; parametrik CAD sistemlerini eşsiz bir otomasyon ve performansla simülasyon teknolojilerini entegre eden bir platformdur. Çift yönlü CAD etkileşimi, güçlü ve otomatik ağ yapısı, her adımda güncelleme mekanizması, gelişmiş parametre yönetimi, etkileşimli optimizasyon araçları ile simülasyon tabanlı ürün gelişimini etkinleştirerek eşi görülmemiş bir üretkenlik sağlar.

AW 12 sürümüne kadar platform, *StartPage* olarak isimlendirilen ara yüzden kullanım amacına uygun olarak *Empty Project*, *Geometry*, *Simulation*, *Finite Element Model*, *Meshing* gibi ikonlara/görevlere basmak suretiyle çalışırken; bu sürümle birlikte (ve sonraki 13, 14, 15 sürümlerinde de) *StartPage* ara yüzünde yenilikçi tasarım uygulanarak, sürükle-bırak mantığıyla, akış şeması biçimindeki bir diyagramda bağlı sistemler halinde grafiksel olarak gösterilmiştir. Böylece kullanıcıların bir bakışta mühendislik amacını, veri ilişkilerini ve analiz projesinin durumunu kolayca anlayabilmesi amaçlanmıştır.

Aşağıda, AW ile bir probleminin çözüm aşamaları özetlenmiştir:

- ✓ Model oluşturulur (*attach geometry*).
- ✓ Malzeme özellikleri tanımlanır (*define part behavior*).
- ✓ Temas bölgeleri, mafsal ve/veya yay içeren bağlantılar tanımlanır (*define connections*).
- ✓ Model elemanlara ayrılır ve düğümler elde edilir (*apply mesh controls/preview mesh*).
- ✓ Hesaplama yapılacak yükleme durumları ve ilgili sonuçlar için analiz türü belirlenir (*define analysis type*).

- ✓ Çeşitli hesaplama seçenekleri için analiz/çözüm seçenekleri belirlenir (*establish analysis settings*).
- ✓ Özellikle *flexible dynamic, steady-state thermal* ve *transient thermal* analizleri olmak üzere hesaplama öncesinde kullanılacak başlangıç şartları tanımlanır (*define initial condition*).
- ✓ Analiz türüne göre problemde uygulanacak yüklemeler ve destek tipleri belirlenir (*apply loads and supports*).
- ✓ Yukarıdaki işlemler sonrasında problem çözülür (*solve*).
- ✓ Analiz türüne göre problemin çözümü sonrasında bakılacak sonuçlar incelenir (*review results*).
- ✓ Gerekliyse, baştan sonra analiz süreci raporlandırılır (*create report*).

Buna göre AW 11 sürümü kullanılarak bir probleminin çözüm süreci aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilir:

Project

StartPage ara yüzünden *Empty Project* görevi yardımıyla, problemle ilgili model, analiz şartları/sonuçları, kullanılan eleman tipleri/sayısı ile çözüm dosyalarını içeren bir *Project* sekmesi oluşturulur. *Project* dosyası (*.wbdb); hepsi *Project* sekmesinde görüntülenen *DesignModeler* (*.agdb), *Simulation* (*.dsdb), *FE Modeler* (*.fedb), *Meshing* (*.cmdb) ve *DesignXplorer* (*.dxd) gibi problemdeki tüm dosyaların doğrudan kontrol edilmesini/erişilmesini kılmaktadır.

DesignModeler (DM)

DM sekmesi; *Project* ara yüzündeki *New Geometry* görevi yardımıyla açılır. *DM* sekmesinde; problemde kullanılacak model, birim sistemi tanımlanarak *line/surface/ solid body* olarak çizilir. Çizim, diğer CAD programlarında olduğu gibi *sketch, extrude, revolve, sweep, skin/loft*, vb. modelleme mantığı ile yapılır. *Boolean* ve *body operation* komutlarıyla modeller arasında kopyalama, döndürme, taşıma, toplama, çıkarma, ara kesişim alma, pah kırma, köşe yuvarlatma, düzlem oluşturma ve montaj gibi işlevler arzu edildiği takdirde parametrik olarak da yapılabilir. Çizim yapmak yerine, *import external*

geometry file özelliği sayesinde; uygun dosya uzantıları (ACIS/.sat, IGES/.iges, Parasolid/.x_t, STEP/.stp) kullanılarak diğer CAD programlarından da model çağrılabilir.

Simulation (S)

Simulation sekmesi; *Project* ara yüzünde, oluşturulan modeli içeren *DesignModeler* dosyası seçilerek *New Simulation* görevi yardımıyla açılır. *Simulation* sekmesinde; malzeme özellikleri (E , G , σ , ν) tanımlanan ve elemanlara ayırma (*meshing*) işlemi gerçekleştirilen model için 2 veya 3 boyutlu yapılacak analiz türüne göre problemde kullanılacak başlangıç ve sınır şartları tanımlanır, analiz/çözüm seçenekleri belirlenir ve çözüm sonrasında bakılacak sonuçlar grafiksel olarak görüntülenir.

DM sekmesinde çizilerek oluşturulan model yerine; *Simulation* sekmesindeki *Attach Geometry* özelliği sayesinde, uygun dosya uzantıları kullanılarak diğer CAD programlarından çağrılan model de doğrudan kullanılabilir. *Simulation* sekmesinde elemanlara ayırmak yerine, yüksek kaliteli ağların gerektiği durumlarda; açılacak olan *CFX-Mesh* sekmesi yardımıyla daha nitelikli ağlar da elde edilebilir.

Analiz türü olarak *static structural*, *flexible/rigid dynamic*, *harmonic response*, *modal*, *linear buckling*, *random vibration*, *shape optimization*, *steady-state/transient thermal* ve *magnetostatic* kullanılabilir. *Static structural* analiz türüne göre başlangıç ve sınır şartları, problemde kullanılacak bağlantı/destek tiplerinin belirlenmesi (*supports*) ve yüklemelerin (*loads*) yapılmasıyla tanımlanır. Modelin bir montaj grubu olması halinde, otomatik olarak algılanan montaj elemanları arasındaki (*face/face*, *edge/face*, *edge/edge*) temas davranışları (*bonded*, *frictionless*, *no separation*, *rough*, *frictional*) belirlenir. Problem çözüm kontrolü (*solver controls*), analiz adım sayısı (*step controls*), çözüm sonuçlarının yakınsaklık kontrolü (*non-linear controls: force/moment/displacement/rotation convergence criterion*, *line search*) ve sonuç kontrolü (*output controls: calculate stress and strain*) gibi seçenekler yardımıyla analiz ayarları yapılır. Çözüm sonrasında *deformation*, *stress/strain*, *thermal*, *contact/joint/reactions results* gibi bakılacak sonuçlar grafiksel olarak görüntülenir.

Arzu edildiği takdirde; başlangıç/sınır şartlarının tanımlanması veya çözüm sonrasında bakılacak sonuçlar aşamasında, daha ziyade Ansys Classic platformunda yaygın olarak kullanılan *Ansys Parametric Design Language (APDL)* komutları da uygulanabilir.

Finite Element Model (FE Model)

(Gerekirse) *FE Model* sekmesi; *Project* ara yüzünde, yapılan analizi içeren *Simulation* dosyası seçilerek *New FE Model* görevi yardımıyla açılır. *FE Model* sekmesinde; çözümü yapılan problem verileri ile Ansys Classic, Nastran, Abaqus gibi diğer sonlu eleman programları arasında veri transferi sağlamak amacıyla, probleme ait geometri, malzeme özellikleri, eleman tipleri, geometrik ve topolojik olarak eleman/düğüm bilgileri ile başlangıç/sınır şartlarını içeren veriler oluşturulur. *FE Model* dosyası oluşturulduktan sonra, arzu edildiği takdirde; Workbench platformunda ele alınan problem veri tabını, *Project* ara yüzündeki *Open analysis in Ansys* görevi yardımıyla Ansys Classic ortamında da açılabilir.

Meshing

(Gerekirse) *Meshing* sekmesi; *Project* ara yüzünde, oluşturulan modeli içeren *DesignModeler* dosyası seçilerek *New Mesh* görevi yardımıyla açılır. Modeli, *Simulation* sekmesinde elemanlara ayırmak yerine; *Meshing* sekmesinde, çözümü yapılacak problemdeki fiziksel tercihe (*CFD, Explicit, Mechanical, Electromagnetic*) göre alternatif olarak çabucak ve kolaylıkla daha güçlü/nitelikli ağlar yapmak mümkündür. Modelle ilgili özellikle topolojik olarak iyileştirmeler yapılarak, son derece elverişli ağlar elde edilebilir.

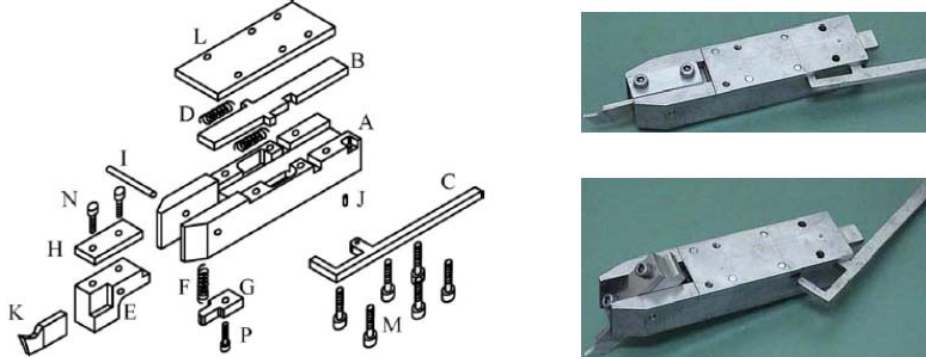
DesignXplorer

(Gerekirse) *DesignXplorer* sekmesi; *Project* ara yüzünde, yapılan analizi içeren *Simulation* dosyası seçilerek *Start DesignXplorer* görevi yardımıyla açılır. *DesignXplorer* sekmesi yardımıyla, varyasyonel teknolojilerle optimizasyon yapılabilir. Problemden kullanılan girdilerdeki (örneğin model geometrisi veya yükleme) değişime göre parça veya montaj grubu üzerindeki çıktı/analiz sonuçlarının (örneğin deformasyon) nasıl değiştiği parametrik olarak incelenebilir. Bunun için çeşitli deney tasarım (*Design of Experiments, DOE*) noktaları (örnekleme noktaları) belirlenir ve girdiler aşama aşama değiştirilerek çıktıların değişimi kontrol edilir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Kanal Açma İşlemini İçeren Çalışmalar

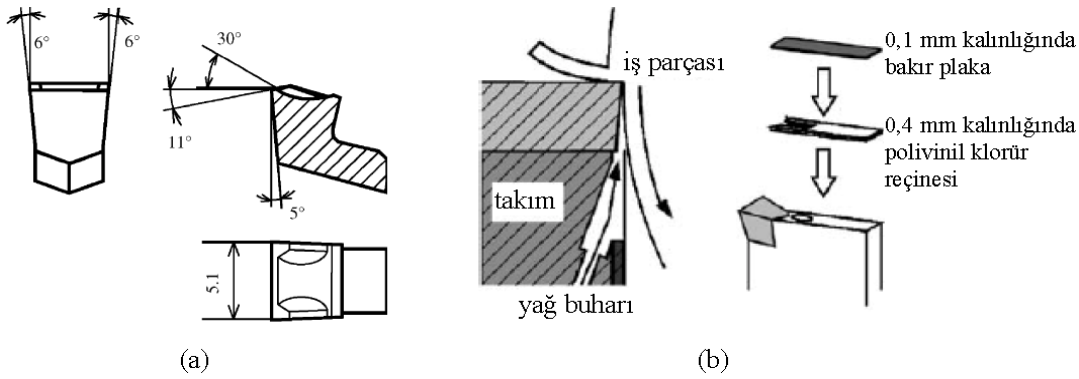
Chern [22], özellikle ortogonal kesme için kullanılan kanal açma veya radyal doğrultuda kesme takımları yardımıyla talaş oluşumunun incelenmesinde kullanılmak üzere yeni, basit ve kullanışlı bir hızlı durdurma takımı (*quick-stop device*, QSD) geliştirmiştir (Şekil 3.1). Chern, geliştirdiği QSD sistemini, kanal açma/radyal doğrultuda kesme işlemi gibi dikkate alarak; 2,6 mm kanal genişliği ile aralarında 2 mm mesafe bırakılan 25 mm çapındaki AISI 1017 çelik üzerinde 20° boşluk açılı ve 5°, 10°, 15°, 20° talaş açılarında sahip kesme takımları yardımıyla 14,1-21,2-24,3-45,6 m/min kesme hızları ve 0,101-0,130-0,165-0,191 mm/rev ilerleme değerleri kullanarak çeşitli ortogonal kesme deneyleri yapmıştır. QSD sistemiyle yapılan kesme deneylerinde çekilen talaş kökü mikro fotoğrafları yardımıyla talaş oluşumu, kayma düzleminin doğrultusu ve kenarda talaş sıkışması/yapışması (*built-up edge*, BUE) olaylarını göstermiştir.



Şekil 3.1. Chern tarafından geliştirilen hızlı durdurma takımı [22]

Obikawa et al. [23]; % 0,45 C içeren karbon çeliğinin P25 kalitesindeki kaplamasız ve her biri 10 µm kalınlığa sahip TiC/TiCN/TiN olmak üzere üçlü kaplama katmanıyla kaplanmış P35 kalitesindeki kesici bir takım kullanarak yüksek hızda silindirik kanal açma işlemindeki minimum miktarda yağlama (*minimum quantity lubrication*, MQL) performansını incelenmişlerdir. 0,12 mm/rev ilerleme ve 4-5 m/s'lik yüksek kesme hızlarıyla (kaplamasız ve kaplamalı takımlar için tavsiye edilen değerler sırasıyla 1,75 m/s ve 2,4 m/s) yapılan deneylerde; 150 mm çapındaki iş parçası üzerinde 2,9 mm aralıklarla 5,1 mm kanal genişliğinde ve 7,5 mm derinliğinde pek çok kanal açma işlemi uygulamışlardır. Kesici takımın titreşim etkilerini asgari seviyeye indirmek açısından 20

mm'lik bağlama boyunu tercih etmişler ve kesici takımındaki yanak aşınması ile sol ve sağ köşelerdeki aşınmaları bir mikroskopla ölçmüşlerdir. Şekil 3.2'de çalışmada kullandıkları kanal açma kesici uçları (Şekil 3.2a) ve önerdikleri kontrollü bir yağ buharı yönüne sahip kesici takım düzeneği (Şekil 3.2b) gösterilmiştir. Çalışmalarında önerdikleri sistemle literatürdeki frezeleme (yüzey/parmak), tornalama, delme, kılavuz çekme gibi diğer MQL uygulamalarını karşılaştırmışlardır. 7 ml/h 'lik sabit ve küçük bir debiye sahip bitkisel yağın kullanılması halinde; 4-5 m/s'lik yüksek kesme hızlarında kesme sıvısı içindeki bir çözelti biçimine göre köşe ve yanak aşınmalarının daha etkili bir şekilde azaldığını görmüşlerdir. MQL kanal açmada sağlanan hava basıncının artırılmasıyla aşınmaların önemli ölçüde azaldığını göstermişler ve kontrollü bir yağ buharı yönüne sahip kesici takım önermişlerdir.



Şekil 3.2. Kontrollü bir yağ buharı yönüne sahip kesici takım düzeneği [23]

De Chiffre et al. [24], su bazlı diğer soğutucularla karşılaştırma yapmak üzere kesici takım ömrü, kesme kuvvetleri, talaşın atılması ve iş parçasının bitirme yüzeyi açısından kriyojenik CO₂'nin verimliliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, kaplı karpit takımlarla AISI 316L östenitik paslanmaz çelik üzerinde vida çekme ve AISI 304L östenitik paslanmaz çelik üzerinde de kanal açma/radyal doğrultuda kesme operasyonları yapmışlardır. Kanal açma/radyal doğrultuda kesme operasyonlarında (kesici takım genişliği 3 mm) Ø46 mm'lik numuneler Ø8 mm'ye kadar (yarıçapta 19 mm) tornalanırken, dış vida açma operasyonlarında (metrik/adım 1,5 mm) Ø90 mm olan numuneler Ø44 mm'ye kadar işleme tabi tutulmuştur. Soğutma uygulamalarında ise dört farklı meme çapı (0,2-0,3-0,5-0,7 mm) ve üç farklı debi (4, 6 ve 10 ml/min) kullanılmıştır. 0,15 mm/rev ilerleme değeriyle yapılan kanal açma/kesme deneylerinde 130-150 m/min, vida açma deneylerinde ise 170-180 m/min kesme hızları kullanılmıştır. Deneyler

sonucunda kriyojenik CO₂'nin su bazlı diğer soğutuculara alternatif olarak kullanılabilceği gösterilmiştir.

Kafkas [25], talaş kaldırarak düz tornalama ve literatürde fazla ele alınmayan kanal açma ve özellikle çalışma konusunu oluşturan vida açma işlemleri neticesinde meydana gelen iş parçasındaki kalıntı gerilmeleri deneysel olarak incelemiştir; bu işlemlerde oluşan kalıntı gerilmeleri karşılaştırmış ve işlemlerde kullanılan parametrelerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla, değişik işleme parametrelerini kullanarak AISI 4140 ve AISI 4340 malzemeler üzerinde deneyler yapmıştır. Kalıntı gerilmeler, katman kaldırma metodu kullanılarak belirlenmiş, katmanların seri olarak kaldırılması elektrokimyasal işleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde, talaş kaldırma işleminde kalıntı gerilmelerin mekanik ve ısıl etkilerden meydana geldiği belirtilmiştir; ısıl etkileri artıran tüm işleme parametrelerinin çekme kalıntı gerilmelerini, plastik deformasyonu arttıran parametrelerin ise basma kalıntı gerilmelerini oluşturduğunu gözlemiştir. Vida açma, kanal açma ve düz tornalama işlemlerinde kesme biçiminin farklı talaş oluşumu meydana getirdiği ve kalıntı gerilmeleri etkileyen en önemli faktörün talaş oluşumunun farklılığından kaynaklandığı ortaya koymuştur. Metrik vida açma işlemi, yuvarlak kanal açma işlemi ve düz tornalama işlemi olmak üzere üç deney grubu için kalıntı gerilme oluşumunu etkilediği belirtilen kesme hızı, kesici takımın ısıl iletim katsayısı ve iş malzemesi sertliği değişken parametreler olarak belirlenmiş; ayrıca bunlara ilave olarak vida açma operasyonlarında paso sayısı, kanal açma ve düz tornalama operasyonları için de ilerleme dikkate alınmıştır. 50, 100, 150 m/min kesme hızı ve 0,1-0,15-0,25 mm/rev ilerleme şartlarında 1,5 mm burun yarıçapına sahip kanal takımıyla 1,5 mm derinliğinde ve 5 mm aralıklarla yapılan kanal açma operasyonlarında iki farklı kesici takımdan yararlanılmıştır: *i*) yüksek hızlarda birçok malzemenin son bitirme ve genel amaçlı işleme aralığındaki talaşlı imalat işlemleri için ideal olan düşük bağlayıcı içerikli, alaşımsız WC/Co ince taneli alt yapıdan oluşan üzeri PVD yöntemiyle TiAlN ile kaplanmış Kennametal ürünü KC 5010 (ISO P20-30, M20-30) kalite kaplamalı kesici uçlar ve *ii*) Yüksek ilerleme oranlarında ve düşük kesme hızlarındaki işlemler için uygun olan WC/Co alt yapı üzerine CVD yöntemi ile TiN+TiCN+TiN kaplanmış Iscar ürünü IC635 (ISO P30-50, M20-40) kalite kaplamalı kesici takımlar.

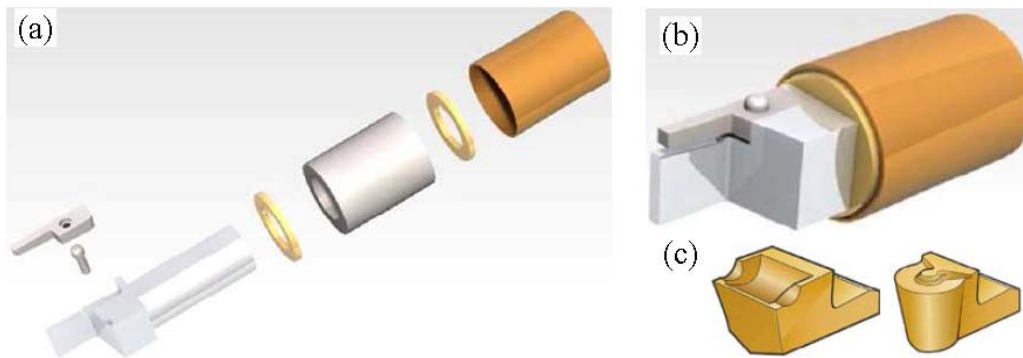
Yanar [26] çalışmasında makine devri, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesici takım olmak üzere dört farklı kesme parametresi ve iki farklı seviye belirleyip bir deney tasarım tekniği

olan Taguchi metodunu kullanarak tornalama ve kanal açma operasyonunda kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmıştır. Birinci seviye deneyde SAE 1040 çelik malzeme, iki farklı burun yarıçapına sahip kesici takımla, ikinci seviye deneyde sermet ve TiAlN kesici takımla işlenmiştir. L16 ortogonal dizini kullanılarak belirlenen şartlarda yapılan deneyler sonucunda, her bir deney konfigürasyonu için ortalama ve S/N oranı değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler varyans analizi metodu ile analiz edilmiş ve en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Birinci deneyde ilerleme hızı×kesici takım, makine devri×kesici takım etkileşimlerinin yanı sıra kesici takım ve makine devri parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak farklılık oluşturduğu görülmüştür. İkinci deneyde ise makine devri×ilerleme hızı×talaş derinliği×kesici takım, ilerleme hızı×kesici takım, makine devri×talaş derinliği etkileşimleri ve takım parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak farklılık oluşturduğu belirlenmiştir. Pistonun dış yüzeyine uygulanan kanal açma deneylerinde 4 mm genişliğe sahip 0,4 mm burun yarıçapı bulunan N123H2-0400-0004 (GF 4125/1125) kesici takımlar soğutma sıvısıyla birlikte kullanılmıştır. Kanal açma deneyleri 1500-2000 rpm makine devirlerinde 0,05-0,1 mm/min ilerlemede yapılmıştır.

Özyılmaz'ın [2] çalışmasında, farklı ısıl işlemlere tabi tutulmuş Etial 145 alüminyum-silisyum alaşımı piston malzemeleri üzerine tornalama yöntemiyle kanallar açılmıştır. Kanal açma işlemleri farklı kesme hızlarında sementit karbür kanal açma takımları kullanılarak yapılmıştır. Öncelikli olarak külçe halinde temin edilen Etial 145 alaşımı malzemeler bir pota içerisinde ergitilerek silindirik kokil kalıba dökülmüş; silindirik haldeki bu malzemeler homojenleştirme ısıl işlemine müteakip 500°C'de 6 saat süreyle çözeltiliye alma ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Çözelti ısıl işlemine maruz kalmış malzemeler 150, 165, 180 ve 195°C sıcaklıklarda 8 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Isıl işlemlerin malzemelerin sertlikleri, çekme dayanımları ve işleme sonrası oluşan yüzeylerin pürüzlülük değerlerine etkileri incelenmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile malzemelerin sertlikleri ve çekme dayanımları önemli derecede artmıştır. Yaşlandırma ısıl işlemiyle yüzey pürüzlülük değerlerinde az da olsa bir azalma görülmüştür. Kanal açma deneyleri soğutma sıvısı kullanılmadan, 0,1 mm/rev ilerleme hızında ve 200, 240, 280 ve 320 m/min kesme hızlarında yapılmış olup numunelere Sandvik N151.2-300-5E kodlu sementit karbür (K20) kesici takımlarla 8 mm (yarıçapta) derinliğinde kanallar açılmıştır. Açılan kanallar

yan yüzeylerine zarar verilmeden testere yardımıyla kesilerek yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmıştır.

Daghini et al. [27] dilimleme için Şekil 3.3a, b'de detay ve montajı gösterilen yeni bir kesici takım tasarımı yaparak bu tasarımın performansını incelemiştir. Tasarım aşamasındaki temel ilkeleri ise kompozit malzeme ara yüzeylerindeki statik direngenlik kaybını minimize eden sönümlenme kapasitesini geliştirmek olmuştur. Geliştirdikleri takımı, işleme sisteminin frekans ve sönümlenme oranı ile işlenen yüzeyin pürüzlülüğü biçiminde dinamik özellikler kriteriyle karakterize etmişler ve bu tasarımı dilimleme işleminde denemişlerdir. Yapısal ve işlem parametrelerini ayrı ayrı tanımlayan bir işleme sisteminin dinamiklerini, klasik yöntemle analizin ötesinde bir adım atarak; işleme sistemi için önerdikleri matematiksel modeli, kesme işlemi süresince bir mikrofon yardımıyla kaydedilen verilere dayandırmışlardır. Analiz çalışmalarını, farklı kesme parametreleri kullanarak deneylerle doğrulamışlar ve artan kesme parametreleri için sınırlama faktörünün kesici takımın sönümlenme kapasitesi olmadığını, buna karşılık takım tutucu sisteminin direngenliği ve iş parçası sabitleme sisteminin dinamik özelliklerinin ise önemli olduğunu belirtmişlerdir. İşleme performansını daha da iyileştirmek için tüm işleme sistemiyle birlikte kesici takım sabitleme sisteminin de dikkate alınması gerektiğini göstermişlerdir. Dövme çelik eksantrik mili (P35 tipindeki malzeme) işlemek için Şekil 3.3c'de gösterilen geometrilerdeki pozitif açılı 4 mm genişliğindeki TNC150 (CVD TiN/TiCN/TiN kaplı) kesici uçlarla 100, 133, 150, 167, 200 m/min kesme hızı ve 0,1-0,23-0,37-0,5 mm/rev ilerleme şartlarında çeşitli radyal doğrultuda kesme deneyi yapılmıştır.



Şekil 3.3. Daghini et al. [27] tarafında geliştirilen kesici takım modeli

Ding ve Rahman [28]; çok hassas işleme tezgâhında tek kristalli elmas mikro takımlar ile çok kristalli Al 6061-T6 alüminyum malzemenin kesme/işleme mekanizmasını anlamak

üzere kanal açma işleminin uygulandığı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; tane boyutu ve tane yönelimi gibi kristalografik yapının kesme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemişler ve kristalografik yapıdaki değişimlerin sonucu olarak kesme kuvvetinde, talaş biçiminde ve işlenmiş yüzeyde değişimler olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada 1 mm/min gibi çok düşük bir kesme hızında soğutma sıvısı kullanmadan yaklaşık 30 µm kanal genişliğine sahip mikro takımla 10 µm'lik bir yüzeyde 0,8 µm kesme derinliğinde ortogonal kesme deneyleri ve 1,5 µm kesme derinliğinde mikro kanal açma deneyleri yapmışlardır.

Machai et al. [29]; işlenmesi oldukça zor olan üç farklı temperleme uygulanmış β-titanyum alaşımının (Ti-10V-2Fe-3Al) işlenmesinde yenilikçi bir soğutma yöntemi olarak karbon dioksit karının (sıvı karbon dioksitin hızlı buharlaştırılmasıyla elde edilen katı/kristalize karbon dioksit) ve yüksek kesme hızlarının etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. 12,5-25-50-100-150-200 ve 300 m/min kesme hızlarında 3 mm genişliğindeki silindirik kanal açma deneylerini yaptıkları çalışmalarında; kesici takımın talaş ve yan yüzeyleri üzerinde farklı soğutma teknikleri arasında karşılaştırma yapmışlar ve kesme kuvvetleri, takım aşınması ve talaş morfolojisini incelemişlerdir. Çalışmada, kesici takımın kesme kenarına bir boru yardımıyla sağlanan tipik soğutucu yağlama biçiminde emülsiyon bazlı soğutma, 1 mm çapındaki bakır borular yardımıyla kesme işlemi sırasında kanal açma takımının talaş ve/veya yan yüzeylerine sıvı karbon dioksitin gönderildiği soğutma ve soğutmada daha ziyade yağlama etkisi yaptığı düşünülen minimum miktarda yağlama (MQL) biçimindeki soğutma olmak üzere üç farklı soğutma tekniği kullanılmıştır.

Baykasoğlu [14] çalışmasında; kaba dış tornalama, boşaltma, alın tornalama, delme, dış açma, kanal açma ve dilimleme işlemlerinde kesme şartlarının optimizasyonu için Turbo C++ ve CLIPPER dillerini kullanarak bir bilgisayar programı geliştirmiştir. En az maliyet kriterini objektif fonksiyon olarak ele alıp tarama metodu yardımıyla kaba dış tornalama, boşaltma ve alın tornalama işlemlerinde kesme şartlarının optimizasyonu yapmıştır. Delme, dış açma, dilimleme-kanal açma işlemlerinde ise kesme şartlarının optimizasyonu için kısıtlayıcı kontrol metotlarını kullanmıştır. Geliştirdiği programda; kesici-iş parçası malzemesi için kullanılacak en büyük/küçük kesme derinliği ve ilerleme, kesici takım ve takım tutucu için en büyük yük, fener mili ve sürücü motorların tork-hız karakteristikleri, tutturma sınırlamaları, parçanın sapması, parçanın toleransı, rulmanların

dizayn yükleri, kesici takım hızları, kesici takım aşınması ve yüzey kalitesini kısıtlayıcılar olarak kullanmıştır. Çalışmada çeşitli pratik örneklerle programın kullanılışı gösterilmiştir.

Cakir ve Cavdar [30]; talaşlı imalat alanında çalışan kişileri eğitmek amacıyla, DELPHI Visual programlama dilini kullanarak if-then kurallarından oluşan bilgi tabanlı bir uzman sistem (COROSolve) programı geliştirmişlerdir. Program; tornalama (vida açma, dilimleme ve kanal açma dahil), frezeleme ve delme operasyonlarında karşılaşılan temel problemlere sebep-sonuç ilişkisini de ifade eden bir şekilde çözüm alternatifleri sunmakta, çeşitli tavsiyeler vermekte ve takım ömrü için uygun kesme parametrelerinin seçimine yardımcı olmaktadır.

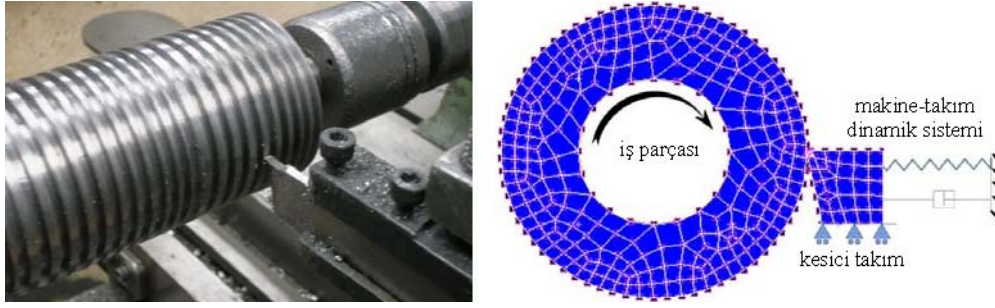
3.2. Kanal Açma İşlemine Benzer FEM Çalışmaları

Ceretti et al. [31]; değişik kesici takım geometrisi ve kesme hızları şartları altında kesmeyi basit bir ortogonal kesme simülasyonu ile göstermişlerdir. İş parçası malzemesindeki sünek kopmayı (talaş oluşumu) simüle etmek için kırılma kriterini kullanmışlar; talaşın ilk biçimlenmesini ve sonraki davranışını tahmin etmişlerdir. Talaş oluşum sürecini tanımlamak için eşdeğer gerilmeye dayalı Cockcroft & Latham kriterini uygulamışlar ve iş parçası için kritik bir hasar değeri belirlemişlerdir. Talaş oluşum süreci; takım-talaş temas bölgesindeki her bir eleman için deformasyon değerinin talaşın iş parçasından ayrılmaya (veya kopmaya) başladığını gösteren en büyük eşdeğer gerilme (830 MPa) ve kritik hasar değeriyle (0,04 ve 0,3) sürekli olarak karşılaştırılması ve bu değerin aşılması halinde bu elemanların silinmesiyle ifade edilmiştir. Kritik hasar değerinin işleme yönteminden veya kesici takım malzemesinden bağımsız olup sadece iş parçası malzemesine göre sabit bir değer olarak seçildiği kabul edilmiştir. Çalışmada düzlem gerinme şartlarını sağlamak üzere kanal açmaya benzer bir işlem uygulanmıştır. Deform-2D yazılımını özelleştirip yaptıkları simülasyonlarda orta karbonlu AISI 1045 çelik malzeme -6° ve 30° talaş ve 5° boşluk açılı, kesme kenarı burun yarıçapı 0,1 mm olan HSS kesici takımlarla 0,15-15-200-600 m/min şartlarında farklı geometrilerdeki talaş kırıcılı bir takımla işlenmiştir.

Nasr et al. [32] kesme kuvvetleri, gerilmeler, sıcaklıklar, deformasyon bölgesi ve yüzey bütünlüğünü etkileyen kesici takım-kesici kenar geometrisinin kesme işlemi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirterek; sürekli talaş oluşumu gösteren üzerinde kanallar açılmış AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin kuru ortogonal kesme işleminde

kesici kenarın burun yarıçapının kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerini simüle etmek için keyfi Lagrangian-Eulerian (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*, ALE) bir sonlu eleman modeli sunmuşlardır (ALE simülasyonunda kesici takım sabit olup kesme hızı iş parçası uygulanmaktadır/iş parçası hareketlidir). 125 m/min kesme hızı, 5° boşluk açısı, 0° talaş açısı ve 0,1 mm kesilmemiş talaş kalınlığı şartlarında; Abaqus yazılımıyla yapılan simülasyonlarda dört farklı kesici kenar burun yarıçapı (0,02-0,05-0,075-0,1 mm) kullanılmıştır. Kalıntı gerilmelerin çekme gerilmesi biçiminde başladığı ve işlenmiş yüzeyden yaklaşık 140 µm ötede basma gerilmesi biçimine geçtiğini belirtmişler ve ayrıca bunu deneylerle de doğrulamışlardır. Kesici kenar burun yarıçapının artmasıyla çekme ve basma bölgelerindeki kalıntı gerilmelerin ve sıcaklıkların da yükseldiğini, buna karşılık kesici kenar burun yarıçapının çekme katmanı kalınlığı üzerinde neredeyse hiçbir etkiye sahip olmadığını, en büyük basma gerilmelerini ise daha derine doğru ilerlediğini göstermişlerdir.

Mahnama ve Movahhedy [33], kesici takım titreşiminin (tırlama, *chatter*) kesme şartları, kesici takım geometrisi (burun yarıçapı, talaş/boşluk açıları) ve takım-iş parçası ara yüzeyindeki sürtünme şartları gibi pek çok parametreden etkilenmesi sebebiyle doğal olarak lineer olmayan bir olay olduğunu vurgulamışlar ve titreşim tahmini için geliştirilen literatürdeki modellerin çoğunlukla bu lineer olmayan durumları göz ardı ettiklerini, özellikle de titreşim oluşumu üzerindeki takım-talaş etkileşimi etkisinin ayrıntılı bir biçimde incelenmediğini ifade etmişlerdir. Bu sebeple çalışmalarında kesici takım titreşiminin tahmini ve etkilerini ele alan yeni bir yaklaşım sunmuşlar; kesici takım titreşimi ve talaş oluşum süreci arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla yeniden ağ oluşturma tekniğini kullanarak MSC Marc2005 yazılımı yardımıyla sonlu eleman simülasyonu yapmışlardır. Çalışmalarında ortogonal kesme işlemini bir dizi kanal açma işlemi yaparak ele almışlar (Şekil 3.4); soğutma sıvısı kullanmaksızın, 60 mm çapındaki AISI 1045 iş parçası üzerinde, 85-760 rpm ve 0,11 mm/rev şartlarında, 0° talaş ve 10° boşluk açılı, 0,06 mm burun yarıçapı olan kesici takımla 0,9-3 mm arasında değişen aralıklarla 9 mm derinliğinde ve 3 mm kanal genişliğinde değişik kanal işleme operasyonları yapmışlardır. Şekil 3.4'te ayrıca iki boyutlu düzlem gerinme (*plane strain*) analizi biçimindeki dinamik kesme işlemi için kullandıkları FEM modeli gösterilmiştir. Çalışmada sadece talaş oluşumu ve kesici takım titreşimi incelenmiş olup kesme kuvvetleri ve kesici takım gerilmeleri ele alınmamıştır.

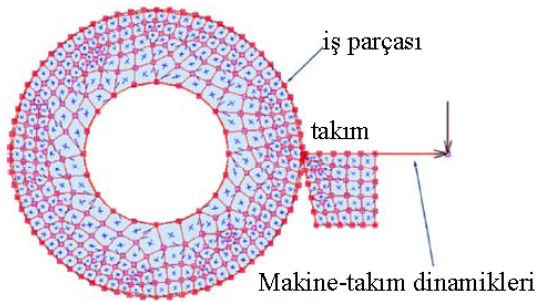


Şekil 3.4. Mahnama ve Movahhedy [33] tarafından yapılan kesme işlemi ve önerilen FEM modeli

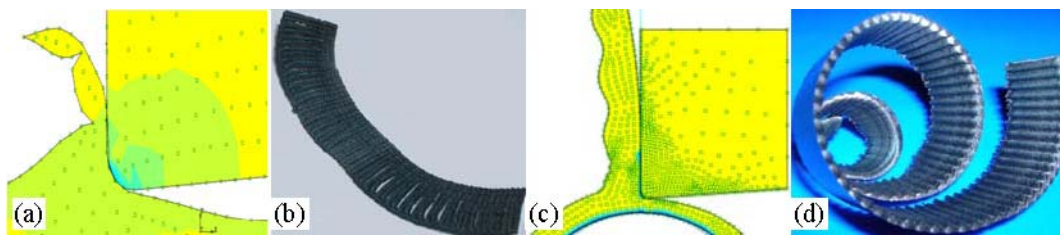
Vaziri et al. [34], talaş kaldırma işleminin sonlu eleman simülasyonundaki kama biçimli kayma düzlemi çevresindeki ilk talaş oluşum süreci ve sünek kırılma/kopmanın sebep olduğu talaşın iş parçasından ayrılması olmak üzere iki önemli talaş oluşum tekniğini AISI 1045 iş parçası üzerinde Abaqus yazılımını kullanarak incelemiştir. Kayma düzlemi çevresindeki ilk talaş oluşum sürecinde kesme işleminin keyfi Lagrangian-Eulerian (ALE) simülasyonu uygulanmış ve talaş oluşumunun iş parçasının plastik akışından kaynaklandığı kabul edilmiştir (talaş, iş parçasının sürekli olarak yeniden elemanlara ayrılmasıyla biçimlenir). Ancak diğer teknikte uygulanan güncellenmiş Lagrangian (*updated Lagrangian*) simülasyonunda deforme olan katmandaki elemanların silindiği Johnson-Cook hasar kriteri kullanılmıştır (talaş, bu tip elemanlardaki toplam deformasyonun önceden belirlenen kritik bir değeri aşması halinde biçimlenir). Çalışma kapsamında geliştirilen modelleri doğrulamak için Ivester et al. [35] tarafından sağlanan ortogonal kesme verileri kullanılmış; deformasyon bölgelerindeki gerilme ve sıcaklıklar için ilk teknik tahminlerinin uygun olmadığı ve tahmin edilen iş parçası direncinin gerçekçi olmayacak kadar yüksek olduğu belirlenmiştir. İkinci teknik tahminlerinin ise daha makul seviyelerde olduğu ifade edilmiştir. 5° ve -7° talaş açısına sahip $10 \mu\text{m}$ burun yarıçapı bulunan kesici takımlarla $3,3\text{-}5 \text{ m/s}$ kesme hızında $150 \mu\text{m/rev}$ ilerlemede simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmadaki simülasyonlardan iş parçası ve talaş için gerilme, gerilme ve sıcaklık dağılımları ile kesme kuvvetleri elde edilmiştir.

Mahnama ve Movahhedy [36], kesme işleminde kesici takımın titreşimini tahmin için geliştirilen modellerin; işlenen malzeme ve talaş kesimine bağlı olarak kesme kuvvetini hesaplayan mekanik bir kuvvet modelini kullandığını, ancak gerçekte birçok faktörün etkilediği kesme kuvvetlerinin kesici takım ve talaş arasındaki karmaşık etkileşimin bir

sonucu olduğunu ifade etmişlerdir. Genelde lineer olmayan işleme dinamikleri üzerindeki bu karmaşık etkileşim etkilerinin kesici takım titreşiminin tahmin edilmesinde dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında gerçekleştirdikleri talaş oluşumunun sonlu eleman simülasyonu; titreşim dinamiklerinin simülasyonunu ve talaş oluşumu süreci ile titreşim kavramı arasındaki ilişkileri de içermektedir. Dinamik etkiler ve sürtünme temasını da içeren elasto-plastik FEM analizi ile talaş oluşumunu simüle etmek üzere yeniden ağ oluşturma tekniğini kullanmışlar ve düşük kesme hızlarında literatürdeki diğer modellerin genelde tahmin edemedikleri sönümlenme sürecinin oluşumu tahmin etmişlerdir. Şekil 3.5'te iki boyutlu düzlem gerinme analizi biçimindeki dinamik kesme işlemi için kullandıkları kesici takım ve iş parçası modeli gösterilmiştir. Moufki ve arkadaşlarının [37] çalışmasını referans alarak simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Moufki et al. [37], ortogonal kesme işlemini boru kesitli bir iş parçasının alın yüzeyinin boyuna tornalaması biçiminde ele alırken; Mahnama ve Movahhedy [36] dolaylı biçimde de olsa kanal açma işlemine benzer olarak simülasyonlarını, iş parçası kesici takıma doğru radyal doğrultuda hareket edecek şekilde kurgulamışlardır. Bu amaçla 0° talaş ve 10° boşluk açılı, 1 mm burun yarıçapı bulunan kesici takımla iç ve dış çapı sırasıyla 30 mm 35 mm olan AISI 4142 çeliğine yakın özellikler gösteren 42CrMo4 çelik iş parçasını kullanmışlardır. 0,1 mm/rev ve 1 mm/rev ilerleme değeriyle yaptıkları simülasyon ve deney sonucu karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 3.6a, b ve Şekil 3.6c, d'de gösterilmiştir.

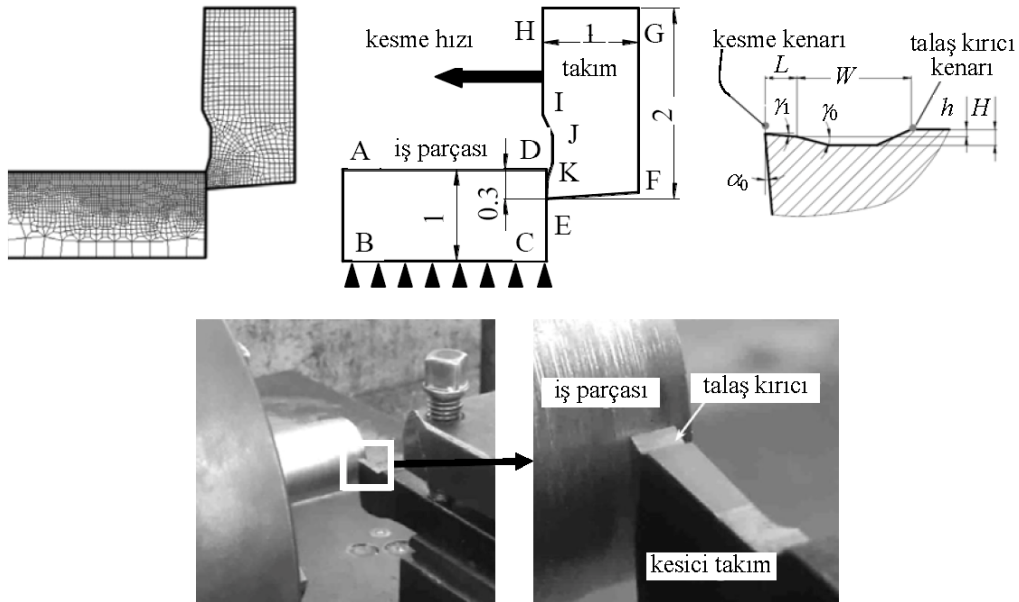


Şekil 3.5. Mahnama ve Movahhedy tarafından önerilen FEM modeli [36]



Şekil 3.6. Mahnama ve Movahhedy'nin simülasyon sonuçları [36]

Deng et al. [38], çalışmalarında orta karbonlu AISI 1045 çeliğin 60 m/min ve 0,3 mm/rev şartlarında talaş kırıcılı bir takım ile ortogonal işlenmesi sırasında talaş kırılmasını simüle etmek için bir sonlu eleman modeli sunmuşlar; Deform-2D yazılımını kullanarak talaş oluşumu, talaş kırılması, kesme kuvvetleri ve talaştaki gerilme, gerinme ve sıcaklığı termo-elastik-plastik sonlu eleman yöntemiyle simüle etmişlerdir. Kesme süreci; başlangıçtan kesme kuvvetinin ve işlenmiş talaştaki periyodik kırılmaların denge durumuna erişilinceye kadar simüle edilmiştir. Talaş kırılması üzerindeki çekme gerilmesinin etkileri tahmin etmek için Ceretti et al. [31]'e benzer biçimde normalize edilmiş Cockcroft & Latham kriterini uygulamışlar; talaşın kırılma mekanizmasını açıklamak üzere kesme kuvveti ve eğilme momentini analiz etmişlerdir. Talaş kırıcılı bir takım ile yaptıkları deneylerle simülasyon verilerini karşılaştırmışlar ve önerdikleri modelin uyumluluğunu açıklamışlardır. Şekil 3.7'de çalışma önerdikleri sonlu eleman ağ modeli, kesici takımın geometrik modeli, talaş kırıcı parametreleri ve deneylerde kullanılan modele uygun takım gösterilmiştir ($L=0,2$ mm, $W=0,7$ mm, $H=0,1$ mm, $h=0,05$ mm, $\alpha_0=5^\circ$, $\gamma_0=15^\circ$). Talaş oluşum süreci; takım-talaş temas bölgesindeki her bir eleman için deformasyon değerinin talaşın iş parçasından ayrıldığını/koptuğunu gösteren $D=0,3$ kritik hasar değeriyle sürekli olarak karşılaştırılması ve bu değer aşılması halinde bu elemanların silinmesiyle ifade edilmiştir.



Şekil 3.7. Deng et al. [38] tarafından önerilen model ve talaş kırıcı parametreleri

Dinç [4], takımındaki aşınmayı dolayısıyla takım performansını ve imalat hassasiyetini direkt olarak etkileyen kesme sıcaklığının özellikle de yüksek hızlı imalatta kesme

parametrelerinin seçiminde sınırlayıcı bir faktör olması sebebiyle; kesme sıcaklığını imalatta düşünülmesi gereken en kritik faktörlerden biri olarak ele almıştır. Bu sebeple çalışmasında; boru kesitli AA 7075, AISI 1050 ve AISI H13 iş parçasının kanal açma takımına benzer bir takım ile ortogonal işlenmesi sırasında talaş, takım ve parçada oluşacak ısıl alanları simüle eden sonlu farklar prensibine dayalı olarak geliştirdiği matematiksel bir modelin geçerliliğini incelemiştir. Kesme hızı, ilerleme, takım geometrisi, takım/iş parçası malzeme özelliklerinin kesme sıcaklık dağılımına etkisini analiz etmek üzere hassas bir kızılaltı kamera düzeneğiyle bir dizi deney yapmış; deney sonuçlarıyla sonlu farklar prensibine dayalı simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır.

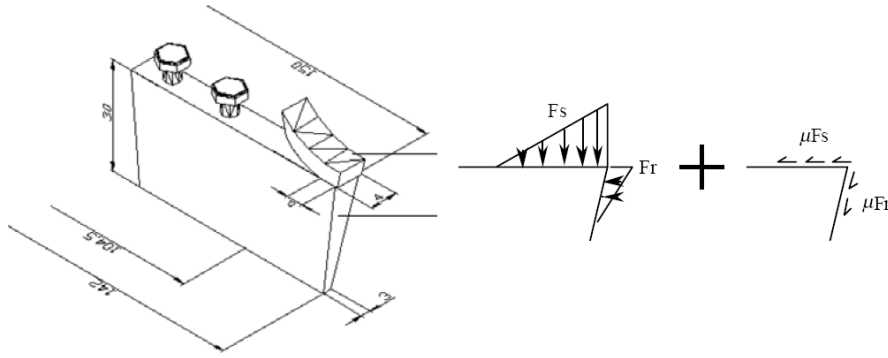
Kountanya et al. [39] çalışmalarında, üzerinde çeşitli aralıklarla kanal açılmış AISI 52100 numuneler üzerinde çeşitli ortogonal kesme deneyleri yaparak; 0,2 mm genişliğinde ve 15°, 20°, 30°'lik pahlara sahip kesici takım kesme kenarı geometrisi ve kesme şartlarının (12, 62, 93, 185 m/min kesme hızı ve -10°, -15°, -25° talaş açısı) talaş morfolojisi ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarını ise Deform 2D yazılımını kullanarak (otomatik yeniden ağ oluşturma prosedürüyle; kesici takım sabit, iş parçası kesici takıma doğru hareketli) yaptıkları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

Preş et al. [40] ise üzerinde çeşitli aralıklarla kanal açılmış C45E çelik numuneler üzerinde çeşitli 180, 220, 280 m/min kesme hızı ve 0,05-0,10-0,15-0,20 mm/rev ilerleme şartlarında ortogonal kesme deneyleri yaparak; iş parçası kenarında oluşan çapaklanma oluşumunu (*burr formation*) incelemiştir. Çapaklanma geometrisi ve kesme kuvvetlerinin ölçüldüğü deney sonuçlarını, Abaqus/Explicit yazılımını kullanarak yaptıkları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

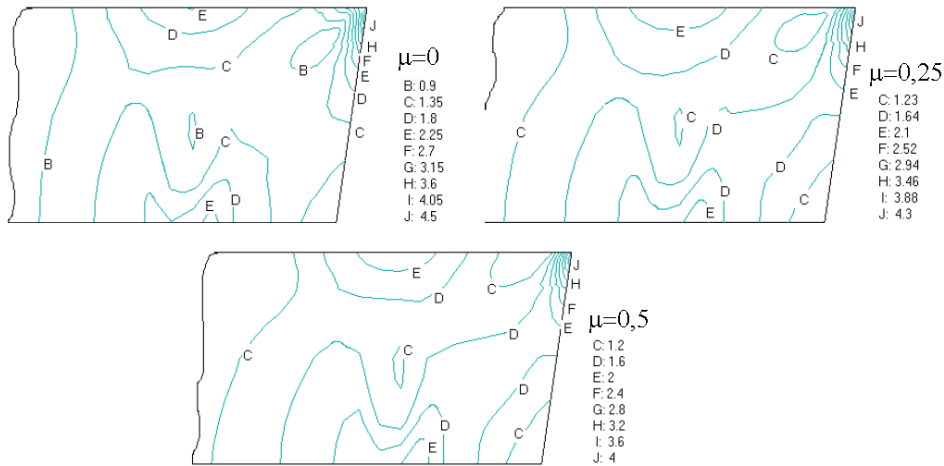
3.3. Kanal Açma ve Kesici Takım Gerilmelerini İçeren Çalışmalar

Taşgetiren ve arkadaşlarının [41] çalışmasında bir çeşit kanal açma takımı olan kesme kalemi geometrisi göz önüne alınarak kesme kuvvetleri ve çeşitli sürtünme durumlarının neden olduğu kesici takım gerilmeleri sonlu elemanlar metodu ile araştırılarak takımın hasara uğramasındaki etkileri üzerinde durulmuştur. Tresca (en büyük kayma gerilmesi) kriterine göre yapılan değerlendirmeler sonucunda alın aşınmasının öncelikli hasar türü olduğu gösterilmiştir. Deney yapılmaksızın, 4 mm kanal genişliği kapasitesine sahip kesme

kalemiyle st60 malzemenin 0,2 mm/rev ilerlemeyle kesildiği kabul edilerek; 3 mm'lik takım-talaş temas uzunluğu bölgesinde üçgen yayılı yük biçiminde uygulanan esas kesme kuvveti (1500 N) ve pasif kuvvet (300 N) ile sürtünme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki etkileri (gerilme dağılımı) araştırılmıştır (Şekil 3.8). Kesici takım 4 düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılarak modellenmiş 550 eleman ve 601 düğüm kullanılmıştır. Çalışmada sürtünme kuvvetleri için 0; 0,25 ve 0,5 olmak üzere üç farklı sürtünme katsayısı dikkate alınmıştır. Bu bölgede oldukça büyük değerlerde olan σ_y gerilmelerinin pratik gözlemlere de uygun olarak kesme kaleminde alın aşınmasına daha yatkın olduğu, buna karşılık σ_x gerilmelerinin ise daha ziyade krater aşınmasına yol açabileceği ve kayma gerilmeleri dolayısıyla artan sürtünme katsayısının her iki aşınmanın oluşmasını hızlandırıcı bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Şekil 3.9'da takım-talaş temas uzunluğu, kesme genişliği ve esas kesme kuvveti yardımıyla boyutsuzlaştırılan kesici takım üzerindeki Tresca eşdeğeri etkin gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Taşgetiren ve arkadaşlarının [41] takım ve yükleme modeli



Şekil 3.9. Kesici takım üzerindeki Tresca eşdeğeri etkin gerilme dağılımı [41]

Taşgetiren'in diğer çalışmasında [42] ise Taşgetiren ve arkadaşlarından [41] farklı olarak kesici takım üzerindeki von Mises eşdeğer gerilme dağılımları üzerinde durulmuştur. En büyük von Mises gerilmelerinin takım-talaş temas uzunluğu boyunca kesici takımın üst yüzeyinde ve kesme kenarına yakın yoğunlaştığı, ancak sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte gerilmelerin azalma eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Taşgetiren ve arkadaşlarına [41]'e benzer biçimde kesici takımın üst yüzeyinde ve kesme kenarı boyunca aşınmaların olabileceği ifade edilmiştir.

3.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Bölüm 2.3 ve özellikle de Bölüm 2.3.3'te belirtildiği üzere, tornada yapılan işlerin pek çoğunda kanal açma takımlarıyla yapılan kanal açma işlemleri uygulanmasına rağmen; kanal açma işlemleri, özellikle de talaş kontrolü açısından tüm kesme operasyonları içindeki en sorunlu yöntemlerden biridir [14, 15]. Bu sorun için kesici takım üzerinde talaş kırıcı profilleri tasarlanmış, böylece talaşın kolayca boşaltılması amaçlanmıştır. Kanal açma işlemlerindeki diğer problemler ise kanal genişliğinin verilen tolerans aralığında elde edilmesinin zorluğu ve kesici takımın yüzeylerine gelen yükler nedeniyle yüzey kalitesinin istenilen kalitede oluşmamasıdır.

Ancak literatürde yapılan tornalama çalışmalarının daha ziyade dış yüzey tornalama üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Kanalların işlenmesi ve özellikle de dayanım açısından kanal açma takımlarını konu alan çalışmalara ise literatürde çok fazla rastlanmamaktadır. Literatürde doğrudan kanal açma işlemini içeren çalışmalarda [22-30] ise kanal açma takımları üzerindeki gerilmeler dikkate alınmamıştır. Özellikle ortogonal kesme işlemlerini içeren FEM çalışmalarında [31-40] ise iki boyutlu duruma uygunluğu sebebiyle dolaylı bir biçimde de olsa kanal açma ele alınmış, ancak daha ziyade talaş ve iş parçası inceleme konusu olmuştur.

Literatürde bu araştırma konusuyla doğrudan ilgili çok az sayıda çalışmaya [41, 42] rastlanılmıştır. Ancak bu çalışmalarda ise deneysel kuvvet verileri yerine teorik kuvvet verileri referans alınmış ve kesici takım geometrisi sabit tutularak (bir tek kesici takım geometrisiyle) sürtünme katsayılarının etkileri incelenmiştir.

Literatürden farklı olarak bu çalışmada; farklı genişlik ve talaş kırıcı geometrilerine sahip değiştirilebilir kesici uçlarda oluşan gerilmeler, kesme parametrelerindeki değişime dayalı olarak sonlu eleman metodu yardımıyla analiz edilmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucunda; talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesi ve kesme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak çözüm yapan Ansys yazılımı kullanılarak analizi olarak tanımlanabilen bu araştırma konusunun, literatürden farklı özellikler göstermesi söz konusudur.

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında, kanal açma sırasında oluşan kesme kuvvetleri etkisiyle kesici takımda meydana gelen gerilmelerin analiz edilmesi için bir dizi kesme deneyi yapılmıştır.

4.1.1. İş parçası malzemesi

Yapılan deneysel çalışmalarda, iş parçası malzemesi olarak kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilen; makine imalat sanayisinde cer kancası, dişli, freze mili yapımında yaygın olarak kullanılan AISI 1050 (DIN 1.1210) karbon çeliği kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,485	0,218	0,752	0,0256	0,056	0,109	0,0147	0,111	0,0021
Co	Cu	Pb	V	Sn	Nb	W	Fe	
0,0013	0,231	0,0021	0,0134	0,0166	0,0025	0,0053	97,9565	

Çizelge 4.2. Deney numunelerinin mekanik özellikleri

Akma Gerilmesi	MPa	330
Çekme Gerilmesi	MPa	479
Uzama	%	17
Yoğunluk	kg/m ³	2800
Sertlik	HB	245

4.1.2. Kesici takımlar

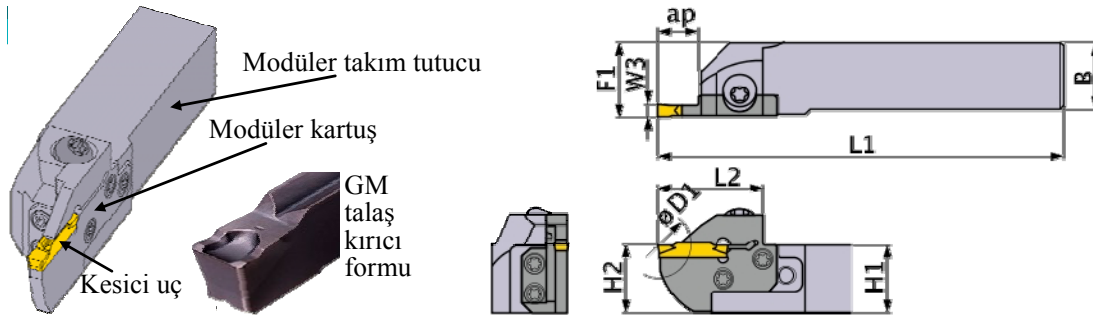
Deneylerde; Çizelge 4.3’te gösterilen Mitsubishi firmasının ürettiği, kanal açma genişlikleri 2, 4, 6 mm olan (sırasıyla D, G ve J) kesici uçlar ve bunlara uygun modüler kartuşlar ile kesici takımların tezgaha bağlanması için modüler takım tutucu kullanılmıştır. GM (G; *grooving*/kanal açma ve M; *medium feeds*/orta ilerlemeler) talaş kırıcı formuna sahip PVD kaplı kesici uçlar, P10 kalitesinde olup Mitsubishi firmasınca VP10RT ile kodlanmıştır. Kesici uçlar ile Şekil 4.1’de montaj biçimi de verilen kartuşlar ve takım tutucuya ait geometrik özellikler sırasıyla Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneyleerde kullanılan kesici takımlar

Kesici uç (VP10RT; PVD kaplı P10)	Modüler kartuş	Modüler takım tutucu
GY2M0200D020N-GM	GYM25RA-D12	GYHR2525M00-M25R
GY2M0400G030N-GM	GYM25RA-G14	
GY2M0600J040N-GM	GYM25RA-J14	

Çizelge 4.4. Kesici uçların geometrik özellikleri [43]

	Kesici uç (VP10RT; PVD kaplı, P10)	(mm)			
		W3	Re	ar	L2
	GY2M0200D020N-GM	2±0,03	0,2	19,4	20,70
	GY2M0400G030N-GM	4±0,04	0,3	24,4	25,65
	GY2M0600J040N-GM	6±0,04	0,4	24,3	25,65



Şekil 4.1. Kanal açma takımları [43]

Çizelge 4.5. Kartuş ve takım tutucu için geometrik özellikler [43]

Modüler takım tutucu	Modüler kartuş	(mm)								
		W3	ap	D1	B	L1	L2	H1	H2	F1
GYHR...	...-D12	2±0,03	12	24	25	150	39	25	25	28
	...-G14	4±0,04	14	28						
	...-J14	6±0,04								

4.1.3. Takım tezgâhı

Deneysel çalışmalarda, özellikleri Çizelge 4.6’da verilen, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü CNC Atelyesinde bulunan JOHNFOR D T35 CNC Torna Tezgâhı kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. JOHNFORD T35 CNC torna tezgahının özellikleri

Tezgah Gücü	(kW)	10
Devir sayısı	(rpm)	4000
Hidrolik ayna çapı	(mm)	250
Taret, takım bağlama kapasitesi		12
Hassasiyet	(mm)	0,001
x eksen	(mm)	250
z eksen	(mm)	600

4.1.4. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi

Kanal açma sırasında oluşan F_C , F_f ve F_p kesme kuvvetleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü CNC Atelyesinde bulunan kuartz Kistler Type 9257B dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Bu dinamometrenin bazı teknik özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kistler 9257B tipi dinamometrenin teknik özellikleri [44]

Kuvvet aralığı	(F_x, F_y, F_z)	(kN)	-5...10
Tepki verme		(N)	< 0,01
Hassasiyet	$(F_x, F_y; F_z)$	(pC/N)	-7,5; -3,5
Doğal frekans $f_0(x, y, z)$		(kHz)	3,5
Kapazitans		(pF)	220
20°C’deki yalıtım direnci		(Ω)	> 1013
Topraklama yalıtımı		(Ω)	> 108
Çalışma sıcaklığı		(°C)	0...70
Ağırlık		(kg)	7,3
Doğrusallık		–	%1 FSO
Histerezis		–	% 0,5 FSO
Koruma sınıfı		–	IP 67

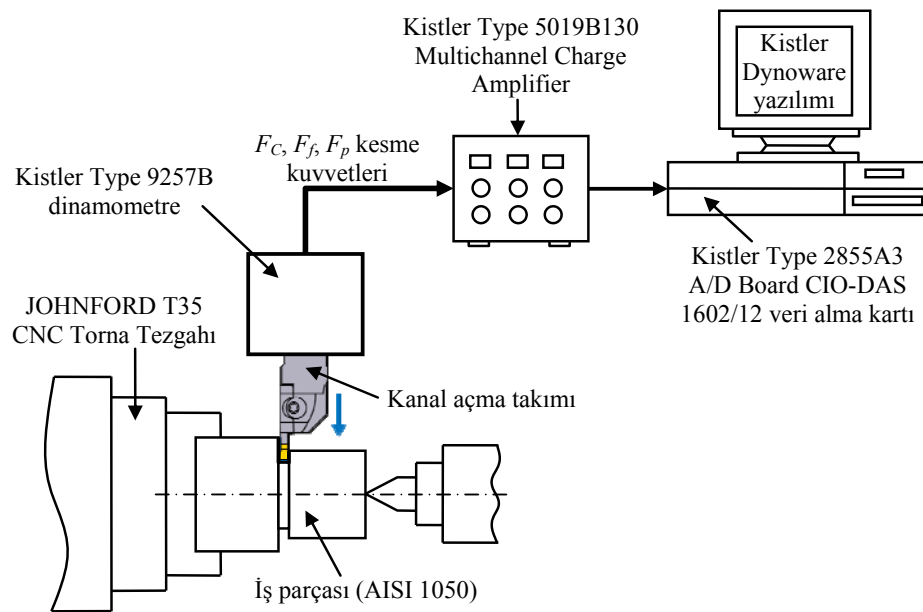
Dinamometre tarafından algılanan kesme kuvveti verileri; Kistler Type 5019B130 Multichannel Charge Amplifier, Type 2855A3 A/D Board CIO-DAS 1602/12 veri alma kartı ve Kistler Type 2825A1-2 Dynoware yazılımı yardımıyla bilgisayar ortamına alınmıştır. Kesme kuvveti gerilim değerlerinin yükseltilmesi ve yazılım için istenilen kanal düzeninin (hangi kanaldan hangi kesme kuvveti bileşeninin okunacağı) ayarlanması gibi işlevler için kullanılan Type 5019B130 yükseltecinin bazı özellikleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Dynoware yazılımı kesme kuvvetlerinin bilgisayar yardımıyla ölçülmesine olanak sağlayan çok esnek bir kullanıma sahip bir paket programdır. Program tarafından,

veri alma kartıyla ilgili yapılacak bazı ayarlamalar ve RS 232 bağlantısı yardımıyla yükselticiyle ilgili bazı düzenlemeler (ölçme aralığı, ölçme süresi, örnekleme oranı, tetikleme zamanı, kuvvet verileri için kanal sırası gibi) yapılabilmektedir. Program tarafından kuvvet ölçümü sonrasında sonuçlarının grafik halinde gösterilmesi, başka programlarda kullanılmak üzere ölçme sonuçlarının bir dosyaya yazdırılması, daha sonraki kullanımlar için yapılan konfigürasyon ayarlarının kaydedilebilmesi, deney sonuçlarının ortalamasının alınabilmesi ve deney sonuçlarının grafik halinde yazdırılması gibi işlevler de yapılabilmektedir.

Çizelge 4.8. Kistler Type 5019B130 yükselticinin özellikleri [44]

Kanal sayısı	–	3
Ölçme aralığı ($\pm \%10$ 10 FS için)	(pC)	$\pm 10 \dots 999\ 000$
Sensör hassasiyeti	(pC/M.U. ^a)	0,01...9990
Doğrusallık hataları	(% FS ^b)	$\leq \pm 0,05$
Frekans aralığı	(kHz)	$\approx 0 \dots 200$
Çıkış gerilimi	(V)	± 10
Çalışma sıcaklık aralığı	(°C)	-10...60
Boyutlar (G×Y×D)	(mm)	396×187×280
Ağırlık	(kg)	≈ 8
^a M.U. = Mekanik birim (örneğin bar, N..)		
^b FS = full scale (ölçme aralığının son değeri)		

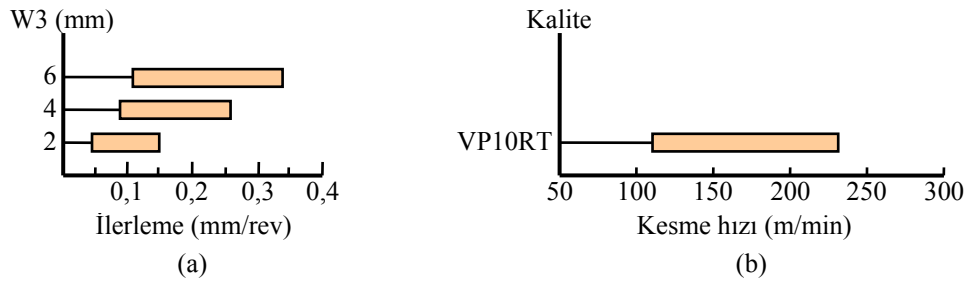
Kesme deneyleri için oluşturulan deney düzeneği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kesme deneyleri için hazırlanan deney düzeneği

4.1.5. Kesme parametreleri

Kesme deneylerinde, Şekil 4.3'te verilen kesici takım üreticisi firmanın (Mitsubishi) önerdiği kesme hızı ve ilerleme kesme parametreleri referans alınmıştır. Firma; VP10RT kalitedeki (P10) kesici uçlar için 110~230 m/min kesme hızı aralığını ve uç genişliği (W3) 2, 4 ve 6 mm olan GM talaş kırıcı formu için sırasıyla 0,05~0,15 mm/rev; 0,10~0,25 mm/rev ve 0,12~0,35 mm/rev ilerleme aralığını önermektedir.



Şekil 4.3. Kesici takım üreticisi firmanın önerdiği kesme hızı ve ilerleme [43]

GM talaş kırıcı formuna sahip uç genişliği 2 mm, 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar arasında karşılaştırmalı değerlendirmeler yapmak amacıyla, kesici takım üreticisi firmanın önerdiği kesme hızı ve ilerleme değerlerinin biraz dışına çıkılmıştır. Bu sebeple kesme deneyleri 7 farklı kesme hızı ve 5 farklı ilerleme değeri kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deneylerde kullanılan kesme parametreleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri

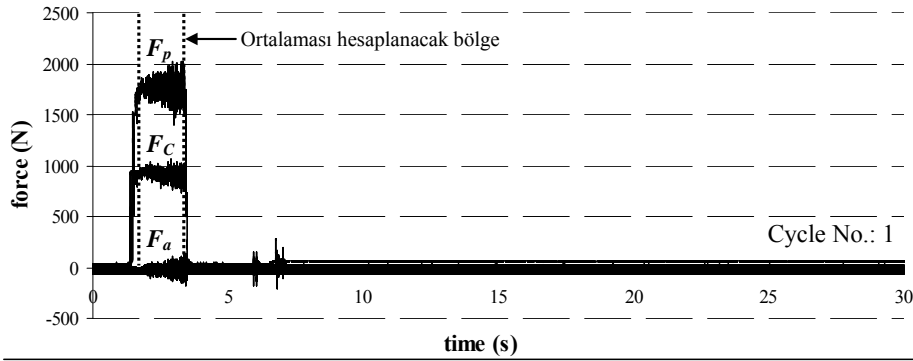
Modüler takım tutucu	GYHR2525M00-M25R
Modüler kartuş / Kesici uç	GYM25RA-D12 / GY2M0200D020N-GM GYM25RA-G14 / GY2M0400G030N-GM GYM25RA-J14 / GY2M0600J040N-GM
Kesme hızı, V (m/min)	100, 125, 150, 175, 200, 225, 250
İlerleme, f (mm/rev)	0,100-0,125-0,150-0,175-0,200

4.1.6. Deneylerin yapılışı

Ø50×500 mm ölçülerinde hazırlanan tüm numuneler, haddelemeden kaynaklanan olumsuzluklar (dış yüzeyindeki farklı lokal sertlik bölgeleri gibi) göz önüne alınarak; deneylerin sağlıklı yapılması için öncelikle 1 mm kesme derinliğinde boydan boya dış yüzey tornalama işlemine tabi tutulmuş ve daha sonra alın yüzeylerine punta delikleri

açılmıştır. Kuru kesme şartlarında (soğutma sıvısı kullanılmamış) yapılan deneysel çalışmalarda, her bir deney için yeni (daha önceden kullanılmamış) kesici uçlar kullanılmıştır. Dinamometre ve takım tutucunun boyutlarına bağlı olarak takım tutucunun dinamometreye bağlama boyu 55 mm olarak ayarlanmıştır. Deneyler sırasında kesme kuvvetlerinin ölçülmesi, kesici takımın iş parçasına yaklaşmasına 1 mm kalacak şekilde ve kanal açma işleminin tamamlanmasına kadar veri alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1 ve Çizelge 4.5'te gösterildiği üzere en büyük kanal açma derinliği göz önüne alınarak (uç genişliği 2 mm için yarıçapta $ap=12$ mm ve uç genişliği 4 mm ve 6 mm için de $ap=14$ mm); ardışık iki kanal arasındaki mesafe 2 mm olacak biçimde numunelere 5 mm derinliğinde (yarıçapta) kanallar açılmıştır. Uç genişliği 2 mm olan kesici takımlar için 30; uç genişliği 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar için de 35'şer deney olmak üzere toplam 100 kanal açma deneyi yapılmıştır. Özellikle uç genişliği 2 mm olan kesici takımlar için 250 m/min kesme hızında tüm ilerleme değerleri için sürekli kesici uç kırılmaları oluşması sebebiyle; uç genişliği 2 mm olan kesici takımlar için 250 m/min kesme hızındaki deneyler (5 adet) yapılamamıştır.

Deneyler tamamlandıktan sonra, kesici takımın iş parçasına yaklaşması süresince ölçülen ve özellikle kesici takımla iş parçasının ilk temas anındaki kuvvet ölçüm sonuçlarında görülen ani yükselme etkileri dikkate alınarak; kanal açma işlemi süresince ölçülen kesme kuvvetlerinin kararlılık gösterdiği (başka bir deyişle kuvvet ölçüm sonuçlarındaki sapmaların az olduğu) bölge belirlenmiştir. Daha sonra Şekil 4.4'te gösterildiği gibi bu kararlı bölge için kesme kuvveti verilerinin ortalaması alınmış olup analizler sırasında ortalaması belirlenen bu kesme kuvveti değerleri kullanılmıştır.



Fa [N]	Cycle No.: 1	Mean = -21,49e0	Min = -151,4e0	Max = 114,7e0	Integral = -33,04e0
Fc [N]	Cycle No.: 1	Mean = 919,1e0	Min = 732,4e0	Max = 1,062e3	Integral = 1,413e3
Fp [N]	Cycle No.: 1	Mean = 1,764e3	Min = 1,396e3	Max = 2,026e3	Integral = 2,712e3

Şekil 4.4. Dinamometre yardımıyla ölçülen kesme kuvvetleri

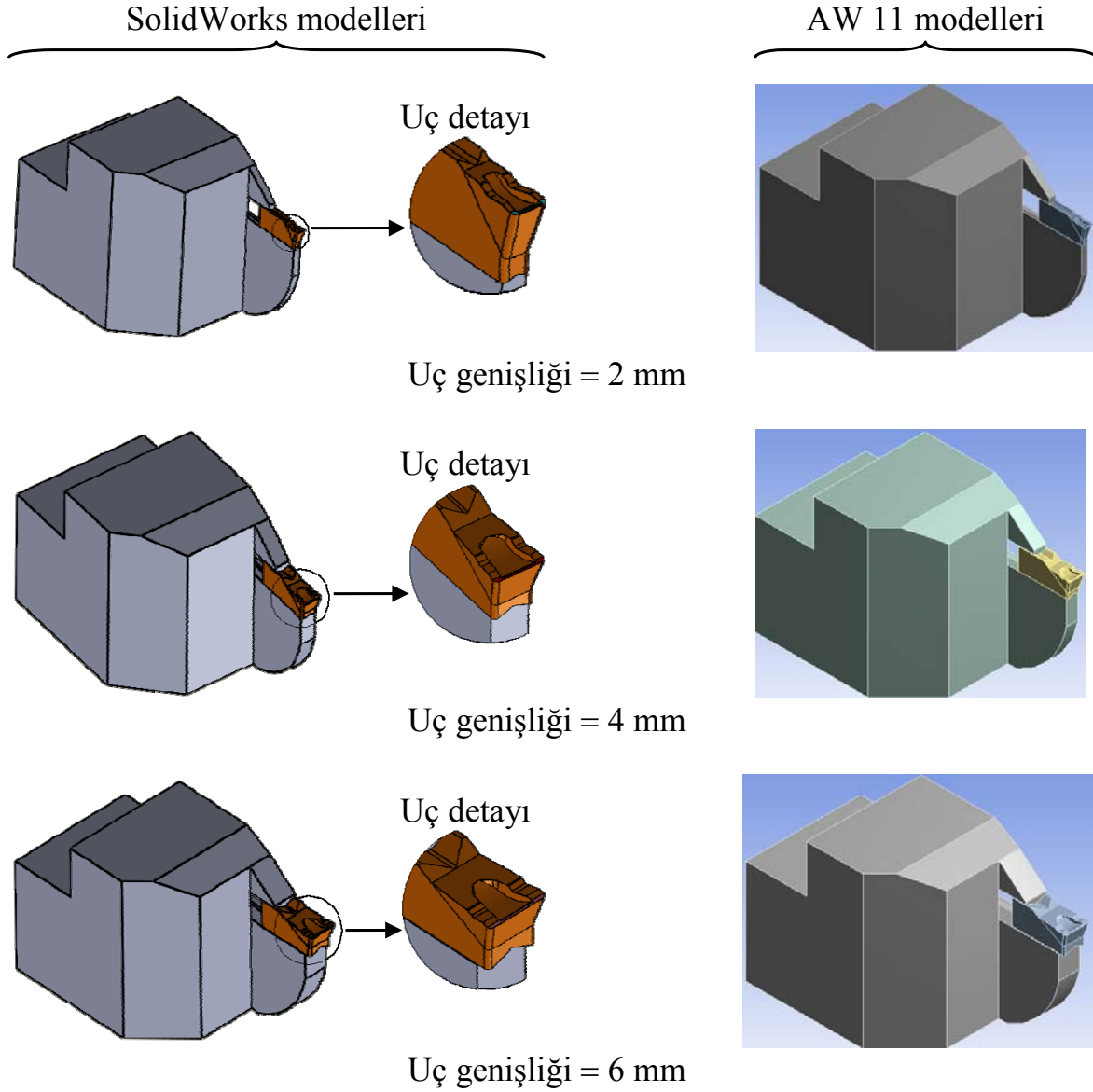
4.2. Analiz Çalışmaları

Kesici takımında oluşan gerilmelerin sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak AW 11 paket programı kullanılarak analiz edilmesi amacıyla çözüm öncesinde bazı ön hazırlıklar yapılmıştır. Bu hazırlıklar; kesici takımlara ait 3 boyutlu katı modellerin oluşturulması, kesici takımlar için gerekli malzeme özelliklerinin belirlenmesi, kullanılacak eleman tipi ve eleman boyutunun belirlenmesi, katı modellerin elemanlara ayrılması (ağ oluşturma), sınır şartı ve yükleme durumunun belirlenmesi ile kullanılacak çözüm metodunun seçilmesi olarak özetlenebilir.

4.2.1. Kesici takımların modellenmesi

Gerçekleştirilen kanal açma deneylerinde ölçülen kesme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki etkilerinin AW 11 yardımıyla değerlendirilmesi (gerilme analizlerinin yapılabilmesi) için Bölüm 4.1.2’de verilen ilgili kesici uç, modüler kartuş ve modüler takım tutucuya ait geometrik bilgilere (ölçülere) ilave olarak doğrudan takım üzerinden yapılan ölçümler kullanılarak kesici takımlar boyutlandırılmıştır.

Kesici takımlara ait 3 boyutlu katı model oluşturulma süreci; gerekli ölçüleri elde edilen kesici takımlar için katı modellerin öncelikle SolidWorks 2011 programı kullanılarak oluşturulması ve elde edilen bu katı modellerin daha sonra da Parasolid uzantısı yardımıyla (.x_t) AW 11’den çağrılması olmak üzere iki ayrı aşamadan oluşmaktadır. Katı modelleme işlemi sırasında özellikle ilerleme değeri referans alınarak oluşturulan takım-talaş temas bölgesi olmak üzere kesici takımlara ait tüm özellikler (talaş açısı, yanaşma açısı, boşluk açıları, talaş kırıcı formları, kesici uç burun yarıçapı) dikkate alınmıştır. Eş. 2.1’deki takım-talaş temas boyu ifadesinde, kanal açma işlemi için a yerine f kullanılmış; $\phi=45^\circ$ ve $\gamma=-10^\circ$ alınmıştır. Şekil 4.5’te kesici takımlara ait 3 boyutlu katı modeller gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Kesici takımlar için oluşturulan katı modeller

Çözüm süresini azaltmak amacıyla modelleme sürecinde; kesici uçtaki tüm ayrıntılar oluşturulurken takım tutucudaki tüm küçük kenar yuvarlatmalar/pahlar, kesici uç ile kartuşu takım tutucuya bağlamada kullanılan bağlantı elemanları (sıkma vidaları), kesici ucun kartuş içerisinde kalan bir bölümü ve takım tutucunun dinamometre içerisinde kalan kısmının modellenmesi ihmal edilmiştir. Eleman sayısını ve dolayısıyla da temas etkileri sebebiyle analizler için gerekli çözüm süresini azaltmak amacıyla; geometrik özellikleri dikkate alınarak bütün kartuşlar, takım tutucu modelinde gösterilmiştir (kartuşlar için ayrı bir model çizilmemiştir; kesici uç ve kartuş geometrisini içerecek biçimde takım tutucu olmak üzere toplam 2 model oluşturulmuştur). Kesici uç yarı uzunluk boyunda ve takım tutucular ise bağlama uzunluğu mesafesinde modellenmiştir.

Katı modellerle sürecinde kesici uç ve takım tutucu için oluşturulan modeller, Eş. 2.1'e göre takım-talaş temas bölgeleri dikkate alınarak çizildiğinden ($f=0,1-0,125-0,15-0,175-0,2$ mm/rev'e karşılık sırasıyla $l_c=0,162-0,203-0,243-0,284-0,324$ mm) dolayı; analizlerde, her bir uç genişliği referans alınarak ilerleme değerine göre oluşturulan 5 farklı model şablonu kullanılmıştır.

4.2.2. Kesici takımlara ait malzeme özellikleri

Çözüm öncesinde yapılan hazırlıkların ikinci aşamasında, katı modelleri oluşturulan kesici takımlara ait gerekli malzeme özellikleri belirlenmiştir. Analizlerde tüm kesici takımlar için lineer elastik malzeme modeli kullanılmış ve literatürde yapılan çeşitli araştırmalardan [45] yararlanılarak kesici takımların malzeme modelleri için gerekli olan özellikler (elastikiyet modülü, E ve Poisson oranı, ν) belirlenmiştir. Çizelge 4.10'da analizlerde kullanılan kesici takımlar için malzeme özellikleri gösterilmiştir.

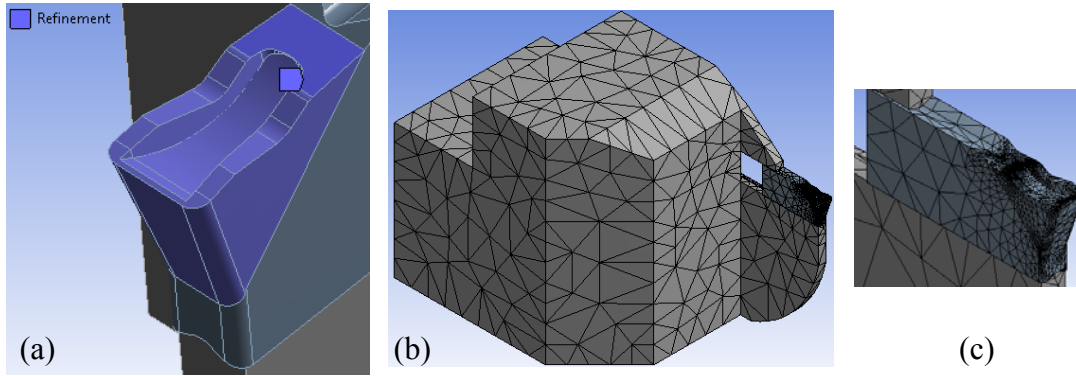
Çizelge 4.10. Kesici takımların malzeme özellikleri

Kesici takımlar	E (GPa)	ν	Kaynak
Modüler kartuş ve takım tutucu GYM25RA-D12 GYM25RA-G14 GYM25RA-J14 GYHR2525M00-M25R	210,7	0,28	[45]
Kesici uç GY2M0200D020N-GM GY2M0400G030N-GM GY2M0600J040N-GM	529,2	0,28	

4.2.3. Elemanlara ayırma ve temas çiftleri

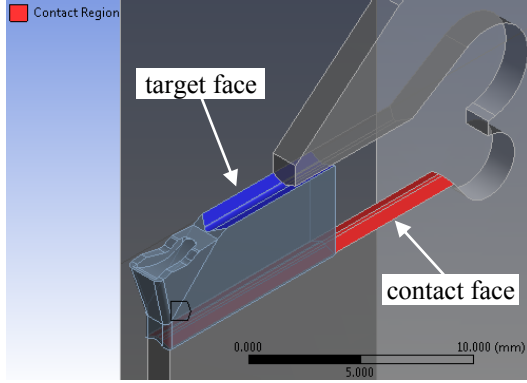
Çözüm öncesinde yapılan hazırlıkların bir sonraki aşamasında, katı modellerde kullanılacak eleman tipi belirlenmiş ve elemanlara ayırma işlemi (katı model için ağ oluşturma) yapılmıştır. Literatüre paralel olarak [1, 46], deneylerde kullanılan kesici takımlar için Bölüm 2.4.1, Şekil 2.12'de gösterilen 3 boyutlu 10 düğümlü kuadratik dört yüzlü SOLID 187 elemanı kullanılmıştır (*Patch Conforming Method: Tetrahedrons*).

Elemanlara ayırma işlemi için AW programı tarafından önerilen *Default* değerleri (*Physics Preference: Mechanical, Shape Checking: Standard Mechanical, Straight Sided Elements: No, Relevance Center: Coarse, Smoothing: Low, Transition: Fast*) referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Ancak kesici uç ve takım tutucuya bu ayarlara göre elemanlara ayırma işlemi uygulandıktan sonra, kesici ucun Şekil 4.6a'da gösterilen talaş kırıcı formunu içeren yüzeylerine daha yoğun (*Refinement: 2*) bir elemanlara ayırma işlemi yapılmıştır. Şekil 4.6b, c'de ise sırasıyla takım tutucu ve kesici uçlar için genel ve talaş kırıcı formunu içeren yüzeylerdeki daha yoğun ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kesici takımlar için analizlerde kullanılan ağ yapısı

Kesici uçla kesici ucun takım tutucuya oturma yüzeyleri arasındaki etkileşim/temas (*contact region*) AW 11'de otomatik olarak algılanmaktadır. AW 11, kesici ucun takım tutucuyla temasta olan yüzeyleri arasındaki teması; temas halinde olan takım tutucu yüzeylerini (6 adet) *contact body* ve kesici uç yüzeylerini de (6 adet) *target body* olarak algılamıştır (Şekil 4.7). Temas yüzeyleri arasındaki etkileşim; her ikisi de kuadratik üçgen eleman olan *contact body* için Conta174 (8 düğümlü yüzey-yüzey temas elemanı) ve *target body* için de Targe170 (hedef elemanı) ile sağlanmıştır. Modeller arasında temas, AW 11'de otomatik olarak algılanmasına rağmen; temas halinde olan takım tutucu yüzeyleri (*contact face*) ile kesici uç yüzeyleri (*target face*) arasındaki temas yüzeyi davranışının (*bonded, frictionless, no separation, rough, frictional*) ayrıca belirtilmesi gerekmektedir. Bu sebeple temas yüzeyleri arasındaki temas davranışı tüm yönlerde simetrik olacak biçimde bağlı/yapışık (*bonded*) olarak uygulanmıştır.



Şekil 4.7. Kesici takımlar için temas bölgeleri

Analizlerde kullanılan takım tutucu ve kesici uçlar için yapılan ağ oluşturma işlemi sonucunda elde edilen eleman ve düğüm sayıları Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Analizler; 2, 4 ve 6 mm uç genişlikleri için $f=0,100-0,125-0,150-0,175-0,200$ mm/rev ilerleme değeri doğrultusunda oluşturulan ve her biri farklı takım-talaş temas bölgesi içeren 5 farklı model şablonu üzerinde yapıldığından, model şablonlarının eleman ve düğüm sayıları farklılık arz etmektedir.

Çizelge 4.11. Kesici takımlar için kullanılan eleman ve düğüm sayıları

Kesici uç genişliği (mm)	Eleman sayısı			Düğüm sayısı			
	2	4	6	2	4	6	
Modüler kartuş ve takım tutucu	1896	1918	1819	3737	3726	3518	
f & l_c (mm/rev) & (mm)	0,100 & 0,162	17289	30773	32172	27342	47478	48736
	0,125 & 0,203	18381	28754	29923	18381	44321	45014
	0,150 & 0,243	17914	30139	33831	28283	46259	51260
	0,175 & 0,284	20366	30106	30497	31879	46352	46413
	0,200 & 0,324	14298	23729	30629	22734	36688	46497

4.2.4. Yükleme durumu ve sınır şartları

Çözüm öncesinde yapılan hazırlıkların son aşamasını analizler için gerekli yükleme durumu, başlangıç şartları ve sınır şartlarının belirlenmesi oluşturmaktadır.

Analizlerde kesici ucu kartuşa ve kartuşu da takım tutucuya tutturmak/bağlamak için Bölüm 4.1.2, Şekil 4.1’deki montaj halin gösterilen bağlantı elemanları (vidalar) kullanılmaktadır. Çözüm süresini uzatacak olması sebebiyle modelle sürecinde bu vidaların modellenmesi ihmal edilmiş; ancak Bölüm 4.2.3’te de belirtildiği gibi, takım tutucu yüzeyleri ile kesici uç yüzeyleri arasındaki temas davranışı tüm yönlerde simetrik

olacak biçimde bağlı/yapışık (*bonded*) olarak uygulanmıştır. Bu sebeple analizlerde kesici ucu kartuşa ve kartuşu da takım tutucuya bağlamak için kesici takımlara ayrıca herhangi bir sıkma kuvveti uygulanmamıştır.

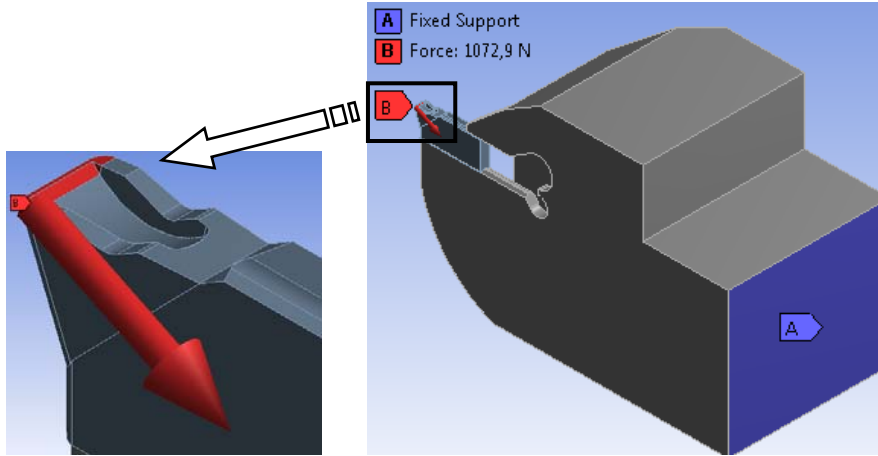
Literatürde yapılan bazı çalışmalarda [1, 46, 47], analizler için kesme kuvvetlerinin nasıl uygulanacağına çeşitli yaklaşımlar izlemiştir. Bu yaklaşımlar doğrultusunda özellikle Taşgetiren'in çalışmalarından [41, 42] farklı olarak, kanal açma işlemi sırasında kesici uca etki eden F_C , F_f ve F_p kesme kuvvetleri; katı model oluşturma sürecinde ilerleme değeri referans alınarak kesici uç üzerinde oluşturulan takım-talaş temas alanına uygulanmıştır. AW 11 çözüm sırasında; takım-talaş temas alanına uygulanan bu kuvvetleri, aslında yükleme alanını (dolayısıyla takım-talaş temas bölgesini) otomatik olarak tanımlamakta kullandığı 3 boyutlu yapısal SURF154 yüzey elemanlarına ve dolayısıyla bu elemanların düğümlerine transfer etmektedir/ uygulamaktadır.

Sınır şartı olarak takım tutucunun dinamometreye bağlandığı kesitte (takım tutucunun bağlama uzunluğu mesafesinde) *fixed support* türü bağlantı seçilmiş ve böylece bu kesit için tüm yönlerdeki yer değiştirme sıfır kabul edilmiştir.

Şekil 4.8'deki "A-fixed support" bağlantı türü olarak yer değiştirme sınır şartını ve "B-Force: 1072,9 N" ise ilerleme değeri referans alınarak kesici uç üzerinde oluşturulan takım-talaş temas alanına uygulan bileşke yük değerini göstermektedir.

Analizler sırasındaki çözümler için aşağıda verilen bazı kabuller yapılmıştır:

1. Ölçülen kesme kuvvetlerine göre takım tutucu ve kesici ucun ağırlık değerlerinin çok küçük olması sebebiyle, kesme kuvvetlerinin uygulanmasında bu ağırlıklar ihmal edilmiştir.
2. Kesme kuvvetleri etkisiyle oluşan yer değiştirmelerin katı model geometrisine göre çok küçük boyutlarda ve uygulanan yüklerle orantılı olduğu; uygulanan yükün kaldırılmasıyla kesici takımın orijinal konumuna geri döndüğü kabul edilmiştir (model lineer elastik özellik sergilemektedir).
3. Kesme sırasındaki sıcaklık ve titreşim etkileri ihmal edilmiş ve statik durum için analiz yapılmıştır.
4. Yük doğrudan uygulanmış; *number of steps*: 1 ve *step end time*: 1 seçilmiştir.



Şekil 4.8. Kesici takımlar için seçilen sınır şartı ve yükleme durumu

4.2.5. Çözüm prosedürü ve incelenen sonuçlar

Statik yapısal (*Static Structural*) analiz öncesinde yapılan bu hazırlıklar sonrasında AW 11 tarafından otomatik olarak kontrol edilen analiz/çözüm ayarları kullanılarak çözüm yaptırılmıştır. Program büyük deformasyon etkilerini kullanmamış (*large deflection: off*), takım tutucu yüzeyleri ile kesici uç yüzeyleri arasındaki temas çiftleri sebebiyle doğrusal olmayan (*non-linear*) çözüm yapmıştır. Geçerli çözüm sonuçlarına ulaşmada ise iterasyon içeren her bir çözüm aşamasında program tarafından kuvvet ile yer değiştirme arasında sürekli olarak kontrol edilen yakınsaklık (*convergence*) kriteri kullanılmıştır.

Analizler sonrasında özellikle talaş yüzeyi, yardımcı yüzeyler, esas kesme kenarı, yardımcı kesme kenarı, talaş kırıcı formu, kesici takım dayanımı ve kesici takımındaki muhtemel aşınma yerleri açısından kesme parametrelerindeki değişime göre;

- ✓ Toplam deformasyon (vektörel olarak),
- ✓ En büyük asal gerilmeler (σ_1),
- ✓ En küçük asal gerilmeler (σ_3),
- ✓ Eşdeğer gerilme (veya von Mises gerilmesi, σ_{VM})

sonuçları incelenmiştir. Eşdeğer gerilme veya von Mises gerilmesi için hesaplama prosedürü Bölüm 2.4.2, Eş. 2.22b'de verilmiştir.

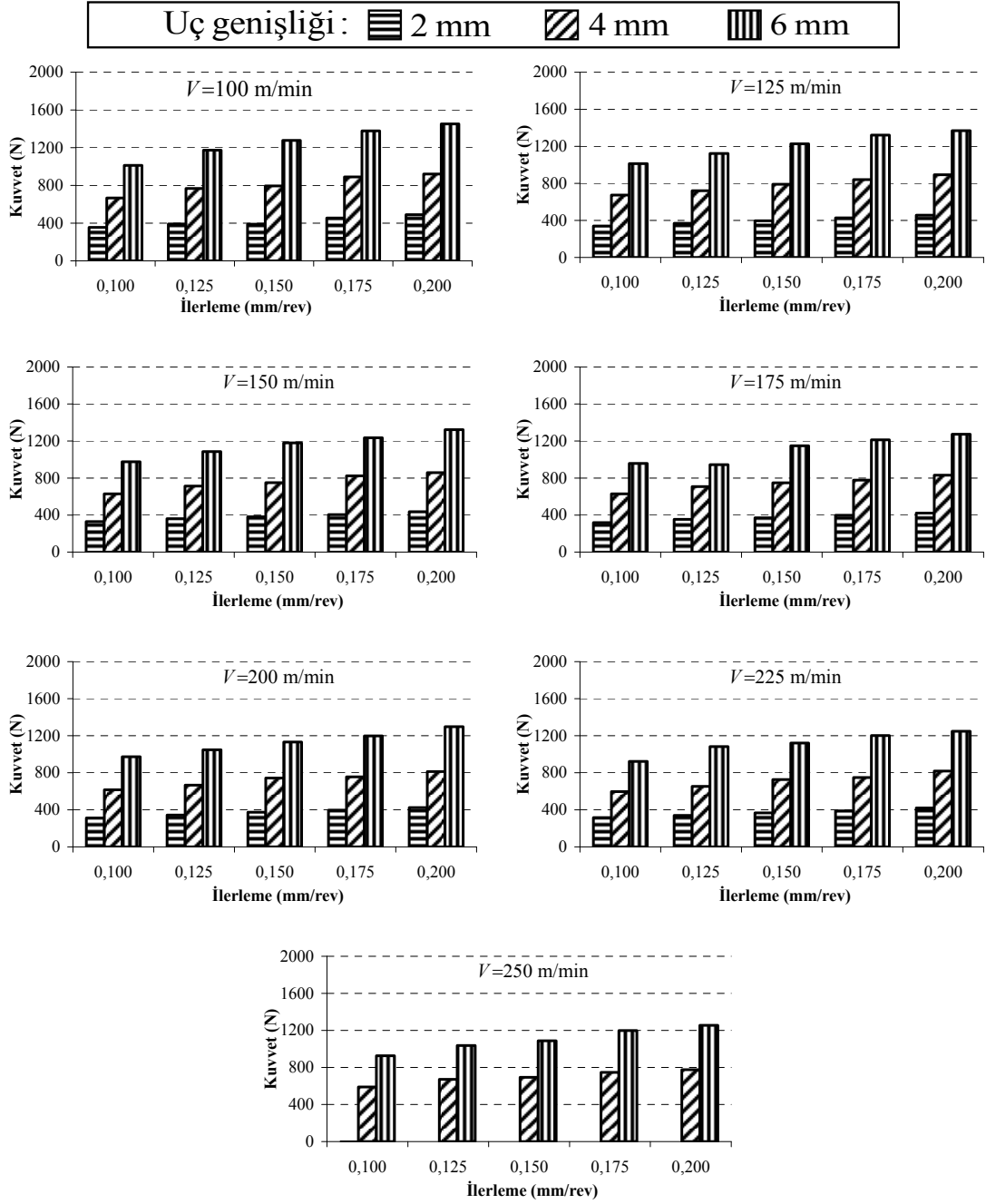
5. DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Kesme Kuvvetleri

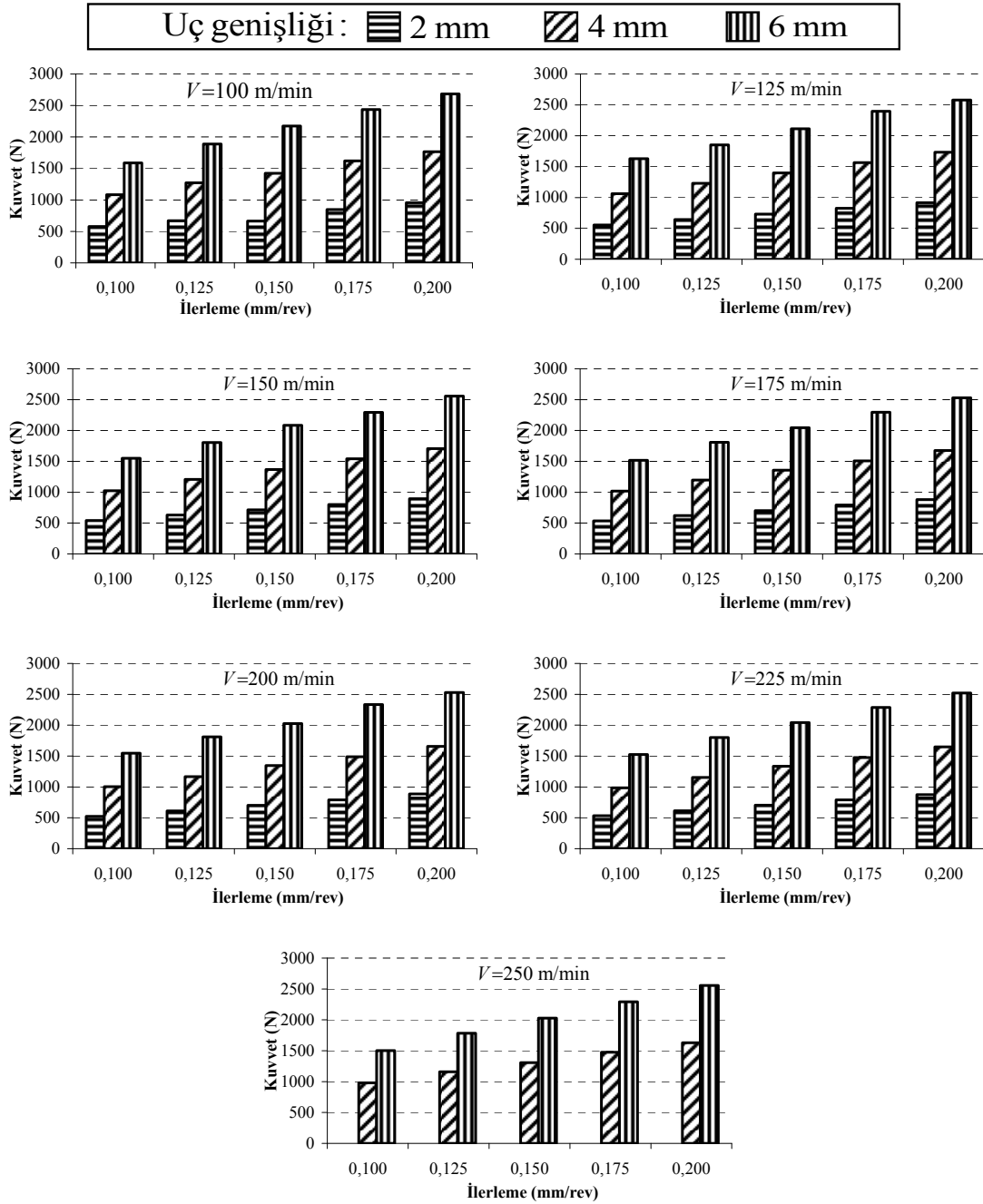
Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlarla yapılan kanal açma deneyleri sırasında dinamometre yardımıyla ölçülen F_C esas kesme kuvveti (veya teğetsel kuvvet) ve F_p pasif (radyal) kuvvet sonuçları sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir.

Şekil 2.10’da (Bkz. Bölüm 2.3.3), kanal açma ve dilimleme işlemleri sırasında kesici takıma etkiyen kesme kuvvetleri gösterilmiş ve diğer tornalama operasyonlarıyla karşılaştırıldığında bu işlemlere özel bazı önemli tespitlerde bulunulmuştur: Dilimleme işleminin aksine, kanal açma işleminin kesme kenarı düz (kesme kenarı iş parçasının boyuna eksenine paralel) olan kesici takım ile yapılmasından dolayı iş parçasının boyuna eksenine paralel doğrultudaki F_a aksel kuvveti; F_C esas kesme kuvveti ve F_p pasif kuvvetin büyüklüğüne göre ihmal edilebilecek seviyededir. Kanal açma işleminde kesici takım; daha ziyade F_C esas kesme kuvveti ve F_p pasif kuvvetin etkisi altındadır [14, 15].

Yapılan kanal açma deneyleri sırasında uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar için F_C esas kesme kuvveti sırasıyla 310~490 N, 590~920 N, 920~1450 N ve F_p pasif kuvveti de sırasıyla 520~950 N, 980~1760 N, 1500~2690 N aralığında ölçülürken; F_a aksel kuvveti ise gerçekten de ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde ölçülmüştür (sırasıyla 2~20 N, 4~25 N, 30~50 N). Başka bir deyişle genel itibarıyla F_a kuvvetlerinin F_C ve F_p kuvvetlerinin yaklaşık %0,4~4’ü seviyelerinde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla kesici takım genişliğine göre Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de sırasıyla sadece F_C ve F_p kuvvet değişimleri gösterilmiştir. F_a aksel kuvvetinin ihmal edilebilecek seviyede olması sebebiyle; çalışmada, bu kuvvetlerin gösterimine yer verilmemiştir.



Şekil 5.1. Kesici takım genişliğine göre esas kesme kuvveti değişimleri



Şekil 5.2. Kesici takım genişliğine göre pasif kuvvet değişimleri

İlerleme değerindeki değişimler açısından Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'den; genel olarak pasif ve esas kesme kuvvetlerinin ilerleme değerindeki artışa paralel olarak yükseldiği görülmüştür. Uçun ve arkadaşlarına [48] göre; ilerleme miktarındaki artış, kesme esnasında talaşın akmaya karşı mukavemeti artmakta ve kesici takım yüzeyine daha fazla talaşın yığılmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda takım-talaş temas boyunun arttığı ve talaşın takım yüzeyi ile daha uzun bir mesafede temas kurduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla takım-talaş

temas bölgesinin ilerleme değerine göre değişmesi sebebiyle; ilerleme artıkça büyüyen takım-talaş temas yüzeyinin daha büyük kuvvetlere maruz kaldığı düşünülmektedir.

Ucun ve arkadaşlarının [48] belirttiği gibi takım-talaş temas bölgesinin kesme hızıyla değişmemesi ve kesme hızının artmasıyla birlikte takım-talaş arasındaki sürtünme katsayısının azalması sebebiyle; ilerleme değeri etkisinin aksine, genel olarak kesme hızındaki artışla birlikte pasif ve esas kesme kuvvetlerinin çok azda olsa düşme eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2).

Kesici takımın radyal doğrultudaki ilerleme hareketleri sebebiyle pasif kuvvetlerin esas kesme kuvvetlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. En yüksek pasif ve esas kesme kuvvetleri, tüm kesici takım genişlikleri için $V=100$ m/min ve $f=0,200$ mm/rev kesme şartlarında ölçülmüştür. Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar için en yüksek pasif ve esas kesme kuvvetleri sırasıyla 955 N, 1765 N, 2685 N ve 489 N, 922 N, 1252 N olarak gerçekleşmiştir.

Uç genişliği 2 mm'den 4 mm ve 6 mm'ye artıkça, boyutsal olarak büyüyen takım-talaş temas bölgesinin daha büyük pasif ve esas kesme kuvvetlerine maruz kaldığı görülmüştür (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Ancak pasif kuvvet ve esas kesme kuvvetindeki uç genişliğine bağlı bu artışın, tam olarak uç boyutuyla doğru orantılı bir biçimde gerçekleştiği söylenemez. Uç genişliğine bağlı olarak, talaş kırıcı geometrisindeki farklılıklar sebebiyle; pasif ve esas kesme kuvvetlerinde uç genişliği 2 mm'ye göre 4 mm ve 6 mm uç genişlikleri için sırasıyla ortalama 1,9-1,96 ve 2,88-3,02 kat değişimlerin olduğu gözlenmiştir.

En düşük pasif ve esas kesme kuvvetleri ise $f=0,100$ mm/rev ilerlemede 2 mm uç genişliği için $V=200$ m/min'de, 4 mm ve 6 mm uç genişlikleri için de $V=250$ m/min kesme hızında ölçülmüştür. Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar için en düşük pasif kuvvetler sırasıyla 524 N, 980 N, 1504 N ve en düşük esas kesme kuvvetleri ise sırasıyla 311 N, 590 N, 926 olarak ölçülmüştür.

Pasif kuvvet ve esas kesme kuvveti için en düşük değerlerin, kesici takım üreticisi firmanın önerdiği en düşük ilerleme ve en yüksek kesme hızına yakın kesme parametrelerinde gerçekleştiğine dikkat ediniz.

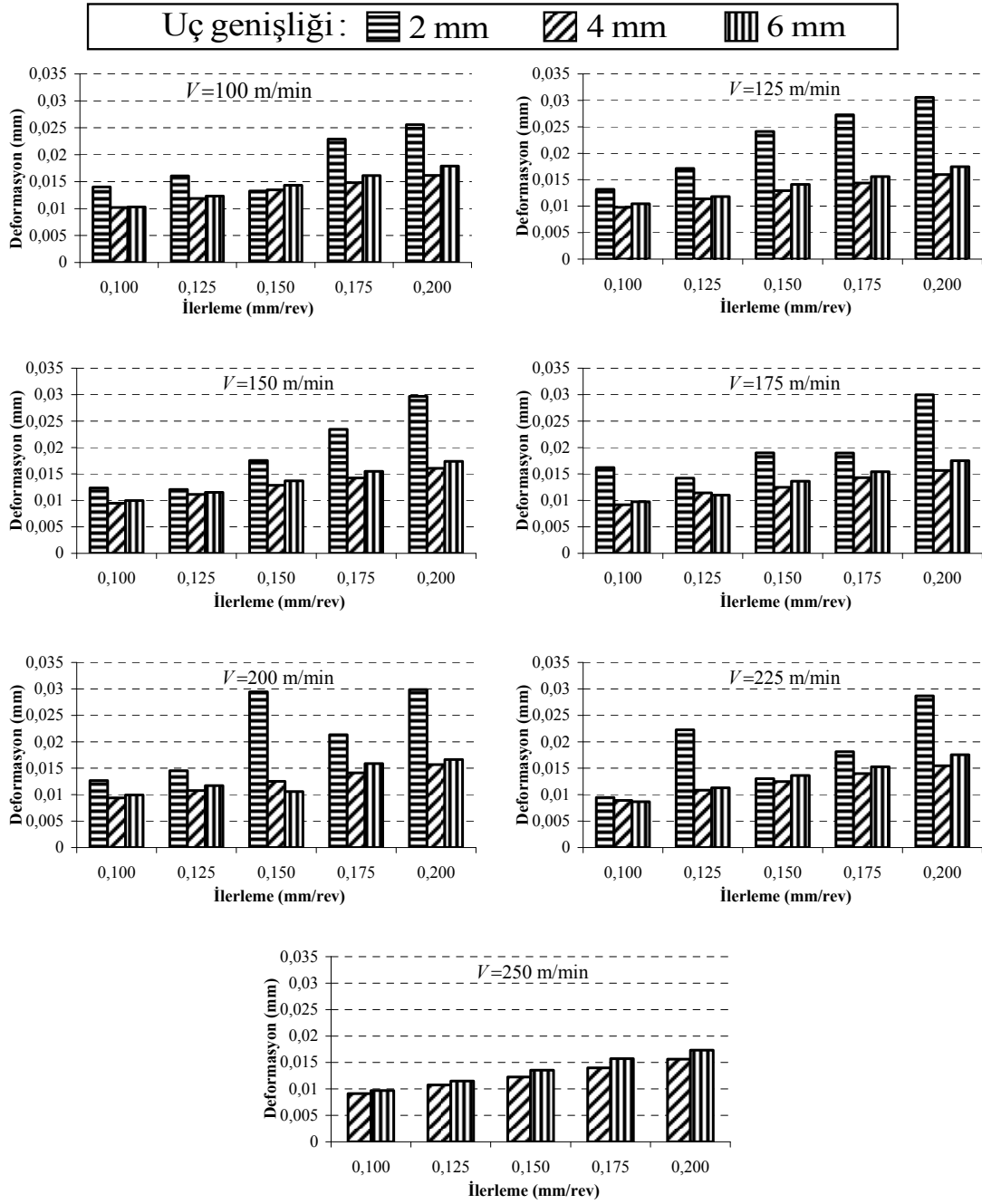
5.2. Analiz Sonuçları

Analiz çalışmaları, kanal açma deneyleriyle ölçülen kesme kuvvetleri ve Bölüm 4.2’de anlatılan prosedür kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme parametrelerinin gerilmeler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla uç genişliği 2 mm olan kesici takımlar için 30; uç genişliği 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar için de 35’şer olmak üzere toplam 100 analiz yapılmıştır. Uç genişliği 2 mm olan kesici takımlar için 250 m/min kesme hızındaki deneyler yapılamadığından, bu kesme hızındaki tüm ilerleme değerleri için analizler (5 adet) yapılamamıştır.

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen toplam deformasyon, en büyük asal gerilme (σ_1), en küçük asal gerilme (σ_3) ve eşdeğer gerilme (von Mises gerilmesi, σ_{VM}) sonuçları elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında en büyük asal gerilme (σ_1) için “+” ve en küçük asal gerilme (σ_3) için de “-” işaretli olan gerilmeler sırasıyla *çekme* ve *basma* gerilmesine işaret etmektedir.

5.2.1. Kesme parametrelerinin toplam deformasyona etkisi

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen vektörel olarak toplam deformasyon sonuçları Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Şekil 5.3’ten; genel olarak kesme kuvvetleri sonucunda kesici takımında oluşan toplam deformasyonun ilerleme değerindeki artışla birlikte yükseldiği görülmüştür. Uç genişliği 4 mm ve 6 mm için toplam deformasyonda görülen değişim (artış) 2 mm uç genişliğindeki takımınla karşılaştırıldığında, uç genişliği 2 mm olan kesici takımın toplam deformasyonunda daha belirgin değişimlerin olduğu söylenebilir.

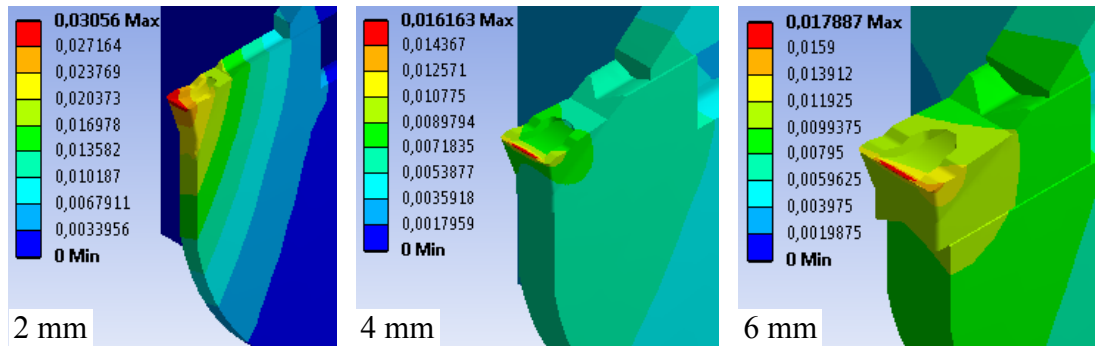


Şekil 5.3. Kesici takım genişliğine göre toplam deformasyon değişimleri

Kesme hızının artmasıyla birlikte 4 mm ve 6 mm genişliğindeki takımların toplam deformasyonunda genelde çok küçük değişimler görülürken 2 mm genişliğindeki takımda ise dalgalanmanın daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durumun uç genişliği ve ilerleme değerine göre oluşan takım-talaş temas bölgeleri arasındaki boyutsal farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle 2 mm uç genişliğindeki takımda oluşan toplam deformasyon değerinde; iş parçası malzemesindeki muhtemel homojensizlikten

kaynaklanan 200 m/min, 0,150 mm/rev ve 225 m/min, 0,125 mm/rev kesme şartlarında ani artışlar görülmüştür.

Analizler sonucunda elde edilen en büyük toplam deformasyon dağılımı 0,2 mm/rev ilerlemede ve uç genişliği 2 mm olan kesici takımlar için 125 m/min; uç genişliği 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar için 100 m/min kesme hızında oluşmuştur. En büyük toplam deformasyon 2 mm, 4 mm ve 6 mm uç genişliği için sırasıyla 0,03056 mm, 0,016163 mm ve 0,017887mm olarak oluşmuştur. Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen en büyük toplam deformasyon dağılımları ise Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kesici takım genişliğine göre toplam deformasyon dağılımları

4 mm ve 6 mm uç genişliğine sahip kesici takımlar için deformasyonun kesme kenarı boyunca ve özellikle talaş kırıcı geometrisindeki oyuk kısmın başlangıcında lokal (uç genişliğinin yarısı kadar uzunlukta ve kesme kenarından $\approx 0,2-0,3$ mm kadar içerdeki talaş yüzeyinde) bir bölgede, ancak uç genişliği 2 mm için tüm kesme kenarı boyunca ve daha geniş bir bölgede (kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu alında, kesme kenarının $\approx 0,5$ mm altına kadar ve kesme kenarından ≈ 1 mm kadar içerdeki talaş yüzeyinde) yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 5.4). 2 mm uç genişliğine sahip kesici takımlardaki bu geniş deformasyon dağılımının, üretici firmanın önerdiği ilerlemenin üstündeki bir ilerlemede gerçekleştiğine dikkat ediniz.

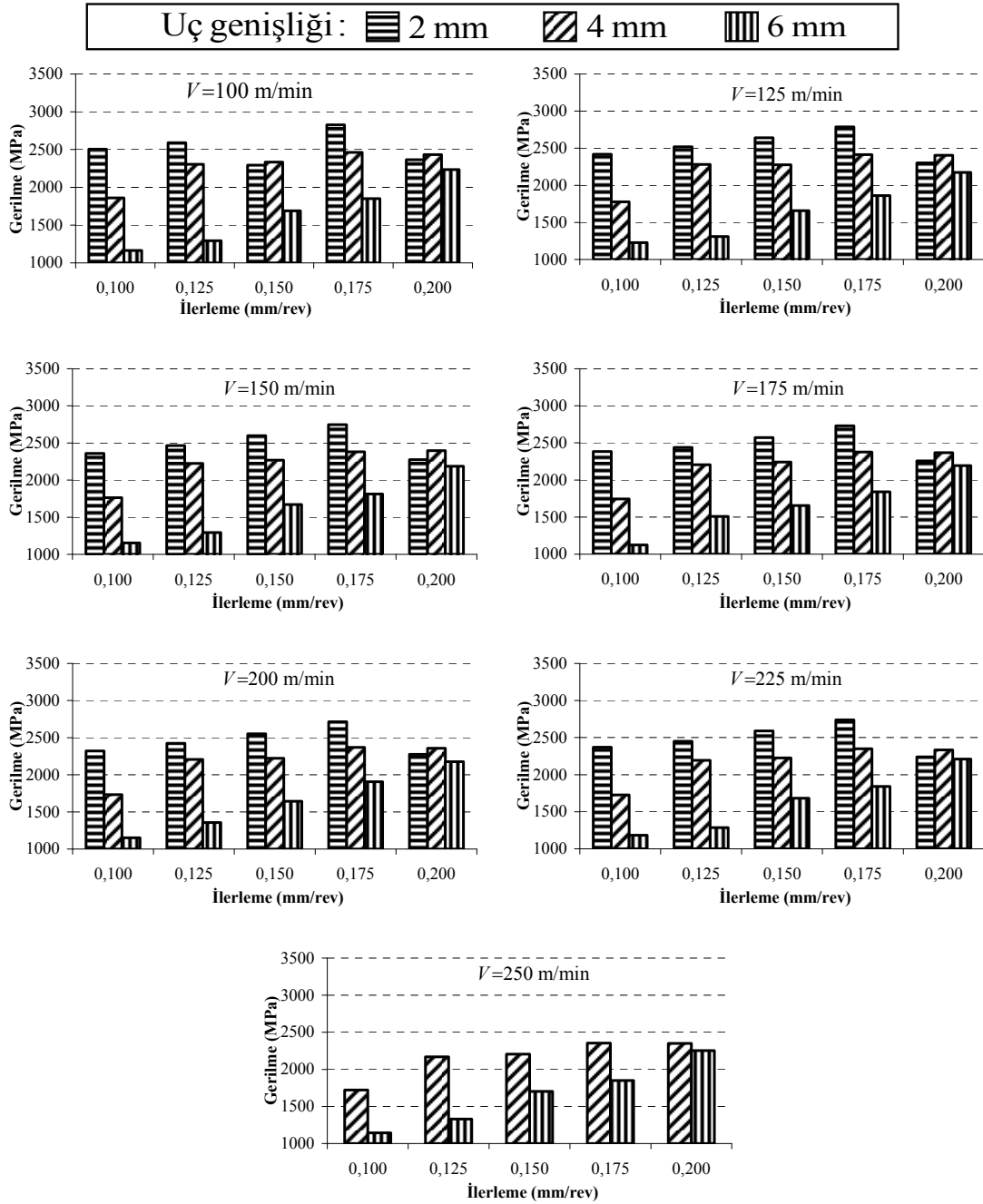
Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar için sırasıyla 0,0094742 mm, 0,0089056 mm ve 0,0086461 mm olarak oluşan en küçük toplam deformasyon değerlerinin (Şekil 5.3), kesici takım üreticisi firmanın önerdiği en düşük ilerleme (0,100 mm/rev) ve en yüksek kesme hızına yakın (225 m/min) kesme şartlarında gerçekleştiği görülmüştür.

5.2.2. Kesme parametrelerinin en büyük asal gerilmeye etkisi

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen en büyük asal gerilme (σ_1) sonuçları Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Şekil 5.5'teki gerilmeler, kesme kuvvetleri etkisiyle kesici takımında oluşan en büyük çekme gerilmelerine işaret etmektedir.

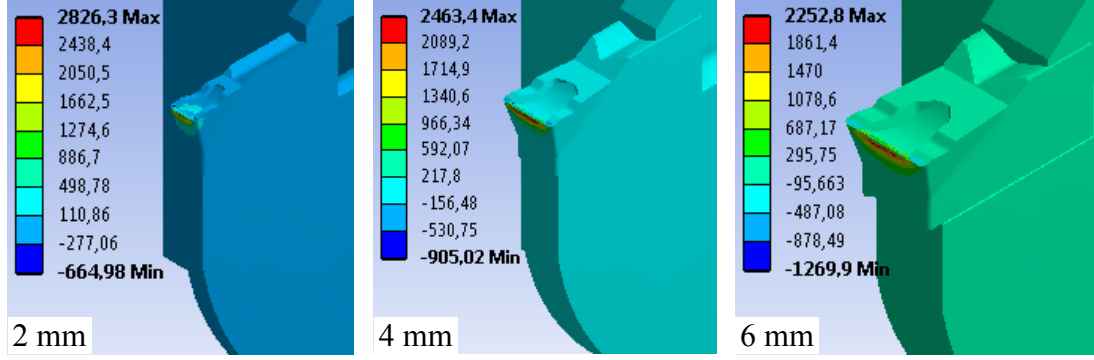
Şekil 5.5'ten; genel olarak ilerlemedeki artışla birlikte en büyük asal gerilmelerin de arttığı, buna karşılık kesme hızındaki artışla gerilmelerin azalma eğiliminde olduğu görülebilir. En büyük asal gerilme değerlerine kesici uç genişliği açısından bakıldığında; özellikle ilerlemedeki artışla birlikte uç genişliği 2 mm ve 4 mm olan takımlarda gerilmeler sırasıyla yaklaşık % 25 ve % 45 oranında artarken, 6 mm uç genişliğindeki takımlarda bu artışın % 100 seviyelerinde olduğu gözlenmiştir. Takım-talaş temas bölgesinin ilerleme değerine göre değişmesi sebebiyle; ilerleme arttıkça büyüyen takım-talaş temas yüzeyinin daha büyük σ_1 gerilmelerine maruz kaldığı düşünülmektedir.

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen en büyük toplam deformasyon dağılımları ise Şekil 5.6'da gösterilmiştir. En yüksek σ_1 dağılımı; 2 mm ve 4 mm uç genişliğine sahip kesici takımlar için 0,175 mm/rev ilerleme ve 100 m/min kesme hızında oluşurken uç genişliği 6 mm için 0,2 mm/rev ve 250 m/min şartlarında gerçekleşmiştir (Şekil 5.6). Analizler sonucunda uç genişliği 2 mm, 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar için en yüksek σ_1 değerleri sırasıyla 2826 MPa, 2463 MPa ve 2253 MPa olarak çıkmıştır.



Şekil 5.5. Kesici takım genişliğine göre en büyük asal gerilme değişimleri

Çekme gerilmesi biçimindeki σ_1 dağılımlarının genel olarak kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu kesme kenarının hemen altındaki (kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu alında, kesme kenarının $\approx 0,2$ mm altında) talaş kırıcı geometrisindeki oyuk kısmın başlangıcına karşılık gelen lokal bir bölgede yoğunlaştığı görülmüştür.



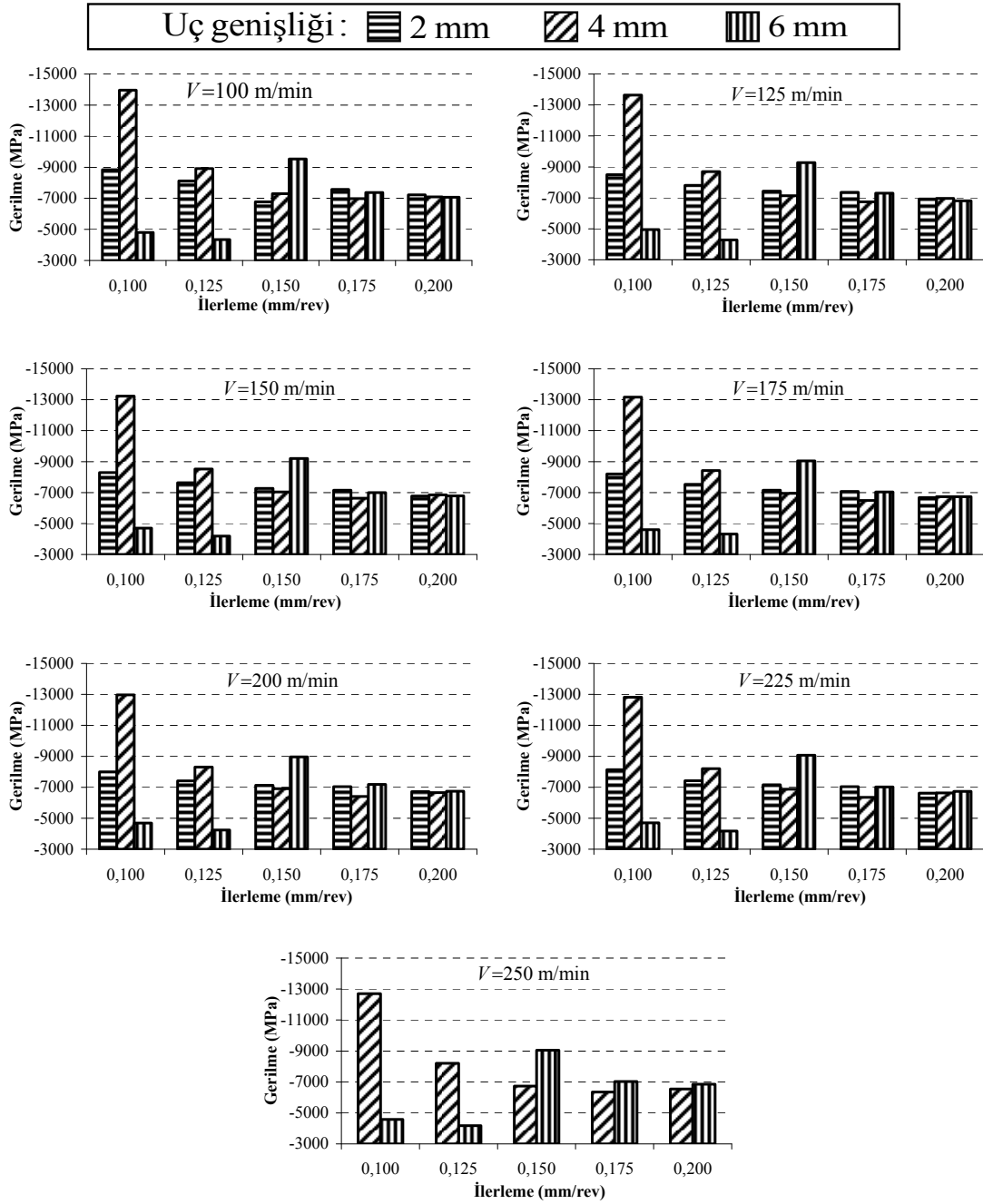
Şekil 5.6. Kesici takım genişliğine göre en büyük asal gerilme dağılımları

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar için sırasıyla 2240 MPa, 1722 MPa ve 1124 MPa olarak gerçekleşen en küçük σ_1 değerleri ise 2 mm'lik takımda 225 m/min ve 0,200 mm/rev'de, 4 mm'lik takımda 250 m/min ve 0,100 mm/rev'de ve 6 mm'lik takımda 175 m/min ve 0,100 mm/rev kesme şartlarında oluşmuştur.

5.2.3. Kesme parametrelerinin en küçük asal gerilmeye etkisi

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen en küçük asal gerilme (σ_3) sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Şekil 5.7'deki gerilmelerin kesme kuvvetleri etkisiyle kesici takımda oluşan en büyük basma gerilmelerine işaret ettiğine ve bu yüzden “-” işaretiyle gösterildiklerine dikkat ediniz.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki en büyük asal gerilme değerleriyle karşılaştırıldığında, kesici takımın radyal doğrultudaki hareketiyle kanal açma işleminin yapılması sebebiyle Şekil 5.7'deki en küçük asal gerilme değerlerinin sayısal olarak daha büyük gerçekleştiği görülmüştür. En küçük asal gerilmelerin en büyük asal gerilmeye oranla uç genişliği 2 mm olan kesici takımlarda $\approx 2,6-3,5$, 4 mm olan kesici takımlarda $\approx 2,7-7,7$ ve 6 mm olan kesici takımlarda ise $\approx 2,9-5,6$ kat daha büyük olduğu görülmüştür. Özellikle 100 m/min'de uç genişliği 2 mm ve 4 mm için sırasıyla 0,100 mm/rev ve 0,150 mm/rev'de ve 6 mm için 125 m/min kesme hızı ve 0,100 mm/rev ilerlemede bu durum oldukça belirgindir. Bu sebeple kesici takım, çekme gerilmesinden ziyade basma gerilmelerine maruz kalır.



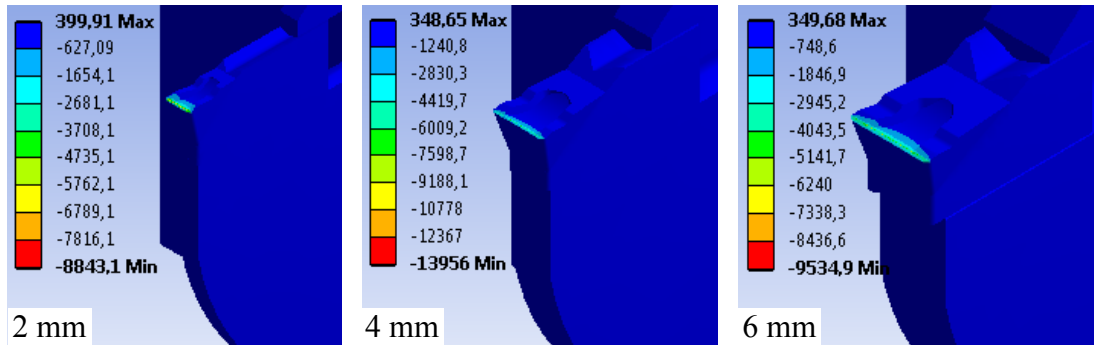
Şekil 5.7. Kesici takım genişliğine göre en küçük asal gerilme değişimleri

En büyük asal gerilmelerin aksine özellikle uç genişliği 2 mm ve 4 mm olan kesici uçlarda genel olarak ilerlemedeki artışla birlikte en küçük asal gerilmelerin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.7). Ancak uç genişliği 6 mm olan kesici uçlarda özellikle 0,150 mm/rev ilerlemede gerilmelerin ani yükseldiği sonraki ilerlemelerde ise azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun sebebinin Bölüm 4.2.3'deki Çizelge 4.11'den de görüleceği gibi 6 mm uç genişliği ve 0,150 mm/rev ilerleme için hazırlanan kesici takım modelinin diğer modellere göre en çok eleman ve düğüm içermesi olduğu düşünülmektedir.

Kesme hızındaki artışla birlikte takım-talaş arasındaki sürtünme katsayısının azalması sebebiyle; genel olarak kesme hızındaki artışla en küçük asal gerilmelerin çok azda olsa düşme eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

2, 4 ve 6 mm uç genişliğine sahip kesici takımlar üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen en küçük asal gerilme dağılımları ise Şekil 5.8’de verilmiştir. En yüksek σ_3 dağılımı; 100 m/min kesme hızında 2 mm ve 4 mm uç genişliğine sahip kesici takımlar için 0,1 mm/rev ilerlemede oluşurken uç genişliği 6 mm için 0,15 mm/rev şartlarında oluşmuştur (Şekil 5.8). Kesme kuvvetlerinin uygulama yönü dikkate alındığında; kesici uçtaki gerilmelerin daha ziyade basma biçimli gerilme davranışı gösterdiği söylenebilir. Şekil 5.6’daki σ_1 dağılımlarından farklı olarak; uç genişliğine bakılmaksızın en yüksek σ_3 dağılımlarının genel olarak tüm kesme kenarı boyunca, talaş kırıcı geometrisindeki oyuk kısmın başlangıcında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 5.8). Analizler sonucunda uç genişliği 2 mm, 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar için basma gerilmesi biçimindeki en yüksek σ_3 değerleri sırasıyla 8843 MPa, 13956 MPa ve 9635 MPa olarak çıkmıştır. Model oluşturma sürecinde kesici ucun talaş kırıcı formu boyutları ile ilerleme değeri doğrultusunda oluşturulan takım-talaş temas bölgesi boyutunun sınırları arasındaki yakınlık sebebiyle; 4 mm uç genişliğine sahip kesici takımında 0,1 mm/rev ilerlemede oluşan gerilmenin diğer uçlara göre en yüksek çıktığı düşünülmektedir.

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar için sırasıyla 6629 MPa, 6351 MPa ve 4173 MPa olarak gerçekleşen en küçük σ_3 değerleri ise 225 m/min kesme hızında 2 mm’lik takımında 0,200 mm/rev’de, 4 mm’lik takımında 0,175 mm/rev’de ve 6 mm’lik takımında 0,125 mm/rev şartlarında oluşmuştur.



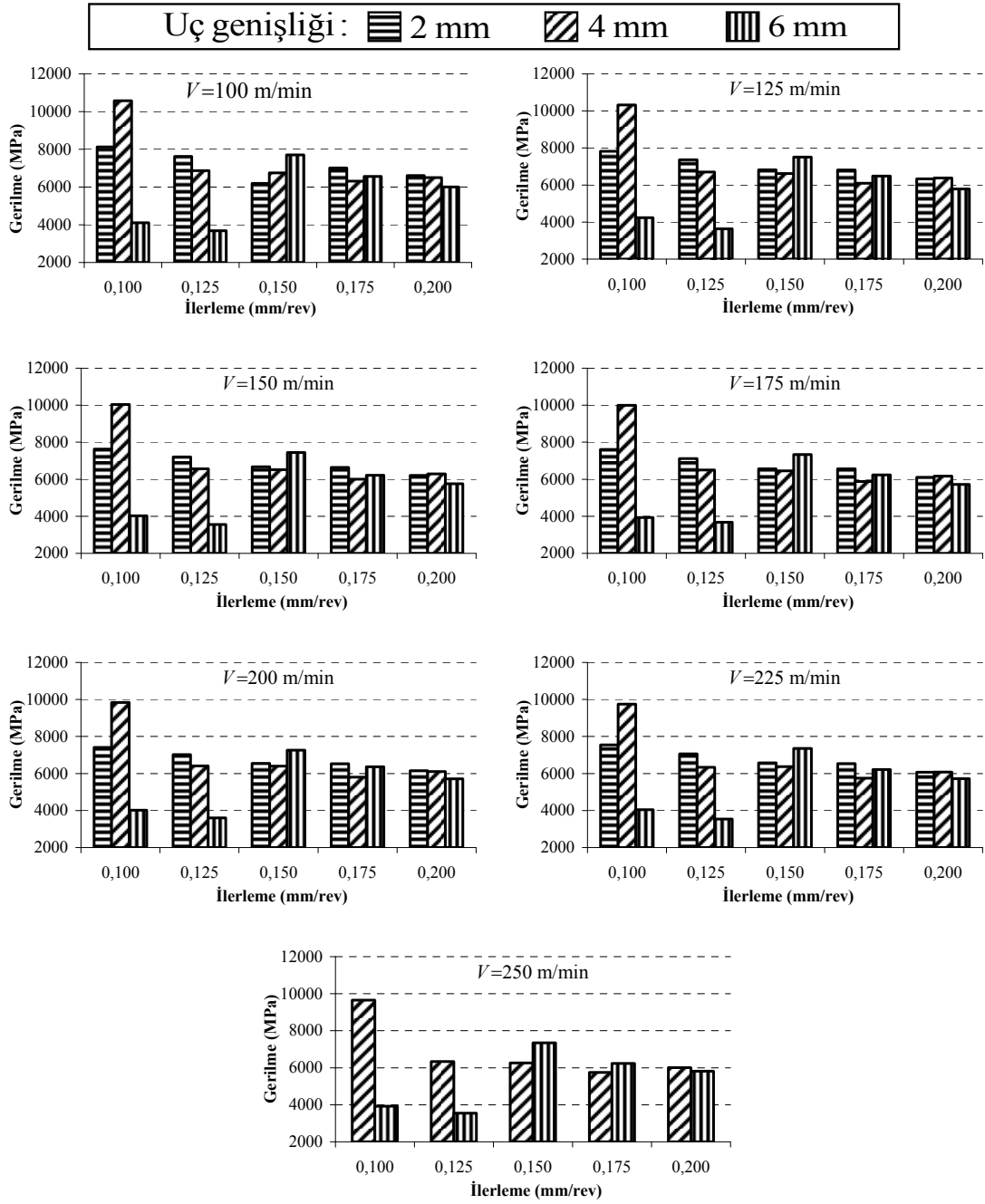
Şekil 5.8. Kesici takım genişliğine göre en küçük asal gerilme dağılımları

5.2.4. Kesme parametrelerinin eşdeğer gerilmeye etkisi

Uç genişliği 2, 4 ve 6 mm olan kesici takımlar üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen eşdeğer gerilme (von Mises gerilmesi, σ_{VM}) sonuçları Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

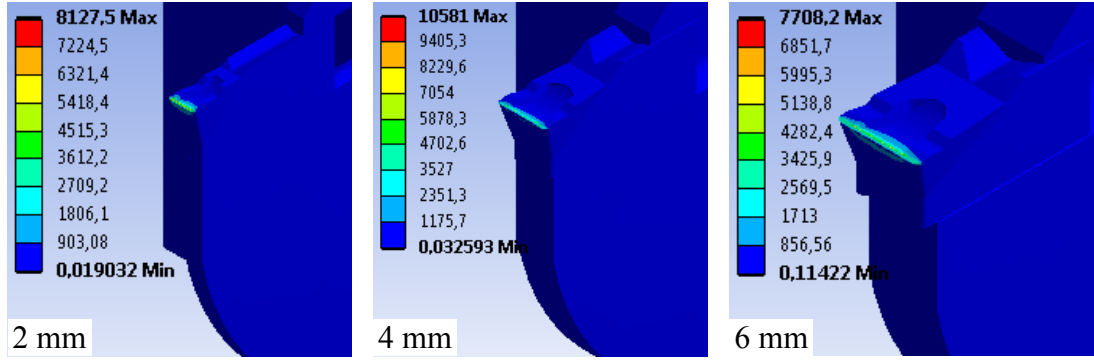
Eşdeğer gerilme (veya von Mises gerilmesi, σ_{VM}); Bölüm 2.4.2, Eş. 2.22b'den de görüleceği üzere asal gerilme değerleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Dolayısıyla basma gerilmesi biçimindeki σ_3 değerinin çekme gerilmesi biçimindeki σ_1 değerinin çok üstünde ($\approx 3-5$ katı) olması sebebiyle; σ_{VM} gerilmelerinin daha ziyade en küçük asal gerilmeden etkilendiği söylenebilir. Bu durum kesme parametrelerine ve kesici uç genişliğine göre özellikle Şekil 5.7'de verilen en küçük asal gerilme değişimleri ile Şekil 5.9'daki eşdeğer gerilme değişimlerinin karşılaştırılması halinde açıkça görülebilir. Dolayısıyla Bölüm 5.2.3 kapsamında kesme parametrelerinin en küçük asal gerilmeye etkisi için yapılan değerlendirmelerin genel itibariyle eşdeğer gerilme (veya von Mises gerilmesi, σ_{VM}) için de geçerli olduğu söylenebilir.

Benzer biçimde Şekil 5.10'da verilen 2, 4 ve 6 mm uç genişliklerine göre en yüksek eşdeğer gerilme için gerilme dağılımlarının en yüksek σ_3 dağılımlarıyla paralellik arz ettiği görülmüştür. σ_{VM} dağılımı, en yüksek σ_3 dağılımının neredeyse aynısıdır.



Şekil 5.9. Kesici takım genişliğine göre eşdeğer gerilme değişimleri

σ_3 ve σ_{VM} gerilme değerlerinin büyüklüğü açısından uç genişliği (takım-talaş temas bölgesi alanı) göz önüne alındığında; 4 mm uç genişliğine sahip kesici takımların aksine, uç genişliği 2 mm olan kesici ucun daha büyük zorlamalara maruz kaldığı düşünülmektedir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Kesici takım genişliğine göre eşdeğer gerilme dağılımları

Analizler sonucunda uç genişliği 2 mm, 4 mm ve 6 mm olan kesici takımlar için sırasıyla 8128 MPa, 10581 MPa ve 7708 MPa olan en yüksek σ_{VM} değerleri ve dağılımları (Şekil 5.9 ve Şekil 5.10); en yüksek σ_3 'te olduğu gibi 100 m/min kesme hızında 2 mm ve 4 mm uç genişliğine sahip kesici takımlar için 0,1 mm/rev ilerlemede oluşurken uç genişliği 6 mm için 0,15 mm/rev şartlarında oluşmuştur. Benzer biçimde en küçük eşdeğer gerilme değerleri de yine en küçük σ_3 'ün kesme şartlarında 2, 4 ve 6 mm uç genişlikleri için sırasıyla 6067 MPa, 5753 MPa ve 3539 MPa olarak gerçekleşmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan kesme deneylerinde kesici uçta çok belirgin bir aşınma görülmemekle birlikte, σ_{VM} dağılımlarından; kesici uçtaki muhtemel aşınmanın klasik silindirik tornalama işlemlerinde olduğu gibi genel olarak krater aşınması biçiminde görüleceği düşünülebilir. Ancak Şekil 5.6'daki σ_1 dağılımları için işaret edildiği üzere kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu kesme kenarının hemen altındaki ucun alın yüzeyinde ise oluşan sürtünme etkisiyle yanak aşınması biçimli bir aşınmanın görüleceği de söylenebilir.

Kanal açma esnasında talaşın akmaya karşı artan mukavemeti ve kesici takım yüzeyinde daha fazla talaşın yığılması sonucunda takım-talaş temas boyunun artarak talaşın takım yüzeyi ile daha uzun bir mesafede temas kurmasına sebep olan ilerleme değerindeki artışlar pasif ve esas kesme kuvvetlerini belirgin bir biçimde yükseltmektedir.

Uç genişliğinin takım-talaş temas bölgesi üzerinde doğrudan etkili olmasından dolayı artan uç genişliği/kalınlığı, kesici takımın daha büyük kesme kuvvetlerine maruz kalmasına yol açar. Ancak kesme kuvvetlerindeki uç genişliğine bağlı bu artış, tam olarak uç boyutuyla doğru orantılı bir biçimde gerçekleşmez.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; farklı kesici takımlar kullanılmak suretiyle kanal açma sırasında oluşan kesme kuvvetleri kesme deneyleri yardımıyla ölçülmüş ve belirlenen kesme kuvvetlerinin kesici takım üzerindeki etkileri, sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak Ansys Workbench yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kanal açma işleminin kesme kenarı düz (kesme kenarı iş parçasının boyuna eksenine paralel) olan kesici takımın radyal doğrultudaki hareketiyle yapılması sebebiyle; iş parçasının boyuna eksenine paralel doğrultudaki F_a aksenal kuvveti diğer kesme kuvvetlerine göre ihmal edilebilecek seviyededir.
- Klasik silindirik tornalamadan farklı olarak, pasif kuvvetler esas kesme kuvvetlerinden daha büyüktür.
- Kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisi açısından; ilerleme değeri, kuvvetlerin büyüklüğü bakımından kesme hızına göre daha belirleyicidir.
- Kesme hızının artmasıyla birlikte takım-talaş arasındaki sürtünme katsayısının azalması sonucunda; ilerleme değeri etkisinin aksine, kesme hızındaki artışla birlikte pasif ve esas kesme kuvvetleri azalmaktadır.
- Pasif ve esas kesme kuvvetleri için en düşük değerler, kesici takım üreticisi firmanın önerdiği en düşük ilerleme ve en yüksek kesme hızına yakın kesme parametrelerinde gerçekleşmiştir.
- Kesici takımda oluşan toplam deformasyon ve en büyük asal gerilme (σ_1); ilerleme değerindeki artışla birlikte yükselirken, kesme hızındaki artışla kısmen azalır.
- Kesme kenarı boyunca ve özellikle talaş kırıcı geometrisindeki oyuk kısmın başlangıcında lokal olarak görülen toplam deformasyon; kesici ucun dayanım özellikleri iyileştiğinden, aynı kesme şartlarında kesici takımın genişliği artıkça azalır.
- Kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu kesme kenarının hemen altındaki talaş kırıcı geometrisindeki oyuk kısmın başlangıcına karşılık gelen lokal bir bölgede yoğunlaşan çekme gerilmesi biçimli σ_1 ; kesici ucun dayanım özellikleri iyileştiğinden, aynı kesme şartlarında kesici takımın genişliği artıkça azalır.

- En küçük asal gerilme (σ_3) ve eşdeğer gerilme (veya von Mises gerilmesi, σ_{VM}) genel olarak ilerleme değerindeki artışla birlikte belirgin bir biçimde azalırken, kesme hızındaki artışla çok az azalır.
- σ_1 ile karşılaştırıldığında basma gerilmesi biçimli σ_3 değerleri sayısal olarak daha büyüktür. Kesici takım çekme gerilmesinden ziyade basma gerilmelerine maruz kalır.
- σ_1 dağılımlarından farklı olarak; uç genişliğine bakılmaksızın σ_3 gerilmeleri genel olarak tüm kesme kenarı boyunca, talaş kırıcı geometrisindeki oyuk kısmın başlangıcında yoğunlaşmaktadır.
- Kesme parametrelerinin σ_3 'e etkisi için yapılan değerlendirmeler, genel itibariyle σ_{VM} için de geçerlidir.
- Eşdeğer gerilmenin asal gerilme değerleri yardımıyla hesaplanması ve σ_3 değerinin σ_1 değerinin çok üstünde ($\approx 3-5$ katı) olması sebebiyle; σ_{VM} gerilmeleri daha ziyade σ_3 'ten etkilenir.
- σ_{VM} dağılımları σ_3 dağılımlarıyla paralellik arz etmektedir (σ_{VM} dağılımları, σ_3 dağılımının neredeyse aynısıdır).
- σ_3 ve σ_{VM} gerilme değerlerinin büyüklüğü açısından uç genişliği (takım-talaş temas bölgesi alanı) göz önüne alındığında; uç genişliği 2 mm olan kesici uç, daha büyük zorlamalara maruz kalır.
- σ_{VM} dağılımlarından; kesici uçtaki muhtemel aşınma, daha ziyade krater aşınması biçiminde görülür. Ancak σ_1 dağılımı için işaret edildiği üzere kesici ucun iş parçasıyla temasta olduğu kesme kenarının hemen altındaki ucun alın yüzeyinde ise oluşan sürtünme etkisiyle yanak aşınması biçimli bir aşınma da görülür.

Kanal açma işlemlerinde kullanılan kesici uçtaki gerilmelerin incelendiği bu çalışma konusyla ilgili olarak bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması bakımından aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- Takım-talaş temas bölgesi, kesme kuvvetleri ve yük uygulama durumları dikkate alınarak yeni talaş kırıcı formları için tasarımlar uygulanabilir.
- Daha farklı talaş kırıcı formlarına sahip kesici takımlar kullanılarak kesici takımdaki muhtemel aşınma davranışları incelenebilir.
- İki boyutlu gerilme analizleri yapılarak, kesici takımlarda oluşan gerilmeler ve aşınma davranışlarının daha hızlı ve kolay bir biçimde yapılabilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Kurt, A. (2006). Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 82-114.
2. Özyılmaz, A. (2011). Piston kanallarının işlenmesinde yüzey kalitesinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 16-20, 42-43.
3. Kurt, A., ve Şeker, U. (2004). Talaş derinliğinin kesici takım gerilmelerine etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 23-29.
4. Dinç, C. (2006). Analysis of thermal fields in orthogonal machining, MSc. Thesis, *Koç University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, İstanbul, 16-26.
5. Donaldson, C., Lecain, G.H., and Goold, V.C. (1980). Tool Design. *McGraw-Hill*, New Delhi, 223-239.
6. Piispanen, V. (1937). Lastunmuodostumisen Teoriaa. *Teknillinen Aikakauslehti*, 27, 315-322.
7. Merchant, M.E. (1945). Mechanics of the cutting process. *Journal of Applied Physics*, 16, 267-318.
8. Kobayashi, S., and Thomsen, E.G. (1959). Some observation of the shearing process in metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, 81, 251-262.
9. Palmer, W.B., and Oxley, P.L.B. (1959). Mechanics of orthogonal machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 173, 623-638.
10. Okushima, K., and Hitomi, K. (1961). An analysis of the mechanism of orthogonal cutting and its application to discontinuous chip formation. *Journal of Engineering for Industry*, 83, 545-556.
11. Zorev, N.N. (1963). Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. *The American Society of Mechanical Engineers International Research in Production Engineering*, New York, 42-49.
12. Nasr, M.N.A., Ng, E.-G., and Elbestawi, M.A. (2007). Modelling the effects of tool-edge radius on residual stresses when orthogonal cutting AISI 316L. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47 (2), 401-411.
13. İnternet: Sandvik Coromant (2014). Kesme ve kanal açma http://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/parting_grooving/pages/default.aspx adresinden 02 Mart 2014'de alınmıştır.
14. Baykasoğlu, A. (1995). Computer aided optimisation of cutting conditions in multicut turning operations, MSc. Thesis, *Gaziantep University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Gaziantep, 70-71.

15. Weill, R., and Wertheim, R. (1980). New parting tool system with self-gripping, replaceable carbide inserts. *Annals of the CIRP*, 29, 29-33.
16. Topçu, M., ve Taşgetiren, S. (1998). Mühendisler için sonlu eleman metodu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Denizli, Ders Kitapları Yayın No: 007, 225-230.
17. Chandrupatla, T.R., and Belegundu, A.D. (1997). Introduction to the finite elements in engineering 2nd edition. *Prentice Hall*, New Jersey, 1-11, 137-141, 226, 280-285.
18. Felippa, C.A., and Clough, R.W. (1969). The finite element method in solid mechanics in numerical solution of field problems in continuum physics, Ed.: G.Birkhoff, R.S.Varga, *Proceedings II American Mathematical Society*, 210-252.
19. Zienkiewicz, O.C. (1983). The finite element method. *McGraw-Hill Book Company*, London, 122-125.
20. Rao, S.S. (1999). The finite element method in engineering. *Butterworth-Heinemann*, 331-334.
21. Ugural, A.C., and Fenster, S.K. (1995). Advanced strength and applied elasticity 3rd Edition. *Printice Hall*, New Jersey, 28-31.
22. Chern, G.L. (2005). Development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (7-8), 789-794.
23. Obikawa, T., Kamata, Y., and Shinozuka, J. (2006). High-speed grooving with applying MQL. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (14), 1854-1861.
24. De Chiffre, L., Andreasen, J.L., Lagerberg, S., and Thesken, I. B. (2007). Performance testing of cryogenic CO₂ as cutting fluid in parting/grooving and threading austenitic stainless steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56 (1), 101-104.
25. Kafkas, F. (2007). Vidaların talaşlı imalatında imalat parametrelerinin vida dış dibindeki kalıntı gerilmeler üzerine etkilerinin deneysel olarak araştırılması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 104-122.
26. Yanar, N. (2008). Hidrolik silindir imalatında yüzey pürüzlülüğüne etkili parametrelerinin Taguchi yöntemi ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 45-48.
27. Daghini, L., Archenti, A., and Nicolescu, C.M. (2010). Design and dynamic characterization of composite material dampers for parting-off tools. *Journal of Machine Engineering*, 10 (2), 57-70.
28. Ding, X., and Rahman M. (2012). A study of the performance of cutting polycrystalline Al 6061 T6 with single crystalline diamond micro-tools. *Precision Engineering*, 36 (4), 593-603.

29. Machai, C., Iqbal, A., Biermann, D., Upmeier, T., and Schumann, S. (2013). On the effects of cutting speed and cooling methodologies in grooving operation of various tempers of β -titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (7), 1027-1037.
30. Cakir, M.C., and Cavdar K. (2006). Development of a knowledge-based expert system for solving metal cutting problems. *Materials & Design*, 27 (10), 1027-1034.
31. Ceretti, E., Lucchi, M., and Altan, T. (1999). FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation. *Journal of Materials Processing Technology*, 95 (1-3), 17-26.
32. Nasr, M.N.A., Ng, E.G., and Elbestawi, M.A. (2007). Modelling the effects of tool-edge radius on residual stresses when orthogonal cutting AISI 316L. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2), 401-411.
33. Mahnama, M., and Movahhedy, M.R. (2010). Prediction of machining chatter based on FEM simulation of chip formation under dynamic conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50 (7), 611-620.
34. Vaziri, M.R., Salimi, M., and Mashayekhi, M. (2011). Evaluation of chip formation simulation models for material separation in the presence of damage models. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19 (2), 718-733.
35. Ivester, R.W., Kennedy, M., Davies, M., Stevenson, R., Thiele, J., Furness, R., and Athavale, S. (2000). Assessment of machining models: progress report. *International Journal Machining Science and Technology*, 4 (3), 511-538.
36. Mahnama, M., and Movahhedy, M.R. (2012). Application of FEM simulation of chip formation to stability analysis in orthogonal cutting process. *Journal of Manufacturing Processes*, 14 (3), 188-194.
37. Moufki, A., Devillez, A., Segreti, M., and Dudzinski, D. (2006). A semi-analytical model of nonlinear vibrations in orthogonal cutting and experimental validation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (3-4), 436-449.
38. Deng, W. J., Xie, Z. C., Li, Q., and Lin, P. (2013). Finite element modeling and simulation of chip breaking with grooved tool. *International Journal of Simulation Modelling*, 12 (4), 264-275.
39. Kountanya, R., Al-Zkeri, I., and Altan T. (2009). Effect of tool edge geometry and cutting conditions on experimental and simulated chip morphology in orthogonal hard turning of 100Cr6 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (11), 5068-5076.
40. Preś, P., Skoczyński, W., and Jaśkiewicz, K. (2014). Research and modeling workpiece edge formation process during orthogonal cutting. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, In Press (<http://dx.doi.org/10.1016/j.acme>.2014.01.003).
41. Taşgetiren, S., Aslantaş, K., and Kurt, A. (2000). Torna kesme kaleminde gerilmeler: Sürtünme katsayısının etkisi. *Teknoloji*, 3 (2-3), 1-10.

42. Taşgetiren, S. (2000). An estimation of edge deterioration on cutting tool during turning: Off-line stres analysis aproximation. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1), 99-108.
43. Mitsubishi Carbide General Catalogue. (2013). Grooving tools (2012-2013). *Mitsubishi Carbide*, F04-F037.
44. Kistler Type 9257B. Three Component Dynamometer Operating Instructions. (1997). *Kistler*.
45. Lin Z.C., and Lo, S.P. (1998). A study of deformation of the machined workpiece and tool under different low cutting velocities with an elastic tool. *International Journal of Machine Science*, 40 (7), 663-681.
46. Wikgren, T. (2001). Analysis of contact between insert and tip seat, Msc. Thesis, *Luleå University of Technolgy Institutionen för Maskinteknik Avdelningen för Datorstödd maskinkonstruktion*, 13-15.
47. Duran, A. (1999). Tornalarda kesici kenar ayar açısının kesmeye etkisinin sonlu elemanlarla analizi. *Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 2 (3-4), 103-117.
48. Uçun, İ., Aslantaş, K., ve Karabulut, A. (2009). Ortagonal kesme işleminde takım-talaş temas uzunluğundaki değişimin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (3), 477-484.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAKIR, Serkan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.11.1982, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (537) 595 01 48
 e-mail : serkanbakir24@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi ABD.	2014
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim ABD.	2005
Lise	Ali Osman Sönmez Teknik Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012 – Halen	Europower Enerji San. Tic. Ltd. Şti.	Mekanik Tasarım
2010 – 2012	Hidropol Müh. Mak. San. Tic. Ltd. Şti.	Makina Tasarımı
2009 – 2010	Global Mak. San. Tic. Ltd. Şti.	Makina Tasarımı
2006 – 2008	Özkanlar Hid. Mak. San. Tic. Ltd. Şti.	Makina Tasarımı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kurt, A., ve Bakır, S. (2014). Kesici uç genişliğinin kanal açma sırasındaki kesme kuvvetlerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji*, 2 (2), 221-228.

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Futbol



GAZİ GELECEKTİR..