
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DELİK DELME İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU VE DELİK DELME İŞLEMLERİNDE KESME PARAMETRELERİNE BAĞLI MEKANİK GERİLMELERİN İNCELENMESİ

Abdulkadir YILDIZ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Abdulkadir YILDIZ
08/06/2022

DELİK DELME İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU VE DELİK DELME İŞLEMLERİNDE KESME PARAMETRELERİNE BAĞLI MEKANİK GERİLMELERİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Abdulkadir YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Bu çalışmada, delme işleminde kullanılan kesici takımın (matkap) kesme performansının artırılması hedeflenmiştir. Çalışma, delme sırasında meydana gelen itme kuvveti ve torkun deneysel olarak belirlenmesini ve bu kesme yüklerinin kesici takım üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) temelli Deform-3D programı ile analizini içermektedir. Bu amaçla, farklı kesme parametreleri (60, 75, 90, 108 m/min kesme hızları ve 0,15-0,20-0,25 mm/rev ilerleme değerleri) kullanılarak dolu ve ön delikli AISI 1050 numuneleri üzerinde kaplanmamış ve TiAlN/TiN kaplı karbür matkaplarla farklı kesme parametreleri ile deneysel delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Delme deneyleri sırasında oluşan itme kuvveti ve torku ölçmek için Kistler 9272 tipi dinamometre kullanılmıştır. Deneysel olarak ölçülen itme kuvveti ve torkun matkap üzerindeki gerilme etkileri analiz edilmiştir. Matkabın performansını artırmak için delme işlemi simüle edilmiş ve Deform-3D programındaki Pre, Simulator ve Post modülleri kullanılarak kesme parametreleri ve gerilmeler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Simülasyonlarla elde edilen sonuçlar, deneylerle ölçülen sonuçlarla paralellik arz ettiği görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek belirlenecek olan kesme parametreleri seçildiğinde kesici takımın kesme performansının iyileştirilmesine ve optimum kesme parametrelerinin seçimine önemli katkılar sağlamıştır. Yapılan çalışmada uygulanan gerilme analizi yaklaşımı, tornalama ve frezeleme gibi diğer kesme işlemlerine de uygulanabilir. Kesici takım tasarımında yapılacak analizlerin takım performansını belirleyen en önemli kriterlerden olduğu ve mutlaka dikkate alınması gerektiği açıktır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Delik delme, matkap, simülasyon, kesici takım gerilmeleri, Deform
Sayfa Adedi : 106
Danışman : Prof. Dr. Abdullah KURT

SIMULATION OF DRILLING OPERATION AND EXAMINATION OF MECHANICAL STRESSES ACCORDING TO VARIATION IN CUTTING PARAMETERS IN DRILLING OPERATIONS

(Ph. D. Thesis)

Abdulkadir YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

In this study, it is aimed to improve the cutting performance of the cutting tool (drill) used in drilling. The study includes experimental determination of thrust force and torque occurred during drilling, and analysis of the effects of these cutting loads on cutting tool with the Deform-3D program based on finite element method (FEM). For this purpose, various drilling experiments with uncoated and TiAlN/TiN coated carbide drills are conducted on full solid and pre-drilled AISI 1050 samples using different cutting parameters (cutting speeds of 60, 75, 90, 108 m/min and feed rates of 0.15, 0.20, 0.25 mm/rev). Kistler 9272 type dynamometer was used to measure the thrust force and torque occurring during the drilling experiments. The stress effects of the experimentally measured thrust force and torque on the drill were analyzed. To improve the performance of the drill, the drilling operation was simulated and the relationships between cutting parameters and stresses were investigated using the Pre, Simulator and Post modules in the Deform3D program. The results obtained with the simulations were found to be in parallel with the results measured by the experiments. By evaluating the results obtained from the study, when the cutting parameters to be determined were selected, it made significant contributions to the improvement of the cutting performance of the cutting tool and the selection of the optimum cutting parameters. The stress analysis approach applied in the study can also be applied to other cutting operations such as turning and milling. It is clear that the analysis to be made in the cutting tool design is one of the most important criteria that determine the tool performance and must be taken into account.

Science Code : 91438
Key Words : Drilling, drill, simulation, cutting tool stresses, Deform
Page Number : 106
Supervisor : Prof. Dr. Abdullah KURT

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecinin her aşamasında, bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı ve destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Abdullah KURT'a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım esnasında delik delme 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 ve bana her zaman manevi desteğiyle hep yanımda olan kıymetli hocam Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. İhsan KORKUT'a, deneylerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Öğr. Görv. Dr. Selçuk YAĞMUR'a ve Sayın Doç. Dr. Gültekin UZUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleşmesinde finansman desteği sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje Kodu: 07/2012-59) teşekkür ediyorum.

Değerli bilgileriyle Deform-3D programının kullanımı konusunda deneyimlerinden faydalandığım Doç. Dr. Kadir GÖK'e teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmamın tamamlanmasında manevi güç ve desteğini hiç bir zaman eksik etmeyen sevgili eşim Hayriye hanım'a, oğlum Kerem Eymen'e ve kızım Nursima'ya teşekkürlerimi şükranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT..... v

TEŞEKKÜR..... vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... x

SİMGELER VE KISALTMALAR..... xiii

1. GİRİŞ..... 1

2. KURAMSAL TEMELLER ……..... 5

2.1. Delik Delme İşlemleri…….. 5

2.2. Temel Tanımlar…… 6

2.3. Delik Tipleri……. 8

2.4. Delik Delme Takımları……..... 9

2.4.1. Matkapların sınıflandırılması……. 10

2.5. Delik Delmede Kesme Kuvvetleri ve Güç……... 11

2.6. Delik Delmede Talaş Oluşumu…… 14

2.7. Delik Delme İşleminin Önemi…… 17

2.8. Sonlu Elemanlar Metodu ve Deform Yazılımı……. 18

2.8.1. Sonlu elamanlar analizi……... 18

2.8.2. Eşdeğer gerilme (von Mises Gerilmesi)……. 24

2.8.3. Deform yazılımı……. 25

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI……. 41

3.1. Delme İşlemi İle İlgili Deneysel Çalışmalar…… 41

3.2. Delme İşlemiyle İlgili Simülasyon Çalışmaları…… 46

Sayfa

3.3. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi……. 51

4. MATERYAL VE METOT……. 53

4.1. Deneysel Çalışmalar…… 53

4.1.1. İş parçası malzemesi…….. 53

4.1.2. Kesici takımlar…….. 53

4.1.3. Takım tezgahı…… 54

4.1.4. Kesme kuvvetleri ve momentin ölçülmesi……. 54

4.1.5. Deneylerin yapılışı……. 56

4.2. Simülasyon ve Analiz Çalışmaları…….. 56

4.2.1. Geometrik model oluşturma ve nesneleri konumlandırma…… 57

4.2.2. Malzeme modelleri…… 58

4.2.3. Elemanlara ayırma…… 60

4.2.4. Sınır şartları…… 61

4.2.5. Simülasyon kontrolleri…….. 64

4.2.6. Veri tabanı oluşturma……... 69

4.2.7. Simülasyon koşulması…….. 72

4.2.8. Matkap gerilmelerinin analizi…….. 74

5. DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA…… 79

5.1. Deneysel ve Simülasyon Sonuçları……. 79

5.2. Gerilme Analizi Sonuçları…… 85

5.3. Gerilme Dağılımları…….. 96

6. SONUÇ VE ÖNERİLER……. 99

KAYNAKLAR…….. 101

ÖZGEÇMİŞ…… 109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Helis adımlarına göre matkap çeşitleri ve kullanıldığı yerler 11

Çizelge 4.1. Deney numulerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık)..... 53

Çizelge 4.2. Deney numunelerinin mekanik özellikleri..... 53

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan tezgahın teknik özellikleri 54

Çizelge 4.4. Kistler 9272-A tipi dinamometrenin teknik özellikleri..... 55

Çizelge 4.5. AISI 1050 için malzeme modeli parametreleri..... 59

Çizelge 4.6. Matkap için malzeme modeli parametreleri 59

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Çap uzunluk ilişkisi 5

Şekil 2.2. Delme işlemleri..... 6

Şekil 2.3. Kesme hızı ve ilerleme hızı 7

Şekil 2.4. Delme işlemlerinde temel tanımlar..... 7

Şekil 2.5. Delik delme işlemleri..... 8

Şekil 2.6. Matkabın başlıca kısımları..... 9

Şekil 2.7. Matkap uç açısı ve boşluk açısı 9

Şekil 2.8. İçten soğutmalı matkap..... 11

Şekil 2.9. Matkapla delmede kesme kuvvetleri 12

Şekil 2.10. Kesme kuvvetinin bileşenleri 13

Şekil 2.11. Delme ve çevreden kesme işleminde kuvvet faktörü 13

Şekil 2.12. Kesme gücü 14

Şekil 2.13.Matkabın çevresinde aşırı kesme hızı..... 15

Şekil 2.14. Talaş oluşumuna etki eden faktörler..... 16

Şekil 2.15. Kesici kenarın talaş kaldırması..... 16

Şekil 2.16. Delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması..... 18

Şekil 2.17. Deform-3D Machining modülü başlangıç ekranı 29

Şekil 2.18. İşleme tipini seçme 30

Şekil 2.19. Kesme parametreleri ve işleme şartlarının girilmesi 30

Şekil 2.20. Kesici takım geometrisini seçme..... 31

Şekil 2.21. Kesici takım geometrisini konumlama 31

Şekil 2.22. Kesici takımın elemanlara ayrılması 32

Şekil 2.23. İş parçasının elemanlara ayrılması..... 33

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.24. İş parçası için yeni bir malzeme modeli tanımlama 34

Şekil 2.25. Simülasyon sürecinin kontrolü ve takım aşınması 36

Şekil 2.26. Veri tabanının oluşturulması..... 38

Şekil 4.1. Kistler 9272-A tipi dinamometre..... 55

Şekil 4.2. Deform-3D Pre ana modülü..... 57

Şekil 4.3. Simülasyonlarda kullanılan geometrik modeller 58

Şekil 4.4. İş parçası malzeme modeli..... 58

Şekil 4.5. İş parçası modelini elemanlara ayırma 60

Şekil 4.6. Matkap modelini elemanlara ayırma 61

Şekil 4.7. Matkabın hareketleri ve iş parçası için sınır şartları..... 62

Şekil 4.8. Matkabın öteleme ve dönme hareketlerini tanımlama..... 62

Şekil 4.9. İş parçası ve matkabın yer değiştirme ve ısı transferi durumunu tanımlama . 63

Şekil 4.10. Nesneler arası etkileşim/temas durumunu tanımlama 64

Şekil 4.11. Simülasyon kontrolleri..... 65

Şekil 4.12. Adım kontrolleri 65

Şekil 4.13. Durdurma kontrolleri..... 67

Şekil 4.14. Yeniden elemanlara ayırma kontrolü..... 68

Şekil 4.15. İterasyon kontrolü..... 69

Şekil 4.16. İşlem şartları kontrolü..... 69

Şekil 4.17. Veri kontrolü ve veri tabanı oluşturma..... 70

Şekil 4.18. Deform programının oluşturduğu bir ".key" dosyası 71

Şekil 4.19. Deform-3D(V10) ara yüzünden simülasyonun koşulması 72

Şekil 4.20. Deform-3D(V10) ara yüzünden simülasyon koşma seçenekleri 73

Şekil 4.21. Delme simülasyonunun başlangıç aşaması..... 73

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.22. Delme simülasyonunun ortasındaki aşama ve talaş oluşumu 74

Şekil 4.23. Delme simülasyonunun sonundaki aşama 74

Şekil 4.24. Deform-3D Machining ara yüzünden gerilme analizi sürecini başlatma 76

Şekil 4.25. İnterpolasyonla belirlenen ve otomatik olarak uygulanan kesme kuvvetleri 77

Şekil 4.26. Kesici takıma uygulanan sınır şartları 77

Şekil 4.27. Gerilmelerin renk gradyanı biçiminde görüntülenmesi 78

Şekil 4.28. Gerilmelerin sayısal veri olarak görüntülenmesi 78

Şekil 5.1. Kesme hızına göre ilerleme kuvveti değerlerinin değişimleri 79

Şekil 5.2. Kesme hızına göre moment değerlerinin değişimleri 80

Şekil 5.3. Delme simülasyonlarındaki kuvvet ve moment değişimleri 83

Şekil 5.4. Delme simülasyonlarındaki talaş oluşum süreci..... 84

Şekil 5.5. Kesme hızına göre σx normal gerilme değerlerinin değişimleri 86

Şekil 5.6. Kesme hızına göre σ_y normal gerilme değerlerinin değişimleri..... 87

Şekil 5.7. Kesme hızına göre σ_z normal gerilme değerlerinin değişimleri 88

Şekil 5.8. Kesme hızına göre τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin değişimleri 89

Şekil 5.9. Kesme hızına göre τ_{yz} kayma gerilmesi değerlerinin değişimleri 90

Şekil 5.10. Kesme hızına göre τ_{zx} kayma gerilmesi değerlerinin değişimleri 91

Şekil 5.11. Kesme hızına göre en büyük asal gerilme (σ_1) değerlerinin değişimleri 93

Şekil 5.12. Kesme hızına göre en küçük asal gerilme (σ_3) değerlerinin değişimleri..... 94

Şekil 5.13. Kesme hızına göre efektif gerilme (σ_{vM}) değerlerinin değişimleri..... 95

Şekil 5.14. Gerilme dağılımları..... 97

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{[\ldots]^T}$	Matrisin transpozu
$\mathbf{[B]}$	Gerinme-deplasman matrisi
$\mathbf{[E]}$	Malzeme özellikleri matrisi
$\mathbf{[J]}$	Jacobian matrisiel
$\mathbf{[k_{(e)}]}$	Eleman rijitlik matrisi
$\mathbf{[K]}$	Genel rijitlik (direngenlik) matrisi
$\mathbf{[N]}$	Şekil fonksiyonları matrisi
$\mathbf{[\sigma]}$	Gerilme matrisi
$\mathbf{\{f_{(e)}\}}$	Eleman kütle kuvvetleri vektörü
$\mathbf{\{F\}}$	Genel yük vektörü
$\mathbf{\{P_i\}}$	Tekil kuvvetler vektörü
$\mathbf{\{q\}}$	Eleman deplasman (yer değiştirme) vektörü
$\mathbf{\{Q\}}$	Genel deplasman vektörü
$\mathbf{\{T_{(e)}\}}$	Eleman yüzey kuvvetleri (yayılı yük) vektörü
$\mathbf{\{u\}}$	x, y, z koordinatlarındaki deplasman vektörü
$\mathbf{\{\varepsilon\}}$	Gerinme vektörü
$\boldsymbol{a_p}$	Talaş genişliği, mm
$\boldsymbol{A}$	Talaş kesit alanı, mm^2
$\boldsymbol{d}$	Ön delik çapı, mm
$\boldsymbol{D}$	Delik (matkap) çapı, mm
$\boldsymbol{E}$	Elastikiyet modülü, GPa
$\boldsymbol{f}$	İlerleme değeri, mm/rev
$\boldsymbol{F_s}$	Kesme kuvvet, N
$\boldsymbol{F_z}$	İlerleme kuvveti, N
$\boldsymbol{F_{rz}}$	Radyal kuvvet, N

Simgeler	Açıklamalar
h	Talaş kalınlığı, mm
k	Özgül kesme kuvveti, MPa
L	Delik boyu (delme derinliği veya ilerleme uzunluğu), mm
L_w	İş parçasının kalınlığı, mm
L_k	Matkap ucu koni yüksekliği
M	Kesme kuvvetlerinin oluşturduğu moment, Nmm
n	Devir sayısı (rpm; revolutions-per-minute), rev/min
N	Simülasyon adım sayısı
P_c	Kesme gücü, kW
$t_{adım}$	Her bir adım için gerekli adım süresi, s
t_{delme}	Delme süresi, s
t_{devir}	Matkabın bir devri için geçen süre, s
V_C	Kesme hızı, m/min
V_f	İlerleme (parçaya nüfuziyet) hızı, mm/min
W	Dış kuvvetlerin işi
ε_x, ε_y, ε_z	Normal gerinmeler, MPa
γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{xz}	Kayma gerinmeleri, MPa
φ	Matkabın uç açısı
ν	Poisson oranı
Π	Potansiyel enerji
σ_1, σ_2, σ_3	Asal gerilmeler, MPa
σ_x, σ_y, σ_z	Normal gerilmeler, MPa
σ_{vM}	von Mises gerilmesi (efektif gerilme), MPa
τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz}	Kayma gerilmeleri, MPa
ω	Açısal hız, rad/s

Kısaltmalar	Açıklamalar
ALE	Keyfi Lagrangian-Eulerian
AMG	Automatic Mesh Generation
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
CAD	Bilgisayarlı Destekli tasarım
CNC	Bilgisayarlı Sayısal denetim
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
FEM	Sonlu Eleman Metodu
HSS	Yüksek Hız Çeliği
NC	Sayısal Denetim
SFTC	Scientific Forming Technologies Corporation
STL	CAD Dosya Formatı, STereoLithography
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrit Kaplama
TiN	Titanyum Nitrit Kaplama
WC	Sementit Karbür
2D	İki Boyut
3D	Üç Boyut

1. GİRİŞ

Delik delme işlemi önemli bir talaş kaldırma işlemi olup, talaş kaldırma işlemlerinin hemen hemen üçte birini kapsamaktadır. Bu işlem genel olarak talaş kaldırma işlemleri içerisinde son işlem olarak kullanılır. İmalat endüstrisinde modern talaşlı imalat yöntemleri geliştirilmesine karşın, geleneksel delik delme yöntemi ekonomik oluşu ve basit uygulanabilir olması gibi nedenlerden dolayı hala en yaygın kullanılan işleme yöntemidir [1].

Delik delme, kesici takımlarla bir iş parçasına silindirik delik açma yöntemidir. Delme işlemi; fatura açma (kademeli delik işleme), havşa açma, delik büyütme ve raybalama gibi talaş kaldırma işlemlerini içermektedir. Bütün bu işlemlerdeki ortak işlem, doğrusal bir ilerleme hareketi ile birlikte ana bir dönme hareketinin olmasıdır [2].

Delik delme işleminin tornalama ve frezeleme işlemleri ile benzer yönleri olsa da delik delme işleminde talaş kırma ve talaşın boşaltılması kritik bir önem taşımaktadır. Delik derinliğinin uzun olmasıyla birlikte delme işlemini kontrol etmek ve talaş kaldırmak o kadar güç olur. Delme işlemi esnasında meydana gelen talaş oluşumu kesme kuvvetlerini, kesme sıcaklığını ve sonuç olarak deliğin yüzey kalitesini ve ölçü tamlığını etkilemektedir. Ayrıca, delme işlemleri esnasında talaşın tahliye edilebilirliği de delik kalitesini doğrudan etki edip kesme parametrelerine (kesme hızı, ilerleme) göre değişim göstermektedir. Kesme hızı ve ilerleme delik delme işleminin en önemli parametreleridir. Bunlar kesme işlemi esnasında oluşan sıcaklık ve kesme kuvvetlerini doğrudan etki edip kesici takımın (matkap) performansını belirleyen faktörlerdir [3].

Her kesici takımın olduğu gibi matkabın da bir ömrü olup, ömrünü tamamlayan matkapla yapılan bir kesme işlemi delik kalitesini ve ölçü tamlığına doğrudan etki yapacaktır. Kaplamalı matkaplarla yapılan delme işlemlerinde, delme sürecinde meydana gelen bu olaylar elimine edilebildiği gibi daha uzun takım ömürleri sağlamakta mümkündür. Ancak, kaplamalı matkapların maliyetlerinin kaplamasızlara göre daha yüksek olması nedeniyle takım maliyetleri artmaktadır. Bu bağlamda, herhangi bir malzeme üzerinde gerçekleştirilecek olan delik delme işlemlerinde oluşan sıcaklığın ve kesme kuvvetlerinin önceden tahmin edilerek kesme işleminin yapılması matkap ömrünün tahmin edilmesinde

ve buna bağlı olarak daha iyi delik kalitesinin elde edilmesinde etkin rol oynayacaktır. Öte yandan önceden tahmin edilecek olan kesici takım ömrü, ürün kalitesini yükselteceği gibi imalat maliyetlerinin de düşmesini sağlayacaktır. Bu nedenlerle, optimum delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin tespit edilmesi ve bu parametreler paralelinde kesme işleminin gerçekleştirilmesi son derece önemlidir.

Uygun kesme parametreleri için gerekli olan bilgiler, genel olarak deneysel yapılan çalışmalarla belirlenmekte ve kesmenin etkili olduğu bölgede oluşan kesme kuvvetleri bu deneysel sonuçlara bağlı olarak elde edilen ampirik eşitliklerle hesaplanmaktadır. Özellikle takımın ömrü ve takımın değiştirilme sıklığı, takım tezgâhlarının daha verimli kullanılması adına çok önemli parametrelerdendir. İyi seçilmeyen kesici takım geometrisi, kesici takım yanaşma açısı ve işleme parametreleri, kesici takımların hızlı aşınması ve kırılması gibi kayıpların yanında, iş parçasının deformasyonu yada yüzey kalitesinin düşüklüğü gibi ekonomik kayıplara da sebep olmaktadır. Talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan takımların kesici kenarları, talaş kaldırma işlemleri sırasında meydana gelen gerilmeler karşısında oldukça fazla zorlanırlar. Bu sebeple takımın bu gerilmeleri karşılayabileceği optimum geometri ve kesmeyi kolaylaştıracak kesme parametrelerini belirlemek için pek çok araştırma yapılmış ve halen de yapılmaktadır.

Bu çalışma esas olarak; kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak delme operasyonlarının *Deform* yazılımı yardımıyla simülasyonunu ve delme operasyonlarındaki kesme sırasında değişen kesme kuvvetlerinin kesici takım (matkap) gerilmeleri üzerindeki etkilerinin *Deform* yazılımı yardımıyla incelenmesini içermektedir. Bu amaç doğrultusunda çalışmada izlenilen yöntem ve çalışma planı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çalışma amacına paralel olarak literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.
- Kesme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri belirlenmiştir.
- Kesme deneylerinde kullanılan kesici takımların katı modelleri oluşturulmuştur.
- Deneysel çalışmalarda kullanılan kesme şartları referans alınarak, talaş kaldırma işleminin (delme operasyonu) *Deform* yazılımı yardımıyla simülasyonu yapılmıştır.
- Kesme parametrelerindeki değişimlerin kesme sırasında kesici takım üzerinde oluşan etkileri sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak *Deform* yazılımı yardımıyla incelenmiştir.

– Elde edilen bulgular ışığında; kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, kesici takım malzemesi ve tipi) ile kesici takım (matkap) arasındaki ilişkiler ele alınmıştır.

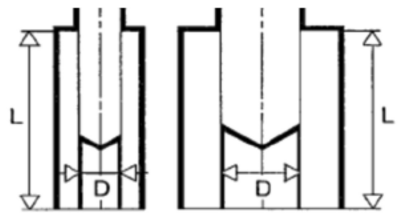
Bu çalışma 6 bölümden oluşmaktadır: Birinci bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı üzerinde durulmuştur. İkinci bölümde delik delme işlemi, delik delme takımları (matkaplar), kesme kuvvetleri ve döndürme momenti hakkında temel bilgiler verilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak matkaptaki gerilme analizi için kullanılan *Deform* programı tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde çalışmayla ilgili olarak literatürde yapılan benzer çalışmalar araştırılmış ve yapılan çalışmanın literatürle olan ilişkisi ortaya konulmuştur. Dördüncü bölümde ise çalışmada yapılan deneysel çalışmalar ve kesici takımdaki gerilme analizi için uygulanan prosedürle ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde elde edilen deneysel çalışma sonuçları ve analiz sonuçları üzerinde yorumlar yapılmış ve altıncı bölümde ise çalışma neticesinde elde edilen bulgular üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Delik Delme İşlemleri

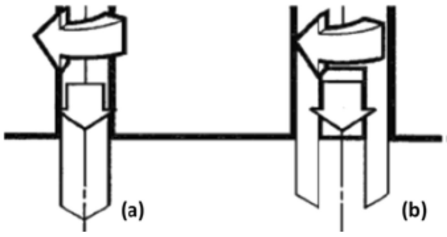
Takım tezgâhına bağlanan, belli bir geometrik şekle sahip kesici takım vasıtasıyla istenilen boyut ve biçimde parça üretilmesi veya iş parçasından fazla malzemelerin talaş şeklinde kaldırılma işlemine "talaş kaldırma" denilir. Delik delme işlemlerinin günümüzde talaş kaldırma işlemleri arasında önemli bir yeri bulunmaktadır. Pek çok delik delme işlemlerinin ortak noktası, kesici takımın kendi ekseni etrafında dönmesiyle hareket ekseni yönünde ilerleme yaparak bir talaş kaldırma işlemi olmasıdır [4]. Delik delme, metal kesme takımlarıyla bir iş parçasında silindirik delik açma yöntemlerini içermektedir. Delik delme, delik büyütme, fatura açma (kademeli delik işleme) ve raybalama gibi birbirini takip eden talaş kaldırma işlemlerini kapsamaktadır. Bütün bu işlemlerde ortak olan, doğrusal bir ilerleme hareketi ile birlikte ana bir dönme hareketinin olmasıdır.

Kısa delik açma ve derin delik açma işlemleri birbirinden farklıdır. Derin delik açma, çapın birçok katı derinliğe sahip deliklerin açıldığı, uzmanlık gerektiren bir yöntemdir ve derinlik, çapın 150 katına kadar çıkabilir [3, 5]. Delik derinliği arttıkça, işlemin kontrolü ve talaşın boşaltılması zor hale gelir. Derin delik delme işleminde yüzey ve delik kalitesi daha büyük bir önem taşırken, kısa deliklerde daha ekonomik bir işlem için daha yüksek talaş debilerinde çalışma önemli hale gelmektedir. Kısa delik delme işlemi ile derin delik delme işlemi arasındaki fark, sadece delik çapı ve derinliği ilişkisiyle sınırlandırılmamıştır. Talaşın boşaltılması, kalite ve talaş debisi ile ilgili parametreler de derin delik delme ile kısa delik delme işlemlerini ayıran en önemli özelliklerdir [2]. Delik boyu (L), delik çapının 10 katından daha büyük ise bu delikler uzun delik olarak adlandırılır. Delik boyu çap oranı 4-10 arasında olan deliklere normal delik, delik boyu çap oranı 3 ve daha düşük olan delikler ise kısa delik olarak adlandırılır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Çap uzunluk ilişkisi [6]

En yaygın delik delme yöntemi, dolu bir malzemenin yekpare bir kesici takım kullanılarak belirli bir çapta, tek operasyonda delinmesidir (Şekil 2.2a). Hem içten hem de dıştan kesen bir takımın kullanıldığı çevreden kesme (Şekil 2.2b) yöntemi dolu numuneye delik delme işleminde olduğu kadar güç gerektirmeyen ve prensip olarak büyük çaplı deliklerin delinmesi için kullanılan bir metottur. Bu metot, malzemenin tamamını talaş olarak kaldırmak yerine, merkezde silindir şeklinde bir çekirdek oluşturan ve yine tek operasyonda tamamlanan bir delme işlemidir [6].



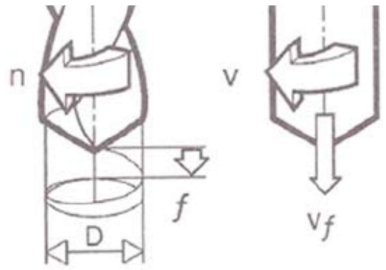
Şekil 2.2. Delme işlemleri [6]

Bazı işlemlerde delinecek olan deliğin yüzey kalitesinin ve delik toleransının daha iyi olması istenirse, delme işlemini takiben bir delik büyütme işleminin uygulanması tavsiye edilir. Bu üçüncü delme metodu normal delik delme matkaplarıyla gerçekleştirilen ancak, yeterli hassasiyet sağlanabilmesi için özen gerektiren bir metottur. Önceden delinmiş delikler, kullanılan takımın asimetrik takım olması durumunda takımın eğilmesine neden olurlar. Normal delik delme işleminde kullanılan matkapların birçoğu kendi kendine merkezleme özelliğine sahiptirler. Önceden delinmiş bir delikte, takım merkezi ararken kesici kenarlarda düzensiz yüklemeler oluşur. Bu, takımın eğri bir yol izlemesi ve oval bir delik delmesine sebep olabilmektedir [2, 5].

2.2. Temel Tanımlar

Delme işleminde ana hareket; takım veya iş parçası tarafından yapılan dönme hareketidir (devir sayısı; n, *revolutions-per-minute* veya rpm, devir/dakika). Delme işlemi için kesme hızı (V_c, m/min) çevresel hızdan faydalanılarak belirlenir (Şekil 2.3). Matkap; D takım çapı olmak üzere bir dönüşte, çevresi $\pi \cdot D$ olan bir daire çizer. Takım çapı birimi mm ise kesme hızının m/min biriminden ifadesi için sonuç, 1000'e bölünür (Eş. 2.1a). İlerleme veya parçaya nüfuziyet hızı (V_f, mm/min), birim zamanda alınan yol olarak tanımlanır ve takımın iş parçasına göre veya alternatif olarak iş parçasının takıma göre ilerlemesi olup

aynı zamanda tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da bilinir (Eş. 2.1b). Devir başına ilerleme (*f*, mm/rev) ise ilerleme hızını hesaplamak üzere kullanılan bir parametre olup takım veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesini ifade etmektedir.



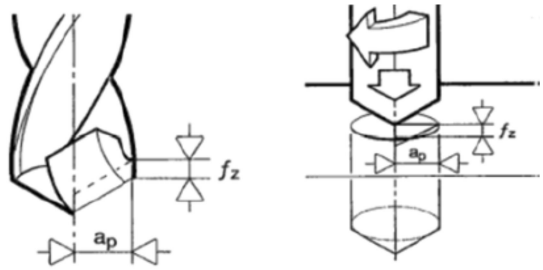
Şekil 2.3. Kesme hızı ve ilerleme hızı [6]

$$V_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \cdots \mathrm{m/min} \quad (2.1a)$$

$$V_f = f \cdot n \cdots \mathrm{mm/min} \quad (2.1b)$$

Talaş genişliği veya radyal talaş derinliği (a_p, mm), takımın temasta olduğu iş parçası yüzeyidir (Şekil 2.4).

$$a_p = ½ \cdot (D - d) \cdots \mathrm{mm} \quad (2.2)$$



Şekil 2.4. Delme işlemlerinde temel tanımlar [6]

z, kesici kenar sayısı olmak üzere; matkapta birden fazla kesici kenar olduğundan, talaş kesit alanı için f_z (kenar başına ilerleme, mm/*z*) değeri kullanılır (Şekil 2.4). Talaş kesit alanı (A, mm^2) ve talaş debisi veya birim zamanda kaldırılan talaş hacmi (V, mm^3/min) aşağıdaki gibi belirlenir [6]:

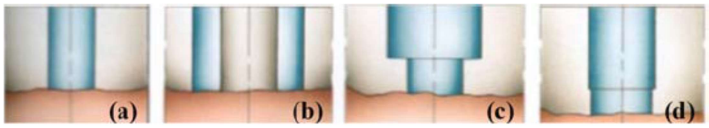
$$A = a_p \cdot f_z \cdots \mathrm{mm}^2 \quad \Rightarrow \quad V = A \cdot V_c \cdot 1000 \cdots \mathrm{mm}^3/\mathrm{min} \quad (2.3)$$

Efektif işleme zamanı (t, min) ise ilerleme uzunluğunun (L+h, mm) ilerleme hızına bölünmesiyle elde edilir. Delinmiş olan veya diğer bir ifade ile takımın ilerlediği uzunluk, delik derinliği ile matkap ucu yüksekliğinin toplamına eşittir [6].

$$h = ½ \cdot D \cdot cot(½ \cdot \varphi) \cdots \text{mm} \quad \Rightarrow \quad t = (L + h)/V_f \cdots \text{min} \tag{2.4}$$

2.3. Delik Tipleri

Delik delme işlemleri; doluya delik delme, delik büyütme, kademeli delik delme ve raybalama olmak üzere dört başlık altında incelenebilir (Şekil 2.5).

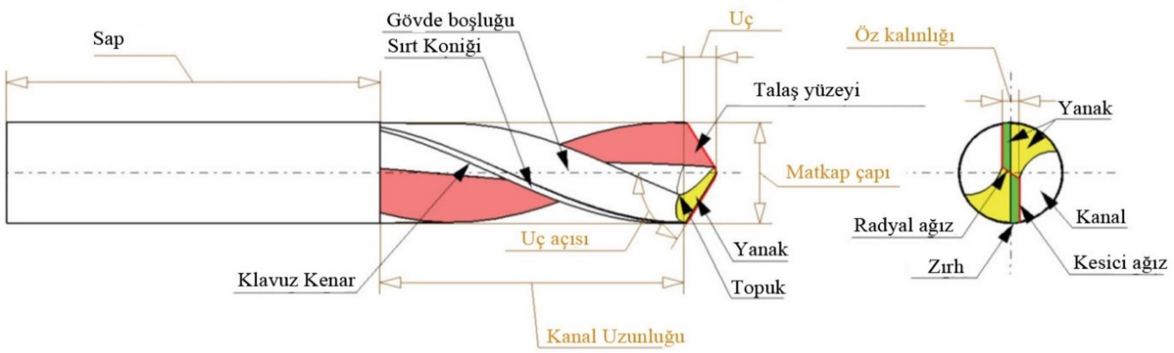


Şekil 2.5.Delik delme işlemleri a) Doluya delik delme b) Delik büyütme c) Kademeli delik delme (Fatura açma) d) Raybalama [5]

Doluya delik delme (Şekil 2.5a) en yaygın delik delme metodudur. Bu metodla katı maddeye tek işlemde önceden belirlenmiş bir çapta delik açılır. Delik büyütme (Şekil 2.5b) genel olarak daha büyük delik çapları için kullanılır. Bu yöntem, doluya delik delme kadar güç harcamayı gerektiren bir yöntem değildir. Delik büyütmede kesici takım bütün çapı işlemez, sadece deliğin çevresindeki bir halkayı işler. Bütün malzemeyi talaş olarak kaldırmak yerine; göbek malzemesi, delik merkezinin etrafında boş olarak bırakılır veya bir ön delik delinerek boşaltılır. Kademeli delik delme (veya fatura açma) (Şekil 2.5c) deliğin çevresinde önemli bir miktarda talaş kaldıran özel olarak tasarlanmış bir takımla mevcut deliğin genişletilmesidir. Deliklere uygulanan bitirme işlemi olan raybalama (Şekil 2.5d) mevcut deliğin son (ince) işlemidir. Bu işlem yüksek yüzey kalitesi ve daha küçük toleranslar sağlamak için küçük çalışma toleranslarına ihtiyaç duyar ve ikincil bir işlem hüviyetinde olduğundan işleme maliyetini önemli ölçüde artırır. Raybalama işlemi dışında da bazı delik bitirme işlemlerinin olduğu unutulmamalıdır. Delik büyütme takımları ile torna ve freze tezgâhlarında yapılabilen delik büyütme işlemleri, daha yüksek yüzey kalitesi arzu edildiğinde bilyeli parlatma (*roller burnishing*) ve honlama işlemleri buna örnek olarak gösterilebilir.

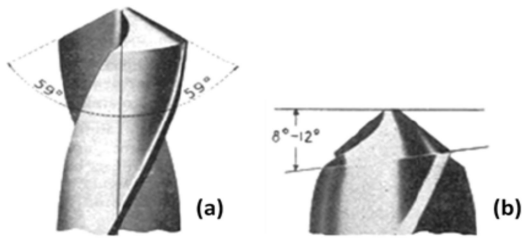
2.4. Delik Delme Takımları

Delik delme işlemlerinde kullanılan kesici takımlara genel olarak matkap denir. Matkaplar talaşlı üretimde en çok kullanılan kesici takımlardan biridir. Bir matkap kendi ekseni etrafında dönerek ve aynı zamanda ekseni doğrultusunda ilerleyerek genelde iki kesici ağzı ile kesme yapar. Metallerin işlenmesinde kullanılan çeşitli matkaplar vardır. Her matkap türü bir ihtiyaçtan ortaya çıkmıştır [7]. İmalat sanayinde yaygın olarak kullanılan matkaplar genel olarak uç, gövde ve sap olmak üzere üç kısımdan meydana gelir (Şekil 2.6) [8].



Şekil 2.6. Matkabın başlıca kısımları [9]

Uç; matkabın kesici kenarlarının (ağızlarının) bulunduğu kısımdır, malzemeden keserek talaş kaldırılmasını ve deliklerin açılmasını sağlar. Matkaplar; genelde 2 kesici ağızlı olarak imal edilmektedir. Fakat 3 ağızlı matkaplar da bulunmaktadır. Matkapların uç geometrisi genelde taşlanarak elde edilir (Şekil 2.7). Uç kısmın taşlanması; kesici ağız kenarlarının oluşturulması biçiminde gerçekleşir. Kesici uç geometrisinin oluşturulması, kesici uç açısının ve kesici kenarın arka boşluk açısının verilmesi şeklinde yapılmaktadır. Matkaplar, normal işleme şartları için 118° uç açısında (Şekil 2.7a) ve 8°-12° kesici kenar arka boşluk açısı (Şekil 2.7b) ile taşlanmaktadır.



Şekil 2.7. Matkap uç açısı ve boşluk açısı [7]

Gövde; matkapların helisel kanalların bulunduğu kısımdır, kesicinin ucundan başlayıp kesicinin sapına kadar devam eder. Helisel oluklar; delik delinmesi sırasında matkabın ucundaki kesici kenarlarla kesilen talaşların dışarı atılması görevini yerine getirmektedir. Helisel oluk sayısı kesici ağız/kenar sayısı kadardır. Olukların helis açısı farklı derecelerde imal edilmektedir. Helisel oluklar, kesici kenarların talaş açılarını oluşturmaktadır. Gövde üzerinde, helisel olukların arka kısımları belli bir set oluşturacak şekilde taşlanmaktadır. Bu setler kesicinin zırh kısımlarını meydana getirmektedir. Matkaplar dönerek talaş kaldırma esnasında gövdenin tamamının delik yüzeylerine sürtünmesini engeller. Matkapların gövdeleri, belli bir açıda konik olacak şekilde imal edilirler. Bu oran çok küçüktür. Amaç kesicinin parça içine dalarak ilerlemesi sırasında sıkışmasını önlemektir. Helisel olukların arasında kalan kısım kesicin özü olarak adlandırılır. Kesicinin özü, kesici ucundan kesici sapına doğru koniktir. Helisel oluklar, kesici ucundan kesici sapına doğru konik olarak açılmaktadır. Koniklik; kesicinin dönerek talaş kaldırması sırasında kesme kuvvetlerinin oluşturacağı momente (M_z) kesicinin kırılmadan dayanabilmesini sağlar. Sap; matkabın tezgâha bağlanmasını sağlayan kısımdır. Sap kısımları; genel de belli bir matkap çapına kadar silindirik yapılmaktadır. Fakat özellikle büyük çaplı matkaplar; bağlanma kolaylığı nedeni ile doğrudan tezgâh miline bağlanabilmesi maksadıyla konik yapılmaktadır [7].

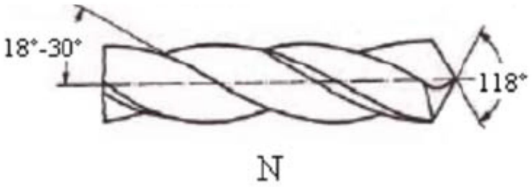
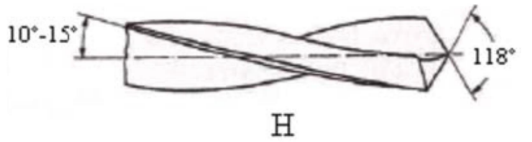
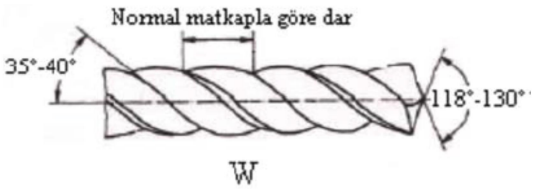
2.4.1. Matkapların sınıflandırılması

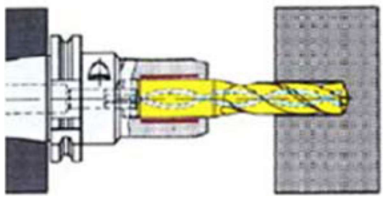
İş parçası malzemesine ve kesme açılarına göre DIN standardında N, H ve W ile simgelenen üç çeşit matkap vardır. Bunlardan N tipi çelik ve dökme demir, H tipi pirinç alaşımları ve W tipi ise alüminyum alaşımları gibi yumuşak malzemeler içindir. Bunlara plastik malzemeler için geçerli olan değiştirilmiş H tipi de ilave edilebilir. Bu matkapların her birinin kesme açıları farklı olup her tip için kesme açıları matkabın çapına ($\varnothing D$) bağlıdır [8]. Uç açıları 118°'den daha küçük olan matkaplara sivri, daha büyük olanlara ise düz denir. Malzeme sertliği artıkça matkapların uç açıları artar (düzleşir), malzeme sertliği azaldıkça da uç açıları azalır (sivrileşir). Çizelge 2.1'de, çeşitli malzemelere göre matkapların helis ve uç açıları verilmiştir.

İçten soğutmalı matkaplar (Şekil 2.8), sap ucundan veya yandan giriş yapan kesme sıvısının matkap içinden sevk edilmesini sağlarlar. Deliklerden basınç ile verilen kesme sıvısı matkap ucuna ulaşır ve burada biriken talaşları dışarıya taşır. Ayrıca kesici ucun

yağlanarak soğutulması ve kesici ile temas eden iş parçasından kopan malzemenin (talaşın) soğutulmasını sağlar. İçten soğutmalı matkaplar genellikle derin deliklerde ve uzun süren çok işlemli operasyonlarda kullanılır.

Çizelge 2.1. Helis adımlarına göre matkap çeşitleri ve kullanıldığı yerler [8]

Malzeme Cinsi	Uç açısı	Matkap Tipi
Çelik; çelik döküm; dökme demir; temper döküm; sert bakır ve çinko alaşımı malzemeler	118°	 N
700 MPa çekme dayanımı üzerindeki çelikler ve çelik döküm malzemeler	130°	
Saç parçaları ve paket halindeki sac demetleri	124°- 130°	
Paslanmaz çelikler; bakıra, 30 mm çap üzerinde delik delerken, kısa talaş veren Al alaşımlarında	130°	
Preslenmiş malzemeler, sert bakalit, sert kauçuk, mermer, arduvaz (taş) kömür vs.	80°	 H
Pirinç (sarı malzeme), bronz ve çeşitleri, sert çelikler	130°	
Magnezyum alaşımları	140°	
Çinko alaşımları, kalay ve kurşun alaşımları (beyaz metal)	118°	 W
Bakır malzemeler	120° - 125°	
Alüminyum alaşımları	140°	
Bakıra 30 mm üzerindeki delik delerken ve uzun talaş veren Al	140°	



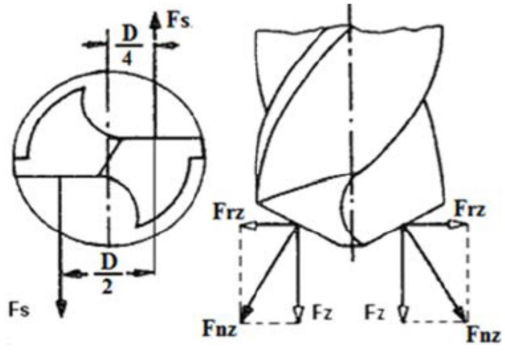
Şekil 2.8. İçten soğutmalı matkap [10]

2.5. Delik Delmede Kesme Kuvvetleri ve Güç

Delik delme işlemi için belli bir miktarda enerjiye ihtiyaç duyulur. Matkap, iş parçasına girerek talaş kaldırırken kesme kuvvetleri matkaba etki eder ve bu da belli bir miktarda güç

gerektirir. Delik açmak için gerekli olan güç, iş parçası malzemesinin cinsine göre farklılık gösterir ve bu güç hesap edilirken, malzeme için gerekli özgül bir kesme kuvveti dikkate alınmalıdır [11]. Özgül kesme kuvveti (k_c, MPa) gerekli olan gücün, momentin ve ilerleme kuvvetinin hesaplanmasında önemlidir. Özgül kesme kuvveti belirli bir talaş açısı ve talaş kalınlığı için belirli bir malzemenin işlenebilirlik ölçüsüdür ve 1 mm^2'lik bir talaş kesit alanını kesmek için gerekli olan teğetsel kuvvet veya efektif kesme kuvvetinin teorik talaş alanına oranı olarak tanımlanır. Karbon çeliği (%8C) için bu değer 2700 MPa, normal bir alüminyum alaşımı için ise 750 MPa'dır. Özgül kesme kuvveti; efektif talaş açısı, ortalama talaş kalınlığı ve iş parçası malzemesine bağlı olarak hazırlanmış tablolardan elde edilir. Özgül kesme kuvveti pozitif talaş açısı ve ortalama talaş kalınlığı arttıkça azalma gösterir. Talaş açısının her bir derecelik artışı için özgül kesme kuvveti değerindeki azalma yaklaşık %1-1,5 civarındadır [12].

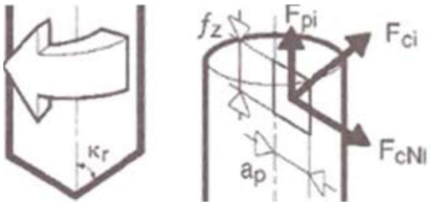
Şekil 2.9'da delme sırasında bir ağza karşılık gelen talaş kaldırma kuvvetlerinin bileşenleri olan kesme kuvveti (F_s), ilerleme kuvveti (F_z) ve radyal kuvvet (F_{rz}) gösterilmiştir. Ağızların konumu itibarıyla her ağızda oluşan radyal kuvvetler birbirini dengelemektedir. Dolayısıyla delme işleminde sadece F_s ve F_z kuvvetleri etki göstermektedir [13].



Şekil 2.9. Matkapla delmede kesme kuvvetleri [10]

Teorik talaş alanının merkezine etkilediği kabul edilen kesme kuvveti; iş parçası malzemesi, talaş derinliği, ilerleme ve takım geometrisi gibi faktörlere göre değişim gösteren teğetsel, radyal ve eksenel yönlerde etkiyen 3 bileşenden oluşur (Şekil 2.10).

Kesici kenar sayısı ile kesici kenar başına eksenel kuvvetin (F_{pi}) çarpımına eşit olan toplam eksenel kuvvet; ilerleme kuvvetine veya delme basıncına (F_p, N cinsinden) eşittir.



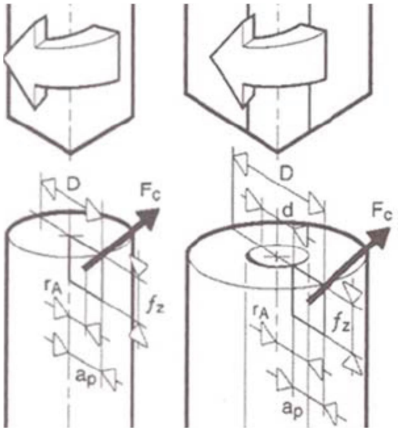
Şekil 2.10. Kesme kuvvetinin bileşenleri [1]

Eş. 2.5'ten de görülebileceği gibi ilerleme kuvveti κ_r yanaşma açısının artmasıyla artar:

$$F_p = ½ \cdot k_c \cdot a_p \cdot f_r \cdot sin(\kappa_r) \cdots \text{N} \quad (2.5a)$$

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f_r \cdots \text{N} \quad (2.5b)$$

İlerleme kuvveti gibi esas kesme kuvveti de kesici kenar sayısı ile kenar başına teğetsel kesme kuvvetinin (F_{ci}) çarpımına eşittir. Her bir kesici kenardaki momentlerin toplamı olan bileşke moment; matkabın maruz kaldığı toplam delme momentinin teğetsel kesme kuvveti ile talaş alanının merkezine olan yarıçapın (r_A) (Şekil 2.11) çarpımına eşittir. Eş. 2.6'da delik çapı (D) ve daha önceden delinmiş ön delik çapının (d) mm, ilerlemenin ise mm/rev biriminden verilmesi halinde momentin Nm biriminden ifade edilebilmesi için çarpımın sonucu 1000'e bölünür.



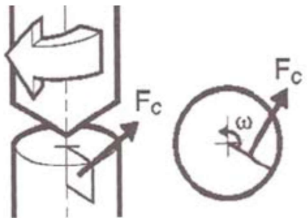
Şekil 2.11. Delme ve çevreden kesme işleminde kuvvet faktörü [1]

$$r_A = ½ \cdot (d + a_p) = ¼ \cdot (D + d) \cdots \text{mm} \quad (2.6a)$$

$$M = F_c \cdot r_A \cdots \text{Nm} \quad \Rightarrow \quad M = \frac{k_c \cdot f}{1000} \cdot \frac{(D^2 - d^2)}{8} \quad (2.6b)$$

İlerleme miktarındaki artış, talaş kalınlığının artmasına buna bağlı olarak daha küçük bir özgül kesme kuvvetinin meydana gelmesine sebep olur. Ancak bu durumda talaş alanı artar; dolayısıyla artan ilerleme toplamda daha büyük bir teğetsel kuvvet ve momentin oluşmasına neden olur. Bununla birlikte, uç açısı arttırılırsa (bu durum talaş kalınlığını da arttıracaktır) daha küçük bir k_c değeri sayesinde teğetsel kuvvet ve moment azaltılabilir.

P_c (kW) kesme gücü Eş. 2.7'de belirtildiği gibi matkabın döndürme momenti ile açısal hızının (ω) çarpımıdır. Üniform bir harekette açısal hız, ana mil hızının 2π katıdır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Kesme gücü [1]

Hız ve talaş açısının kesici kenar boyunca değişimi dikkate alınmadığından eşitlikler yaklaşık sonuç verir. Bundan başka kılavuzlama yapan kenarlarda talaşın deliğin cidarlarına sürtünmesi sebebiyle oluşan, moment ve gücü etkileyen sürtünme kuvvetleri de dikkate alınmamıştır [5]. Eş. 2.6b doğrultusunda güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$n = 1000 \cdot V_c/(\pi \cdot D) \quad \Rightarrow \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \tag{2.7a}$$

$$P_c = M \cdot \omega \quad \Rightarrow \quad P_c = \frac{k_c \cdot f \cdot (D^2 - d^2) \cdot V_c}{240000 \cdot D} \tag{2.7b}$$

Tezgah için gerekli güç (P_c, kW) hesaplanırken tezgahtaki güç kayıplarının da dikkate alınması gerekir. Motor gücü, delme gücünün tezgâh verimine (η) bölünmesiyle bulunur:

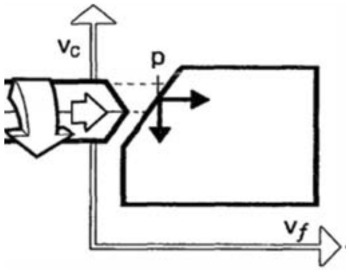
$$P = P_c/\eta \tag{2.8}$$

2.6. Delik Delmede Talaş Oluşumu

Normal delik delme işleminde kullanılan matkapların çoğunda iki talaş kanalı ve iki kesici kenar vardır. Talaşlar, delik içerisinden helis kanalları yardımıyla boşaltılırlar. Bu, modern

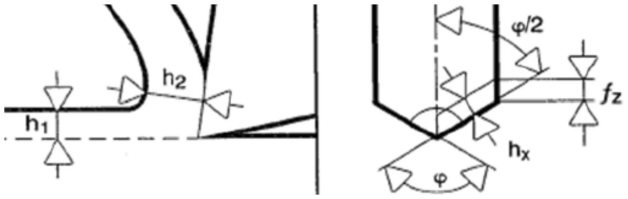
tezgâhlarda ve matkaplarda kesme sıvısının takım içerisinde bulunan kanallar vasıtasıyla kesme bölgesine aktarılması sonucunda gerçekleştirilir. Talaş oluşumu iş parçasının malzemesi, takımın geometrisi, kesme hızı, ilerleme ve kesme sıvısı seçiminden etkilenir. Genel olarak artan ilerleme ve/veya azalan kesme hızı değerleri kısa talaş oluşumuna neden olurlar. Talaşların matkabın kesici kenarlarından problemsiz uzaklaştırılması, elde edilen talaşın kabul edilebilir bir uzunlukta olduğunu gösterir [6].

Talaş kırma aralığının etüdü sonrasında doğru kesme verilerinin saptanması mümkündür. Talaş kırma alanı, söz konusu malzeme üzerinde çeşitli kesme hızı-ilerleme değerlerinin denenmesi ve belirlenen değerlerden talaş kırma açısından tatmin edici sonuçlar veren değerlerin seçilmesiyle oluşturulur [5]. Şekil 2.13'teki diyagramda, çevredeki kesme hızının (p) talaş kırma açısından çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu örnekte problem, ilerleme değerinin arttırılması ile çözülebilir. Tezgâhın gücünün veya rijitliğinin sınırlı olması halinde kesme hızının düşürülmesi daha uygundur.



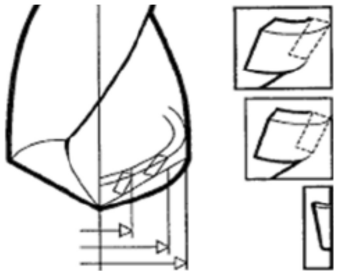
Şekil 2.13. Matkabın çevresinde aşırı kesme hızı [6]

Kesme hızı, matkabın çevresinden merkeze yaklaştıkça azalır. Bu nedenle kesme hızının azalması sonucunda ortaya çıkabilecek yığma kenar oluşumu riskinin göze alınması gerekir. Matkap merkezinin yakınında oluşacak belirli bir miktar yığma kenar çoğu işlem için kabul edilebilir bir durumdur [5]. Ancak kesme hızının düşürülmesi yığma kenarın çevreye daha yakın bir bölgede oluşmasına neden olacaktır, dolayısıyla sakıncalıdır. Talaş kaldırma işlemi esnasında talaşın plastik deformasyona uğraması nedeniyle, deformasyona uğramış talaş kalınlığı (h_2) teorik talaş kalınlığından (h_1) farklıdır. Delme işleminde teorik talaş kalınlığı kenar başına ilerleme ve uç açısı (φ) ile artar (Şekil 2.14) [6].



Şekil 2.14. Talaş oluşumuna etki eden faktörler [6]

Artan ilerleme değeri ile helis açısı artar ve boşluk açısı azalır. Azalma, merkeze en yakın noktada en yüksek seviyeye ulaşır. Bu ise, takım ile delik yüzeyleri arasındaki aşınmanın önlenebilmesi için boşluk açısının çevreden merkeze doğru artırılmasını zorunlu kılar. Talaş açısı, kesici kenar boyunca değişir ve matkabın çevresinden merkeze doğru azalır. Matkabın hızının da çevreden merkeze doğru azalması nedeniyle kesme hızının sıfır olduğu merkez noktasında matkabın ucu son derece verimsiz çalışacaktır. Matkap, merkezdeki malzemeyi kesmek yerine bastırıp ezerken talaş açısının negatif olduğu ve kesme hızının sıfıra yaklaştığı noktada bir plastik deformasyon oluşur (Şekil 2.15). Bu basınç oldukça yüksek bir eksenel kuvvet bileşeninin ortaya çıkmasına neden olur. Tezgâhın gücü delinecek deliğin boyutlarına göre düşükse, ilerleme kuvvetinin büyük olmasından dolayı tezgâh ana milinin esnemesi söz konusu olacak ve bunun sonucunda oval delikler elde edilecektir. Radyal ağız nedeniyle ortaya çıkan elverişsiz çalışma koşullarının giderilmesi için takımlarda önemli değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Radyal ağız çok inceltilmiş veya tamamen ortadan kaldırılmış ve kesici kenara matkap merkezine doğru bir yarıçap verilmiştir [6].



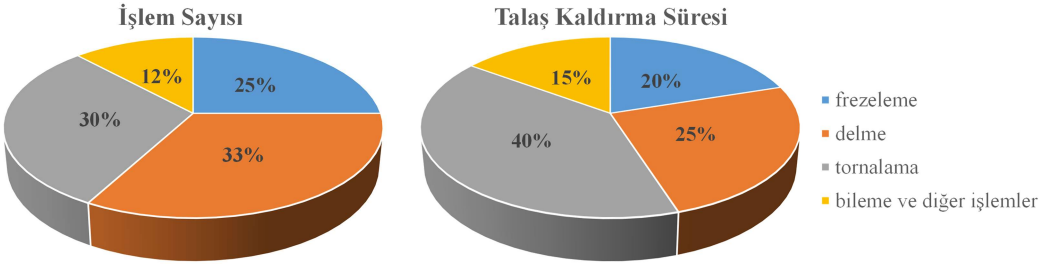
Şekil 2.15. Kesici kenarın talaş kaldırması [6]

Klasik helisel matkaplarda öz kısmının inceltilmesi işlemi, matkabın ucundaki helis kanalın taşlanması ile gerçekleştirilir. Bu sayede çapraz kesici kenarın uzunluğu azaltılır ve ana kesici kenar kırık bir hat oluşturur. Özün inceltilmesini takiben kesici kenarlara doğrusal bir profil kazandırabilmek amacıyla bir son taşlama işlemi uygulanır. Son taşlama ana kesici kenarın tamamına veya bir kısmına uygulanır ve böylelikle işlem süresince sabit

bir talaş açısının elde edilmesi sağlanır. Örneğin, kırılgan malzemelerin delinmesi işleminde, tüm kesici kenar boyunca küçük bir talaş açısına sahip bir matkabın kullanılması tavsiye edilir [6].

2.7. Delik Delme İşleminin Önemi

Talaşlı imalat sektöründe kullanılan takımların bir kısmı yurtdışından ithal edilmektedir. Özellikle sementit karbür esaslı takımların maliyeti yüksek olup büyük bir bölümü yurtdışından ithal edilmektedir. Bu nedenle kesici takım ömrünün optimum kullanılmaması sonucu, kesici takım maliyeti artacak ve buna bağlı olarak ürün maliyeti de artmış olacaktır. Delik delme sürecinde; işlenen malzeme ve kesici takım maliyetleri imalat maliyetini etkilediği için kullanılan kesici takımlardaki performansın ve işleme kalitesini etkileyen malzemenin cinsi, kesici takım geometrisi, kesici takım cinsi, kullanılan soğutma-kesme sıvısı gibi parametrelerin iyi analiz edilmesi gerekmektedir [5]. Bu parametreler maliyeti etkiledikleri gibi buna ek olarak delik ölçüsü, dairesellikten sapma, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını da etkilemektedir. Bu parametreler kesici takıma gelen kuvvet ve momentleri değiştirmekte ve kesici takımın ömrünü ve diğer maliyetleri etkilemektedir. Ayrıca, delme işlemi en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık üçte birini kapsamaktadır (Şekil 2.16). Delme işlemi çoğunlukla talaş kaldırma işlemlerinin sonuncusunu oluşturmaktadır. Tornalama ve frezeleme işlemleri ile delme işlemleri karşılaştırıldığında, işlemlerin kinematik ve dinamik yapısı benzer olup talaş akışı ve kesme sıcaklığı dağılımının da benzer şekilde olduğu görülür. Öte yandan delme işleminde olumsuz durumlar da görülmektedir. Talaşın oluşumu kapalı alanda meydana gelir ve bu dıştan görülemez. Talaş akışını sınırlandıran sadece matkapta oluşan talaş kalınlığıdır. Takım ve iş parçası arasındaki sürtünme önemlidir; yüzeyden akan sıcaklığın yetersiz olması ve dönme ekseninde kesici ağız boyunca kesme hızı değerinin sıfır olması ana problemdir. Bu yüzden matkap ve işlem; tezgâha ve iş parçasına göre uyarlanmalı, delik kalitesi sağlanmalı ve gerekli yöntem doğruluğu oluşturulmalıdır. Bu nedenlerden dolayı birçok takım geometrisi ve takım malzemesi geliştirilmiştir [1, 5]. Ayrıca yine talaş kaldırma işlemlerinde harcanan enerjinin yaklaşık %25'lik kısmında delik delme işlemlerinde harcanır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması [5]

Delik delme, iş parçası üzerinden talaş kaldıran bir kesici takımla silindirik olarak delik açma yöntemlerinin tamamına verilen bir addır. Delme terimi kısa veya derin delik delme işlemleri için kullanıldığı kadar, bunların ardından yapılan, raybalama, havşa yuvası açma ve ovalama (veya parlatma) gibi çeşitli son işlemler için de kullanılır. Bütün bu işlemlerin ortak yanı, ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketiyle birlikte yapılmasıdır [6]. Delik delme işlemi birçok yönden tornalama ve frezeleme işlemleriyle karşılaştırılabilir, ancak bu işlemde talaşın kırılması ve boşaltılması çok daha büyük önem taşır. Delik derinleştikçe işlemin kontrolü ve talaşın boşaltılması zor hale gelir. Derin delik delme işleminde delik ve yüzey kalitesi daha büyük öneme taşırken, kısa deliklerde daha ekonomik bir işlem için daha yüksek talaş debilerinde çalışma önemli hale gelmektedir [1, 5].

Delik delme, esas itibariyle iki hareketin bir bileşiminden oluşur. Bu hareketler ana dönme hareketi ile doğrusal ilerleme hareketleridir. Eski klasik tezgâhlarda kısa delik delme işlemi genellikle takımın dönerek ilerlemesi ile gerçekleştirilir, ancak kısa delik delme işlemlerinde NC/CNC tezgâhların kullanılmasıyla iş parçasının dönüp takımın sabit olduğu delme işlemleri de yaygın hale gelmiştir [5].

2.8. Sonlu Elemanlar Metodu ve Deform Yazılımı

2.8.1. Sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar metodu (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 noktalardaki (düğüm noktaları) sınır ve başlangıç şartlarının uygulanmasıyla problemde aranan değerlerin çözümü olmak üzere üç ana unsur bulunmaktadır [14]. 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 [15].

FEM'de karşılaşılan problemler genellikle kısmı 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 kısmı diferansiyel denklemin çözümüyle elde edilir. Ancak eğrisel kenar/yüzey içeren geometriye sahip karmaşık problemlerde gerçek çözümden ziyade yaklaşık çözümler elde edilecektir. Yaklaşık çözümleme yöntemlerinde 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 [15]. 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;

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.9a}$$

$$[\mathrm{E}] = \frac{E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_2 & \lambda_2 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \text{olup} \begin{cases} \lambda_1 = (1-\nu) \\ \lambda_2 = \nu \\ \lambda_3 = ½ \cdot (1-2\nu) \end{cases} \tag{2.9b}$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \gamma_{xy} & \gamma_{yz} & \gamma_{zx} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.9c}$$

$$\{\mathrm{u}\} = \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.9d}$$

$$\{\mathrm{f}\} = \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.9e}$$

$$\{\mathrm{T}\} = \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.9f}$$

$$\{\mathrm{P}_i\} = \begin{bmatrix} P_x & P_y & P_z \end{bmatrix}_i^{\mathrm{T}} \tag{2.9g}$$

$$U = ½ \cdot \int_V [\sigma]^{\mathrm{T}} \cdot \{\varepsilon\} \cdot \mathrm{d}V \tag{2.10a}$$

$$W = -\int_V \{\mathrm{u}\}^{\mathrm{T}} \cdot \{\mathrm{f}\} \cdot \mathrm{d}V - \int_A \{\mathrm{u}\}^{\mathrm{T}} \cdot \{\mathrm{T}\} \cdot \mathrm{d}A - \sum_i \{\mathrm{u}_i\}^{\mathrm{T}} \cdot \{\mathrm{P}_i\} \tag{2.10b}$$

$$\Pi = U + W \tag{2.11}$$

olarak elde edilir [16]. Daha sonra ise sınır şartlarına göre minimizasyon yapılır:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{\mathrm{u}\}} = 0 \tag{2.12}$$

Sonlu eleman problemlerinin çözümünde; çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek, bu geometrik yapıya en uygun elemanlar seçilir [17]. FEM'de temel olarak tek, iki ve üç boyutlu 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. 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 yapılır. İzoparametrik tanımlamada ise elemanın düğüm sayısı *n* olmak üzere Eş. 2.13a'daki bir noktanın koordinatları (*x*, *y*, *z*) ve bu noktaya karşılık gelen *u*, *v*, *w* deplasmanlarından oluşan Eş. 2.13b'deki problemin bütünlük şartları; elemandaki düğüm

koordinatları (x_i,…, x_n; y_i,…, y_n; ; z_i,…, z_n) ve düğüm deplasmanları (u_i,…, u_n; v_i,…, v_n; ; w_i,…, w_n) yardımıyla N_i şekil fonksiyonlarıyla ifade edilir [1, 17].

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_{n-1} & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{n-1} & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_{n-1} & z_n \\ u_1 & u_2 & \dots & u_{n-1} & u_n \\ v_1 & v_2 & \dots & v_{n-1} & v_n \\ w_1 & w_2 & \dots & w_{n-1} & w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ \vdots \\ N_{n-1} \\ N_n \end{bmatrix} \tag{2.13a}$$

$$1 = \sum_{i=1}^{n} N_i \quad ; \quad x = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot N_i \quad ; \quad y = \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot N_i \quad ; \quad z = \sum_{i=1}^{n} z_i \cdot N_i$$
$$u = \sum_{i=1}^{n} u_i \cdot N_i \quad ; \quad v = \sum_{i=1}^{n} v_i \cdot N_i \quad ; \quad w = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot N_i \tag{2.13b}$$

Şekil fonksiyonları ise daha ziyade doğal/parametrik koordinatlar yardımıyla tanımlanır. {q} düğüm deplasman vektörü ve [N] şekil fonksiyonları matrisi kullanılarak elemanın {u} deplasman vektörü

$$\left.\begin{aligned} &\{\mathrm{q}\} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & \dots & q_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\ &N_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \text{ olup } \; i = 1,2,3,\dots,n \\ &[\mathrm{N}] = \begin{bmatrix} N_1 \mid N_2 \mid N_3 \mid \dots \mid N_n \mid \end{bmatrix} \end{aligned}\right\} \tag{2.14a}$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \mid N_2 \mid N_3 \mid \dots \mid N_n \mid \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \{\mathrm{u}\} = [\mathrm{N}] \cdot \{\mathrm{q}\} \tag{2.14b}$$

biçiminde yazılabilir. Bir sonraki FEM aşamasında ise Eş. 2.14b ile deplasman tanımlaması yapılan elemandaki gerinmelerin interpolasyonuyla elde edilen düğüm koordinatları cinsinden [B] gerinme-deplasman matrisi elde edilir:

$$[\mathrm{D}]=\begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{2.15a}$$

$$\{\varepsilon\}=[\mathrm{D}]\cdot\{\mathrm{u}\}=[\mathrm{D}]\cdot[\mathrm{N}]\cdot\{\mathrm{q}\}\Rightarrow[\mathrm{B}]=[\mathrm{D}]\cdot[\mathrm{N}]\Rightarrow\{\varepsilon\}=[\mathrm{B}]\cdot\{\mathrm{q}\} \tag{2.15b}$$

$$[\mathrm{B}]=\begin{bmatrix} q_{x_1} & \dots & q_{x_n} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & q_{y_1} & \dots & q_{y_n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & q_{z_1} & \dots & q_{z_n} \\ q_{y_1} & \dots & q_{y_n} & q_{x_1} & \dots & q_{x_n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & q_{z_1} & \dots & q_{z_n} & q_{y_1} & \dots & q_{y_n} \\ q_{x_1} & \dots & q_{x_n} & 0 & \dots & 0 & q_{z_1} & \dots & q_{z_n} \end{bmatrix} \tag{2.15c}$$

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, .., n ve j = 1, 2, 3, 4. Eş. 2.9a, b, c yardımıyla üç boyutlu durum için gerilme-gerinme ilişkileri

$$\{\sigma\}=[\mathrm{E}]\cdot\{\varepsilon\} \tag{2.16a}$$

biçiminde tanımlanabildiğinden [16]; Eş 2.15b'deki $\{\varepsilon\}$, Eş 2.16a'da yerine yazılır:

$$\{\sigma\}=[\mathrm{E}]\cdot[\mathrm{B}]\cdot\{\mathrm{q}\} \tag{2.16b}$$

Eş. 2.16b doğrultusunda, Eş 2.10a'daki şekil değiştirme (gerinme) enerjisi ifadesi aşağıda gibi yazılabilir:

$$U=\tfrac{1}{2}\cdot\int_V[\sigma]^{\mathrm{T}}\cdot\{\varepsilon\}\cdot\mathrm{d}V\ \Rightarrow\ U_{(\mathrm{e})}=\tfrac{1}{2}\cdot\{\mathrm{q}\}^{\mathrm{T}}\cdot[\mathrm{B}]^{\mathrm{T}}\cdot[\mathrm{E}]\cdot[\mathrm{B}]\cdot\{\mathrm{q}\}\cdot\int_{(\mathrm{e})}\mathrm{d}V \tag{2.17}$$

Eş 2.17'deki elemanın $V_{(\mathrm{e})}$ hacmi için $|\mathrm{J}|$, Eş 2.15c'deki [B] matrisinin elde edilme sürecinde bir dizi kısmi türev işlemlerinde doğal koordinatları geometrik koordinatlara

dönüştürmek amacıyla kullanılan [J] Jacobian matrisinin determinantını göstermektedir [15, 16]. Belirlenen $V_{(e)}$ hacmi yardımıyla $[k_{(e)}]$ eleman rijitlik matrisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$U_{(e)} = \tfrac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot \left(V_{(e)} \cdot [B]^T \cdot [E] \cdot [B]\right) \cdot \{q\} = \tfrac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot [k_{(e)}] \cdot \{q\} \quad \text{olmak üzere}$$
$$[k_{(e)}] = V_{(e)} \cdot [B]^T \cdot [E] \cdot [B] \tag{2.18}$$

$A_{(e)}$, yüzey kuvveti uygulanan alanı göstermekle birlikte; Eş 2.14b'ye göre Eş 2.9e, f'deki kuvvet terimlerinin Eş 2.10b'de gösterilen işi sırasıyla aşağıdaki gibi olur:

$$\int_V \{u\}^T \cdot \{f\} \cdot dV_{(e)} = \{q\}^T \cdot \{f_{(e)}\} \tag{2.19a}$$

$$\int_A \{u\}^T \cdot \{T\} \cdot dA = \{q\}^T \cdot \{T_{(e)}\} \tag{2.19b}$$

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):

$$\sum_e [k_{(e)}] \rightarrow [K] \tag{2.20a}$$

$$\sum_e \left(\{f_{(e)}\} + \{T_{(e)}\}\right) + \{P_i\} \rightarrow [F] \tag{2.20b}$$

Başka bir deyişle genel (sistemin tamamı için) deplasman vektörü {Q} olmak üzere; Eş. 2.10a ve Eş. 2.10b doğrultusunda yazılan Eş. 2.11'teki potansiyel enerji ifadesi sistemin tamamı için toplam potansiyel enerji olarak yazılır:

$$\{Q\} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 & Q_3 & \cdots & Q_{N-2} & Q_{N-1} & Q_N \end{bmatrix}^T \tag{2.21}$$

$$U = \sum_e \tfrac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot [k_{(e)}] \cdot \{q\} = \tfrac{1}{2} \cdot \{Q\}^T \cdot [K] \cdot \{Q\} \tag{2.22a}$$

$$W = -\sum_e \{q\}^T \cdot \{f_{(e)}\} - \sum_e \{q\}^T \cdot \{T_{(e)}\} - \sum_i \{Q_i\} \cdot \{P_i\} = -\{Q\}^T \cdot \{F\} \tag{2.22b}$$

$$\Pi = ½ \cdot \{Q\}^T \cdot [K] \cdot \{Q\} - \{Q\}^T \cdot \{F\} \tag{2.23}$$

Eş. 2.12'de gösterildiği üzere sistemin tamamı için toplam potansiyel enerji minimizasyon yapılarak ($\partial\Pi/\partial\{Q\}=0$) nihai durum elde edilir:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{Q\}} = 0 = [K] \cdot \{Q\} - \{F\} \quad \Rightarrow \quad [K] \cdot \{Q\} = \{F\} \tag{2.24}$$

Eş. 2.24'un çözülmesiyle (örneğin $\{Q\}=[K]^{-1}\cdot\{F\}$ olarak) sistemde kullanılan elemanların düğümlerine ait deplasmanlar belirlenmiş olur.

2.8.2. Eşdeğer gerilme (von Mises gerilmesi)

FEM hesaplamalarında düğüm deplasmanları belirlendikten sonraki aşamada problemde aranılan sonuçlar görüntülenir (veya listelenir). Örneğin bir gerilme analizi probleminde normal gerilmeler (σ_x, σ_y, σ_z), kayma gerilmeleri (τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz}), asal gerilmeler (σ_1, σ_2, σ_3), eşdeğer gerilme (veya von Mises gerilmesi, σ_{vM}) ile toplam deformasyon gibi gerilmeler görüntülenir. 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 σ_1, σ_2, σ_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 teorisi aşağıdaki gibi yazılabilir [19]:

$$U_g = \frac{1}{12G} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \tag{2.25a}$$

$$U_g = \frac{1}{12G} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \tag{2.25b}$$

$$U_g \leq [\sigma_Y^2 / (6 \cdot G)] \tag{2.26}$$

$$\sigma_{vM} = \sqrt{½ \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \tag{2.27a}$$

$$\sigma_{vM} = \sqrt{½ \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.27b)$$

$$\sigma_{vM} \leq \sigma_Y \quad (2.28)$$

Bu teoriye göre (Eş. 2.28); basit çekme deneyindeki akma noktasından (σ_Y) daha büyük gerilmelere maruz kalındığı takdirde malzemede hasar (kırılma/kopma) görülür. Dolayısıyla malzemede hasar oluşmaması için von Mises gerilmesi, malzemenin akma noktası gerilmesine eşit veya küçük olmalıdır.

2.8.3. Deform yazılımı

SFTC'nin geliştirdiği *Deform* programı; tasarımcıların metal şekillendirme, ısıl işlemler ve talaş kaldırma gibi işlemleri analiz edebilmek için gerçek deneyler üzerinde yaptıkları çalışmalarını sanal ortama taşımalarını sağlayan bir mühendislik yazılımıdır. *Deform* kullanarak işleme simülasyonlarını yapmak, yirmi yıldan fazla bir zamandır araştırmacılara maliyet ve zaman açısından önemli bir iyileştirme sağlamıştır [20]. Günümüzdeki sıkı rekabet baskıları, firmaların kendilerine sunulan her bir araçtan en yüksek seviyede yarar elde etmelerini gerektirmektedir. Bu bağlamda *Deform*, araştırma ve endüstriyel uygulamalarla oldukça geniş bir yelpazede etkin olarak kullanılmaktadır.

Deform, simülasyon sistemine dayanan değişik şekillendirme ve ısıl işlem süreçlerini analiz etmek için tasarlanmış, metal şekillendirme ve ilgili endüstriler tarafından kullanılan bir FEM yazılımıdır [21]. *Deform*'da Lagrangian ve Arbitrary Lagrangian Euler (ALE) formülasyonu ve takım aşınma modeli olarak da Usui modeli kullanılmaktadır. Lagrangian ve ALE formasyonunda talaş oluşumu, geometrik kriter olarak isimlendirilebilen iş parçası için kullanılan elemanlardaki fiziksel bozulmaya göre belirlenmektedir. İş parçasına ait sonlu eleman ağındaki elemanlarda görülen bozulmanın kritik talaş ayrılma değerlerine ulaşması halinde kesici takımın geometrisi bozulan bu elemanı kaydırmaya başlayacağı kabul edilir [20]. Pek çok termo-mekanik şekillendirme ve ısıl işlem proseslerini analiz etmede *Deform*'dan yararlanılmaktadır. *Deform*'da genel yaklaşım; ilk olarak iş parçası, takım geometrisi ve malzemesi ile kesme parametrelerini belirlemek, daha sonra da uygun simülasyon parametreleri (kesici hareketiyle ilgili zaman stepleri) yardımıyla ardışık olarak iş parçasına uygulanan her bir işlemi simüle etmektir [21].

Deform, birçok alt programı bünyesinde barındıran bir FEM yazılımıdır. *Deform* sistemi içinde yaygın olarak kullanılan alt programlar *Deform-3D*, *Deform-2D*, *Deform-F2*, *Deform-F3* ve *Deform-HT* olup bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Deform-3D/2D; Karmaşık metal şekillendirme (talaş kaldırma) işlemlerinin üç boyutlu akışını analiz edebilmek için tasarlanmış bir işlem simülatörüdür. Deneysel çalışmaların oldukça maliyetli ve zaman gerektiren süreçler olması sebebiyle; *Deform-3D*, endüstriyel şekillendirme operasyonlarındaki malzeme akışını (talaş oluşumu) tahmin edebilmesi sayesinde pratik ve verimli bir araç olmuştur. *Deform* sistemi içindeki bu alt programda kapalı ve açık kalıp dövme, metal kesme (talaş kaldırma), haddeleme, ekstrüzyon, perçinleme, çekme, doldurma, sıkıştırma ve şişirme uygulamaları yapılabilmektedir. Metal kesme modülünde; tornalama, frezeleme, delik delme, delik büyütme ve vida çekme işlemlerinin simülasyonları yapılabilmektedir. *Deform-3D* aynı zamanda esnekliği sayesinde araştırmacılara birçok uygulama, geliştirme ve araştırma dallarında çalışma olanağı sağlayan açık bir sistemdir. Program, kullanıcı tanımlı kodları ve parametreleri desteklemektedir. Kullanıcıların çoklu deforme olabilen karmaşık cisimler arasında keyfi temasları tanımlayabilmelerine olanak sağlar. Böylece kullanıcının isteğine göre simülasyon sonrası mekanik birleşim ya da birbirleriyle temas halindeki çiftlerin gerilme (*coupled die stress*) analizleri yapılabilir. Matematiksel altyapısı FEM'e dayanan *Deform*'un sonuçlardaki hassasiyeti ve güvenilirliği son yıllarda endüstriyel uygulamalarda başarıyla uygulanmasını sağlamıştır [20]. Simülatör motorunun şaşırtıcı seviyedeki hassasiyetiyle büyük deformasyonlu malzeme akışının ve ısıl davranışın tahmin edebilme yeteneğinden dolayı *Deform*, birçok araştırmacı ve tasarımcı tarafından tercih edilen simülasyon yazılımlarından biridir [21]. *Deform-2D* ise *Deform-3D*'den farklı olarak yukarıda sayılan üç boyutlu metal akış sürecinin simetri veya düzlem gerinme varsayımlarıyla iki boyutlu olarak analiz edilebildiği bir simülasyon programıdır.

Deform-F2/F3; Dövme, soğuk şekillendirme/haddeleme, ekstrüzyon ve çekme işlemlerinin simülasyonunun yapılmasına olanak sağlayan iki boyutlu bir simülatördür. Program FEM motoru, ağ oluşturma motoru ve *Deform-2D*'deki diğer sistem işlevlerini kullanmaktadır. Programın işlevleri arasında şekillendirme, ısı transferi ve birbirleriyle temas halindeki çiftlerin gerilme analizleri gösterilebilir. *Deform-F3* ise üç boyutlu karmaşık metal şekillendirme işlemlerinde malzemenin akma davranışını analiz edebilmek için tasarlanmış bir simülatördür. *Deform-F3*, deneyler gibi maliyet gerektirmeden soğuk ve sıcak dövme

operasyonlarındaki malzeme akışını tahmin eden tasarımcılar için yararlı ve etkin bir programdır.

Deform-HT; Isıl işlem proseslerinin simülasyonunu gerçekleştirebilmek için tasarlanmış bir FEM simülatörüdür. Sistem; parçaların ısıl işlemleri sırasındaki termal, mekanik ve metalürjik açıdan sergileyecekleri davranışları tahmin edebilmektedir ve ısıl işlem sonucundaki çarpılmaları, su verme esnasında oluşan çatlamaları ve kalıntı gerilmeleri hesaplayabilmektedir. Sistem ayrıca faz dönüşümü ve faz hacim oranları gibi hususlarda da kullanıcıya bilgi sunabilmekte ve karbon çeliğinden alüminyuma, titanyumdan nikel esaslı alaşımlara kadar malzeme kütüphanesinde bulunan birçok malzemeyi modelleyebilmektedir. *Deform-HT* ile normalizasyon, östenitleme, karbürleme, problem çözme işlemleri, su verme, temperleme, yaşlandırma ve gerilim giderme simülasyonları yapılabilmektedir [21].

Endüstride yaygın olarak kullanılan *Deform* programının kullanım alanları ise aşağıda özetlenmiştir [20]. İlgili açıklamanın sonunda ise kullanım alanının kapsadığı *Deform* sistemi içindeki alt programa işaret edilmiştir.

- Tornalama, frezeleme, delik delme, delik büyütme ve vida çekme gibi talaş kaldırma işlemlerinin simülasyonu ve sıcaklık, kesme kuvvetleri, gerilme dağılımları gibi önemli işlem değişkenlerinin tahmini (2D, 3D; işleme modülü),
- Büyük deformasyon modelleri için uygun olan rijit, elastik ve termo-viskoplastik malzeme modelleri,
- Malzeme modellemesi, pres modellemesi, kırılma kriteri ve diğer fonksiyonlar için kullanıcının belirlediği alt döngüler (2D, 3D),
- Malzeme veri tabanında bulunmayan herhangi bir malzeme için kullanıcının belirlediği malzeme veri girdisi,
- Toz metalürjisi ürünlerinin model oluşumu için gözenekli malzeme modeli (2D, 3D),
- Kalıntı gerilme ve geri esneme problemleri için elastik-plastik malzeme modeli (2D, 3D),
- Soğuk, ılık ve sıcak dövme işlemlerinin simülasyonu için deformasyon ve ısı transferinin mekanik birleşim ya da birbirleriyle temas halindeki çift biçimde modellenmesi,

- Malzeme akışı, kalıp doldurma, dövme yükü, kalıp gerilmesi, tane akışı, hata/kusur oluşumu ve sünek kırılma üzerine bilgiler,
- Hidrolik pres, çekiçler, vidalı pres ve mekanik presler için entegre modeller,
- Sıcaklık, gerinme, gerilme, hasar ve diğer önemli değişkenlerin sınır çizgileri (eğrileri),
- Çoklu deforme olabilen karmaşık cisimler arasındaki mekanik birleşim ya da birbirleriyle temas halindeki çiftlerin gerilme analizleri yapılabilir (2D, 3D),
- Çatlak başlangıcı ve çatlak/kırılma ilerleme modelleri üzerine iyi bilinen hasar faktörleri zımbayla kesme/delme ve talaş kaldırma modellerine izin verir (2D, 3D),
- Normalleştirme, tavlama, su verme, temperleme ve karbürlemeyi simüle etmek.

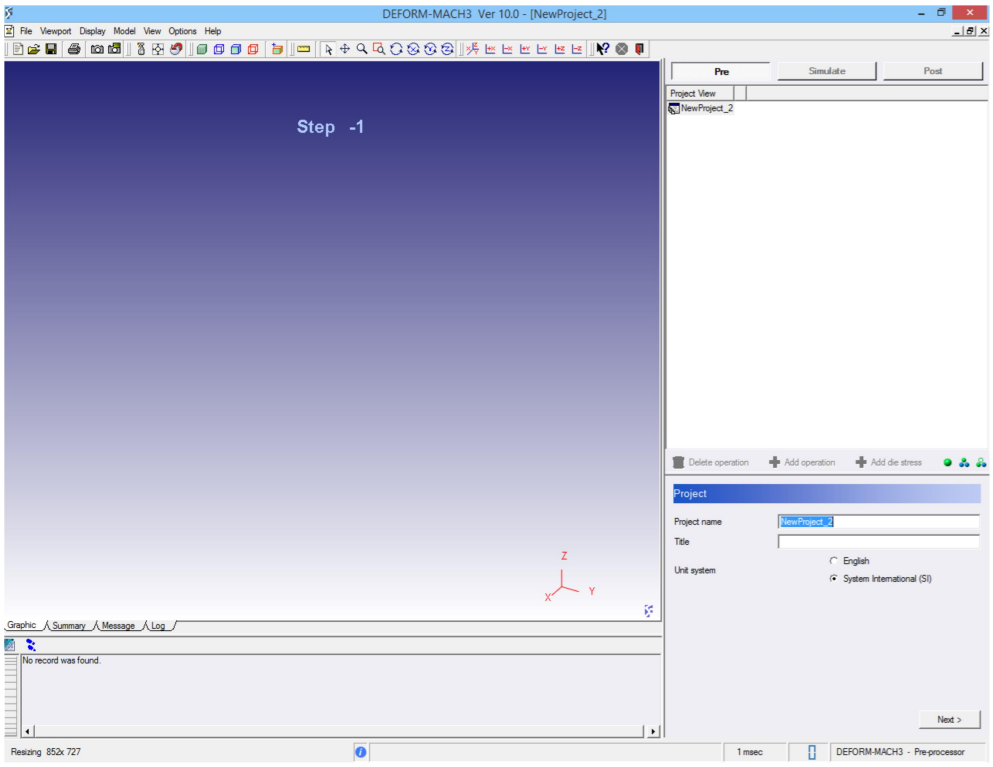
Deform programı genel olarak üç temel bileşenden oluşmaktadır [21];

1. *Ön işlemci* (*Pre-processor*): Simülasyonu yapılacak işlem (örneğin talaş kaldırma) için sistemin oluşturulması/düzenlenmesi ve gerekli veri tabanının oluşturulması için kullanılır. Ön işlemci kısmında işleme/talaş kaldırma tipi, kesme/simülasyon parametreleri, kesici takıma ve iş parçasına ait geometrik ve malzeme modelleri, elemanlara ayırma (*meshing*) ile eleman ve düğüm koordinatları/geometrileri için veri tabanı oluşturma gibi işlemler gerçekleştirilir.
2. *Simülasyon motoru* (*Simulation engine*): Simülasyonu yapılacak işlemi analiz etmek üzere hesaplamalar yapılır ve sonuçlar veri tabanına yazdırılır. Simülasyon motoru veri tabanını okur ve gerçek çözüm hesaplamalarını yaparak uygun çözüm verisini veri tabanına ilave eder. Simülasyon motoru ayrıca kesici takım hareketi soncunda iş parçasındaki deformasyon etkisiyle talaş oluşumu için yeni FEM ağları (*mesh*) oluşturur (*Automatic Mesh Generation*, AMG). Simülasyon motoru çalışırken elemanların konum bilgilerini ve muhtemel hataları mesaj (*.msg*) ve kütük (*.log*) dosyalarına yazar.
3. *Son işlemci* (*Post-processor*): Simülasyon motorunun çalışmasıyla oluşturulan veri tabanını okur ve istenilen sonuçları (talaş oluşumu, sıcaklık, vb.) grafik veya sayısal olarak gösterir/verir.

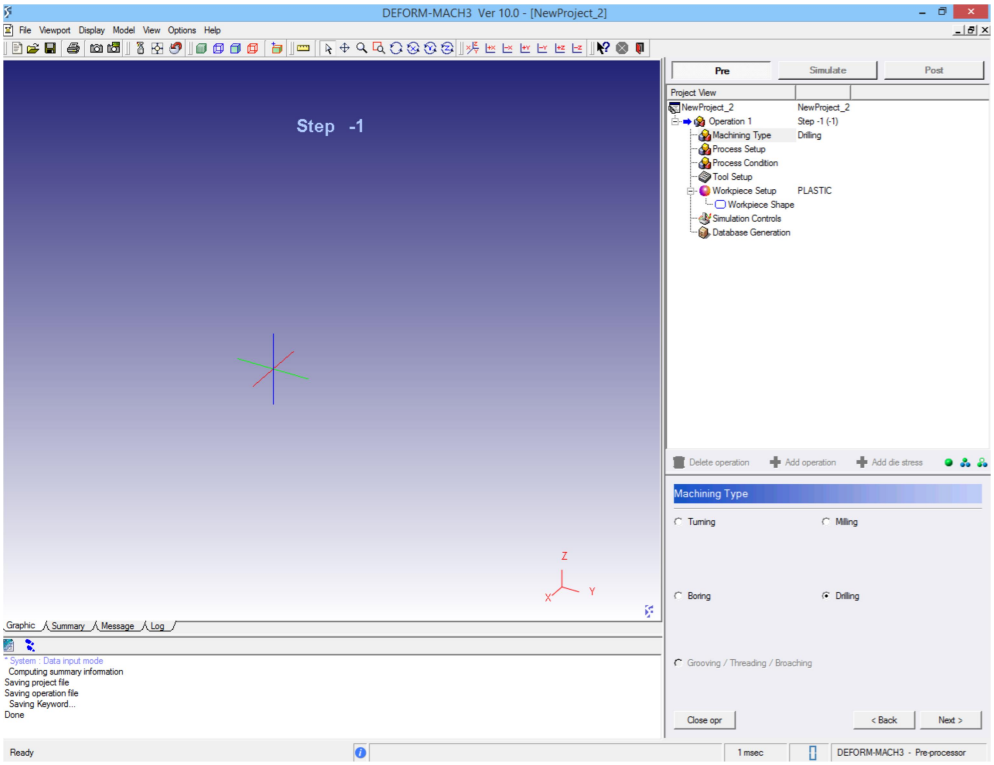
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen delik delme işleminin simülasyonu *Deform-3D* ana modülünden veya *Deform-3D Machining* yardımcı modülünden (veya *Deform-3D* ana modülündeki *Machining* (*Cutting*) ara yüzü yardımıyla) yapılabilmektedir. *Deform-3D Machining* modülü yardımıyla işlem sırası, ayrıntılı bir biçimde aşağıda açıklanmıştır.

Ön işlemci;

Başlat menüsünden *Deform-3D Machining* modülü seçilerek program açılır. Şekil 2.17'de gösterilen başlangıç ekranından proje adı girilir ve birim sistemi ayarlanır. Daha sonra program ara yüzündeki *Next* butonu yardımıyla bir sonraki adımlara geçilmektedir. *Next* butonu ile ekrandan simülasyon için operasyon adı tanımlanır ve daha sonra da işleme tipi seçilir (Şekil 2.18).

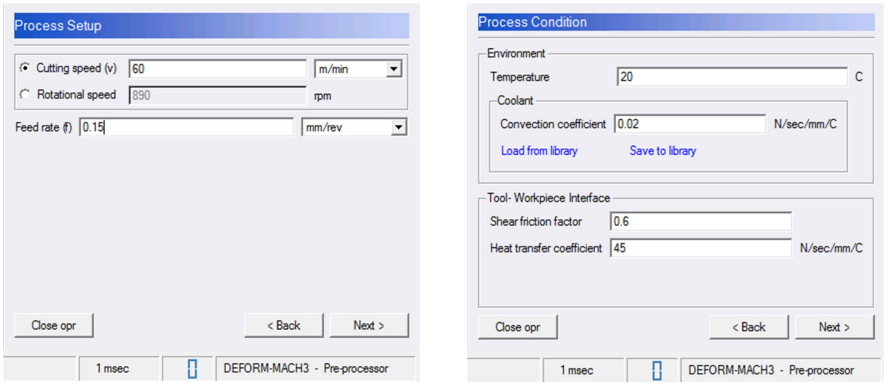


Şekil 2.17. Deform-3D Machining modülü başlangıç ekranı



Şekil 2.18. İşleme tipini seçme

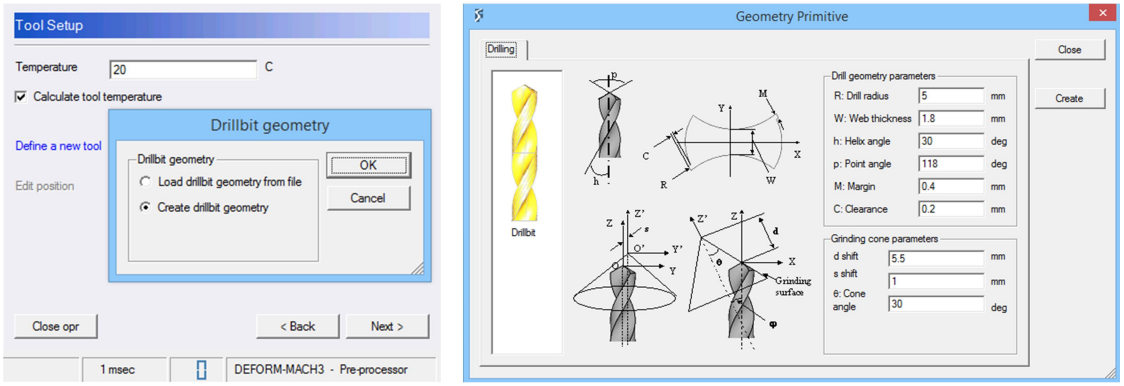
Sonraki aşamalarda sırasıyla simülasyonda kullanılacak kesme parametreleri ve işleme şartları tanımlanır; kesme hızı, ilerleme değeri, ortam sıcaklığı ve soğutma sıvısı için iletim katsayısı gibi değerler girilir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Kesme parametreleri ve işleme şartlarının girilmesi

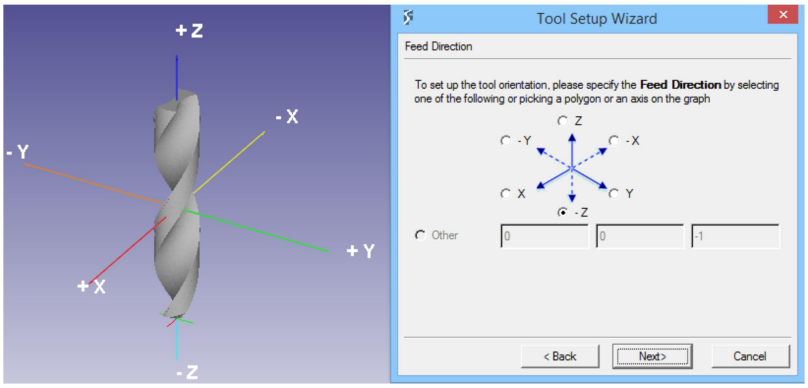
İzleyen aşamada Şekil 2.20'de gösterilen ekrandan öncelikle "*Define a new tool*" komutu yardımıyla kesici takımın (matkap) geometrik modeli oluşturulur. Program, matkabın geometrik modeli için iki seçenek sunmaktadır: *Load drillbit geometry from file* seçeneği, veri tabanında bulunmayan matkaplar için daha önceden oluşturulan matkap geometrik

modelinin *.STL* uzantısıyla (hızlı prototipleme ve CAD sektörü için vazgeçilmez bir dosya formatıdır; *STereoLithography*, STL) çağrılması için kullanılır. *Create drillbit geometry* seçeneği ise program veri tabanından doğrudan matkap geometrik modeli oluşturmak için kullanılır. Matkap için gerekli olan *R* matkap yarıçapı, *W* öz kalınlığı, *h* helis açısı, *p* uç açısı, θ koni açısı, koni koordinat sistemindeki koni kaymasını gösteren *d* ve *s* gibi parametreler tanımlanır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Kesici takım geometrisini seçme

Matkabın geometrik modeli oluşturulduktan sonra *Auto/Manual Position* seçenekleriyle konumlaması yapılır. Doğru/hatasız simülasyon açısından matkap ilerleme yönünün doğru olması gereklidir. Şekil 2.21'de gösterildiği gibi matkap ilerleme yönü *–z* olacak biçimde seçilir. Daha sonra ise özellikle ilerleme ve kesme hızı hesaplamaları açısından son derece önemli olan kesici kenar sayısı ve matkap çapı değerleri girilir.



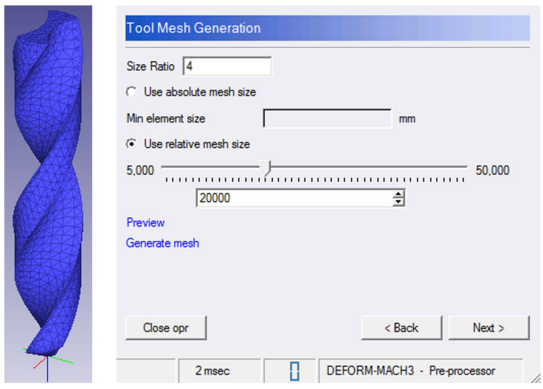
Şekil 2.21. Kesici takım geometrisini konumlama

Bir sonraki aşamada geometrik modeli oluşturulan ve konumlaması yapılan matkabın malzeme modeli tanımlanır. Malzeme modeli oluşturma; program kütüphanesinden

(*Import Material from Library*), programda bulunmayan malzemeler için yeni bir malzeme tanımlaması *Create new material* veya *Import Material from file* seçenekleri ile yapılır. Program kütüphanesinde değişik % oranlarında karbür, WC ve Al_2O_3, TiC, TiN, TiCN kaplamalar gibi oldukça geniş bir malzeme modeli seçeneği bulunmaktadır. Arzu edildiği takdirde programda farklı kalınlık ve malzeme türüne göre kaplama tabakası tanımlaması da yapılabilir.

Malzeme modeli tanımlanan matkaba daha sonra elemanlara ayırma (*meshing*) işlemi uygulanır. Elemanlara ayırma; 5000-50000 arasında bir eleman sayısı seçilerek bağıl (*use relative mesh size*) veya en küçük eleman boyutu tanımlanarak mutlak (*use absolute mesh size*) olarak yapılabilir. Kullanılacak eleman sayısı veya eleman boyutu belirlendikten sonra *Preview* komutu ile ön izleme yapılır ve *Generate mesh* komutu ile elemanlara ayırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2.22).

Daha sonra matkap ile ortam (veya iş parçası) arasındaki ısı iletimi için sınır şartı (*boundary condition*) program tarafından otomatik olarak tanımlanır.

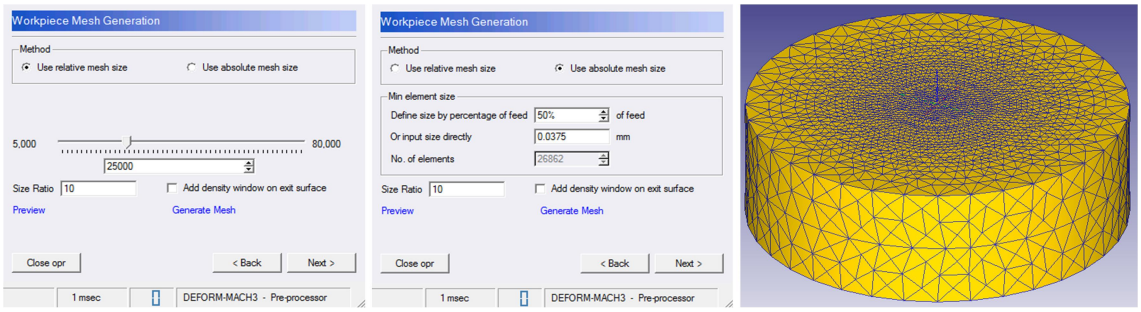


Şekil 2.22. Kesici takımın elemanlara ayrılması

Matkapla ilgili işlemler sonrasında iş parçası için de benzeri işlemler gerçekleştirilir. İş parçası için programda öncelikle malzeme özelliği plastik veya elasto-plastik olacak biçimde tanımlanabilir. Sonrasında iş parçasına ait geometrik model oluşturulur. İş parçası için geometrik model çap ve kalınlık değeri girilmek suretiyle doğrudan veya *Import geometry* komutuyla daha önceden oluşturulan geometrik modelin *.STL*/*.IGES* gibi uzantılarla çağrılarak dolaylı bir biçimde oluşturulabilir. Simülasyonun yapıldığı bilgisayarın donanım özellikleri (işlemci, RAM) ve simülasyon için çözüm süresi göz

önünde bulundurularak iş parçası boyutları (çap ve kalınlık) tanımlanmalıdır. İş parçasının matkap çapından yaklaşık %20 daha büyük bir çapa sahip olması yeterlidir [22].

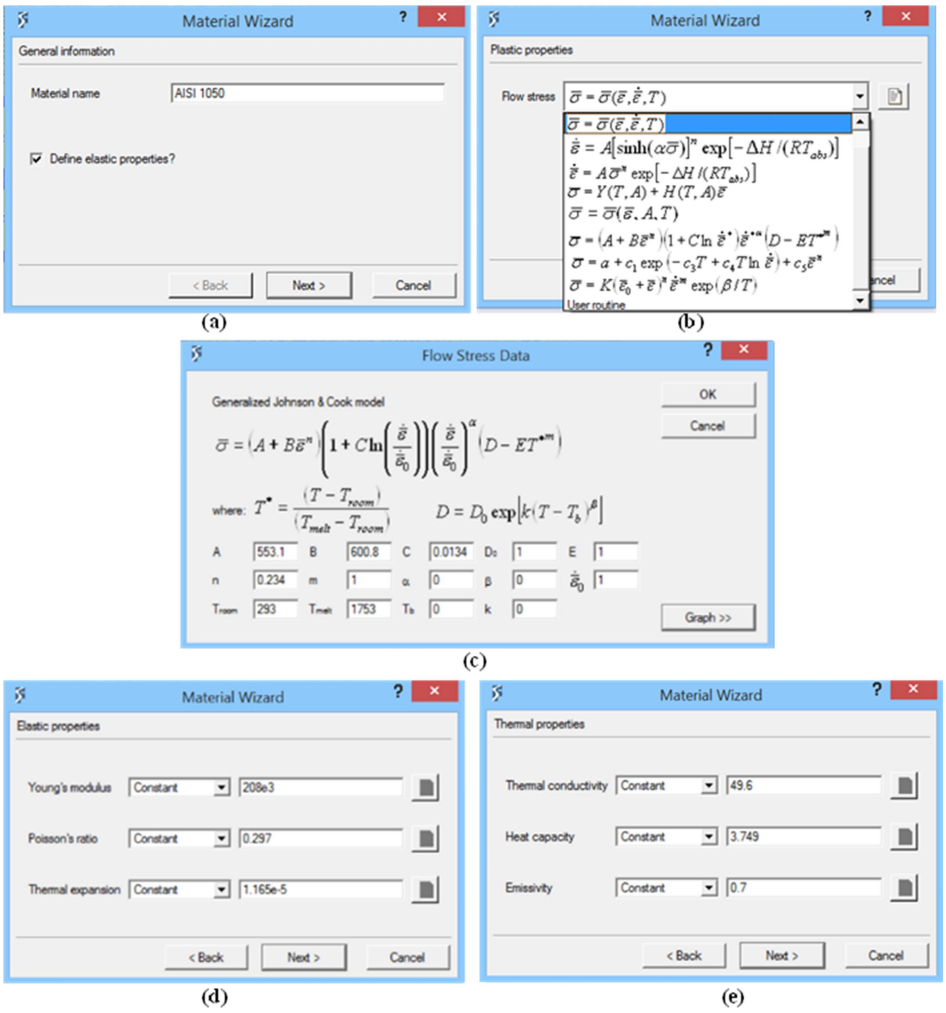
İş parçasına ait geometrik model oluşturma sürecinden sonraki elemanlara ayırma işlemi, doğru/hatasız bir delik delme simülasyonu açısından son derece önemli bir aşamadır. Matkapta olduğu gibi program; bağıl (*use relative mesh size*) veya mutlak (*use absolute mesh size*) seçenekleri yardımıyla iş parçasına elemanlara ayırma işlemini uygular (Şekil 2.23). Bağıl yöntem için programda 5000-80000 arasında bir eleman sayısı ve belirli bir boyut oranı (*Size Ratio*) tanımlanır. Eleman boyut oranı; elemanlara ayırma sonrasındaki en büyük eleman kenarının en küçük eleman kenarına oranı olup talaş kaldırma simülasyonunda 10 gibi büyük bir boyut oranı kullanılmakla birlikte daha büyük boyut oranları simülasyon için çözüm sırasında çok fazla zaman artışlarına yol açmaktadır [22]. Mutlak yöntemde ise en küçük eleman boyutu; matkap ilerlemesinin % oranı olarak veya doğrudan eleman boyutu biçiminde tanımlanır. Delme simülasyonu için en küçük eleman boyutu, matkap kesici ağız sayısı başına ilerlemenin ½'si olabilir (örneğin 2 ağızlı bir matkap için ilerlemenin %25'i) [22]. Kullanılacak yönteme göre eleman sayısı/eleman boyutu belirlendikten sonra *Preview* komutu ile ön izleme yapılır ve *Generate mesh* komutu ile elemanlara ayırma işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 2.23. İş parçasının elemanlara ayrılması

Programda daha sonra iş parçasını sabitleme ve iş parçası ile ortam arasındaki ısı iletimi için sınır şartları tanımlanır. İş parçasını sabitleme; simülasyon sırasında iş parçasının dış çap yüzeyi üzerindeki tüm düğümler için hız değeri tüm yönlerde (x, y, z doğrultularında) 0-sıfır tanımlanarak yapılır. Isı iletimi için sınır şartı ise iş parçasının tüm yüzeyleri için program tarafından otomatik olarak tanımlanır.

Bir sonraki aşamada programda matkapta olduğu gibi *Import Material from Library*, *Import Material from file* veya *Create new material* seçenekleri ile iş parçası için malzeme modeli oluşturulur. Programda bulunmayan malzemeler (örneğin AISI 1050) için *Create new material* seçeneği ile yeni bir malzeme tanımlaması sırasıyla şöyle özetlenebilir (Şekil 2.24):



Şekil 2.24. İş parçası için yeni bir malzeme modeli tanımlama

Create new material seçeneği ile yeni bir malzeme tanımlamada önce yeni malzeme için bir isim verilir (Şekil 2.24a). Simülasyon sırasında deforme olan iş parçasının (talaş) plastik davranışını tanımlamak üzere kullanılacak akma gerilmesi modeli seçilir (Şekil 2.24b). Seçilen model (örneğin genelleştirilmiş Johnson-Cook akma gerilmesi modeli) için gerekli alanlar doldurulur veya özellikler belirtilir (Şekil 2.24c). Daha sonra ise malzemenin elastik ve termal özellikleri tanımlanır (Şekil 2.24d, e).

Talaş kaldırma simülasyonlarında iş parçası plastik davranışının tanımlanmasında genelleştirilmiş Johnson-Cook akma gerilmesi modeli yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Genelleştirilmiş Johnson-Cook akma gerilmesi modeli;

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\varepsilon}^{n}) \cdot [1 + C \cdot ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)] \cdot (\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)^{\alpha} \cdot [D - E \cdot (T^*)^{m}] \tag{2.29}$$

olarak tanımlanmıştır. Eş. 2.29'daki bazı değerler ve D, T^* parametreleri için programda

$$\delta = k \cdot (T - T_b)^{\beta} \quad \text{olup} \quad D = D_0{}^{\delta} \quad \text{ve} \quad T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r) \tag{2.30a}$$

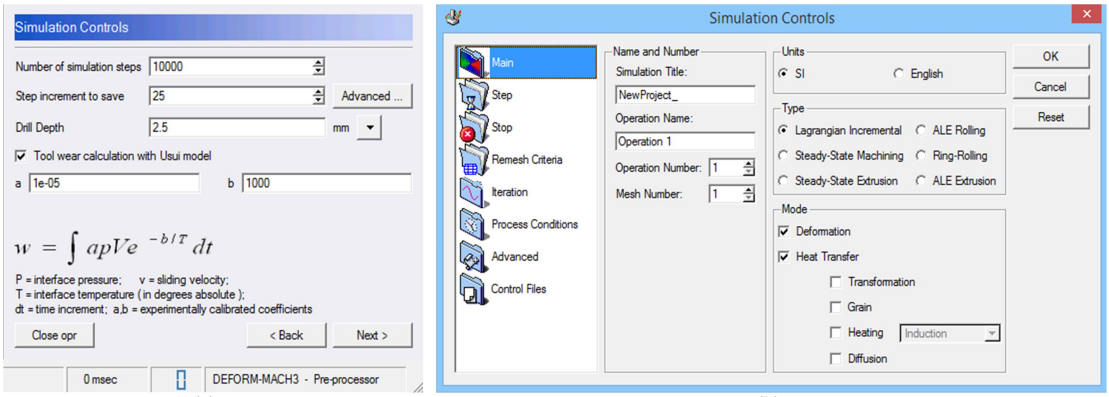
$$\alpha = \beta = k = T_b = 0 \quad \text{ve} \quad \dot{\bar{\varepsilon}}_0 = D_0 = E = 1 \tag{2.30b}$$

olduğuna göre, Eş. 2.30'a göre Eş. 2.29 revize edildiğinde; Johnson-Cook akma gerilmesi modelinin son hali Eş. 2.31'deki gibi elde edilir [20]:

$$\sigma = (A + B \cdot \bar{\varepsilon}^{n}) \cdot [1 + C \cdot ln(\dot{\bar{\varepsilon}}/\dot{\bar{\varepsilon}}_0)] \cdot [1 - \{(T - T_r)/(T_m - T_r)\}^{m}] \tag{2.31}$$

Eş. 2.31'deki A ve B sırasıyla malzemenin oda sıcaklığındaki (T_r) akma gerilmesi ve gerinme sertleşmesi sabitlerini; n ve C sırasıyla gerinme sertleşmesi ve gerinme hızı sertleşme üs değerlerini; $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$, referans gerinme hızını; T deney parçasının sıcaklığını; T_m malzemenin ergime sıcaklığını ve m, sıcaklığa bağlı sabiti göstermektedir. Şekil 2.24c'de T_{room} ve T_{melt} olarak gösterilen Eş. 2.31'deki sırasıyla T_r ve T_m sıcaklık değerlerinin programda özellikle °K olarak girilmesi gerekmektedir.

Deform programındaki ön işlemcide son olarak simülasyon sürecinin kontrol parametreleri ve takım aşınması ile ilgili ayarlar yapılır. Program, simülasyon sürecinde Usui modeline göre takım aşınmasının dikkate alınıp alınmayacağını kullanıcının belirtmesine ve gerekli parametrelerin girilmesine ihtiyaç duymaktadır (Şekil 2.25a). Doğru/hatasız bir delik delme simülasyonu açısından son derece önemli bir aşama olan simülasyon sürecinin kontrolü; simülasyon adım sayısının (*Number of simulation steps*), simülasyonu kaydetme adım sayısının (*Step increment to save*) ve delme derinliğinin (*Drill depth*) girilmesi suretiyle yapılır (Şekil 2.25a).



Şekil 2.25. Simülasyon sürecinin kontrolü ve takım aşınması

Simülasyon sürecinin kontrolü açısından *Advanced* butonu ile Şekil 2.25b'de gösterilen gelişmiş simülasyon kontrolleri de ayrıca kullanılır. Gelişmiş simülasyon kontrolleri içerisinde özellikle adım (*Step*), durdurma (*Stop*) ve işlem şartları (*Process conditions*) sekmelerinde bazı ayarlar yapılır. Bu ayarlar aşağıda kısaca özetlenmiştir [22]:

Adım kontrolleri; *Deform*'da simülasyon, artışlı zaman adımlarının (*incremental time steps*) yüzlerce veya binlerce alt bölümlerine ayrılmıştır. Kullanıcı tanımlı zaman adımı, simülasyon hesaplamaları için bir başlangıç noktası verir (zaman adımı çok büyükse, simülasyon modülü değeri, otomatik olarak daha uygun bir değere azaltır). Delme işlemi için genelde zaman adımı başına dönme, yaklaşık 1° derece kabul edilir. Başka bir deyişle devir başına yaklaşık 300 adım kullanılabilir (300 adım sonunda matkap 1 devir yapmış olur) [22]. Örneğin 400 rpm (veya 400/60 devir/s) ile dönen matkabın 1 devri için geçen süre 60/400'dür (yani 60/400=0,15 s/devir). Bu durumda her bir adım için gerekli zaman $t_{adım}$=0,15/300=5×10^{-4} s olur. Çözüm adımı tanımı (*Solution Step Definition*) kısmından zaman artışlı (*With Constant Time Increment*) bölümü seçilerek 0,0005 s değeri yazılır. 2 mm kalınlığındaki iş parçasının 400 rpm devir ve 0,15 mm/rev ilerleme ile hareket eden bir matkapla delindiğini (bu durumda matkap ucu koni yüksekliği 1,5 mm olan bir matkapla delme derinliği; L=2+1,5=3,5 mm) kabul edelim. Buna göre V_f=400·0,15/60=1 mm/s ilerleme hızı için delme süresi $t_{delme}=L/V_f$ =3,5 s ve simülasyon adım sayısı ($t_{delme}/t_{adım}$) 7000 olur. Bu adım değeri, hesaplanacak gerçek adım sayısı için bir tahmin anlamı taşımakla birlikte; simülasyon sürecindeki yeniden elemanlara ayırma (*remeshing*) ve otomatik zaman adım kontrolü sebebiyle gerçek sayı genelde daha fazla olabilir (program bunu otomatik olarak ayarlayacaktır).

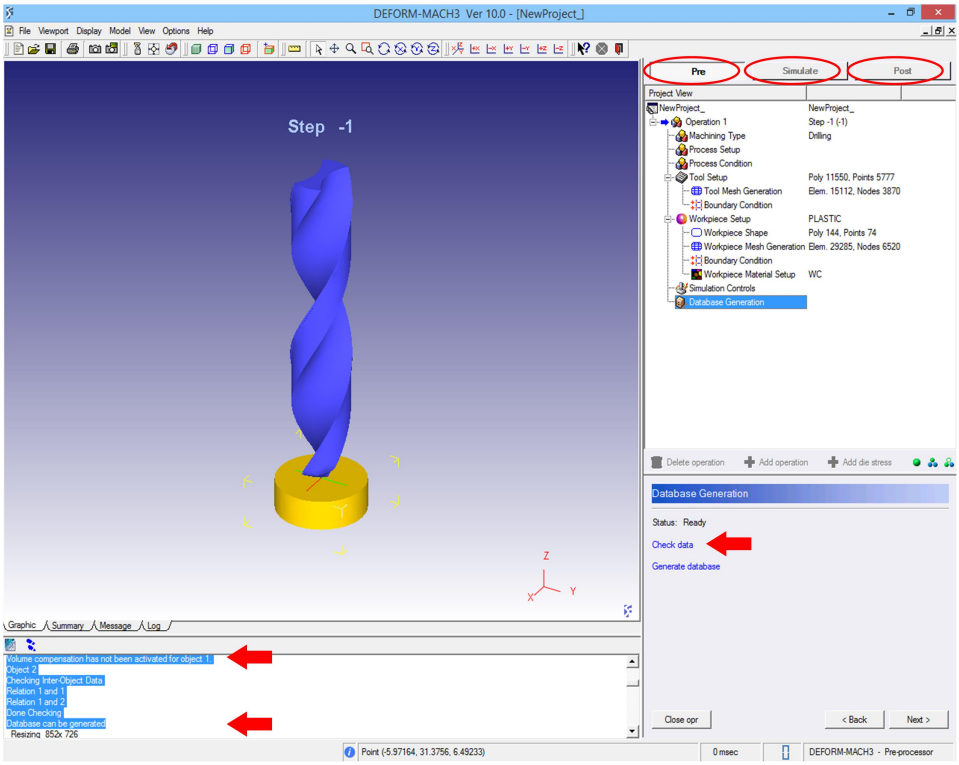
Durdurma kontrolleri; Programda ayarlanabilen çok sayıda durdurma kontrolü/parametresi vardır. Bu parametreler simülasyondaki zaman adımı sayısı, elemanda birikmiş en büyük gerinme değeri, en büyük işlem süresi gibi sıralanabilir [21]. Bir simülasyon, önceden tanımlanmış durdurma parametrelerinden birine ulaşıncaya kadar veya kullanıcı tarafından durdurulunca kadar çalışır. Örneğin işlem parametreleri (*Process Parameters*) sekmesindeki genel kısmından girilen işlem süresi (*Process Duration*) veya birincil takım (matkap) için koordinat biçiminde girilen hareket/yer değiştirme miktarı (*Primary Die Displacement*) ile gelişmiş kısmından girilen birincil takım (matkap) için en küçük hız (*Min. velocity of Primary Die*) ve en büyük yük (*Max. load of Primary Die*) veya herhangi bir elemandaki en büyük gerinme (*Max. strain in any Element*) değerlerinden birine ulaşınca simülasyon durdurulur. Yer değiştirme yalnızca doğrusal hareket için uygun olmakla birlikte; sadece dönme hareketi tanımlanmış ise durdurma kontrolü zamana dayalı olmalıdır [22]. Yukarıda bahsedilen L=3,5 mm delme derinliği göz önüne alınırsa hareket/yer değiştirme miktarı koordinat biçiminde 0, 0, L olarak girilir.

İşlem şartı kontrolleri; İşlem ortamıyla ilgili bilgileri (ısı transferi; ortam sıcaklığı ve taşınım katsayısı) ve genel çözüm davranışıyla ilgili sabitler programda işlem şartları olarak ele alınmaktadır. Programda hava (kuru kesme) için varsayılan ısı transferi taşınım katsayısı değeri hala uygun olup [22] soğutma sıvısı kullanılması halinde uygun değerin bu alana girilmesi gerekir. Su ve yağ bazlı soğutma sıvısı kullanılması halinde ısı transferi taşınım katsayıları sırasıyla $3{,}5\times10^{-3}$ ve 7×10^{-4} Btu/in^2·s·°F (veya ≈10 ve ≈2 N/mm·s·°C) olarak girilir [22].

Arzu edildiği takdirde (varsayılan değerlerin kullanılması tavsiye edilir [22]) simülasyon kontrolleri içerisindeki yeniden elemanlara ayırma (*Remeshing*) ayarları da yapılabilir. Programda yeniden elemanlara ayırma işlemi mutlak veya bağıl ara yüzey girişim derinliği (*Interference Depth*) göz önüne alınarak yapılır. İş parçası üzerindeki komşu iki eleman için bir elemanın kenar uzunluğu, deformasyona neden olan ana nesne (*master object*, matkap) etkisiyle belirtilen nüfuz mesafesi (*Penetration Distance*) kadar diğer elemana nüfuz ettiği takdirde (en büyük nüfuz derinliği, belirtilen değeri aştığında) yeniden elemanlara ayırma (talaş oluşumu) gerçekleşecektir. Matkap yüzeyi ile temasta olan eleman kenarının orta noktası arasındaki mesafe mutlak nüfuz mesafesi ve bu mesafenin orijinal kenar uzunluğuna oranı ise bağıl nüfuz mesafesi olarak ele alınmaktadır (varsayılan değer 0,7).

Deform-3D Machining modülünde nesneler (iş parçası ve matkap) arası veri (*Inter-Object Data*) olarak adlandırılan temas ilişkileri otomatik olarak algılanmaktadır. Bu modülde, özel bir nesneler arası veri ayarı bulunmamaktadır; kesici takım ve iş parçası ara yüzeyi için sürtünme katsayısı ve ısı transfer katsayısı gibi parametreler ise zaten Şekil 2.19'da gösterilen işlem durumu (*Process Condition*) aşamasında girilmektedir.

Buraya kadar anlatılan *ön işlemci* ayar ve düzenlemelerinin son aşamasında Şekil 2.26'da gösterilen veri tabanının oluşturulmasına (*Database Generation*) geçilir. *Check data* komutu çalıştırılarak otomatik veri denetimi kontrol edilir. Program hatalı/eksik durumları kırmızı renkli yazı mesajı ile bildirim penceresinden rapor verir. Böyle bir durumda; kullanıcının *ön işlemci*ye geri dönmesi ve devam etmeden önce bu durumu düzeltmesi gerekir. Mutlaka simülasyonun durmasına neden olmayan muhtemel sorunlara işaret eden bildirimler ise turuncu renkli yazıyla gösterilecektir. Kullanıcının devam etmeden önce bu bildirimlerin kaynağını belirlemesi gerekir.



Şekil 2.26. Veri tabanının oluşturulması

Deform programının bir simülasyon sonucuna etki eden hacimde önemli derecede değişimin olduğu özellikle dövme simülasyonları için bir hacim kontrolü özelliği (hacim

telafisi, *Volume compensation*) vardır. Talaş kaldırma simülasyonlarında genelde turuncu renkli yazıyla "*Volume compensation has not been activated for object 1*" bildirimi gelmektedir. Bu bildirim ise bir talaş kaldırma simülasyonu için her zaman göz ardı edilebilir [22]. Başka herhangi bir hata veya uyarı yoksa artık *Generate Database* komutu ile simülasyon motoru için kullanılacak olan veri tabanı oluşturulur. Bildirim penceresinde yazan "*Done Writing Database*" mesajı ile anlaşılan veri tabanı oluşturma tamamlandıktan sonra "*Close opr*" butonu ile devam etmekte olan operasyondan (*ön işlemci*den) çıkılır.

Simülasyon motoru;

Şekil 2.26'da gösterilen "*Simulate*" butonu kullanılarak simülasyon motoru çalıştırılır ve "*Run simulation*" komutu ile simülasyon başlatılır (başka bir deyişle simülasyon koşulur). Ancak simülasyon yapılan bilgisayar için çoklu işlemci lisansı varsa simülasyon süresini düşürmek amacıyla "*Use multiple processors*" seçeneği işaretlenir (max. işlemci sayısı 4 olmak üzere simülasyon, bu işlemcilere paylaştırılır). Kısmi paralel FEM çözümünde (*Partially parallel using MPI*) simülasyonun sadece çözüm kısmı paralel modda çalışırken direngenlik matrisi modeli, yeniden elemanlara ayırma ve interpolasyon gibi diğer kısımlar tek bir işlemcide çalışır [21]. Tamamen paralel FEM çözümünde (*Fully parallel using MPI*) ise tüm kısımlar paralel modda çalışır (işlemler, işlemcilere paylaştırılır). Simülasyon koşulurken durdurulup, *Continue* komutu ile tekrar kaldığı yerden devam ettirilebilir. "*Simulation Graphics*" komutu ile simülasyonun mevcut durumu izlenebilir ve deformasyon, gerinme, gerilme, hız, sıcaklık gibi çeşitli sonuçlara bakılabilir. Girilen simülasyon kaydetme adım sayısına göre (Şekil 2.25a); bir simülasyon çalışırken periyodik olarak veri tabanı dosyası yeniden adlandırılarak kaydedilir. Arzu edildiği takdirde bu dosya (devam eden simülasyonun son zaman adımından önceki dosya) başka bir veri tabanı dosyası gibi son işlemcide açılabilir.

Son işlemci;

Program, simülasyon tamamlandıktan sonra simülasyon kaydetme adım sayısına göre oluşturulan veri tabanını okur ve istenilen model sonuçlarını gösterir/verir. Son işlemci ile;

- Matkap hareketleri ve kaydedilen her bir adımdaki deforme olan elemanlarla birlikte deforme olmuş iş parçası geometrisi (talaş oluşumu),
- Gerilme, gerinme, sıcaklık ve hasar gibi sonuçların renk gradyanları yardımıyla dağılımları,

- İşlem süresince her bir adımdaki düğümlere ait yer değiştirme veya hızın büyüklük ve yönüne göre vektörel gösterimleri,
- Yük (kesme kuvvetleri) ve hacim gibi değişkenlerin grafiksel gösterimleri

hakkında bilgiler görülebilir/okunabilir.

Alternatif olarak delik delme işleminin *Deform-3D* ana modülü kullanılarak simülasyonu için işlem sırası ise ayrıntılı bir biçimde Bölüm 4.2'de açıklanmıştır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Talaş kaldırma işlemleri (tornalama, frezeleme, delme, vb.) halen birçok araştırmacının üzerinde durduğu önemli bir çalışma konusudur. Yapılan çalışmalar doğrultusunda talaş kaldırma işlemini optimize ederek talaş kaldırma miktarını artırma ve maliyetleri azaltma açısından birçok gelişme sağlanmıştır. Talaş kaldırma sırasında kesici takıma etki eden kuvvetlerin ve kesici takımda oluşan sıcaklıkların ve gerilmelerin belirlenmesi de yıllardan beri birçok araştırmacının ilgisini çekmiş, bu konu hakkında birçok araştırma yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Literatürde delik delme işlemleri üzerine yapılan araştırmalar deneysel çalışmalar ve simülasyon çalışmaları olarak aşağıda ayrı ayrı incelenmiştir.

3.1. Delme İşlemiyle İlgili Deneysel Çalışmalar

Kıvak [2], Inconel 718'in kaplamasız ve kaplamalı karbür matkaplarla delinmesi sırasında kesme parametrelerinin; kesme kuvvetleri, delik kalitesi, yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisini analiz etmiş; yüksek kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarında takım performansı ve delik kalitesinin düştüğünü belirtmiştir.

Yağmur [5]; delik delme uygulama biçimleri (delik tipi, delik boyu ve uygulama biçimi), kesme parametreleri (kesme hızı ve ilerleme) ve kesici takım tipi (kaplamasız ve TiN/TiAl/TiCN kaplamalı solid karbür) girdilerini esas alarak AISI 1050 malzemelerin delinebilirliğini kesme kuvvetleri, moment, sıcaklık ve delik kalitesi (ölçü tamlığı, yüzey kalitesi) açısından değerlendirmiştir.

Çalışmasında yüksek kesme hızlarında talaş kaldırma sırasındaki sıcaklık ölçümünü ve sıcaklık ölçüm metotlarını inceleyen Wan ve diğerleri [23], sıcaklık ölçüm metotlarının (ısıl çift, kızılötesi, fotogrometri, termal boya ve mikro yapısal veya mikro sertlik gözlem) avantaj ve dezavantajlarını araştırmışlardır.

İşlenebilirlikte oluşan kesici takım-talaş arasındaki sıcaklığın takım malzemesi ve iş parçasının niteliklerine bağlı olarak sonuçlandığını inceleyen Q'Sullivan ve Cotterell [24], bu parametrelerin takım aşınmasında önemli bir rol oynadığını deneysel olarak gözlemiştir. Çalışmasında kesici takım için kuvvet bileşenleri tanımlayarak; kuvvet sonucu oluşan

enerjinin takım-talaş ve iş parçası malzemesine bağlı olarak ısıya dönüştüğünü ve takım aşınmasının kesme kuvvetleri ile bağlantılı olduğunu belirtmiştir. Yaptığı deneysel çalışmalar için çeşitli kuvvet ve sıcaklık ölçüm simülasyonları yapmıştır.

Kalidas ve diğerleri [25], farklı matkap kaplamalarının ıslak/kuru delme şartları altında gösterdiği performansı ve delinmiş olan deliğin yapısı ve kalitesi üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışma, artan ilerleme hızlarının kesme sıvılarının yokluğunda daha düşük iş parçası sıcaklıklarına neden olduğu sonucunu göstermiştir.

Kelly ve Cotterell [26], alüminyum alaşımı iş parçası üzerinde çeşitli kuru delme deneyleri yapmış ve ısıl çift kullanarak sıcaklığı ölçerek değişik kesme sıvılarını asgari seviyede kullanmayı incelemiştir. Değişen kesme hızı ve ilerleme koşulları altında, çeşitli kesme sıvısı uygulama yöntemleri kullanarak bir dizi test gerçekleştirmişlerdir.

Dörr ve diğerleri [27], temassız sıcaklık ölçme olan kızılötesi tekniğini ve yüksek çözünürlükteki termografik kamera kullanarak kesici takım ile iş parçası arasındaki temas noktasının sıcaklığını ve talaş akışının sıcaklığını ölçmüşlerdir. Çalışmada değişik kaplama türlerinin sıcaklığa etkisini araştırmışlar ve sıcaklığa karşı mukavemeti en yüksek olan kaplamanın TiAlN+ZrO_2 olduğunu göstermişlerdir.

Zeilmann ve Weingaertner [28] ısıl çift yöntemini kullanarak Ti6Al4V iş parçasının TiAlN, CrCN ve TiCN karbür matkaplar kullanılarak delinmesi sırasında karbür matkaptaki sıcaklığı araştırmışlar, minimum yağlama miktarı şartlarında değişik kaplamaların sıcaklığını değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, karbür takımlarla dahili olarak uygulanan minimum yağlama miktarı ile rahat bir delmenin olacağını göstermişlerdir.

Endo ve diğerleri [29], yumuşak çelik sacların delinmesinde küçük çaplı deliklerin hassasiyet tahmini ve delme parametrelerinin etkisini incelemişler; delik hassasiyetinde matkabın eğilmeye karşı rijitliğinin ve matkabın uç noktası inceliğinin önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Çakır [30], HSS ve karbür matkaplar kullanarak Al 7075 ve Al 6013 alüminyum malzemelerin delinmesi sırasındaki sıcaklık, titreşim, kesme kuvvetleri ve moment gibi

kesme parametrelerini incelemiştir. Yaptığı çalışmada, F_z maksimum kuvvetlere ve momentlere malzeme ve kesme hızının, kesici ve ilerleme kadar etkili olmadığı sonucunu elde etmiştir.

Bağcı ve Özçelik [31], AISI 1040 ve Al 7075-651'in dik işleme merkezinde delinmesi sırasında oluşan kesme sıcaklığını ve kesme kuvvetlerini ölçmüşler; deneylerinde sabit matkap/dönen iş parçası yöntemini kullanmışlardır. Sıcaklık ölçümü için ısıl çift metodunu tercih etmişler, matkap soğutma kanalları içerisine yerleştirilmiş ısıl çiftler yardımıyla üç farklı devir sayısı ve üç farklı ilerleme miktarı kullanarak 10 mm çapındaki TiN/TiAlN kaplamalı matkaplarla 35 mm boyunda aynı parametrelerle üç delik delmişlerdir.

Meral [32], kaplamasız ve TiAlN kaplamalı HSS matkaplarla AISI 1050'nin delme işlemlerindeki (kuru) kesme kuvveti, yüzey kalitesi, delik çapındaki değişim (ölçü tamlığı ile delik giriş ve çıkış ağzı arasındaki eksenel kaçıklık), dairesellikten ve silindiriklikten sapma gibi işlem parametrelerini deneysel olarak araştırmıştır. Kaplamalı matkapların kaplamasız matkaplara göre tüm değerlendirme kriterleri için olumlu sonuçlar sergilediğini, ilerleme kuvveti üzerinde ilerleme hızının kesme hızına göre daha etkili bir parametre olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün artan kesme hızı değerlerine bağlı olarak azaldığını buna karşılık ilerleme hızındaki artışla birlikte arttığını göstermiştir.

Kaplan [33], iki farklı sertlikteki (20/28 HRc) soğuk iş takım çeliğini (AISI D2 ve D3) HSS kesici takımlar kullanarak delme sırasında farklı parametrelerin ilerleme kuvveti, titreşim, moment, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda; malzeme sertliği, kesme hızı, matkap çapı/boyu, ilerleme ve delik sayısının ilerleme kuvveti, moment ve titreşime etkili olduğunu, ayrıca matkap çapı dışındaki diğer deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve çıkış çapağı oluşumuna etkili olduğunu ifade etmiştir.

Ertunc ve Loparo [34], delik delme operasyonu sırasında oluşan kesme kuvveti ve moment değerlerini ölçmüş; anlık olarak ölçülen kesme ve moment değerlerinin değerlendirilmesine yönelik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistemde delik delme anında zamana bağlı olarak değişen kesme kuvveti, moment, vb. şartları daha önceden oluşturulmuş olan değerler tablosuyla karşılaştırarak yorumlanmaktadır. Kıyas için kullanılan değerler tablosu; kesicinin daha önceden kullanılmış ve ilk defa kullanılıyor

olması durumuna göre elde edilen kesme kuvveti, moment, vb. değerlerden oluşmaktadır. Sistem; kesicinin zamana bağlı aşınmasını tahmin ettiğinden delik delme hassasiyetinin korunmasını sağlamaktadır.

Hashmi ve diğerleri [35], bulanık mantık yöntemi ile orta karbonlu, düşük karbonlu ve imalat çeliği malzemeleri, değişik çap ve kalitedeki HSS matkapları kullanarak delik delme operasyonları için en uygun kesme hızı ve ilerlemeyi belirlemeye çalışmışlardır. Geliştirilen yöntem; delinecek malzeme sertliği ile kesme hızı arasındaki ilişkiye yönelik çıkarımlar yapmakta ve sistem imalata yönelik hazırlanmış olan el kitaplarından derlenen bilinenden hareketle bilinmeyeni tahmin etme şeklinde çalışmaktadır. Sistem; sertliği artan malzeme için düşük kesme hızı ve ilerleme önerirken sertliği düşen malzeme için de yüksek kesme hızı ve ilerleme önermektedir.

Mohan ve diğerleri [36], cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin delinmesi sırasında kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve momente etkisini araştırmış ve kesme parametrelerini optimize etmişlerdir. Çalışmadan elde ettiği verilere dayanarak; delmede momente etki eden en önemli parametrelerin kaldırılan talaş hacmi (kalınlığı) ve matkap çapı olduğunu ifade etmişlerdir.

Özer ve Özçatalbaş [37], delik delme metoduyla H-Drill kalıntı gerilme analiz programı kullanarak kalıntı gerilmelerin ölçülmesini ve rozet tip gerinim ölçerlerin kalibrasyonunu amaçlamıştır. Bu amaçla, farklı en kesit alanlarına sahip çelik çekme numunesine ASTM'ye göre standart ve standart dışı D_0/D oranlarına sahip farklı iki tip rozet gerinim ölçerler (RGÖ) uygulanmıştır. Yatay çekme presi ile çelik çekme numunesine 30, 45 ve 60 kN'luk eksenel kuvvetler uygulanmış ve bu kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeler ölçülmüştür. Ayrıca, 60 kN'luk çekme kuvvetinin çelik levhanın farklı kesitlerinde oluşturduğu kalıntı gerilmeler belirlenmiştir. Eksenel çekme gerilmelerinin belirlenmesinde, farklı RGÖ'lerden yaklaşık aynı gerinimler elde edilmiş ve teorik gerilme değerlerine yakın sonuçlar belirlenmiştir. Kalıntı gerilme ölçüm sonuçlarında ise standarda uygun RGÖ'ler teorik değere yakın gerilme değerleri vermiştir. Ancak, standart dışı RGÖ'lerden düşük ölçüm hassasiyeti ve yaklaşık 36MPa daha düşük gerilme değerleri alınmıştır. Bununla birlikte, artan veya azalan kalıntı gerilmeye karşın bu sapma miktarının yaklaşık aynı değerde olduğu belirlenmiştir.

Şekerci [38], delik delme esnasında farklı kesme parametrelerinin kesme bölgesi sıcaklığı, ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda; AISI 316L tipi östenitik paslanmaz çelik malzemesi iki farklı tipte (kaplamasız ve TiN/TiAlN/TiCN çok katmanlı kaplamalı) HSS kesici takımlarla delinmiştir. Dört farklı kesme hızı (15, 20, 25, 30 m/min) ve dört farklı ilerleme miktarı (0,15-0,20-0,25-0,30 mm/rev) değerinin kullanıldığı delme işlemi esnasında oluşan kesme sıcaklıkları kaplamalı ve kaplamasız takımların soğutma kanalları içerisine yerleştirilmiş ısıl çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre; kesme bölgesindeki sıcaklığın artan ilerleme miktarı ile azaldığı, kesici takıma kaplama uygulaması neticesinde, kesme bölgesindeki sıcaklıkların önemli ölçüde düştüğü bilgileri ortaya konmuştur.

Yağmur ve diğerleri [39], AISI 1050 malzemelerin delinebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada; delik tipi (doluya delme ve ön delikli), kesme parametreleri (60, 75, 90, 108 m/min ve 0,15-0,20-0,25 mm/rev) ve kesici takım tipi (kaplamasız ve TiN/TiAl/TiCN kaplamalı solid karbür) girdilerini kullanarak; talaş kaldırma sırasında oluşan sıcaklığı incelemişlerdir. Matkap talaş yüzeyi boyunca meydana gelen kesme sıcaklıkları kaplamasız ve kaplamalı matkapların soğutma kanalları içerisine yerleştirilmiş K tipi ısıl çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; kesme bölgesindeki sıcaklığın artan ilerleme miktarı ile azaldığı gözlenmiştir. Kesici takıma kaplama uygulaması neticesinde, kesme bölgesindeki sıcaklıkla önemli ölçüde düşmüştür. Kesici takıma kaplama yapılması değerlendirilen bütün parametreler açısından önemli avantajlar sağlamıştır.

Tekaud ve diğerleri [40], işlenmesi zor olan AISI H13 sıcak iş çeliği üzerinde delinebilirlik deneyleri yapmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, ilerleme hızındaki bir artışın, hem kaplanmamış hem de kaplanmış matkaplarla işlenen iş parçasındaki itme kuvvetinde bir artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarında matkaplar üzerinde oluşan gerilmeleri analiz edip sonlu elemanlar yöntemi ve ANSYS Workbench paket yazılımını kullanarak matematiksel bir model geliştirilmişlerdir.

3.2. Delme İşlemiyle İlgili Simülasyon Çalışmaları

Kaynak [12]; deneysel ve nümerik yaklaşımlar kullanarak matkap kaplamaları, matkap uç açıları ve değişik kesme parametrelerinin kesme sıcaklıkları ve kesme kuvvetlerine etkisini araştırmıştır. Çalışmasında 10 mm çapında değişik kaplamalı matkaplarla birkaç farklı kesme hızlarında ve ilerleme değerlerinde kuru delme şartlarında Al2024 malzemenin delinmesi esnasında oluşan sıcaklığı ısıl çift yöntemiyle, kesme kuvvetlerini ise dinamometre ile ölçmüştür. Kesme kuvveti ve sıcaklık tahmini için Lagrangian temeline dayalı açık sonlu elemanlar yazılımı olan *Third Wave AdvantEdge*'i kullanmıştır.

Bagci ve Ozcelik [31]; AISI 1040 ve Al 7075-651'in TiN/TiAlN kaplamalı matkaplarla dik işleme merkezinde delinmesi sırasında oluşan kesme sıcaklığını ve kesme kuvvetlerini ölçtükleri deneysel çalışmaları dışında delme işlemini analiz etmek üzere FEM'e dayalı olarak *Third Wave AdvantEdge* yazılımı kullanılarak termal bir model geliştirmişlerdir.

Agapiou ve Devries [41], helisel matkap ucunda (kesici ağız ve talaş yüzeyindeki) geçici sıcaklık dağılımının analitik modelini geliştirmişler; elde ettikleri bu sonuçları deneysel çalışmalarında elde ettikleri verilerle karşılaştırmışlardır. Analitik yöntemle hesaplanan sıcaklıkların, deney yöntemiyle elde edilen sıcaklıklara oldukça yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Delme işlemi sıcaklıkları için Agapiou ve Stephenson [42] yeni bir model geliştirerek bu modelde geçici ve sürekli sıcaklık dağılımını gelişigüzel nokta geometrisinde hesaplamışlar, ısı akışı ve sıcaklık dağılımı analitik olarak modellemişlerdir.

Ansys programının kullanıldığı Nedelik ve Lux'un [43] çalışmasında, kaplama yapılmış çeşitli takımlarda oluşan sıcaklık dağılımı için termal bir model geliştirilmiş; kaplama işleminin kesici takımın yüzey sıcaklıklarında etkili olduğunu belirterek, soğutma sıvısı kullanmaksızın kesme hızını artırmayı başarmışlardır. Kesme işlemi sırasındaki mekanik kuvvetin kesme şartlarına (hız, ilerleme) bağlı olarak yüksek oranda ısıya dönüştüğünü, ısı oluşumunun kesici takım malzemesi ve geometrisine bağlı olduğu kadar işlenen malzemeye de bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Genel olarak takım-talaş yüzeyi ve talaş kayma bölgesinde ısı artışının olduğunu ve oluşan sıcaklıkla kesici takımdaki aşınmaların arttığını ve takım ömrünün azaldığını gözlemişlerdir.

Bono ve Ni [44], ısı yayılımının kuru delmedeki delik çapı ve silindirikliğine etkisi için FEM modelleri oluşturmuşlardır. Modellerden birinde *Abaqus* yazılımını kullanarak silindirik iş parçasını iki boyutlu asimetrik FEM modeli olarak ele alırken, diğer modelde 4 düğümlü bilineer sıcaklık ve yer değişim elemanlarından yararlanmışlardır.

Ti-6Al-4V alaşımına sahip titanyumun yüksek hızda helisel matkapla boydan boya delinmesinde sıcaklık ve gerilme dağılımlarını inceleyen Li ve Shih [45]; ters ısı transferi metodunu kullanan bir sonlu elemanlar ısıl modeli kullanarak takım-talaş temas alanındaki ısı dağılımını ve kesme sıvısının konveksiyon ısı iletim katsayısını bulmaya çalışmışlardır. Matkap gerilme dağılımı için termo-mekanik sonlu elemanlar analizi uygulamışlar; kesme sıvısı uygulamanın, matkabın kesici ve kanal kenarları çevresindeki sıcaklığı düşürmede önemli olduğunu göstermişlerdir.

Marasi [46] ile Poutord ve diğerleri [47] delme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini FEM'e dayalı olarak *Deform2D* yazılımıyla incelemişlerdir. Benzer biçimde Gao ve diğerleri [48] ile Sha ve diğerleri [49] delme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisini FEM'e dayalı olarak araştırmışlardır. Singh ve diğerleri [50] fiber takviyeli plastiklerin kuru şartlarda delinmesi sırasında kesme kuvveti ve tork gibi işlem çıktıları üzerindeki girdi değişkenlerinin etkisini analiz etmek üzere ProE yazılımını kullanarak bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model, matkap geometrisinin matkap ve iş parçası üzerindeki sıcaklık değişimlerini anlamaya yardımcı olmuştur. Kyratsis ve Bilalis [51] delme işlemi sırasındaki kesme kuvvetini analiz etmek üzere *Drill3D* yazılımını kullanarak üç boyutlu bir CAD modeli önermişlerdir. Choi ve diğerleri [52, 53]; gerekli dayanım gerekliliklerini karşılayacak biçimde ağırlığı azaltmak üzere özellikle uzay sanayiinde tercih edilen, çok katmanlı (iki katmandan oluşan AISI 304L paslanmaz çelik) malzemelerin delinmesi sırasında oluşan çapak oluşumunu FEM'e dayalı olarak *Abaqus* yazılımı yardımıyla incelemişlerdir. Gao ve diğerleri [54, 55] FEM'e dayalı olarak *Pro/E* ve *Deform3D* yazılımlarını kullanarak; paslanmaz çelik iş parçasının delinmesi sırasında delme parametrelerinin talaş kaldırma, kesme kuvveti ve sıcaklık üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Wang ve diğerleri [56] honlanmış kesme kenarı bulunan K kalite karbür matkapların honlama büyüklüğünün kesme kuvveti ve tork üzerindeki etkisini *AdvantEdge* yazılımı yardımıyla incelemişlerdir. Muhammad ve diğerleri [57] bir sonlu eleman modeli kullanarak iş parçası malzemesinin delme işlemindeki tork, kesme kuvveti ve talaş kaldırmaya etkisini araştırmışlardır. Sun ve

diğerleri [58] delme işlemindeki devir sayısı ve ilerlemenin tork ve kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemek üzere bir sonlu eleman modeli önermişlerdir. Benzer biçimde Abouridouane ve arkadaşları [59] *Deform3D* yazılımını kullanarak paslanmaz çelik malzemelere mikro delik delme için ve Qi ve diğerleri [60] de ortopedik cerrahi uygulamaları için femur kemiğine delik delme sırasında matkapta (normal ve boru profilli) oluşan gerilmeleri değerlendirmek üzere bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. AISI 1040 iş parçası malzemesi üzerindeki deneysel çalışmalarla destekledikleri araştırmalarında Gök ve diğerleri [61]; *Deform3D* yazılımı yardımıyla 118° uç ve 20°, 25°, 30° helis açılarına sahip HSS matkaplar kullanarak delme sırasında oluşan kesme kuvveti ve tork incelemesi yapmışlardır. Chatterjee [62] AISI 316 iş parçası malzemesi üzerinde deneysel çalışmalar yaparak desteklediği araştırmasında, *Deform3D* yazılımını kullanarak; devir sayısı, ilerleme ve matkap çapının delme sırasındaki çapak oluşumu, yüzey pürüzlülüğü, daireselliğe etkisini incelemiştir.

Gardner ve Dornfeld [63], FEM'e dayalı olarak *Deform3D* yazılımı ile delme gibi oldukça karmaşık işleme sürecinin simülasyonunda; matkap geometrisi, iş parçası kalınlığı (matkap çapının en az yarısı kadar olan), simülasyon zaman ayarları, matkap ve iş parçası için malzeme modelleri (matkabın rijit olmalıdır), elemanlara ayırma (boyut oranı 4 yeterlidir, en küçük eleman boyutu ilerlemenin ¼'ü kadar olmalı ve matkapla iş parçasının temasta bulunduğu yerlerde daha küçük boyutlu elemanlar olmalı) ve eleman sayısı (iş parçası için 20000 eleman yeterlidir) ile sınır ve temas şartları gibi dikkat edilmesi gereken hususlara dikkat çekmişlerdir. Gardner ve diğerleri [64] kaliteli ve kapsamlı bir analiz yapılabilmesi için uygun FEM yazılımının seçimi üzerinde durmuşlar; *Deform*, *AdvantEdge* ve *Abaqus* yazılımlarını kullanarak özellikle çapak oluşumu açısından yazılımların avantaj ve dezavantajlı yönlerini incelemişlerdir. Çeşitli delme simülasyonları yaparak hızlı ve malzeme özellikleri, matkap ve iş parçası geometrik modelleri ile işlem parametrelerini tanımlama açısından kolay bir simülasyon için *Deform* ve *AdvantEdge* yazılımlarının kullanılabileceğini göstermişlerdir. Benzer biçimde Constantin ve diğerleri [65] de *Deform*, *AdvantEdge* ve *Abaqus* yazılımlarını kullanarak tornalama, frezeleme ve delme işlemlerindeki kesme kuvvetleri, gerilmeler, talaş oluşumu, takım aşınması ve sıcaklık gibi parametreleri ve yazılımların etkinliğini incelemişlerdir.

Attanasioa ve diğerleri [66], nikel bazlı alaşımların, özellikle Inconel 718'in delinmesinde takım aşınmasını *Deform-3D* yazılımı kullanarak, simüle etmeyi hedeflemişlerdir. Yapmış

oldukları çalışmayla, bu tür malzemelerin işlenmesinde, takım aşınmasının sebep olduğu termal ve mekanik olayların yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisinin en önemli konu olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle, takım aşınmasının takım ömrü, son parça kalitesi ve kesme kuvveti ile güç tüketimi üzerindeki etkisini incelemenin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmayla takım aşınmasına, seçilen kesme parametrelerine (kesme hızı, ilerleme) bağlı olarak çeşitli olayların (yapışma, aşınma, erozyon, difüzyon, korozyon, kırılma vb.) neden olduğu ortaya çıkmıştır. Bazı durumlarda, bu aşınma mekanizmaları, işleme dahil olan fiziksel büyüklüklerin fonksiyonu olan analitik modeller ile tanımlanabileceği (kesme yüzeyi boyunca sıcaklık, basınç ve kayma hızı) sonucuna varılmıştır.

Majeed ve diğerleri [67], yapmış oldukları çalışmada, yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı çelik olan AISI4340 çeliğin kuru şartlardaki delme işleminde matkap ucu sıcaklığının etkisini, nümerik ve deneysel olarak incelenmişlerdir. Bu çalışmada *Deform-3D* yazılımı ile delme işlemi için bir 3D sonlu eleman modeli gerçekleştirmişlerdir. Delme işlemlerinin sonlu elemanlar analizi sırasında, matkap ucundaki takım sıcaklığı sayısal olarak elde edilmiş olup deneysel yapılan matkap ucu sıcaklığıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel aşamada ise, matkabın takım ömrü farklı işleme koşullarında ölçülmüştür. Çalışma sonuçları, matkap ucu sıcaklığının deneysel ve sayısal sonuçları arasında iyi bir uyumun olduğunu göstermiştir. Takım ömrünün ve takım sıcaklığının birbiriyle ilişkili olduğu gözlenmiştir. En uygun parametreler seçilerek takım ömrünün arttırılabileceği sonucuna varılmıştır.

Su ve diğerleri [68], *Deform-3D*'yi kullanarak Ti-6Al-4V'nin delinmesi için bir 3D FE modelini geliştirilmişlerdir. Çalışmalarında delme parametrelerinin işleme performansı üzerindeki etkisini araştırmak için farklı ilerleme ve delme hızlarında simülasyonlar yapmışlardır. Simülasyon sonuçları, işleme parametrelerinin delme kuvveti, tork ve maksimum takım sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermiştir. Böylelikle FE simülasyonlarına göre Ti-6Al-4V'nin delinmesi için optimum delme parametreleri önermektedirler.

Sha ve diğerleri [69], karbon fiber takviyeli plastiklerin delinmesine yönelik olarak yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir işleme modeli sunmuşlar ve *Deform-3D*'yi kullanarak çeşitli delme simülasyonu yapmışlar, deliğin işleme kalitesini etkileyen faktörleri ortaya çıkarmışlardır. Simülasyon sonuçlarının literatür ve deneylerden

elde edilen sonuçlara uygun olduğunu ve delme parametrelerinin optimizasyonunda ve delme kalitesinin iyileştirilmesinde kanıt olarak kullanılabileceği sonucunu elde etmişlerdir.

Liu ve diğerleri [70], *Deform-3D* sayısal simülasyon teknolojisini kullanılmışlar ve bir delme FEM modeli oluşturmuşlar; iş parçasının, delme işleminin indekslenebilir kesici uçlarla dinamik simülasyonu yoluyla eşdeğer gerilimi ve sıcaklığını elde edilebilmişlerdir. Dahası bu çalışmayla, delme işlemi sırasında iki bıçak tarafından maruz bırakılan kesme kuvveti, karbürün radyal kuvveti ve tork analiz edilerek tahminler yapılmıştır. Diğer taraftan, bıçağın aşınması da bu çalışmada değerlendirilmiştir.

Yavuz [71], delik delme işlemlerinde matkabın, GGG 50 malzemesi üzerinde delik kalitesi ve kesme performansına olan etkisini incelemiştir. Bunun için mevcut matkap ve geliştirilen özgün matkap geometrilerini kullanarak deneysel ve simülasyon çalışmaları yapmıştır. Çalışmada, ticari olarak tedarik edilebilen iki farklı matkap geometrisi ile bu çalışma kapsamında geliştirilen iki yeni matkap geometrisini; ilerleme kuvveti, moment ve delik kalitesi (geometrik toleranslar ve yüzey pürüzlülüğü) verilerine göre deneysel olarak karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlarını Anova analizi, taguchi S/N analizi ve gri ilişkisel analizi kullanarak değerlendirmiştir. Matkap tasarımı simülasyon tabanlı bütünsel bir yaklaşımla elde edilmiş ve üretilmiştir. Simülasyonlar *Deform* yazılımı kullanılarak yapılmış, deneysel ve simülasyon analizlerinin sonuçları değerlendirilerek optimum geometri ve optimum işleme şartları belirlenmiştir. Geliştirilen matkap formları içerisinde 3 numaralı takım geometrisinin kesme performansına etkisi deneysel olarak incelendikten sonra geliştirilen 4 numaralı matkap geometrisinin diğer ticari olarak tedarik edilebilen 1 ve 2 numaralı matkaplardan ve bu çalışma kapsamında geliştirilen 3 numaralı matkaptan daha başarılı olduğunu gözlemlemiştir.

Lotfi ve diğerleri [72], AISI 1045 çeliğin delme işlemini ve özellikle matkap yüzeylerindeki ısı ve aşınmayı incelemek için bir 3D sonlu elemanlar modeli geliştirilmişlerdir. Matkap aşınmasını modellemek için değiştirilmiş bir Usui serbest yüzey aşınma oranı kullanılmış ve deneyler, *Deform-3D* ile simüle edilen modelin doğrulanması ve yüzey pürüzlülüğünün ve biriken kenarın değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışma, öngörülen ve deneysel itme kuvvetleri ile aşınma oranlarının karşılaştırılmasıyla

tahmin edilen değerlerin düşük hatalara sahip olduğunu ve gelişmiş modelin daha fazla analiz için faydasını gösteren deney değerleriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuştur.

Allaparthi ve diğerleri [73], yapmış oldukları araştırmada, çok katmanlı baskılı devre kartı (PCB) malzemesinin mikro delinmesi için sonlu eleman simülasyonu gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, CATIA V6 yazılımıyla 04 katmanlı PCB malzemesinin işlenmesi için geleneksel ve ultrasonik titreşim destekli mikro delmeyi simüle eden üç boyutlu (3D) sonlu bir eleman (FE) modeli geliştirilmişlerdir. Çeşitli PCB malzemeleri katmanlarında meydana gelen von-Mises gerilmeleri formundaki sonuçlar sunulmuştur. İtme kuvvetlerinin hız ve ilerlemeye göre değişimi, simülasyonlu işleme koşulları için grafiksel olarak gösterilmiştir. Ultrasonik titreşim destekli mikro delmenin FE simülasyonu yapılırken oluşan itme kuvvetleri, analitik sonuçlar ve önceki deneysel referanslarla karşılaştırılmıştır.

Yaşar [74], farklı ilerleme hızı ve kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Delme deneyleri, üç farklı kalite ve geometriye sahip matkaplarla gerçekleştirilmiştir. Delme değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvveti üzerindeki etkisi, gri ilişki analizinin "daha küçük-daha iyi" yaklaşımı metoduna göre araştırılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen en yüksek ve en düşük gri ilişki dereceleri sırasıyla 0,828 ve 0,338 olmuştur. İtme kuvveti için sayısal analizler, sonlu elemanlar metoduna dayanan *ThirdWaveAdvantEdge* simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel ve simülasyon itme kuvveti değerleri arasında ortalama %4,9 fark olduğunu ve sonlu eleman modelinin uygulanabilirliği de bu çalışmayla kanıtlanmıştır.

3.3. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Literatürde incelenen çalışmalar ışığında delme işlemi açısından genel olarak sıcaklık, kesme kuvvetleri ve tork kuru işlemede önemli kriterler olarak görülmektedir. Delme sırasında oluşan sıcaklığın kontrol edilememesi iş parçası ve kesici takımın önemli ölçüde etkilenmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu sıcaklık etkisi; kesici takımda değişik aşınma türlerine yol açarak takım ömrünün azalmasına ve iş parçası açısından ise yüzey kalitesinin olumsuz yönde etkilenmesine ve kimyasal yapısında istenmeyen değişikliklere yol açmaktadır. Bu sebeplerden dolayı delik delme işlemlerinde sıcaklık, kesme kuvvetleri ve tork üzerinde pek çok araştırma yapıldığı gözlenmiştir.

Matkaplar en yaygın metal işleme takımları arasında yer almasına rağmen talaş kaldırma mekanizmasının en karmaşık ve en az anlaşılanlarından biridir. Bu sebeple matkap geometrisinin incelenmesi ve delme performansını geliştirmeye yönelik bazı çalışmaların da yapıldığı gözlenmiştir [75-78]. Diğer kesici takım tipleri ile karşılaştırıldığında daha karmaşık bir yapıya sahip olan helisel matkap geometrisi tasarımı; düşük kesme kuvveti, aşınma direnci, burulma ve eğilme dayanımı, talaş tahliye yeteneği ve daha pek çok parametrenin tamamını bir arada değerlendirmeyi gerektirmektedir.

Delme işleminin karmaşıklığını daha iyi anlamak için önerilen sonlu eleman modellerinde matkap sıcaklığı, kesme kuvvetleri, tork ve matkaptaki aşınma gibi parametreleri araştırmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır [12, 31, 41-62]. Nümerik çalışmalar açısından genel olarak *Deform* yazılımının araştırmacılar tarafından tercih edildiği görülmüştür. Bunların dışında özellikle statik durumdaki matkap gerilmelerinin de araştırmacıların ilgisini çektiği gözlenmiştir [79,80].

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında, delik delme sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve tork etkisiyle kesici takımda meydana gelen gerilmelerin analiz edilmesi ve simülasyon sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve torkun karşılaştırılması amacıyla bir dizi kesme deneyi yapılmıştır.

4.1.1. İş parçası malzemesi

Yapılan deneysel çalışmalarda karbon çelikleri referans alınmıştır. Bu kapsamda 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 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 [81]

Yoğunluk	(kg/m^3)	7860
Elastikiyet modülü	(GPa)	208
Poisson oranı		0,297
Özgül ısı	(J/kg°K)	477
Isıl iletkenlik	(W/m°K)	49,6
Isıl genleşme	(J/kg°K)	$11,65\times10^{-6}$

4.1.2. Kesici takımlar

Sinterlenmiş karbür delik takımlarının yüksek verim ve işlem maliyetlerinin düşük olması HSS (yüksek hız çeliği) matkaplara tercih edilmelerini ve sürekli geşiştirilmelerinin önünü açmıştır. Yekpare sinterlenmiş karbür matkaplar için takım ömrü, HSS matkapların 20 kat civarıdır ve kesme hız kapasitesi aynı ilerleme oranı için 10 katı yüksektir. Günümüzde kullanılan matkapların uç geometrisi geleneksel kesme kenarının kesme hareketini büyük

oranda geliştirirken takım malzemeleri de performansı ve takım ömrünü büyük ölçüde arttırmıştır. Yekpare karbür helisel matkaplar genellikle, işlem ve tezgâh çeşidine bağlı olarak daha düşük kesme hızlarında, daha yüksek ilerlemelerde çalışırken değiştirilebilir kesici uçlu matkaplar ise yüksek kesme hızları, düşük ilerlemeler için kullanılır [5].

Bütün bu hususlar göz önünde bulundurularak, çalışmada *Sandvik* R840-1400-30-A1A-H10F kaplamasız (K25) ve R840-1400-30-A1A 1220 çok katmanlı (TiAlN/TiN) kaplamalı (P25) yekpare helisel karbür matkaplar kullanılmış; matkapların çapı $\varnothing D$=14 mm, sap uzunluğu 45 mm, kanal boyu 60 mm olan ve başlıca kısımları Şekil 2.6'da verilmiş olan matkap seçilmiştir. Matkapların delme derinliği olarak $3\times\varnothing D$=42 mm seçilmiştir. Matkapların uç açısı140^{o} olup helis açısı da $31,8^{o}$'dir.

4.1.3. Takım tezgâhı

Talaş kaldırma deneyleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan ve teknik özellikleri Çizelge 4.3'te verilen Johnford VMC-550 CNC dikey işleme merkezinde yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan tezgahın teknik özellikleri

İşletim sistemi	Fanuc
Tezgâhın gücü (kW)	5
En yüksek devir sayısı (rpm)	8000
Sırayla x, y, z ekseni sınırları (mm)	600, 500, 600
Ölçü hassasiyeti (mm)	0,001

4.1.4. Kesme kuvvetleri ve momentin ölçülmesi

Kesme kuvvetleri ve momentin ölçülebilmesi için Şekil 4.1'de gösterilen ve teknik özellikleri Çizelge 4.4'te verilen kuartz *Kistler 9272-A* tipi dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre tarafından eş zamanlı olarak hissedilen kesme kuvveti (F_x, F_y, F_z) ve moment (M_z) verileri (elektriksel gerilim değerleri); *Kistler 1667A5* data kablosu, *Kistler Type 5070-A Amplifier* (yükselteç) yardımıyla ve *Kistler Type 2825A1-2 Dynoware* yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Çizelge 4.4. Kistler 9272-A tipi dinamometrenin teknik özellikleri

Ölçme aralığı	F_x, F_y (kN)	-5….5
	F_z (kN)	-5….20
	M_z (Nm)	-200…200
Hassasiyet (pC/N)	F_x, F_y	-7,8
	F_z (pC/N)	-3,5
	M_z (pC/Nm)	-160
Doğrusallık		%≤±1 FSO
Histerezis		%≤1 FSO
Kapasitans (pF)	F_x, F_y, F_z	185
	M_z (pF)	420



Şekil 4.1. Kistler 9272-A tipi dinamometre

Mekanik ve ısıl gerilmelere yol açan ilerleme hızı, talaş oluşumu için belirleyici bir faktördür ve güç tüketimini de etkiler. Yüksek ilerleme hızı; iyi talaş kontrolü, daha düşük kesme süresi, daha yüksek matkap kırılma riski ve daha kötü delik kalitesi anlamına gelebilmektedir. Güç tüketimini etkileyen kesme hızı takım ömrünün belirlenmesinde temel faktördür. Aşırı yüksek kesme hızları; matkap üzerinde hızlı serbest yüzey aşınmasına, kesme kenarlarında plastik deformasyona, düşük delik kalitesine ve tolerans dışı sonuçlara neden olabilir. Çok düşük kesme hızları ise matkap üzerinde talaş yığılması oluşumuna, talaş tahliyesinin olumsuz etkilenmesine ve düşük verimlilik/delik başına yüksek maliyete neden olur. Kesme parametreleri belirlenirken en önemli etkenler iş parçası ve matkap malzeme çiftinin özellikleridir. Bu sebeple, kesme parametreleri belirlenirken; kullanılan iş parçası ve matkap için üreticiler tarafından önerilen değerler dikkate alınmıştır. Bütün bu bilgiler ışığında kesme deneyleri için kesme parametresi olarak V_C=60-75-90-108 m/min kesme hızı ve f=0,15-0,20-0,25 mm/rev ilerleme değerleri

seçilerek; ilerleme kuvveti (F_z) ve döndürme momenti (veya tork, M_z) deneyler yapılarak dinamometre yardımıyla ölçülmüştür.

4.1.5. Deneylerin yapılışı

Deneylerde dış çapları 25 mm olacak şekilde tornalanarak hazırlanan *dolu* ve $\varnothing d$=½×$\varnothing D$=$\varnothing$7 mm olarak boydan boya *ön delikli* numuneler olmak üzere iki farklı tipte numune kullanılmıştır. Bu deneylerde kaplamasız takımlarla yapılan delme işlemlerinde, 3×$\varnothing D$=42 mm derinliğinde deliklerin delinememesi nedeniyle, bütün numuneler için 35 mm derinliğinde delikler açılmıştır.

4.2. Simülasyon ve Analiz Çalışmaları

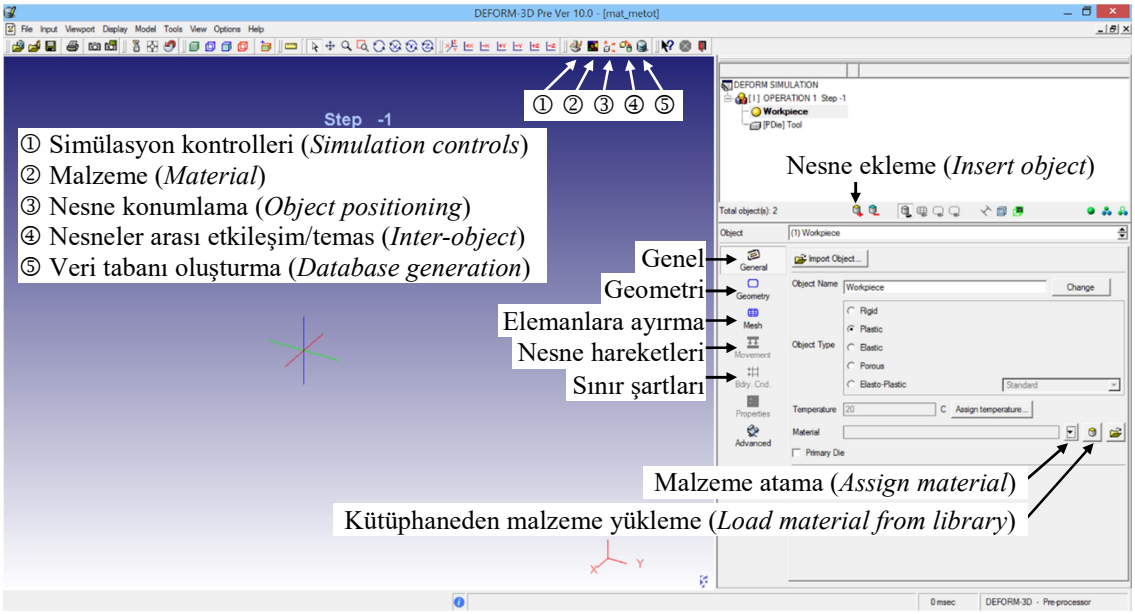
Deform'da matkap devir sayısının karakteristik davranışını oluşturmak gerektiğinden simülasyonlar zaman alıcıdır. Bu sebeple; literatürde [22, 63-65] belirtilen uyarılar göz önünde bulundurularak, problem/simülasyon boyutunun optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda özellikle iş parçası geometrisi (çap ve kalınlık açısından) mümkün olduğunca küçük tutulmuş ve yeterli talaş geometrisi verecek biçimde elemanlara ayırma uygulanmıştır.

Bölüm 2.8.3'de *Deform-3D Machining* yardımcı modülü kullanılarak delik delme işleminin simülasyonunun nasıl yapıldığı adım adım açıklanmıştır. Ancak özellikle iş parçası için elemanlara ayırma işleminde ve *STL* uzantısıyla çağrılan iş parçası/matkap geometrik modellerinin konumlandırılmasında esneklik sağlaması sebebiyle; delme işleminin simülasyonu, *Deform-3D* (V10) *Pre* ve *Simulator* ana modülleri yardımıyla yapılmış olup aşağıda ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

Deform-3D Pre ana modülünde iş parçası (*Workpiece*) ve *Insert object* komutu ile oluşturulan matkap (*Tool*) için aşağıda kısaca özetlenen işlemler yapılmıştır (Şekil 4.2);

- Geometrik modelleri oluşturma ve nesneleri konumlandırma,
- Malzeme modellerini tanımlama,
- Nesneleri elemanlara ayırma (*meshing*),
- Nesne hareketlerini (öteleme/dönme) tanımlama,

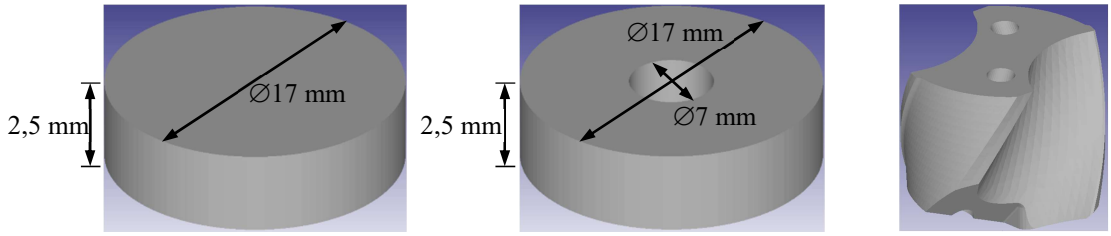
– Sınır şartlarını (yer değiştirme/ısı transferi) tanımlama,
– Nesneler arası etkileşimi/teması tanımlama,
– Simülasyon kontrollerini tanımlama ve
– Veri tabanı oluşturma.



Şekil 4.2. Deform-3D Pre ana modülü

4.2.1. Geometrik model oluşturma ve nesneleri konumlandırılma

Simülasyonlarda yüksekliği 2,5 mm ve dış çapları 17 mm olacak şekilde *dolu* ve boydan boya ∅7 mm'lik öndeliğe sahip *ön delikli* olmak üzere iki farklı iş parçası modeli ile matkap üzerinden doğrudan ölçü alınarak ve kesici takım üreticisi kataloğundan yararlanılarak oluşturulan matkap modeli kullanılmıştır (Şekil 4.3). İş parçası ve matkap için geometrik modeller öncelikli olarak SolidWorks 2014 programında oluşturmuş ve daha sonra geometri sekmesindeki *Import object* komutu ile "*.STL*" uzantısı yardımıyla çağrılmıştır. Modellerin çağrılmasından sonra, programdaki orijin ve özellikle matkabın dönme ekseni ve ilerleme yönü göz önünde bulundurularak eksenlerin doğrultuları ve yönleri dikkate alınarak nesneler konumlandırılmıştır. Literatürdeki çalışmalara [22, 61-65] paralel olarak nesne tipi (*Object Type*) iş parçası için plastik ve matkap için de rijit olarak seçilmiştir.

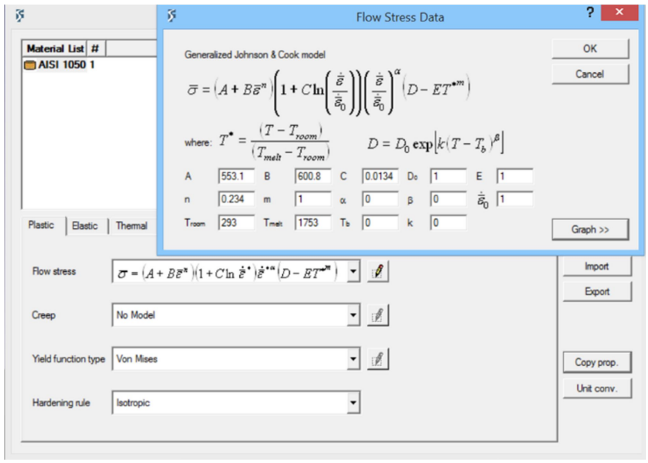


Dolu iş parçası modeli | Ön delikli iş parçası modeli | Matkap modeli

Şekil 4.3. Simülasyonlarda kullanılan geometrik modeller

4.2.2. Malzeme modelleri

İş parçası malzemesinin (AISI 1050) programdaki malzeme kütüphanesinde bulunmaması sebebiyle; Şekil 2.24 doğrultusunda yapılan açıklamalara (Bkz. Sayfa 32-34) benzer biçimde AISI 1050 çeliği için yeni bir malzeme modeli tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. İş parçası malzeme modeli

AISI 1050 çeliğinin simülasyon sürecindeki talaş oluşumu için gerekli olan akma davranışı Johnson-Cook akma gerilmesi modeli yardımıyla tanımlanmıştır. Eş. 2.31'de verilen genelleştirilmiş Johnson-Cook akma gerilmesi modeli doğrultusunda literatürden [20, 82] elde edilen parametreler ve Çizelge 4.2'de gösterilen malzemenin elastik ve termal özellikleri girilmiştir. Şekil 2.24c, d, e'de de gösterildiği gibi Şekil 4.4'te verilen pencere görüntüsünden (*Plastic*, *Elastik* ve *Thermal* sekmelerinden) girilen parametreler Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. AISI 1050 için malzeme modeli parametreleri [20, 82]

Johnson-Cook akma gerilmesi parametreleri	A (MPa)	B (MPa)	C	D_0	E	n	m
	553,1	600,8	0,0134	1	1	0,234	1
	T_{rom} (°K)	T_m (°K)	α	β	$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$	T_b	k
	293	1733	0	0	1	0	0
Elastik özellikler	Elastikiyet modülü (GPa)			208			
	Poisson oranı			0,297			
	Isıl genleşme (J/kg°K)			$11{,}65\times10^{-6}$			
Termal özellikler	Isıl iletkenlik (W/m°K)			49,6			
	Isı kapasitesi (J/m^3°K)			3,749			
	Emisivite			0,7			

Matkaba ait geometrik modelin oluşturulmasından sonra kaplamalı ve kaplamasız matkaplar için uygun malzeme modelleri oluşturulmuştur. Malzeme modeli oluşturmak için matkap üreticisinin (*Sandvik*) web sayfasında ve ilgili takım kataloglarında kaplamasız ve kaplamalı matkaplara ait gerekli bilgiler (elastikiyet modülü, Poisson oranı, ısıl genleşme, ısıl iletkenlik, ısı kapasitesi ve kaplama kalınlığı) elde edilemediği için programın malzeme kütüphanesindeki veriler kullanılmıştır. Buna göre kaplamasız matkaplar sementit karbür (WC) malzeme modeliyle tanımlanmıştır. Kaplamalı matkapların malzeme modeli ise ana malzeme (gövde) için WC ve sonra toplam 10 μm kaplama kalınlığına sahip sırasıyla TiAlN ve TiN malzeme modelleriyle tanımlanmıştır. Çizelge 4.6'da kaplamasız ve çok katmanlı kaplamalı matkaplar için kullanılan malzeme modeli özellikleri gösterilmiştir.

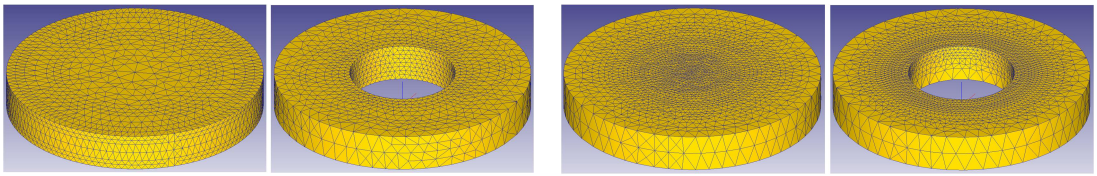
Çizelge 4.6. Matkap için malzeme modeli parametreleri [21]

	Kaplamasız	Çok katmanlı kaplamalı	
	WC	TiAlN	TiN
Kaplama kalınlığı (μm)	-	5	5
Elastikiyet modülü (GPa)	650	440	600
Poisson oranı	0,25	0,23	0,25
Isıl genleşme (J/kg°K)	5×10^{-6}	$9{,}2\times10^{-6}$	$9{,}4\times10^{-6}$
Isıl iletkenlik (W/m°K)	59	12 (0° ve 20°C için), 20 (1000°C için)	25
Isı kapasitesi (J/m^3°K)	15	15	12
Emisivite	0,85 [70]	0,5	0,21 [71]

4.2.3. Elemanlara ayırma

Üçgen piramit biçimli (*tetrahedral*) elemanlara ayırma (*meshing*) süreci; nesnenin girilen eleman sayısı ve boyut oranına göre elemanlarına ayrılması ve sonrasında da çözüm bölgesi olan delik çevresinin ilerleme değerine göre lokal elemanlarına ayrılması olmak üzere genel olarak iki aşamadan oluşmaktadır.

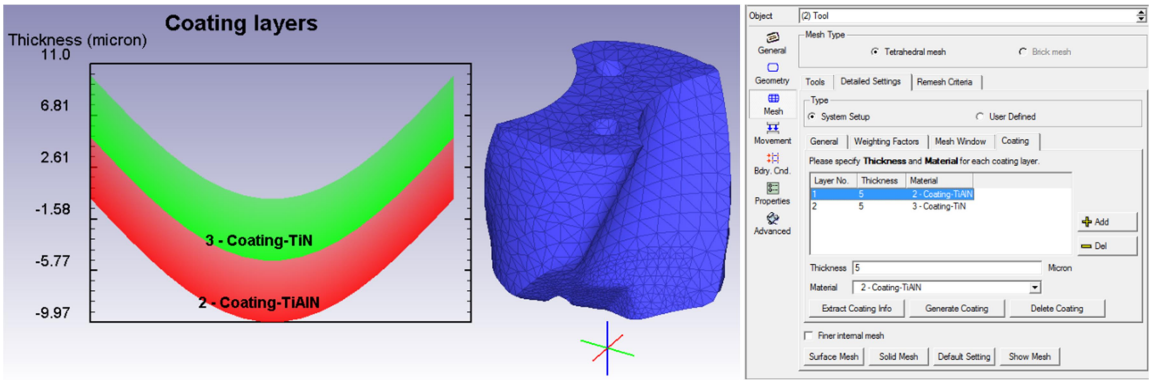
Simülasyonların doğruluğu açısından iş parçasının uygun büyüklükteki elemanlara ayrılması son derece önemlidir [22]. İş parçası için bağıl elemanlara ayırma yöntemi yardımıyla eleman sayısı 20000 seçilmiş (başlangıç değeri olup çözüm bölgesi çevresindeki lokal eleman boyutuna göre değişiklik arz etmektedir) ve eleman boyut oranı 10 kullanılarak Şekil 4.5a'da gösterilen elemanlara ayırma uygulanmış; dolu iş parçası modeli için 17700 eleman (4095 düğüm) ve ön delikli iş parçası modeli için de 15974 eleman (3780 düğüm) elde edilmiştir. Literatüre [22] paralel olarak çözüm bölgesi olan delik çevresinin lokal elemanlarına ayrılması için *Weighting Factors* ile birlikte *Mesh Window* sekmelerinden yararlanılmıştır. Buna göre tüm ilerleme değerleri için iş parçası modellerinde kullanılan ağırlık faktörleri (*weighting factors*); *surface curvature / temperature distribution* = 0 ve *strain distribution / strain rate distribution / mesh density windows* = 0,333 olarak ayarlanmıştır. *Mesh window* sekmesinde ise boyut oranı 0,1 seçilerek 0,45 mm kalınlığında (yüzeyden ± 0,225 mm yukarıda ve aşağıda), dolu ve ön delikli iş parçası modelleri için iş parçası yüzeyinin merkezinde sırasıyla 0,15 ve 3,65 mm yarıçaplı silindirik pencere biçimi tanımlanarak Şekil 4.5b'de gösterilen lokal elemanlara ayırma uygulanmıştır. Dolu ve ön delikli iş parçası modelleri için toplam eleman sayıları sırasıyla 20637 eleman (4659 düğüm) ve 20911 eleman (4798 düğüm) olmuştur. Dolu ve ön delikli iş parçası modelleri için ilgili *STL* uzantılı modellerde kullanılan nokta ve poligon sayılarındaki farklılıklar sebebiyle eleman ve düğüm sayıları farklılık arz etmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.5. İş parçası modelini elemanlara ayırma

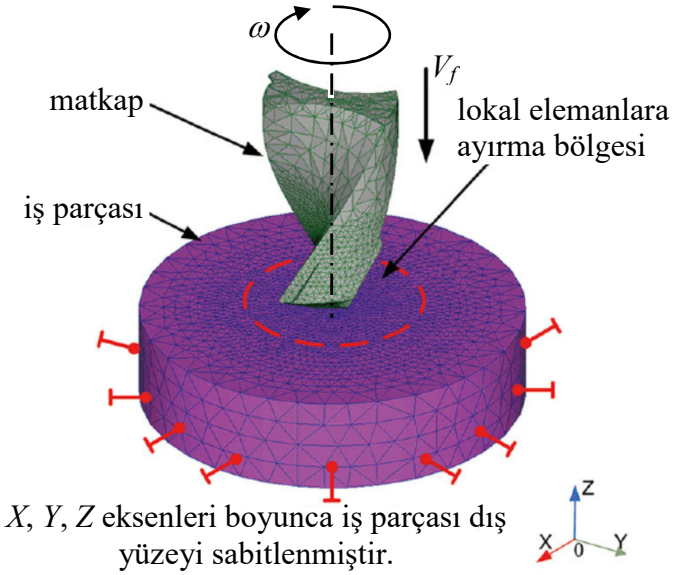
Ancak rijit nesne olan matkabın elemanlara ayrılması plastik nesne olan iş parçası kadar hassas değildir [22, 48]. Matkabın elemanlara ayrılması sadece matkaptaki sıcaklıkların hesaplaması için kullanılmakla birlikte gerilmeler interpolasyon yoluyla dolaylı bir biçimde hesaplanmaktadır. Bu sebeple kaplamasız matkaplar için de bağıl elemanlara ayırma yöntemi yardımıyla; eleman sayısı 20000, eleman boyut oranı 4, ağırlık faktörleri / *surface curvature* = 0,453, *temperature distribution* = 0, *strain distribution* ve *strain rate distribution* = 0,045, *mesh density windows* = 0,453, *mesh window* / boyut oranı = 0,1, h = 16,154 mm (iş parçası yüzeyinden ± 8,077 mm yukarıda ve aşağıda) ve matkap merkezinde r = 5,4 mm yarıçaplı silindirik pencere biçimi kullanılarak elemanlara ayırma uygulanmış ve 17447 eleman (4045 düğüm) elde edilmiştir. Çok katmanlı kaplamalı matkaplar ise Çizelge 4.6'daki malzeme modelleri göz önüne alınarak, Şekil 4.6'da gösterilen *Coating* sekmesi yardımıyla sırasıyla 5 µm kalınlığında TiAlN (ilk katman, *Layer No.* 1) ve 5 µm kalınlığında TiN (ikinci katman, *Layer No.* 2) kaplamaları uygulanmış ve toplam 41527 eleman (8036 düğüm) elde edilmiştir. Kaplamalı matkaplar için oluşturulan kaplama kalınlıkları sebebiyle kaplamasız ve kaplamalı matkapların eleman ve düğüm sayıları farklılık arz etmiştir.



Şekil 4.6. Matkap modelini elemanlara ayırma

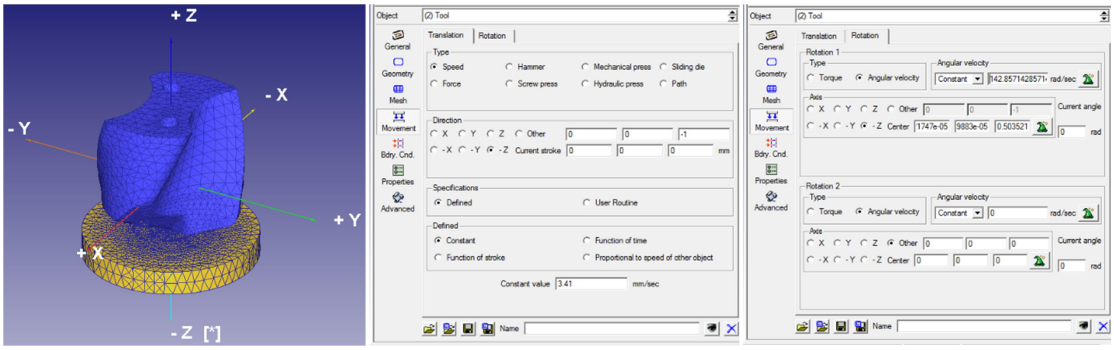
4.2.4. Sınır şartları

Sınır şartları; matkap hareketlerini (öteleme/dönme) tanımlama, iş parçası ve matkabın yer değiştirme/ısı transferi durumunu tanımlama ve nesneler arası etkileşimi/teması tanımlama ayarlarından oluşmaktadır. Şekil 4.7'de matkabın hareketleri ve iş parçası için sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Matkabın hareketleri ve iş parçası için sınır şartları

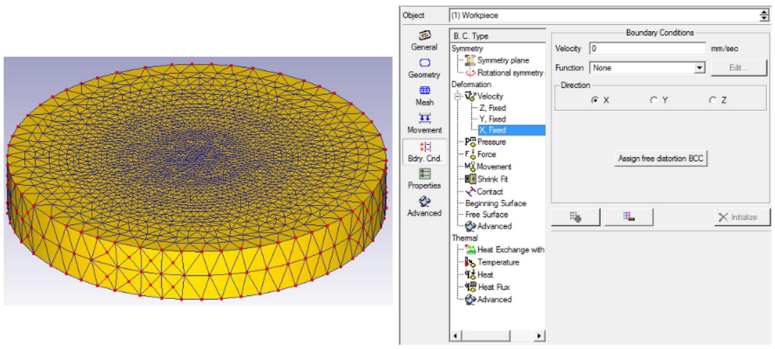
Öteleme ve dönme biçimindeki matkap hareketleri Şekil 4.8'de gösterilen ekranın *Movement* kısmındaki sırasıyla *Translation* ve *Rotation* sekmelerinden ayarlanmıştır. Öteleme (*Translation*) hareketi için hareket tipi olarak hız (*Speed*) seçilmiş ve aynı zamanda matkabın dönme ekseni olan *–Z* doğrultusunda sabit ilerleme hızı girilmiştir. Matkap çapı $\varnothing D$=14 mm olmak üzere Eş. 2.1a yardımıyla V_C=60-75-90-108 m/min kesme hızlarına karşılık gelen sırasıyla n≅1364-1705-2046-2456 rpm devir sayılarının her biri için Eş. 2.1b'den f=0,15-0,20-0,25 mm/rev ilerlemelerine karşılık gelen ilerleme hızları (V_f, mm/s) hesaplanmış ve programdaki ilgili alana girilmiştir (Şekil 4.8a). Dönme (*Rotation*) hareketi için dönme ekseni tanımlanarak (*–Z* ekseni) *Rotation 1* kısmından hareket tipi olarak açısal hız (*Angular velocity*) seçilmiş ve ilgili devir sayıları için $\omega=n\cdot 2\pi/60$ dönüşümü yapılarak sabit açısal hız (rad/s) değeri girilmiştir (Şekil 4.8b).



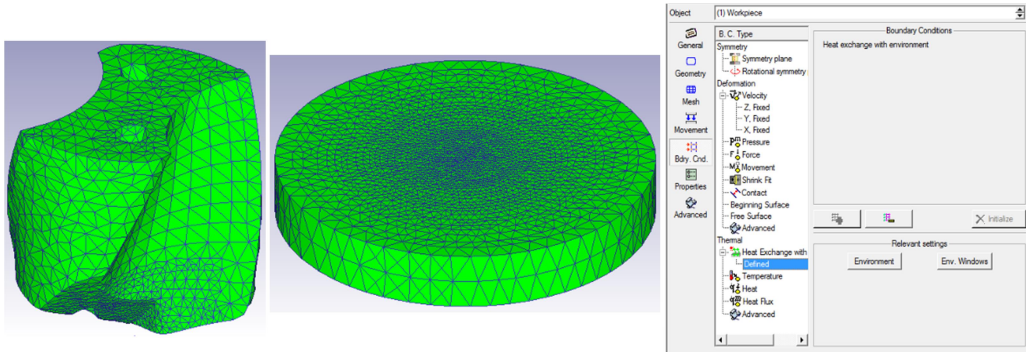
(a) (b)

Şekil 4.8. Matkabın öteleme ve dönme hareketlerini tanımlama

İş parçası ve matkabın yer değiştirme/ısı transferi sınır şartları Şekil 4.2'de gösterilen ekrandaki *Bdry. Cnd.* (*Boundry Condition*) kısmından ayarlanmıştır. İş parçası için sınır şartı yer değiştirme tipi hız (*Deformation/Velocity*) seçilerek; çevre boyunca tüm düğümler, tüm yönlerde sabitlenmiştir (yer değiştirmeler 0 seçilmiştir) (Şekil 4.9a). İş parçası ve matkabın çevreyle ve birbirleriyle ısı alış verişi (transferi) ısıl (*Thermal*) sınır şartı tipi altındaki *Heat Exchange with the Environment* seçilerek iş parçası ve matkabın dış yüzeyleri için ayrı ayrı tanımlanmıştır (Şekil 4.9b). Ortam (*Environment*) butonuyla ısı alış verişi yapılan ortamın sıcaklık ve ısı transferi taşınım katsayısı ayarları girilmiştir (arzu edildiği takdirde bu ayarlar; Bölüm 4.2.5'teki işlem şartları (*Process Conditions*) simülasyon kontrolleri kapsamında da yapılabilmektedir).



(a)

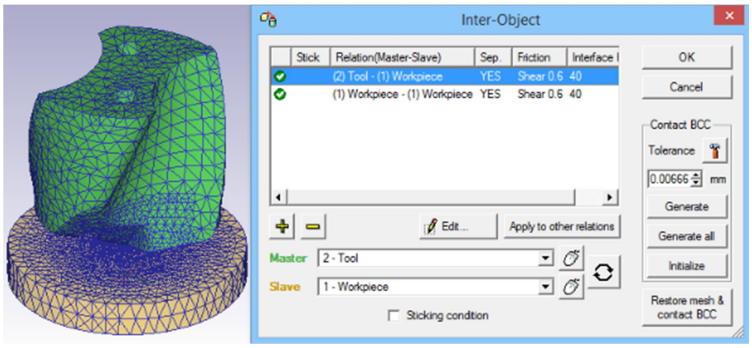


(b)

Şekil 4.9. İş parçası ve matkabın yer değiştirme ve ısı transferi durumunu tanımlama

Nesneler arası etkileşim/temas (*Inter-Object*), Şekil 4.2'de gösterilen ekrandaki *Inter-Object* butonu yardımıyla ayarlanmıştır. Program, varsayılan ilişkileri tanımlamak için kullanıcıyı yönlendirmektedir. Matkap otomatik olarak ana (deformasyona neden olan nesne, *master*) ve iş parçası da bağımlı (deformasyona uğrayan nesne, *slave*) nesne olarak tanımlanır (Şekil 4.10). *Edit* butonu yardımıyla talaş oluşum sürecindeki talaş ayrılma kriteri (programın mevcut ayarı), sürtünme (sürtünme tipi olarak kayma seçilmiş ve 0,6

sürtünme katsayısı [22]) ve ısı transferi katsayısı (40 N/s/mm/C [22]) gibi değerler girilmiştir. Matkapla iş parçası arasındaki ilişkinin dışında, oluşan talaşın iş parçasına muhtemel teması dikkate alınarak iş parçası-iş parçası (oluşan talaş) ilişkisi de dikkate alınmış ve matkap-iş parçası arasındaki ilişkiye ait değerler kullanılmıştır.



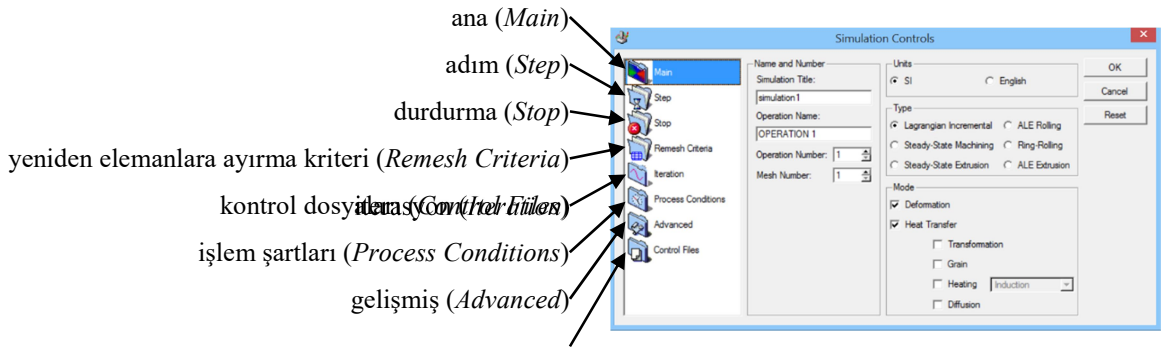
Şekil 4.10. Nesneler arası etkileşim/temas durumunu tanımlama

Başlangıç temas koşullarının oluşturulması; muhtemel geometri sorunlarının belirlenmesi ve ilk hesaplamaları geliştirme açısından önemlidir [22]. Bir simülasyon koşulmaya başladıktan sonra program, temas şartlarını otomatik olarak güncellemektedir. Şekil 4.10'daki ekrandan *Contact BCC* işlevi; ana (*master*) nesnenin tolerans mesafesi içerisinde olan bağımlı (*slave*) nesne üzerindeki herhangi bir düğümü bulur ve bir temas durumu oluşturur. Tolerans değeri çekiç simgeli buton tıklatılarak ayarlanmış ve daha sonra ilgili bağlantıyı oluşturmak için *Generate All* butonu kullanılmıştır.

4.2.5. Simülasyon kontrolleri

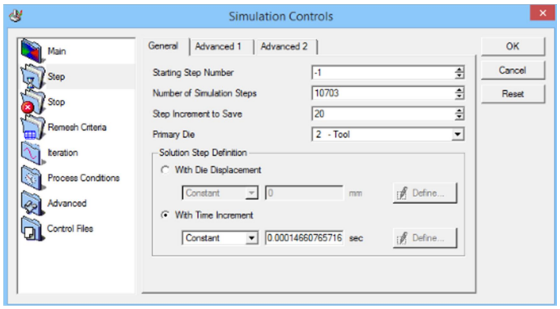
Simülasyon kontrolleri Şekil 4.11'de gösterildiği gibi ana (*Main*), adım (*Step*), durdurma (*Stop*), yeniden elemanlara ayırma kriteri (*Remesh Criteria*), iterasyon (*Iteration*), işlem şartları (*Process Conditions*), gelişmiş (*Advanced*) ve kontrol dosyaları (*Control Files*) gibi ayarlardan oluşmaktadır.

Ana (*Main*) kontrol ayarlarıyla (Şekil 4.11); simülasyonu yapılan problemin başlığı, işlem adı, kullanılan birim sistemi, simülasyon tipi ve simülasyon modu gibi simülasyonla ilgili temel ayarlar yapılmıştır. Literatürde [22, 63-65] belirtilen uyarılar göz önünde bulundurularak artışlı Lagrangian simülasyon tipi ve ısı transferi ile deformasyon simülasyon modu kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Simülasyon kontrolleri

Adım (*Step*) kontrol ayarları (Şekil 4.12); doğru/hatasız bir simülasyonun koşulabilmesi açısından en önemli ayarların yapıldığı kısımdır. Şekil 2.25b doğrultusunda yapılan açıklamalara göre (Bkz. Sayfa 35-37); literatüre uygun olarak [22], 300 adımda matkabın 1 devir yaptığı kabul edilerek zaman artışı (*With Time Increment/Constant*) ve simülasyon adım sayısı (*Number of Simulation Steps*) aşağıdaki prosedür kullanılarak hesaplanmıştır:



Şekil 4.12. Adım kontrolleri

Eş. 2.1a yardımıyla;

$$n = (1000 \cdot V_c / \pi \cdot D) / 60 \ldots (\text{devir} / \text{s}) \tag{4.1}$$

devir sayısı ile dönen matkabın 1 devri için geçen süre (t_{devir}),

$$t_{devir} = 1/n \ldots (\text{s} / \text{devir}) \tag{4.2}$$

olur. Bu durumda her bir adım için gerekli adım süresi ($t_{adım}$),

$$t_{adım} = t_{devir} / 300 \ldots (\mathrm{s}) \tag{4.3}$$

olur. Şekil 4.12'deki genel (*General*) sekmesindeki çözüm adımı tanımı (*Solution Step Definition*) kısmından zaman artışlı (*With Time Increment/Constant*) bölümü seçilerek $t_{adım}$ değeri yazılır.

L_w=2,5 mm kalınlığındaki iş parçasının; matkap ucu koni yüksekliği L_k olan ve n (rpm) devir, f (mm/rev) ilerlemeyle hareket eden bir matkapla delindiği ve matkap ucunun iş parçası yüzeyinden 0,1 mm çıktığı düşünülürse matkabın toplam ilerleme miktarı;

$$L = L_w + L_k + 0{,}1 \ldots (\mathrm{mm}) \tag{4.4}$$

olacaktır. Buna göre Eş. 2.1b'nin

$$V_f = (f \cdot n) / 60 \ldots (\mathrm{mm/s}) \tag{4.5}$$

biçiminde revize edilmesiyle belirlenen ilerleme hızı (mm/s) için delme süresi (t_{delme}) ve simülasyon adım sayısı (*Number of Simulation Steps*, *N*) sırasıyla aşağıdaki gibi olacaktır:

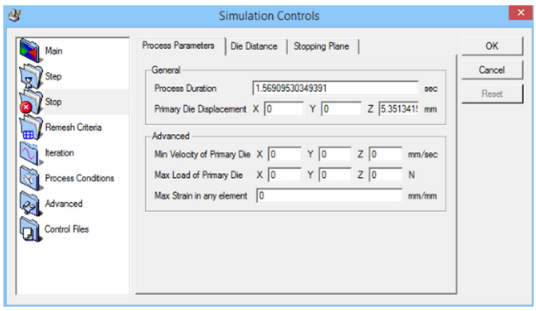
$$t_{delme} = L / V_f \ldots (\mathrm{s}) \tag{4.6}$$

$$N = t_{delme} / t_{adım} \tag{4.7}$$

V_C=60-75-90-108 m/min olmak üzere 4 adet kesme hızı ve f=0,15-0,20-0,25 mm/rev olmak üzere 3 adet ilerleme değeri olması sebebiyle *dolu* ve boydan boya ∅7 mm'lik bir ön deliğe sahip *ön delikli* iş parçası modellerinin herbiri için toplam 12 adet adım süresi ($t_{adım}$) ve simülasyon adım sayısı (*N*) hesaplanmıştır. Ancak bu adım sayısı, program tarafından hesaplanacak gerçek adım sayısı için bir tahmin anlamı taşımakla birlikte; simülasyon sürecindeki yeniden elemanlara ayırma (*remeshing*) ve otomatik zaman adım kontrolü sebebiyle gerçek sayı genelde daha fazla olabilmektedir (program bunu otomatik olarak ayarlamaktadır) [22]. Gelişmiş 1, 2 (*Advanced 1, 2*) sekmelerinde ise herhangi bir

değişiklik yapılmamış, literatüre uygun olarak [22] programın mevcut ayarları kullanılmıştır.

Bir simülasyon, önceden tanımlanmış durdurma parametrelerinden birine ulaşıncaya kadar veya kullanıcı tarafından durduruluncaya kadar çalışmaktadır. Şekil 4.13'te gösterildiği gibi programda; işlem parametreleri (*Process Parameters*) sekmesindeki genel kısmından girilen işlem süresi (*Process Duration*) veya birincil takım (matkap) için koordinat biçiminde girilen hareket miktarı (*Primary Die Displacement*) ile gelişmiş kısmından girilen birincil takım için en küçük hız (*Min. velocity of Primary Die*), en büyük yük (*Max. load of Primary Die*) veya herhangi bir elemandaki en büyük gerinme (*Max. strain in any Element*) değerlerinden birine ulaşınca simülasyon durdurulmaktadır. Yer değiştirme yalnızca doğrusal hareket için uygun olmakla birlikte; sadece dönme hareketi var ise durdurma kontrolü zamana dayalı olmaktadır [22].

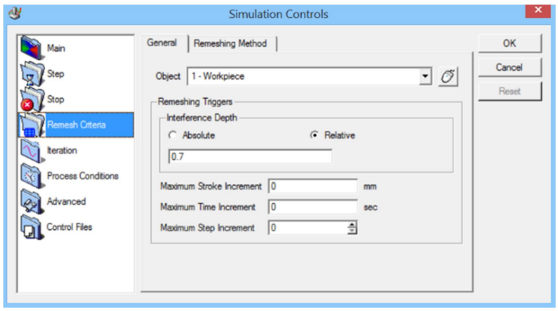


Şekil 4.13. Durdurma kontrolleri

Programda ayarlanabilen çok sayıda durdurma (*Stop*) kontrolü bulunmasına rağmen, Eş.4.4 ve Eş.4.6 ile belirlenen sırasıyla matkabın toplam ilerleme miktarı ve delme süresi göz önüne alınmış olup toplam ilerleme miktarı; literatüre uygun olarak [22] koordinat biçiminde girilen hareket miktarı (*Primary Die Displacement*) 0, 0, *L* biçiminde girilmiştir (Şekil 4.13). Programın diğer sekmelerinde (*Die Distance, Stopping Plane*) herhangi bir değişiklik yapılmamış, literatüre uygun olarak [22] programın mevcut ayarları kullanılmıştır.

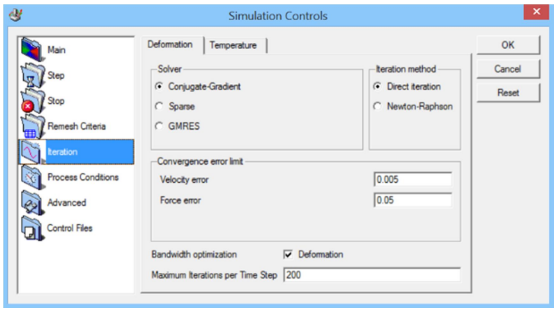
Şekil 4.14'te gösterildiği gibi programda; ara yüzey girişim mesafesi (başka bir deyişle nüfuziyet değeri, *Interference Depth*), en büyük zaman artışı (*Maximum time increment*), en büyük adım artışı (*Maximum step increment*) ve özellikle haddeleme için en büyük strok artışı (*Maximum stroke increment*) olmak üzere genel olarak 4 adet yeniden

elemanlara ayırma kriteri (*Remesh Criteria*) bulunmaktadır [21]. Kullanılacak olan bu 4 kriterden herhangi birindeki şart/durum gerçekleştiği takdirde veya eleman kullanılamaz olduğunda (negatif Jacobian); nesne yeniden elemanlara ayırmaya tabi tutulmakta ve eski elemandaki çözüm bilgisi yeniden elemanlara ayırma sonrasındaki yeni eleman üzerine interpole edilerek simülasyon devam ettirilmektedir. Ara yüzey girişim mesafesi kriterinde; matkap yüzeyi ile temasta olan elemanlarına ayrılan iş parçasındaki bir eleman kenarının orta noktası arasındaki mesafe mutlak nüfuz mesafesi ve bu mesafenin orijinal kenar uzunluğuna oranı ise bağıl nüfuz oranı olarak ele alınmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyonlarda yeniden elemanlara ayırma yöntemi (*Remeshing Method*) sekmesinden genel (*Global Remeshing*) seçilerek kriter olarak programın mevcut ayarı da olan ara yüzey girişim mesafesi (nüfuziyet değeri, *Interference Depth*) kullanılmıştır. Bağıl (*Relative*) arayüz kriterine göre; matkap yüzeyi ile temas halindeki elemanlarına ayrılan iş parçasındaki bir eleman kenarının orta noktasından matkap yüzeyine olan mesafe (l) hesaplanır ve elemanın orijinal kenar uzunluğuna (l_0) bölünür (başka bir deyişle l/l_0 oranı belirlenir). Hesaplanan l/l_0 oranı, belirtilen değeri (varsayılan değer, *Relative*=0,7) geçtiğinde ise yeniden elemanlara ayırma süreci başlatılır ve simülasyon süreci boyunca bu işlem devam ettirilir.



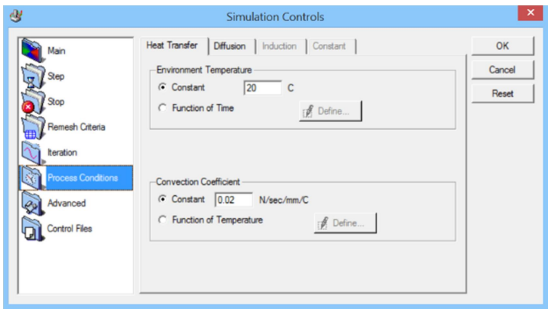
Şekil 4.14. Yeniden elemanlara ayırma kontrolü

İterasyon (*Iteration*) kontrol ayarları; FEM çözücüsünün bir problemin simülasyonundaki her bir adımdaki çözümü bulmak üzere kullandığı kriterleri içermektedir. İşleme (*machining*) de dâhil olmak üzere pekçok problem için programdaki mevcut ayarların geçerli olması sebebiyle [21]; programdaki varsayılan iterasyon kontrol ayarları kullanılmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. İterasyon kontrolü

İşlem şartları (*Process Conditions*) kontrol ayarlarında genel olarak simülasyon yapılan kesme işlemi için ortam sıcaklığı (sabit, 20°C) ve ısı taşınım katsayısı (literatüre [22] uygun olarak 0,02 N/mm·s·°C) gibi bilgiler girilmiştir (Şekil 4.16). Yayılma (*Diffusion*) sekmesinde ise programdaki varsayılan değerler kullanılmıştır.



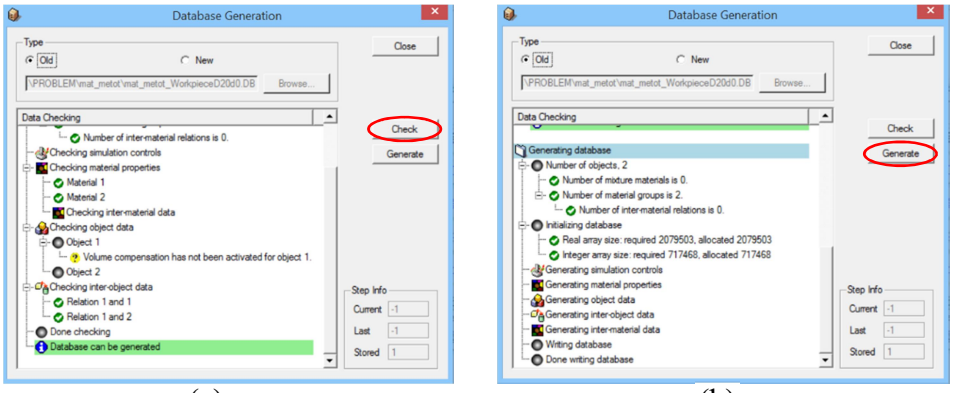
Şekil 4.16. İşlem şartları kontrolü

Literatüre [22, 63-65] uygun olarak gelişmiş (*Advanced*) ve kontrol dosyaları (*Control Files*) ayarları için programdaki varsayılan değerler kullanılmıştır.

4.2.6. Veri tabanı oluşturma

Buraya kadar anlatılan *ön işlemci* ayarlarının son aşamasında Şekil 4.2'de gösterilen veri tabanı oluşturma (*Database Generation*) butonu kullanılmış; Şekil 4.17a'daki veri kontrolü (*Check data*) butonu çalıştırılarak otomatik veri denetimi kontrol edilmiş ve daha sonra da Şekil 4.17b'daki veri tabanı oluşturma (*Generate*) butonu çalıştırılarak simülasyon motoru için kullanılacak olan veri tabanı oluşturulmuştur. Simülasyon koşulmadan önce mutlaka düzeltilmesi gerekli olan hatalı veya eksik durumlar program tarafından kırmızı renkli

uyarıyla rapor edilmektedir. Simülasyonun durmasına neden olmayan muhtemel sorunlara işaret eden bildirimler ise sarı renkli uyarıyla gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.17. Veri kontrolü ve veri tabanı oluşturma

Bir simülasyon sonucuna etki eden hacimde önemli derecede değişimin olduğu özellikle dövme simülasyonları için *Deform* programının bir hacim kontrolü özelliği (hacim telafisi, *Volume compensation*) bulunmaktadır. Talaş kaldırma simülasyonlarında ise Şekil 4.17a'da gösterilen sarı renkli uyarıyla "*Volume compensation has not been activated for object 1*" bildirimi gelmekte olup bu bildirim, bir talaş kaldırma simülasyonu için her zaman göz ardı edilebilir [22]. Başka herhangi bir hata veya uyarı yoksa artık *Generate Database* komutu ile simülasyon motoru için kullanılacak olan veri tabanı oluşturulur. Bildirim penceresinde yazan "*Done Writing Database*" mesajı ile anlaşılan veri tabanı oluşturma tamamlandıktan sonra "*Close opr*" butonu ile devam etmekte olan operasyondan (*ön işlemci*den) çıkılır.

Yukarıda ayrıntıları verilen simülasyon işlemleri/ayarları *Deform* programında bir simülasyon süreci için gerekli olan rutin işlemlerdir. Belirtilen işlemler/ayarlar eksiksiz bir şekilde yapıldığı takdirde; program, Şekil 4.18'de bir örneği verilen bir "*.key*" dosyası oluşturur.

```
*
*  DEFORM-3D V10.0 KEYWORD FILE (Qt)
*
*  Process Definition
*
TITLE
analiz_1
CURSIM       1       0       0
SIMNAM
analiz_1
.....
.....
.....
NSTART      -1
STPINC      20
PDIE         2       0
NSTEP    10703
TMAX    1.5690950E+000
SMAX    0.0000000E+000  0.0000000E+000  5.3513416E+000
DTMAX   1.4660770E-004  0.0000000E+000
.....
.....
.....
MOVCTL       2       1       0  0.0000000E+000  0.0000000E+000 -1.0000000E+000  3.4104631E+000
ANGMOV       2       1       0  1.4285714E+002
```

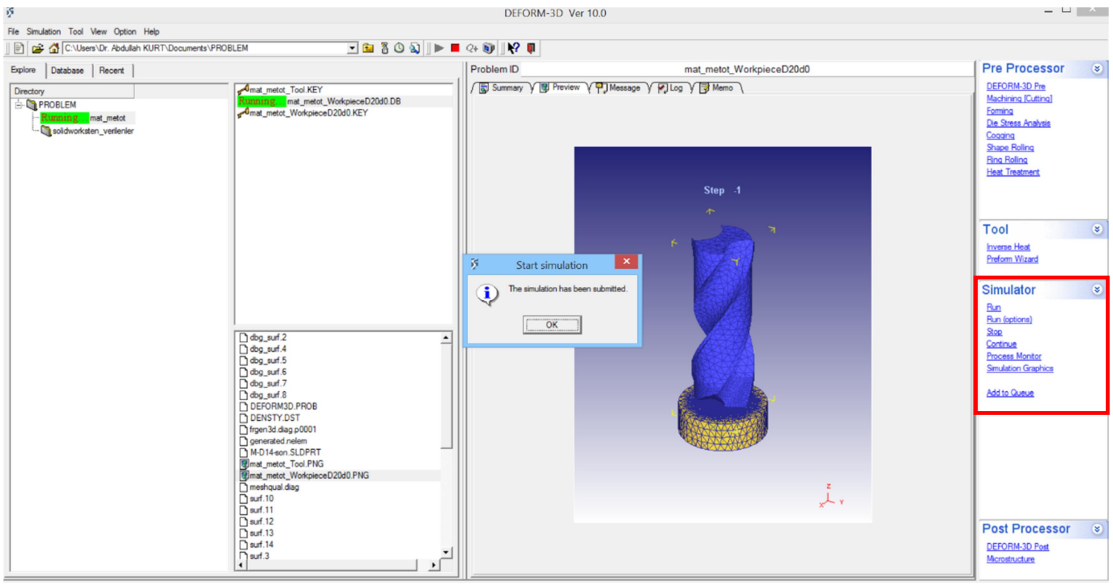
Şekil 4.18. Deform programının oluşturduğu örnek bir ".key" dosyası

Ancak simülasyonlarda kullanılan iş parçası numunelerinin *dolu* ve boydan boya *ön delik delinmiş* olmak üzere 2 farklı geometride olması, matkapların ise kaplamasız (K25 grade) ve kaplamalı (P25 grade) 2 farklı malzeme modeliyle tanımlanması, buna karşılık herbir simülasyonda sadece kesme hızı ve ilerlemeden oluşan kesme parametrelerinin değişmesi göz önünde bulundurularak; simülasyon ön hazırlıklarını daha hızlı bir biçimde gerçekleştirmek amacıyla 4 farklı grup oluşturulmuştur. Bunlar: 1) Dolu iş parçası geometrisi ve kaplamalı matkap, 2) Dolu iş parçası geometrisi ve kaplamasız matkap, 3) Ön delik delinmiş iş parçası geometrisi ve kaplamalı matkap, 4) Ön delik delinmiş iş parçası geometrisi ve kaplamasız matkap. Bu 4 farklı grubun her biri için simülasyon işlemlerinde sadece kesme hızı ve ilerleme değerleri ve buna bağlı olarak adım sayısı, adım süresi, vb. gibi işlem şartları değiştiğinden, ancak matkap/iş parçası geometrisi, malzeme özellikleri, *meshing*, sınır şartları, temas koşulları, vb. gibi diğer işlemlerde bir değişiklik olmayacağından yola çıkılarak; 4 farklı grubun her biri için birer şablon dosyası (*sablon1.key*, *sablon2.key*, *sablon3.key*, *sablon4.key*) oluşturulmuştur. Bu şablon dosyalarında, Şekil 4.18'de de gösterilen; simülasyon tanımlaması (*TITLE*), simülasyon adı (*SIMNAM*), maksimum adım sayısı (*NSTEP*), maksimum simülasyon/işlem süresi (*TMAX*), birincil nesne/matkap için maksimum ilerleme miktarı (*SMAX*), herbir adım için geçen işlem süresi (*DTMAX*) ile kesme hızına ve ilerlemeye göre birbirinden farklı olan matkabın

öteleme hareket kontrolü (*MOVCTL*) ve açısal hareket (*ANGMOV*) değerleri simülasyonlardaki değişken terimleri ifade etmektedir. Her bir simülasyon öncesinde, deney verilerine göre şablon dosyasındaki *TITLE*, *SIMNAM*, *NSTEP*, *TMAX*, *SMAX, DTMAX*, *MOVCTL*, *ANGMOV* değişkenlerin değerleri değiştirilerek (güncellenerek) kaydedilmiş ve güncellenen bilgilerin bulunduğu şablon dosyası *Deform-3D Pre* ara yüzündeki *import keyword* komutu yardımıyla çağrılmış ve son olarak veri tabanı oluşturulmuştur. Böylece her bir simülasyonun koşulmasından önce yapılması gereken rutin işlemler daha hızlı ve sistematik bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir.

4.2.7. Simülasyonun koşulması

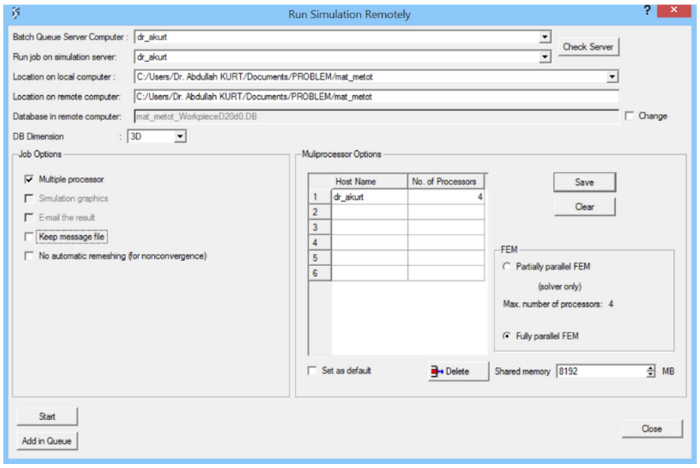
Buraya kadar anlatılan işlemler sonrasında Şekil 4.19'da gösterilen *Deform-3D* (V10) ara yüzündeki "*Simulator*" ana modülünde bulunan "*Run*" komutu kullanılarak simülasyon motoru çalıştırılmış ve simülasyon başlatılmıştır (başka bir deyişle simülasyon koşulmuştur). Simülasyon koşulurken durdurulup, "*Continue*" komutu ile tekrar kaldığı yerden devam ettirilebilir. "*Simulation Graphics*" komutu ile simülasyonun mevcut durumu izlenebilir ve iş parçasındaki deformasyon, gerinme, gerilme, hız, sıcaklık gibi çeşitli sonuçlara bakılabilir.



Şekil 4.19. Deform-3D (V10) ara yüzünden simülasyonun koşulması

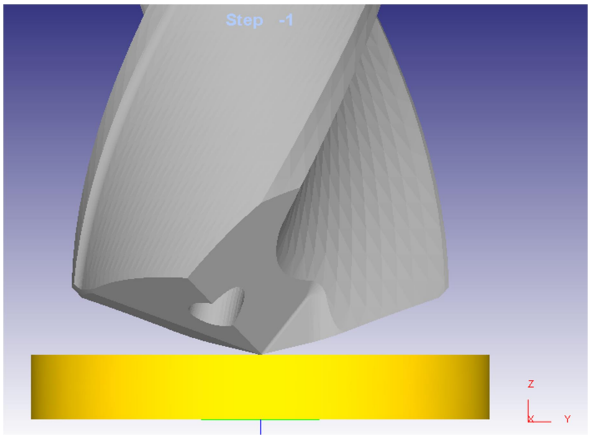
Ancak simülasyon koşulmadan önce "*Run (options)*" komutu kullanılarak; Şekil 4.20'de gösterilen pencereden simülasyon süresini düşürmek amacıyla çoklu işlemci (*Multiple*

processors) ve tamamen paralel FEM (*Fully parallel FEM*) seçenekleri seçilmiştir. Böylece simülasyon probleminin çözüm kısmı ile direngenlik matrisi modeli, yeniden elemanlara ayırma ve interpolasyon gibi diğer kısımları, maksimum işlemci sayısı 4 olmak üzere bu işlemcilere paylaştırılmıştır [21].

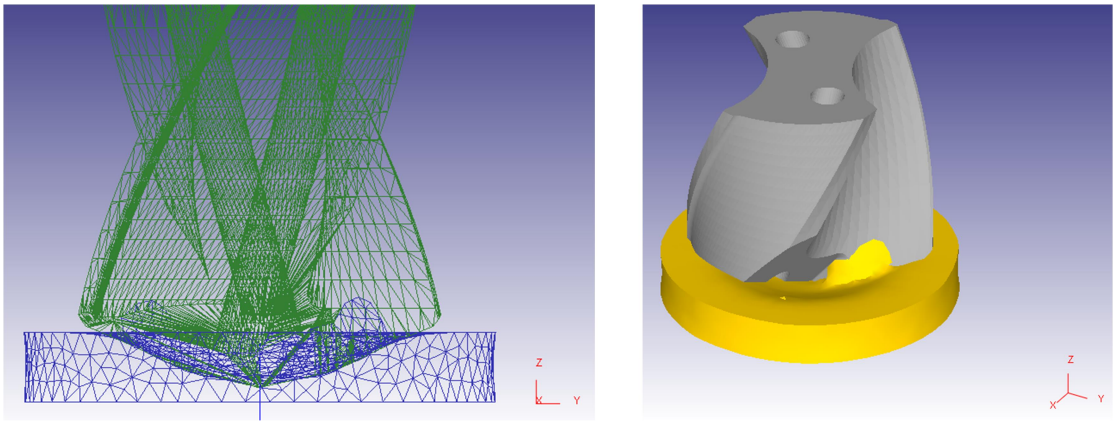


Şekil 4.20. Deform-3D (V10) ara yüzünden simülasyon koşma seçenekleri

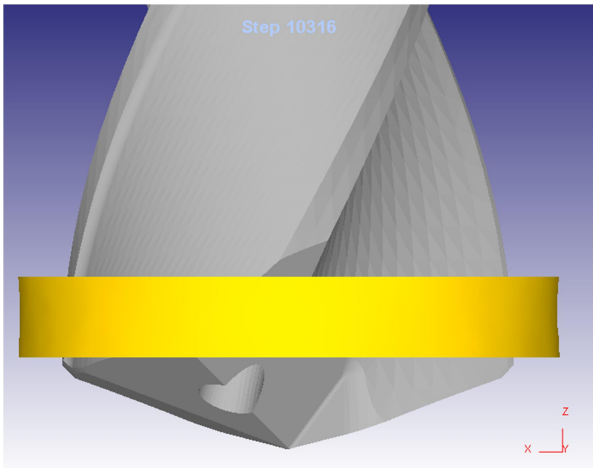
Girilen simülasyon kaydetme adım sayısına (*Step Increment to Save*, Bkz. Şekil 4.12) göre; bir simülasyon koşulurken program, veri tabanı dosyasını periyodik olarak yeniden adlandırılarak kaydetmektedir. Arzu edildiği takdirde bu dosya (devam eden simülasyonun son zaman adımından önceki dosya), başka bir veri tabanı dosyası gibi Şekil 4.19'da gösterilen *Deform-3D* (V10) ara yüzündeki son işlemci (*Post Processor*) ana modülünde bulunan "*Deform-3D Post*" komutu yardımıyla açılabilir ve Şekil 4.21-4.23'te gösterilen simülasyon sürecinin başlangıç, ortası ve sonu için matkap konumları ile iş parçasındaki deformasyon, gerilme, sıcaklık gibi çeşitli sonuçlar incelebilmektedir.



Şekil 4.21. Delme simülasyonunun başlangıcı aşaması



Şekil 4.22. Delme simülasyonunun ortasındaki aşama ve talaş oluşumu



Şekil 4.23. Delme simülasyonunun sonundaki aşama

4.2.8. Matkap gerilmelerinin analizi

Program, simülasyon tamamlandıktan sonra simülasyon kaydetme adım sayısına göre oluşturulan veri tabanını okumak suretiyle istenilen simülasyon sonuçlarını gösterir/verir. Şekil 4.19'da gösterilen *Deform-3D* (V10) ara yüzündeki son işlemci (*Post Processor*) ana modülünde bulunan "*Deform-3D Post*" komutu kullanılarak;

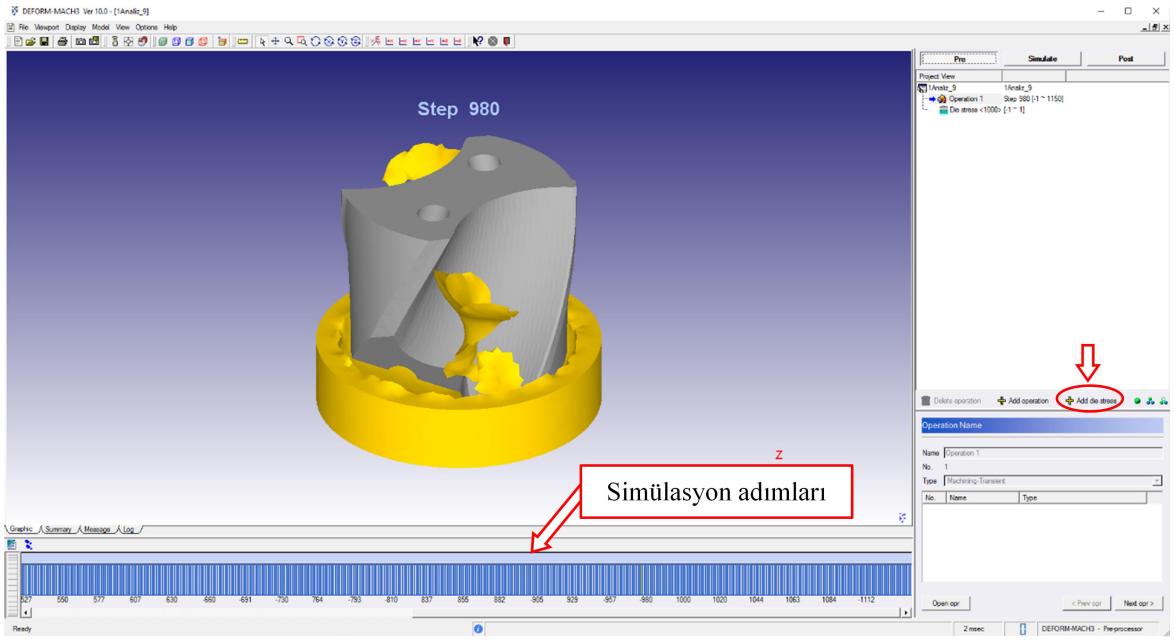
- Matkap hareketleri ve kaydedilen her bir adımdaki deforme olan elemanlarla birlikte deforme olmuş iş parçası geometrisi (talaş oluşumu),
- İş parçası için gerilme, gerinme, sıcaklık ve hasar gibi sonuçların renk gradyanları yardımıyla dağılımları,
- İşlem süresince her bir adımdaki düğümlere ait yer değiştirme veya hızın büyüklük ve yönüne göre vektörel gösterimleri,

– Yük (kesme kuvvetleri, moment) ve hacim gibi değişkenlerin grafiksel gösterimleri

hakkında bilgiler görülebilir/okunabilir.

Simülasyonlar sonrasında özellikle talaş oluşumu ve matkapta oluşan gerilme sonuçları incelenmiştir. Simülasyon koşulduktan/tamamlandıktan sonra kesme parametrelerindeki (kesme hızı ve ilerleme) değişime göre kesici takımdaki gerilme analizi çalışmalarına geçilmiştir. Programda, matkapta oluşan gerilmeleri doğrudan inceleme/görme özelliği yoktur. Bazı işlemler yapılarak, dolaylı bir biçimde de olsa matkapta oluşan gerilmeler analiz edilebilmiştir. Matkapta oluşan gerilmelerin analizi, farklı yordamlar uygulansa da *Deform-3D Machining (Cutting)* modülü veya *Deform-3D* (V10) ara yüzündeki sırasıyla ön işlemci (*Pre-processor*) panelindeki "*Die Stress Analysis*", simülasyon motoru (*Simulator*) panelindeki "*Run*" ve son işlemci (*Post-processor*) panelindeki "*Deform-3D Post*" yardımıyla yapılabilmektedir. *Deform-3D Machining (Cutting)* modülü yardımıyla matkapta oluşan gerilmelerin analizi sürecinde aşağıda açıklanan işlemler yapılmıştır. İş parçası için bu prosedüre gerek yoktur; iş parçası için deformasyon, gerilme, gerinme, vb. bilgiler zaten Bölüm 4.2.1-4.2.6'daki prosedürle elde edilmektedir.

Gerilme analizleri için simülasyon koşulduktan sonra oluşturulan "*.db*" uzantılı veri tabanı dosyasının *Deform-3D Machining (Cutting)* modülünde açılarak proje biçiminde ("*.d3prj*" uzantılı) kaydedilmesi gerekmektedir. Program, kesici takımdaki gerilme analizini, seçilen bir adım veya adım aralığını referans alarak yapmaktadır. Bu sebeple gerilme analizi yapılarak seçilmiş ve "*Add die stress*" komutu ile analizi süreci başlatılmıştır (Şekil 4.24). Analizi yapılacak adım için bir isim verme işleminden sonra "*Object Selection*" penceresinden iş parçası veya kesici takımdan hangisi için analiz yapılacaksa bunun seçimi yapılır. Takım/*Tool* seçildikten sonra nesne tipi olarak elastik özellikte olduğu (rijit değil) belirtilerek elemanlara ayırma (*meshing*) ayarları yapılmış (eleman boyut oranı/*Size ratio*=10, eleman sayısı/*Number of solid elements*=14000) ve sonrasında elemanlara ayırma işlemi uygulanmıştır (*generate mesh*, bu işlemle 11568 eleman ve 2714 düğüm elde edilmiştir).

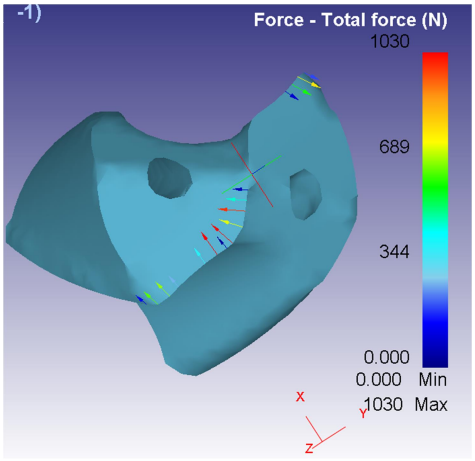


Şekil 4.24. Deform-3D Machining ara yüzünden gerilme analizi sürecini başlatma

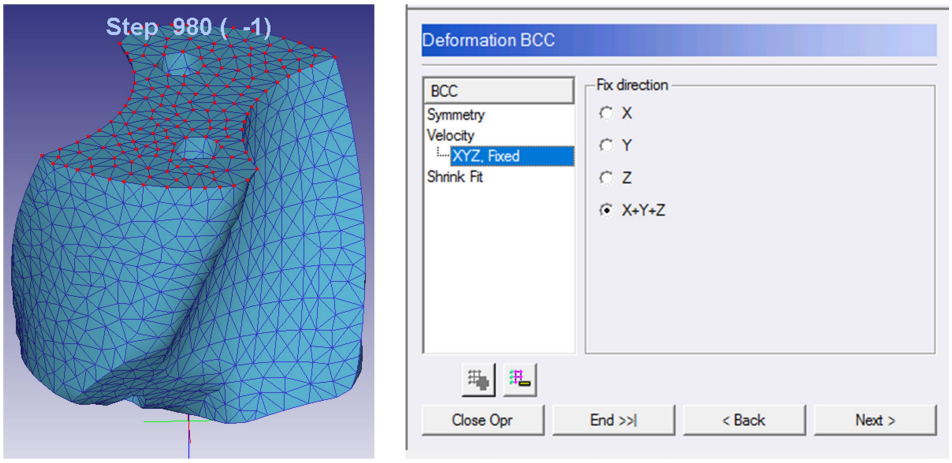
Gerilme analizleri için matkaba etkiyen kesme kuvvetleri, programda interpolasyonla belirlenmekte ve Şekil 4.25'te gösterildiği gibi bileşke kuvvet biçiminde otomatik olarak uygulanmaktadır. Bu sebeple gerilme analizleri için delme deneyi ile ölçülen F_Z, M_Z değerlerine en yakın simülasyonla bulunan F_Z, M_Z değerlerinin gerçekleştiği adım seçilmiş ve seçilen bu adım için sadece matkapta oluşan gerilmeler incelenmiştir. Analiz yapılacak adım seçimi için bir diğer kriter de matkap kesici ağızlarının iş parçası ile tamamen temas etmesi durumu göz önüne alınmıştır. Buna göre delme başlangıcındaki gibi iş parçasıyla sadece radyal ağzın teması değil, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi tüm kesici ağızların iş parçasıyla tamamen temas ettiği durum seçilmiş ve böylece Şekil 4.25'teki gibi kesme kuvvetlerinin radyal ağızla birlikte kesici ağızlara da etki etmesi referans alınmıştır.

Bir sonraki aşamada deformasyon (yer değiştirme) için sınır şartları tanımlanmıştır. Şekil 4.26'da bir örneği verilen kesici takımın üst yüzeyi tüm yönlerde sabitlenmiştir (*Velocity; XYZ, Fixed*).

Sınır şartları tanımlandıktan sonra kesici takım malzeme özellikleri girilmiştir. Bu işlem, "Bölüm 4.2.2. Malzeme modelleri" kısmındaki kesici takım malzeme modelleri bilgileri referans alınarak yapılmıştır.



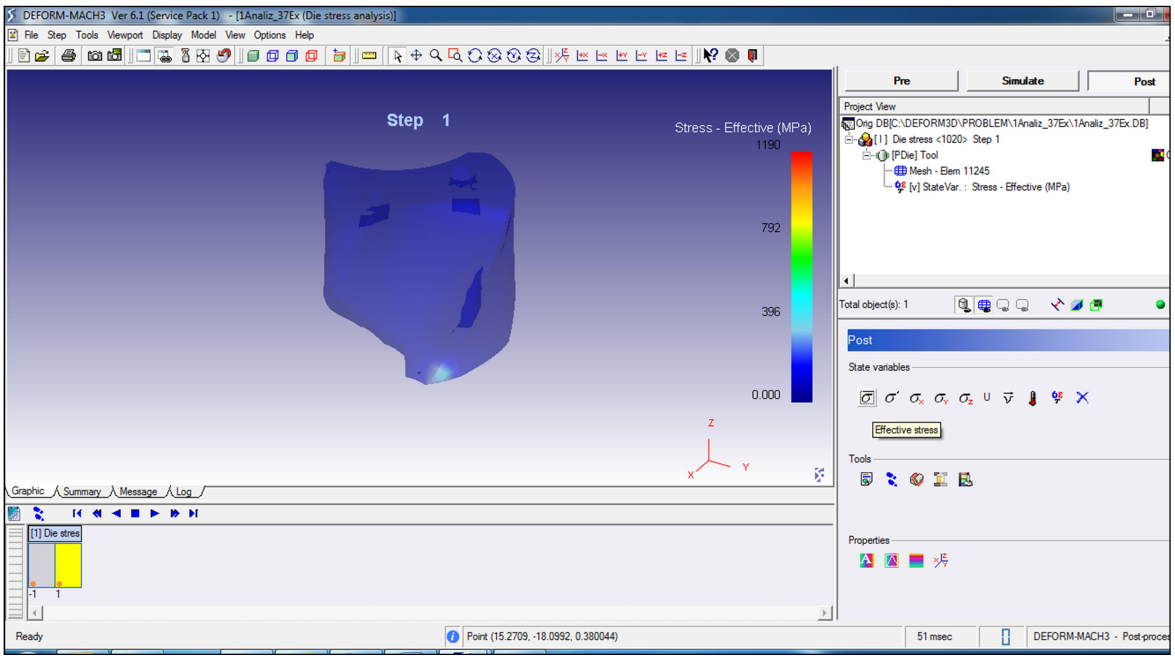
Şekil 4.25. İnterpolasyonla belirlenen ve otomatik olarak uygulanan kesme kuvvetleri



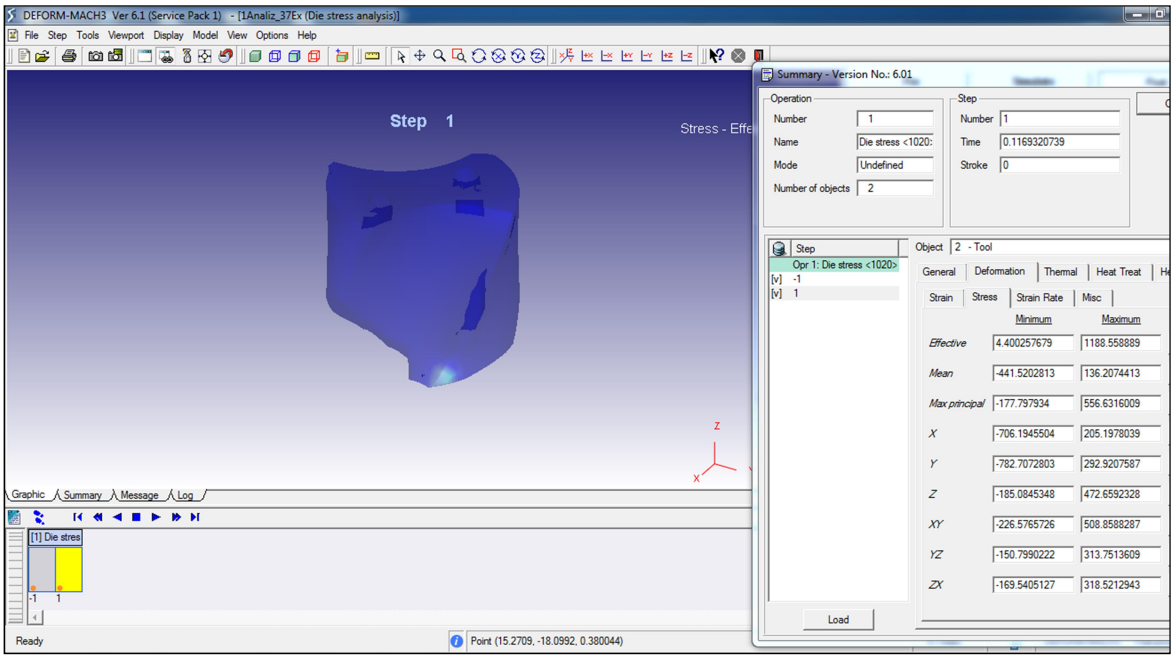
Şekil 4.26. Kesici takıma uygulanan sınır şartları

Son olarak analizin kaç adımda çözüleceği (*Number of Simulation Steps:1*) ve çözümün nasıl yapılacağı (*Solver:Conjugate gradient*) ile ilgili simülasyon kontrolleri de yapıldıktan sonra veri tabanı oluşturulmuştur (*Generate Database*). Şekil 4.24'e benzer biçimde "*Check data*" komutu çalıştırılarak otomatik veri denetimi kontrol edilir. Program hatalı/eksik durumları kırmızı renkli yazı mesajı ile bildirim penceresinden rapor verir. Mutlaka simülasyonun durmasına neden olmayan muhtemel sorunlara işaret eden bildirimler ise turuncu renkli yazıyla gösterilir. Kullanıcının devam etmeden önce bu bildirimlerin kaynağını belirlemesi gerekir. Şekil 4.24'teki "*Simulate*" butonu kullanılarak simülasyon motoru çalıştırılır ve "*Run simulation*" komutu ile simülasyon başlatılır (başka bir deyişle simülasyon koşulur).

Simülasyon tamamlandıktan sonra Şekil 4.24'te gösterilen "*Post*" butonu kullanılarak analizi yapılan adım için kesici takımdaki deformasyon, gerilme ve gerinme hakkında bilgiler incelenmiştir. Örneğin Şekil 4.27'de gösterildiği gibi gerilmeler renk gradyanı biçiminde veya Şekil 4.28'de gösterildiği gibi sayısal veri olarak görüntülenebilir.



Şekil 4.27. Gerilmelerin renk gradyanı biçiminde görüntülenmesi

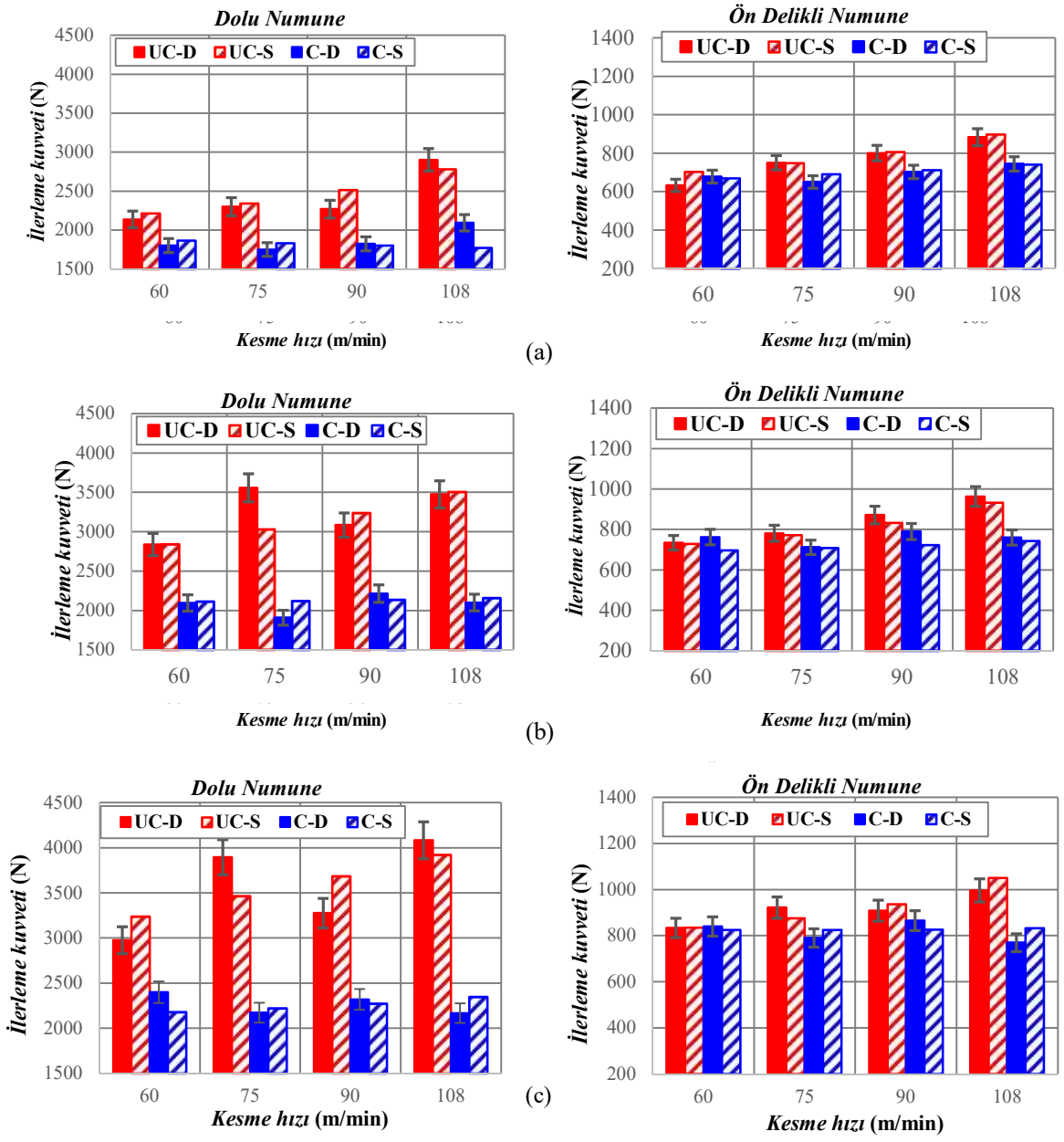


Şekil 4.28. Gerilmelerin sayısal veri olarak görüntülenmesi

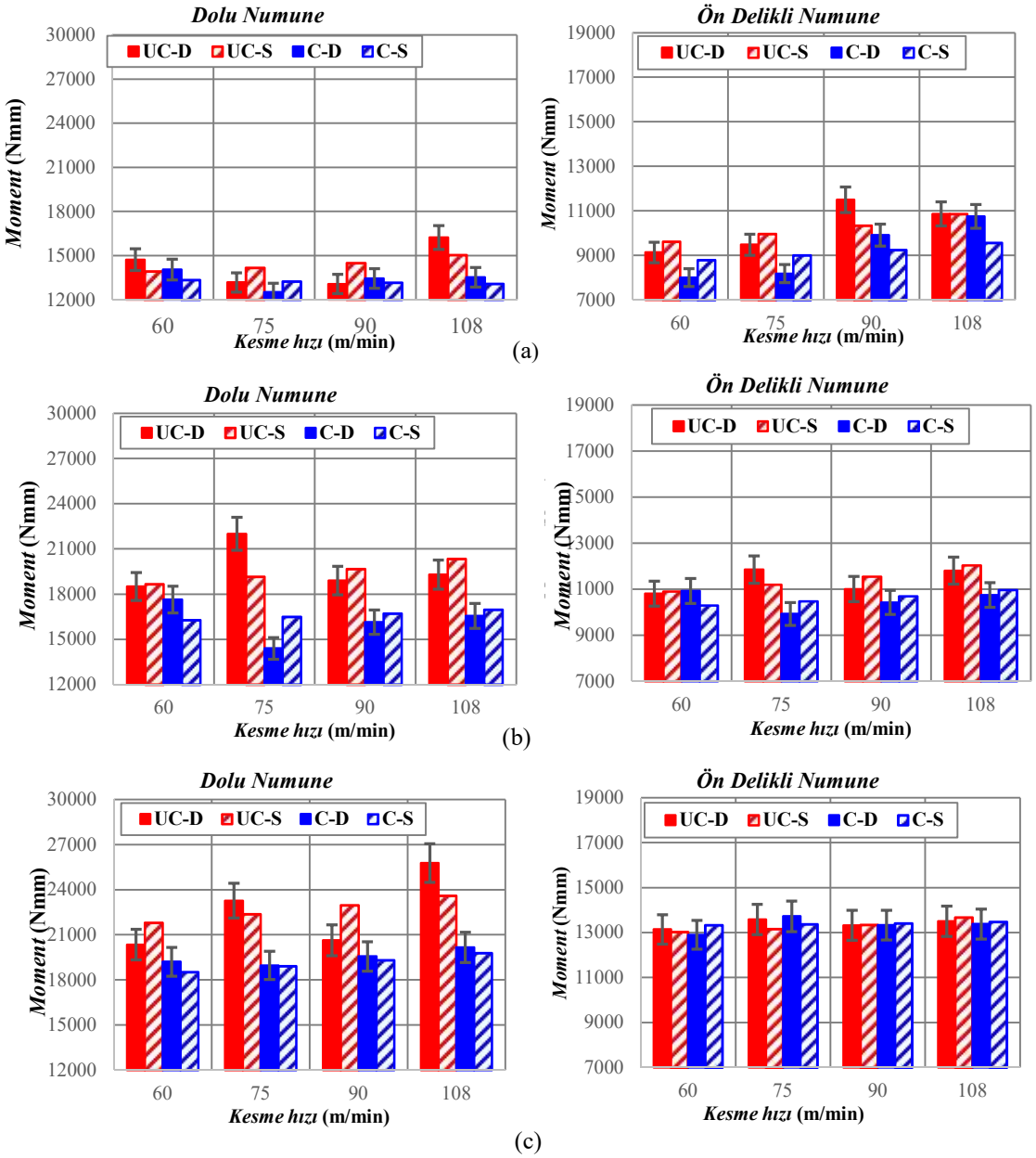
5. DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Deneysel ve Simülasyon Sonuçları

Dolu ve ön delik delinmiş numuneler üzerinde yapılan delme deneyleri sırasında dinamometre yardımıyla ölçülen ve Bölüm 4.2'de detayları verilen delme simülasyonları ile elde edilen ilerleme kuvveti (F_z) ve döndürme momenti (M_z) sonuçlarının kesme hızıyla değişimi sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kesme hızına göre ilerleme kuvveti değerlerinin değişimleri, a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev



Şekil 5.2. Kesme hızına göre moment değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de kaplamasız ve kaplamalı matkaplar için dinamometre yardımıyla ölçülen kuvvet ve momentler sırasıyla UC-D, C-D ve simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçlar ise sırasıyla UC-S, C-S gösterimleri ile belirtilmiştir.

Kaldırılacak talaş hacmi açısından belirgin bir fark ortaya koyması açısından genel olarak dolu numuneler için elde edilen ilerleme kuvvetleri ve döndürme momentleri ön delik delinmiş numunelere kıyasla daha yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. Her iki numune türü için en yüksek ilerleme kuvvetleri ve döndürme momentleri; genel olarak en yüksek kesme

hızı (108 m/min) ve ilerleme değeri (0,25 mm/rev) kesme şartlarında kaplamasız matkaplarla elde edilmiştir. Deneyler sırasında en yüksek ilerleme kuvveti ve döndürme momenti dolu numuneler için kaplamasız matkaplarla yapılan 108 m/min ve 0,25 mm/rev kesme şartlarında sırasıyla yaklaşık 4000 N ve 25800 Nmm olarak ölçülmüştür (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Tekaud ve diğerleri [83], yapmış oldukları deneyde ilerleme kuvvvetini, kaplamasız matkapla 108 m/min ve 0,25 mm/rev kesme şartlarında yaklaşık olarak 6000 N olarak ölçmüşlerdir. Her iki deneyde de en yüksek ilerleme kuvvetinin aynı kesme şartları altında benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak en yüksek döndürme momenti iki deneyde farkılık arzetmektedir. Tekaud ve diğerleri [83], deneyinde en yüksek döndürme momentini kaplamalı matkapla 60 m/min ve 0,25 mm/rev kesme şartlarında yaklaşık olarak 22500 Nmm olarak ölçülmüştür. Bu deneyde de ölçülen en yüksek kesme kuvvetinin, en yüksek döndürme momenti şartları ile aynı oluştuğu görülmektedir. Yaşar [74], yapmış olduğu deneyde ise en yüksek ilerleme kuvvetinin kaplamalı matkapla yapılan 120 m/min ve 0,1 mm/rev kesme şartlarında gerçekleşmiş olup, bu değer yaklaşık 5750 N olarak ölçülmüştür.

İlerleme miktarındaki artışın sonucu büyüyen talaş kesiti, talaşı kaldırmak için gereken enerjiyi artıracak ve bunun sonucunda da ilerleme kuvvetlerinde ve döndürme momentlerinde artışlar görülecektir [7]. Dolu ve ön delik delinmiş numuneler üzerinde kaplamasız ve kaplamalı takımlarla yapılan deneylerin tamamında en yüksek ilerleme kuvvetleri ve döndürme momentleri en yüksek ilerleme değerinin kullanıldığı kesme şartlarında meydana gelmiştir. İlerleme kuvvetlerinde ve döndürme momentlerinde gerçekleşen değişimlerin birbirleriyle paralellik sergilediği söylenebilir. İlerleme değerindeki artışlar sonucunda beklenildiği gibi döndürme momenti değerleri de yükselmiştir. İlerleme değerindeki artışın sonucunda talaş kalınlığı artacak ve buna bağlı olarak daha küçük bir özgül kesme kuvveti oluşacaktır. Buna karşılık talaş alanının da artması sonucunda artan ilerleme değeri, toplamda daha büyük döndürme momenti oluşumuna yol açacaktır.

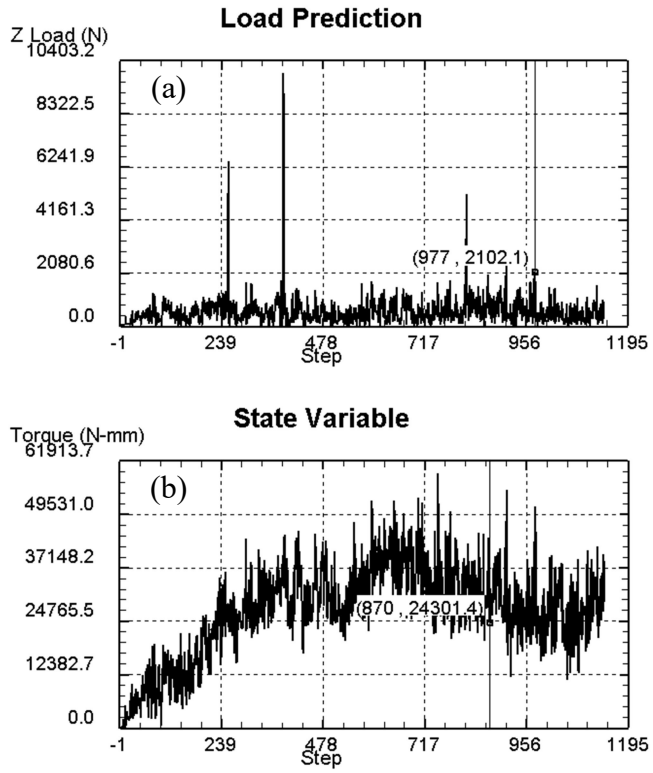
Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'den görüleceği üzere delme işleminin tornalama ve frezeleme işlemlerinden farklılık göstermesi açısından genel olarak kesme hızındaki artışla birlikte beklenenin aksine ilerleme kuvvetlerinde bir yükselme gerçekleşmiştir. Bu durumun sebebinin kesme hızının yükselmesiyle artan enerji miktarı ihtiyacı olduğu söylenebilir. Her iki numune türü için kaplamalı takımlarla yapılan deneylerde en düşük ilerleme

kuvvetleri tüm ilerleme değerleri için 75 m/min kesme şartında oluşmuştur. Tekaud ve diğerleri [83], en küçük ilerleme kuvvetini kaplamalı matkapla 108 m/min kesme hızında elde etmiş ve Yaşar [74] ise en düşük ilerleme kuvvetini kaplamasız matkapla 120 m/min ile yaklaşık 2500 N olarak ölçmüştür.

Kesici takıma kaplama uygulanması sonucunda özellikle de yüksek kesme hızı ve ilerleme değeri şartlarında daha iyi performans sergiledikleri için kaplamasız takımlara oranla ilerleme kuvvetlerinde ve döndürme momentlerinde belirgin bir farklılık gözlenmiştir (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Nitekim Tekaud ve diğerleri [83], kaplamalı matkapların, yüksek kesme hızı ve ilerleme şartlarında daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Örneğin dolu numune üzerinde 108 m/min ve 0,25 mm/rev kesme şartlarında yapılan deneylerde ilerleme kuvveti ve döndürme momenti değerleri kaplamalı ve kaplamasız matkaplar için sırasıyla yaklaşık 2200 N, 20200 Nmm ve 4100 N, 25800 Nmm olarak ölçülmüştür.

Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara karşı doğrulanması da Şekillerde gösterilmektedir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, Simüle edilen sapmayı belirtmek için deneysel sonuçlar referans alınarak ±%5'lik sapma sınırları içinde gösterilmiştir. Simüle edilmiş birçok sonuç, deneysel sonuçların ±%5'i sınırları içinde olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere sonlu elemanlar yöntemini esas alan simülasyon çalışmaları, gerçek (ölçülen) sonuçlar açısından yaklaşık bir çözümü (sonucu) ortaya çıkaran ve böylece gerçek sonucu öngörebilmeyi (tahmin edilebilirliği) mümkün kılan bir yaklaşımdır. Simülasyon çalışmalarının temel amacı makul bir biçimde gerçek çözüme olabildiğince yaklaşmaktır. Başka bir deyişle; gerçek sonuçlar açısından simülasyon çalışmalarında bir hata/farklılık olması zaten beklenen bir durumdur. Gerçek sonuca yaklaşmak ise simülasyonun başarısını ortaya çıkarır. Simülasyon adımlarına karşılık gelen ilerleme kuvveti (F_z) ve döndürme momenti (M_z) değişimlerinin bir örneği Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.3'ten de görüleceği üzere bazı adım değerleri için kesme kuvveti ve moment değerlerinde ani bir yükselme veya düşmeler görülmektedir. Bu durumun sebebi, Demirel'in [84] de belirttiği gibi simülasyonlar sırasında sürekli olarak ağ yapısında görülen bozulmalardır (dejenerasyon). Elemanların yeniden biçimlenme (*remeshing*) suretiyle talaş oluşumunu gerçekleştirmesi sırasında, programın elemanları yeniden boyutlandırması sebebiyle, elemanlarda sürekli bir biçimde bozulma oluşur. Bu sebeple

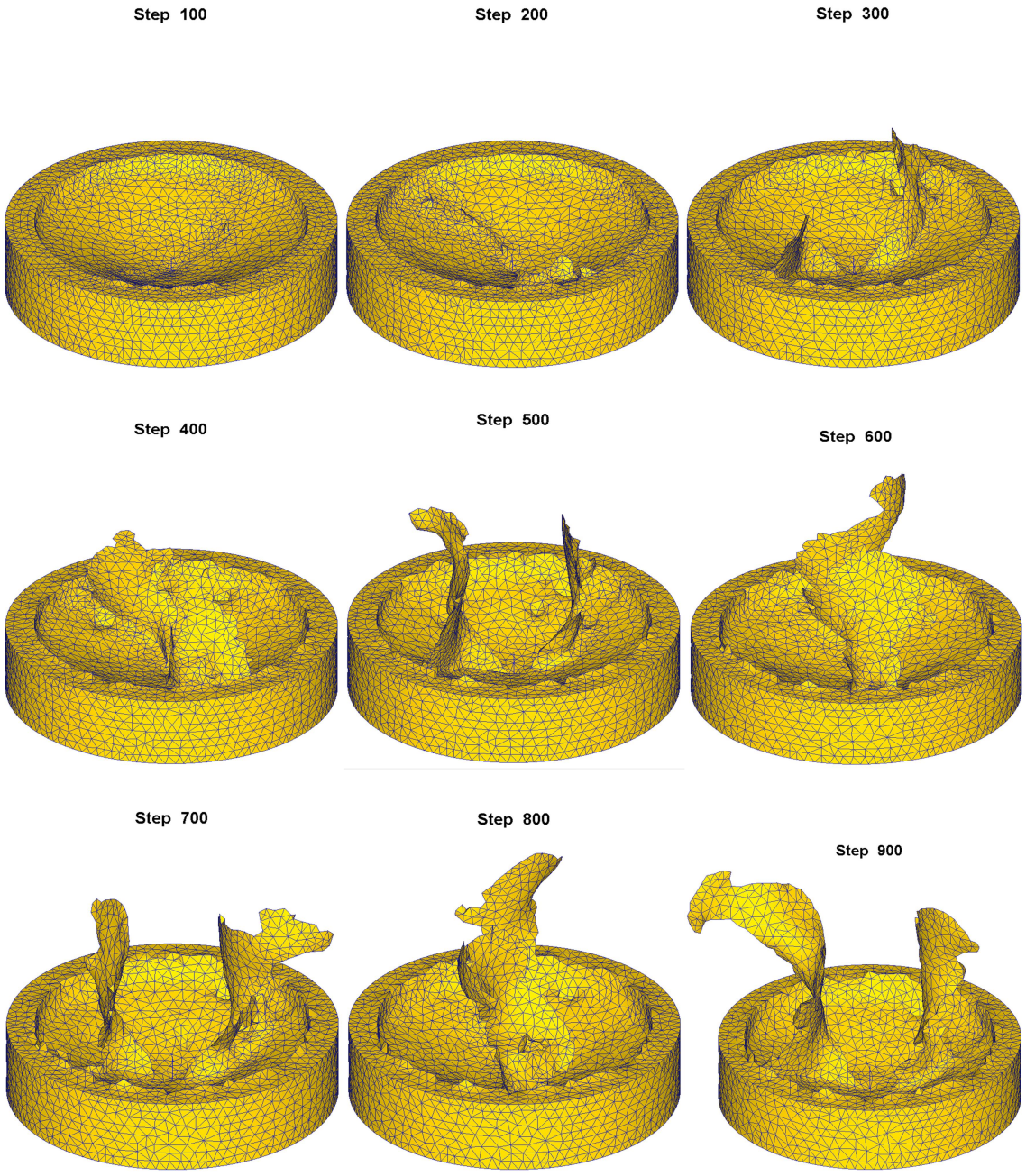
simülasyon sırasında oluşan kesme kuvveti ve moment değerlerinde ani yükselme veya düşmeler görülür.



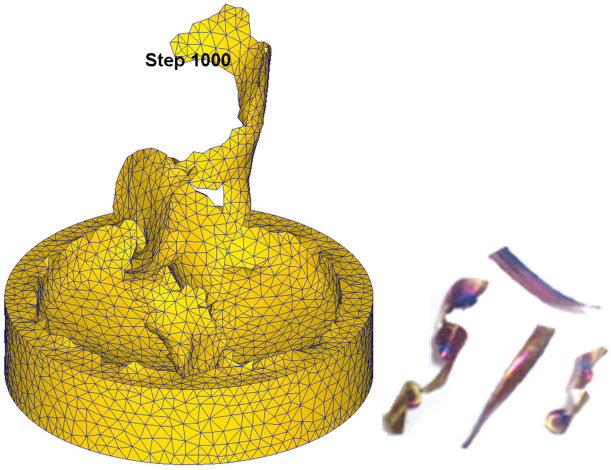
Şekil 5.3. Delme simülasyonlarındaki kuvvet ve moment değişimleri a) İlerleme kuvveti b) Döndürme momenti

Simülasyon sonuçları, Şekil 5.3'te verilen kesmenin kısmen kararlı olduğu (ardışık step değerleri için kuvvet/moment değişimlerinin çok farklılık göstermediği) seçilen bir bölgenin ortalamasıdır. Seçilen bölgenin yerinin de etkisiyle tüm kesme deneyleri için delme simülasyonları, Bölüm 4.2'de detayları verilen aynı işlemler uygulanarak yapılmasına rağmen; bazı deneyler için birbirine çok yakın gerçekçi sonuçlar vermesinin yanında bazı deneyler için de çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, simülasyonlar sırasında sürekli olarak gerçekleşen ağ yapısındaki bozulmalara atfedilebilir. Deneylerle ölçülen sonuçlarla simülasyon sonuçları arasındaki farklılığın bir diğer sebebinin de esas itibariyle iş parçası malzemesi için seçilen malzeme modelinin etkisi olduğu düşünülebilir. Ancak delme deneyleri sırasında dinamometre yardımıyla ölçülen ilerleme kuvveti (F_z) ve döndürme momenti (M_z) değerlerinin genel olarak simülasyonlarla elde edilen sonuçlarla paralellik arz ettiği söylenebilir (Şekil 5.1, Şekil 5.2).

Şekil 5.4'te 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme için simülasyonlar sırasındaki 100'er steplik aşamalarla örnek bir talaş oluşum süreci ve deney sonrası talaş biçimi gösterilmiştir. Simülasyonların gerçekleştirildiği *Deform* programı kullanıcı dostu (kullanımı kolay) bir program olmasına rağmen, çözüm süresi (simülasyon) inanılmaz derecede çok uzundur. Bazı simülasyonlardaki talaş oluşum sürecinde görülen programın yaptığı otomatik alt step işlemleri etkisiyle, bilgisayar kesintisiz çalışmasına rağmen, bir simülasyonun yapılması yaklaşık 10-15 günü bulmuştur.



Şekil 5.4. Delme simülasyonlarındaki talaş oluşum süreci

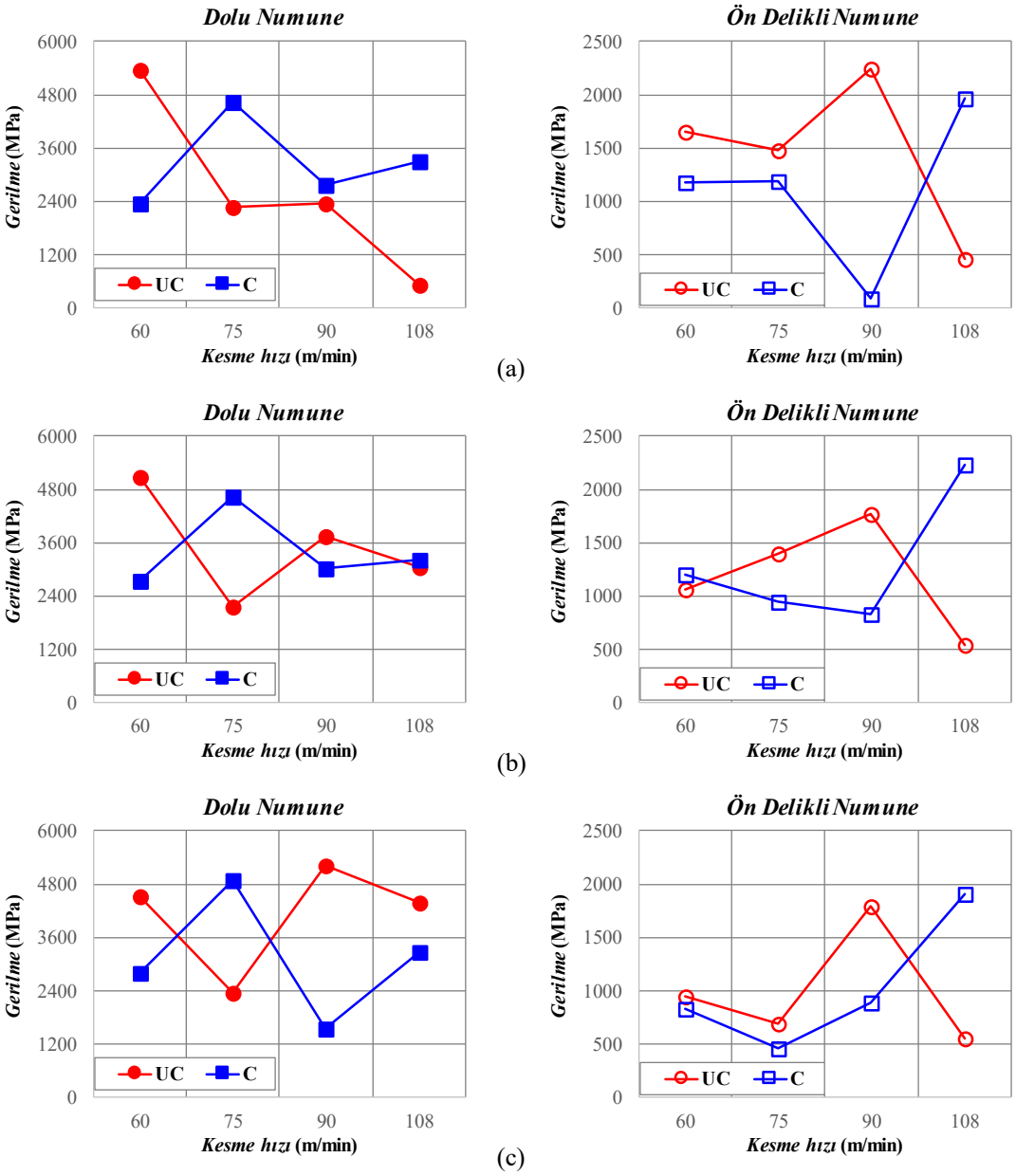


Şekil 5.4. Delme simülasyonlarındaki talaş oluşum süreci (devamı)

5.2. Gerilme Analizi Sonuçları

Bölüm 4.2.7'de verilen prosedür uygulanarak, simülasyonlar tamamlandıktan sonra, kesici takımda (matkapta) oluşan normal gerilmeler (σ_x, σ_y, σ_z), kayma gerilmeleri (τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}), en büyük asal gerilme (σ_1), en küçük asal gerilme (σ_3) ve efektif gerilme (σ_{vM}) incelenmiştir.

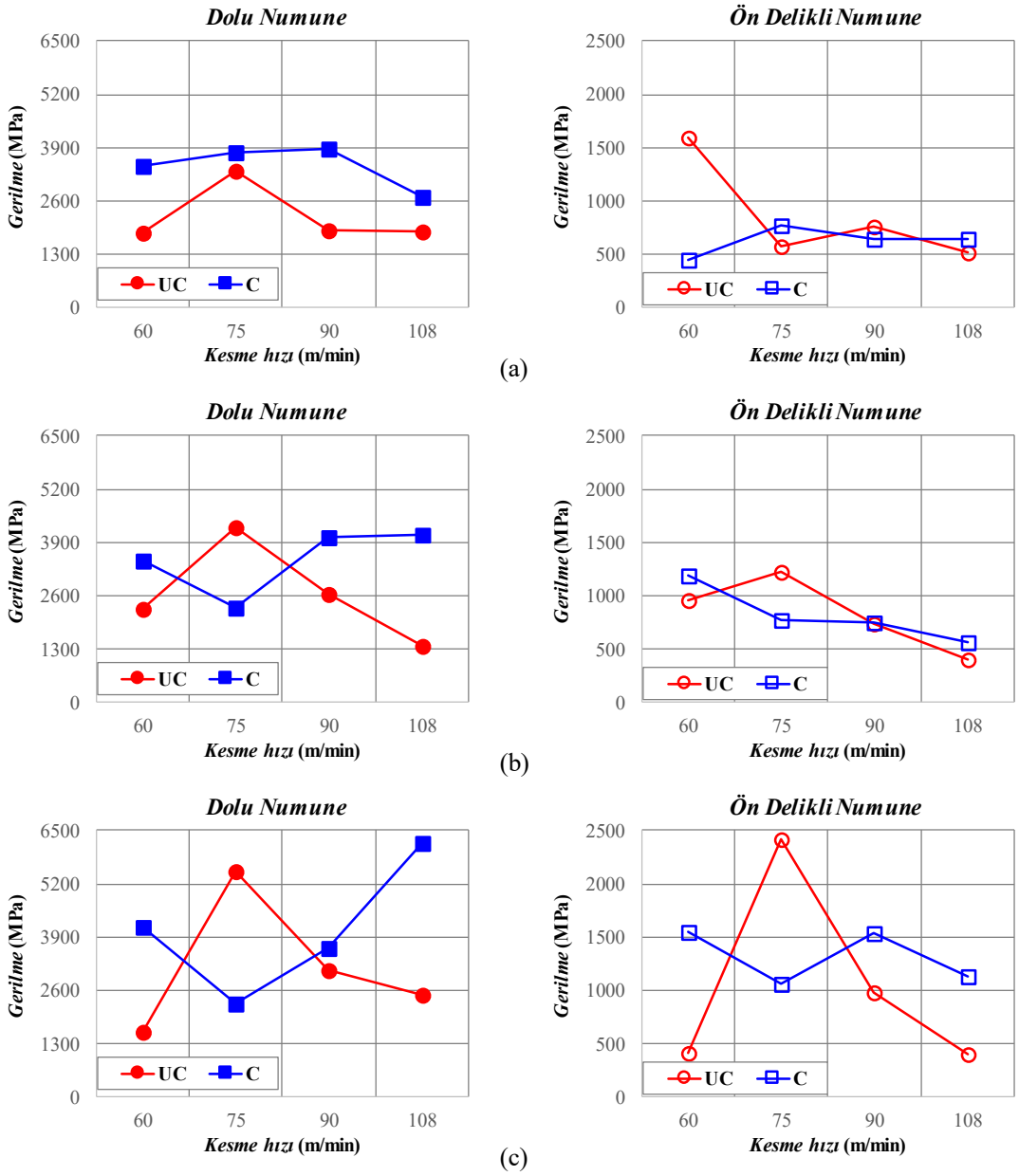
σ_x normal gerilme sonuçlarının kesme hızıyla değişimi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Tamamı basma biçiminde (negatif işaretli) olan gerilmelerin en yüksek değerleri dolu numuneler için kaplamasız matkapta 60 m/min ve 0,15 mm/rev kesme şartlarında yaklaşık 5400 MPa ve kaplamalı matkapta ise 75 m/min ve 0,25 mm/rev'de yaklaşık 4900 MPa olmuştur. Ön delik delinmiş numunelerde ise 0,15 mm/rev ilerleme değerinde kaplamasız matkapta 90 m/min'de yaklaşık 2300 MPa ve kaplamalı matkapta ise 108 m/min'de yaklaşık 2000 MPa olarak gerçekleşmiştir. Dolu numuneler için elde edilen gerilmelerin ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıktığı görülmüştür.



Şekil 5.5. Kesme hızına göre σ_x normal gerilme değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

σ_y normal gerilme sonuçlarının kesme hızıyla değişimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Tamamı basma biçiminde (negatif işaretli) olan gerilmelerin en yüksek değerleri 0,25 mm/rev ilerleme değerinde elde edilmiştir. Dolu numuneler için kaplamasız matkapta yaklaşık 5500 MPa (75 m/min'de) ve kaplamalı matkapta ise yaklaşık 6200 MPa (108 m/min'de) olmuştur. Ön delik delinmiş numunelerde ise kaplamasız matkapta 75 m/min'de yaklaşık 2500 MPa ve kaplamalı matkapta ise 60 m/min'de yaklaşık 1600 MPa olarak

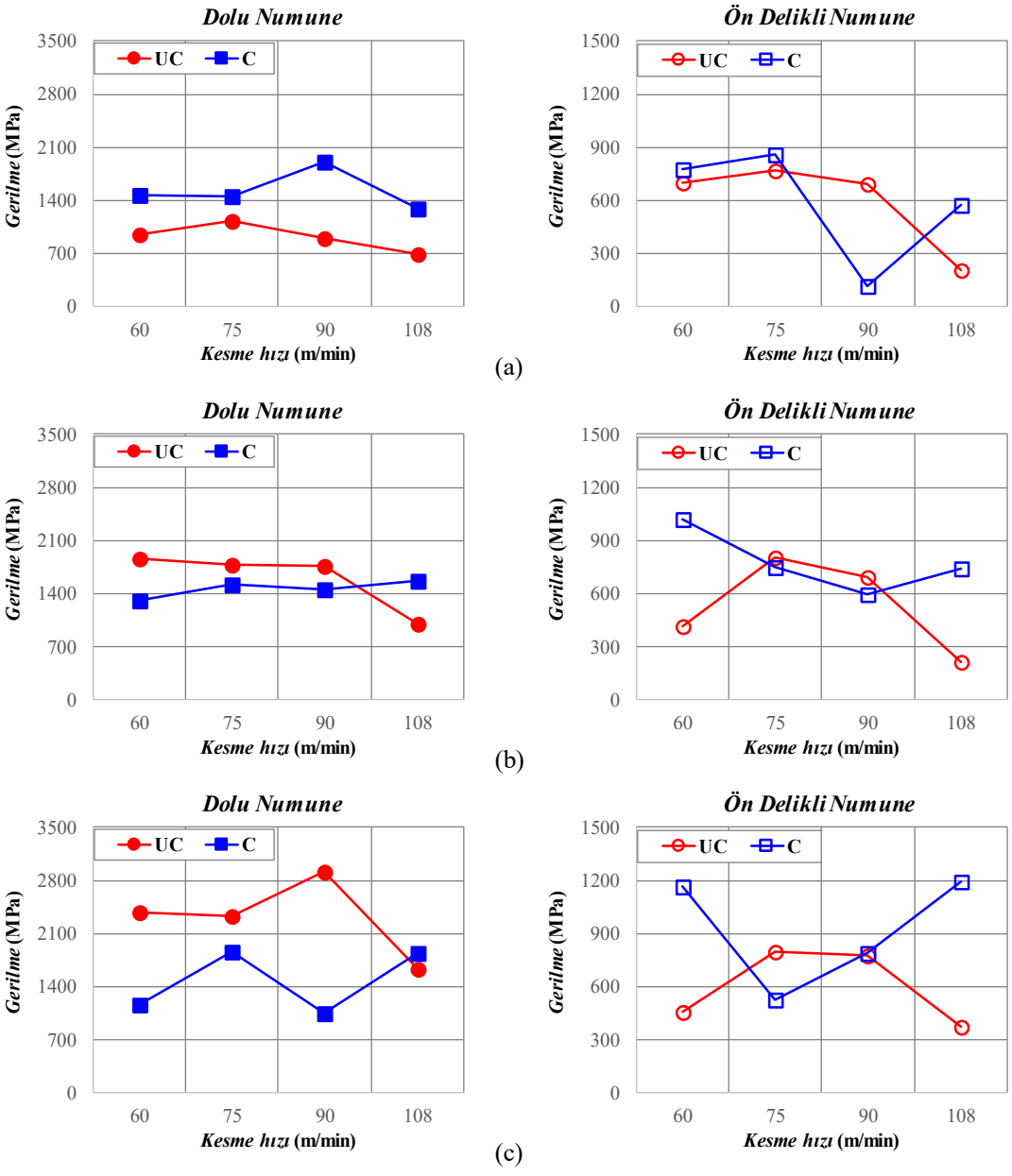
gerçekleşmiştir. Dolu numuneler için elde edilen gerilmelerin ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıktığı görülmüştür.



Şekil 5.6. Kesme hızına göre σ_y normal gerilme değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

Diğer normal gerilmelerin aksine çekme biçimli σ_z normal gerilme sonuçlarının kesme hızıyla değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir. En yüksek σ_z normal gerilme değerleri dolu numuneler için 90 m/min kesme hızında kaplamasız matkapta 0,25 mm/rev'de yaklaşık 2900 MPa ve kaplamalı matkapta ise 0,15 mm/rev'de yaklaşık 1900 MPa olmuştur. Ön delik delinmiş numunelerde ise 0,25 mm/rev ilerleme değerinde kaplamasız matkapta 75

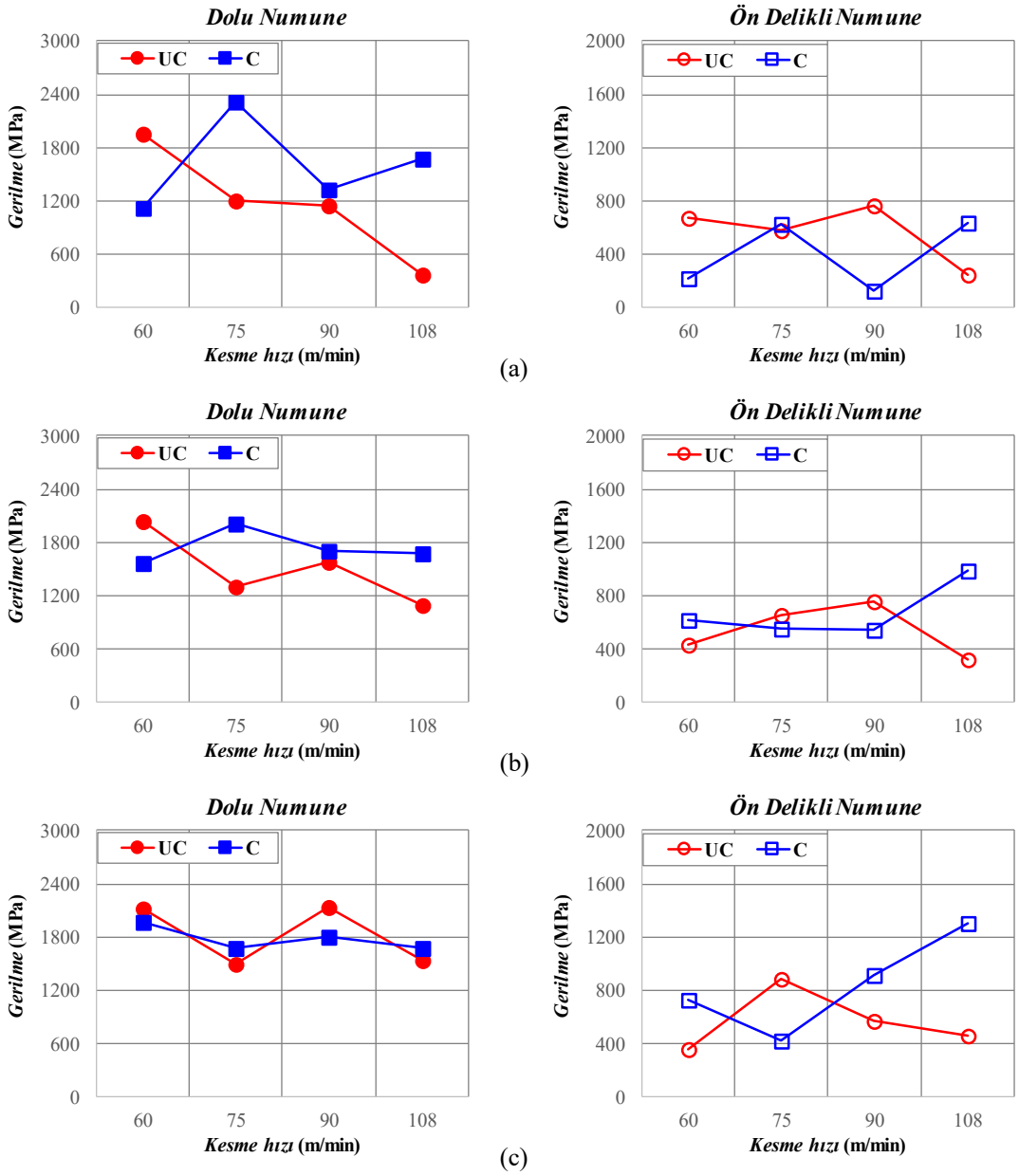
m/min'de yaklaşık 800 MPa ve kaplamalı matkapta ise 108 m/min'de yaklaşık 1200 MPa olarak gerçekleşmiştir. Dolu numuneler için elde edilen gerilmelerin ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıktığı görülmüştür.



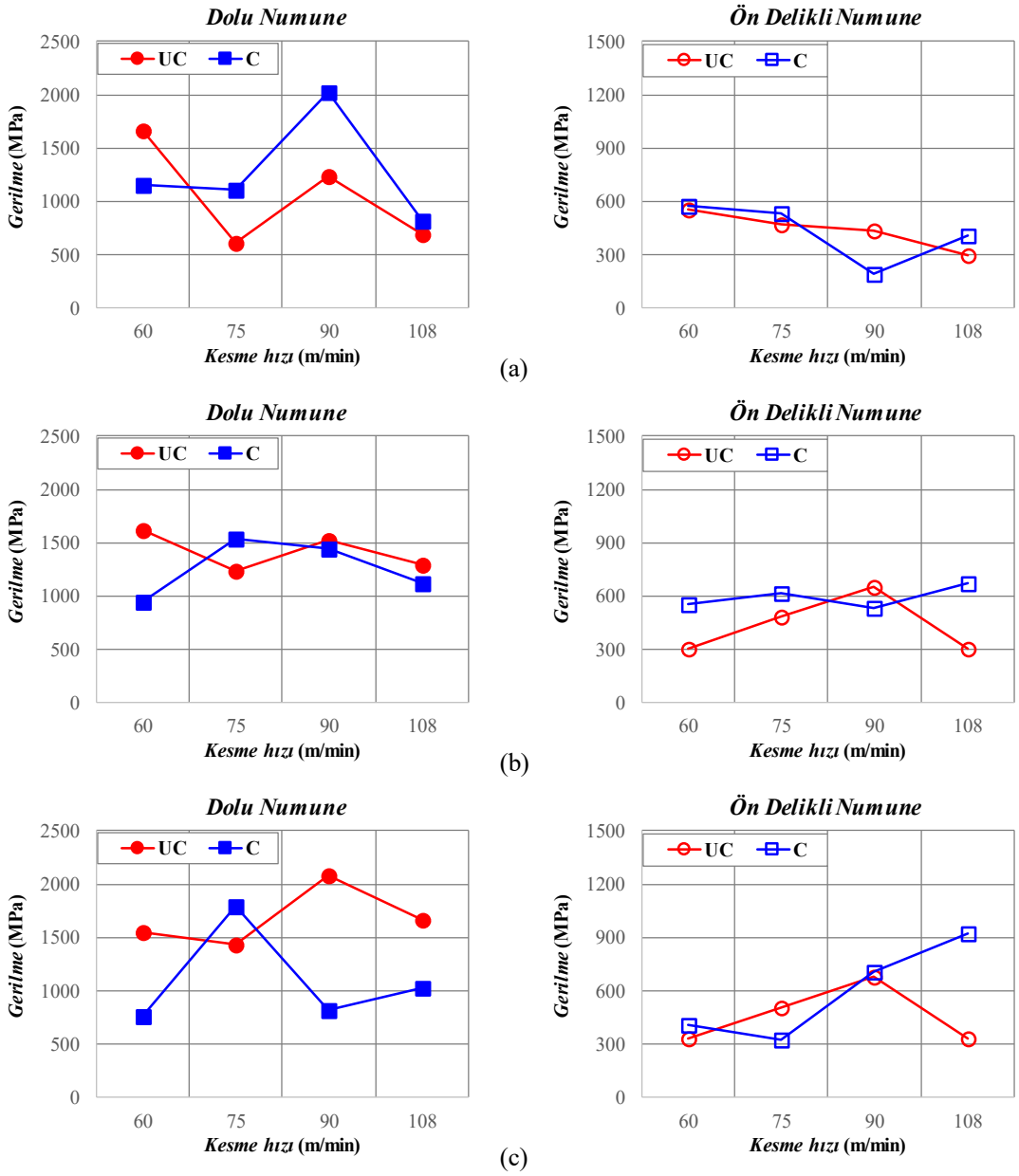
Şekil 5.7. Kesme hızına göre σ_z normal gerilme değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

τ_{xy}, τ_{yz} ve τ_{zx} kayma gerilmesi sonuçlarının kesme hızıyla değişimi sırasıyla Şekil 5.8 - Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Tüm kayma gerilmeleri açısından dolu numuneler için elde

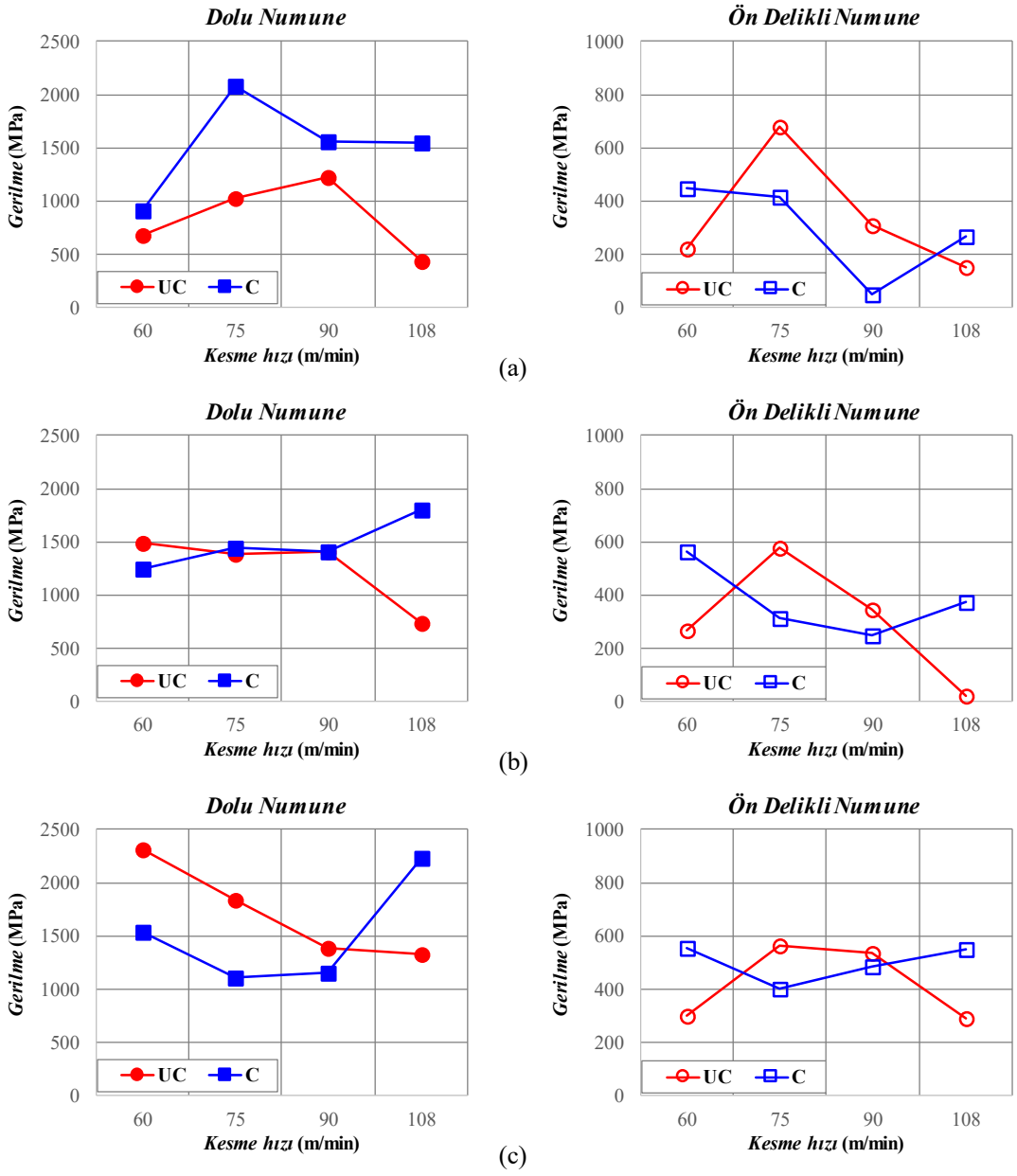
edilen gerilmelerin ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıktığı görülmüştür.



Şekil 5.8. Kesme hızına göre τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev



Şekil 5.9. Kesme hızına göre τ_{yz} kayma gerilmesi değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev



Şekil 5.10. Kesme hızına göre τ_{zx} kayma gerilmesi değerlerinin değişimleri a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

Genel olarak kesme hızı arttıkça gerilmelerin yükselme, buna karşılık ilerleme değerindeki artışla gerilmelerin kısmen küçülme eğiliminde olduğu söylenebilir. Analizlerde τ_{xy} ve τ_{zx} kayma gerilmelerinin en yüksek değerleri pozitif işaretli olurken τ_{yz} kayma gerilmesinin en yüksek değerleri ise negatif işaretli çıkmıştır (Şekil 5.8 - Şekil 5.10).

τ_{xy} gerilmelerinin en yüksek değerleri (Şekil 5.8) dolu numuneler için kaplamasız matkapta 90 m/min ve 0,25 mm/rev kesme şartlarında ve kaplamalı matkapta ise 75 m/min ve 0,15 mm/rev'de yaklaşık 2200 MPa - 2300 MPa seviyelerinde olmuştur. Ön delik delinmiş

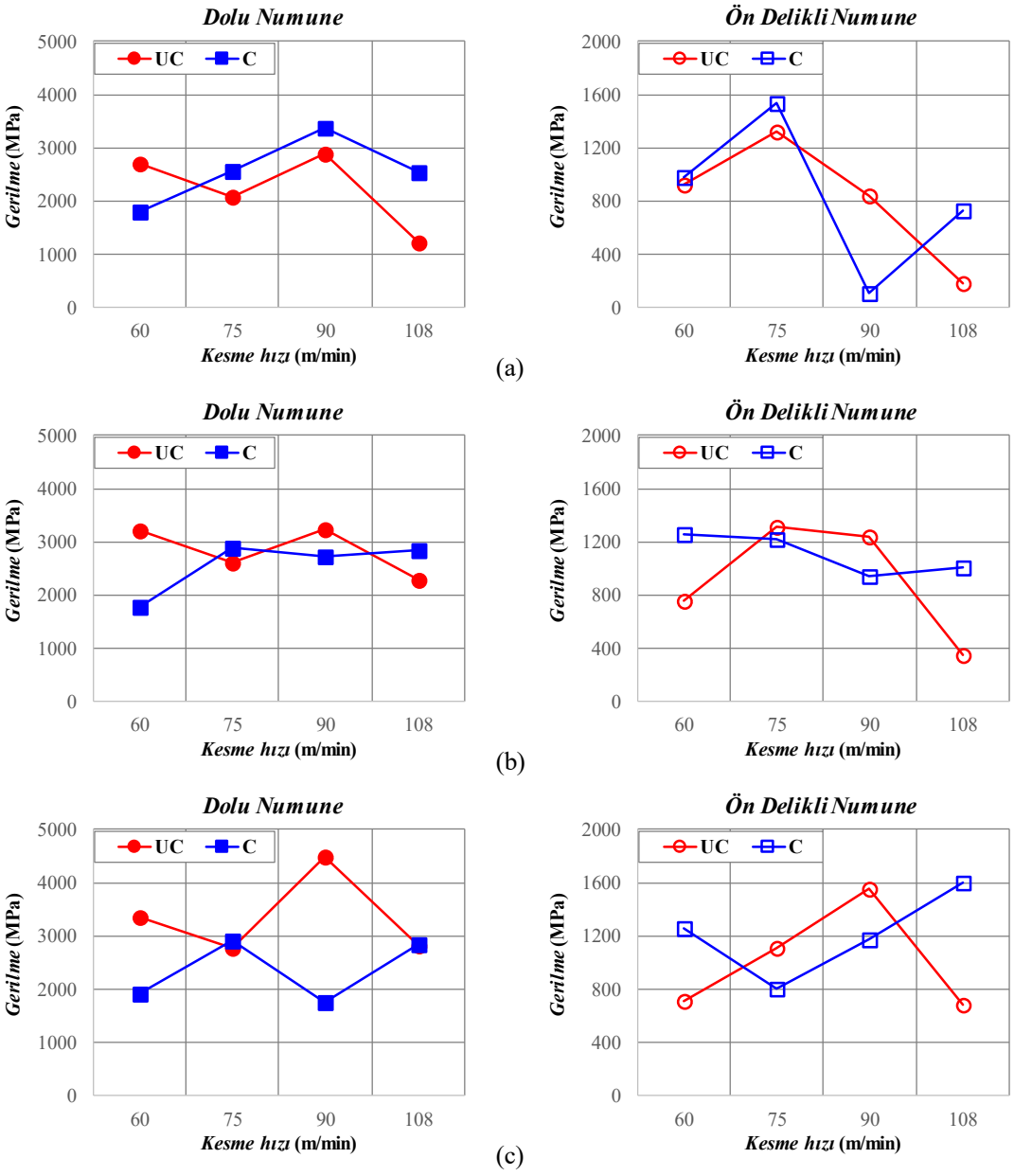
numunelerde ise 0,25 mm/rev ilerleme değerinde kaplamasız matkapta 75 m/min'de yaklaşık 900 MPa ve kaplamalı matkapta ise 108 m/min'de yaklaşık 1300 MPa olarak gerçekleşmiştir.

τ_{yz} gerilmelerinin en yüksek değerleri (Şekil 5.9) dolu numuneler için 90 m/min kesme hızında kaplamasız matkapta 0,25 mm/rev'de ve kaplamalı matkapta ise 0,15 mm/rev'de yaklaşık 2000 MPa - 2100 MPa seviyelerinde olmuştur. Ön delik delinmiş numunelerde ise 0,25 mm/rev ilerleme değerinde kaplamasız matkapta 75 m/min'de yaklaşık 700 MPa ve kaplamalı matkapta ise 108 m/min'de yaklaşık 900 MPa olarak gerçekleşmiştir.

τ_{zx} gerilmelerinin en yüksek değerleri (Şekil 5.10) dolu numuneler için 0,25 mm/rev ilerleme değerinde kaplamasız matkapta 60 m/min ve kaplamalı matkapta ise 108 m/min'de yaklaşık 2200 MPa - 2300 MPa seviyelerinde olmuştur. Ön delik delinmiş numunelerde ise kaplamasız matkapta 75 m/min ve 0,15 mm/rev kesme şartlarında ve kaplamalı matkapta ise 60 m/min ve 0,25 mm/rev'de yaklaşık 600 MPa - 700 MPa seviyelerinde gerçekleşmiştir.

σ_x, σ_y ve σ_z normal gerilme sonuçlarının (Şekil 5.5- Şekil 5.7) τ_{xy}, τ_{yz} ve τ_{zx} kayma gerilmesi sonuçlarından (Şekil 5.8- Şekil 5.10) daha büyük olması sebebiyle; matkabın kesme yüzeyleri ve muhtemel deformasyonu açısından normal gerilmelerin çok daha etkili olduğu söylenebilir.

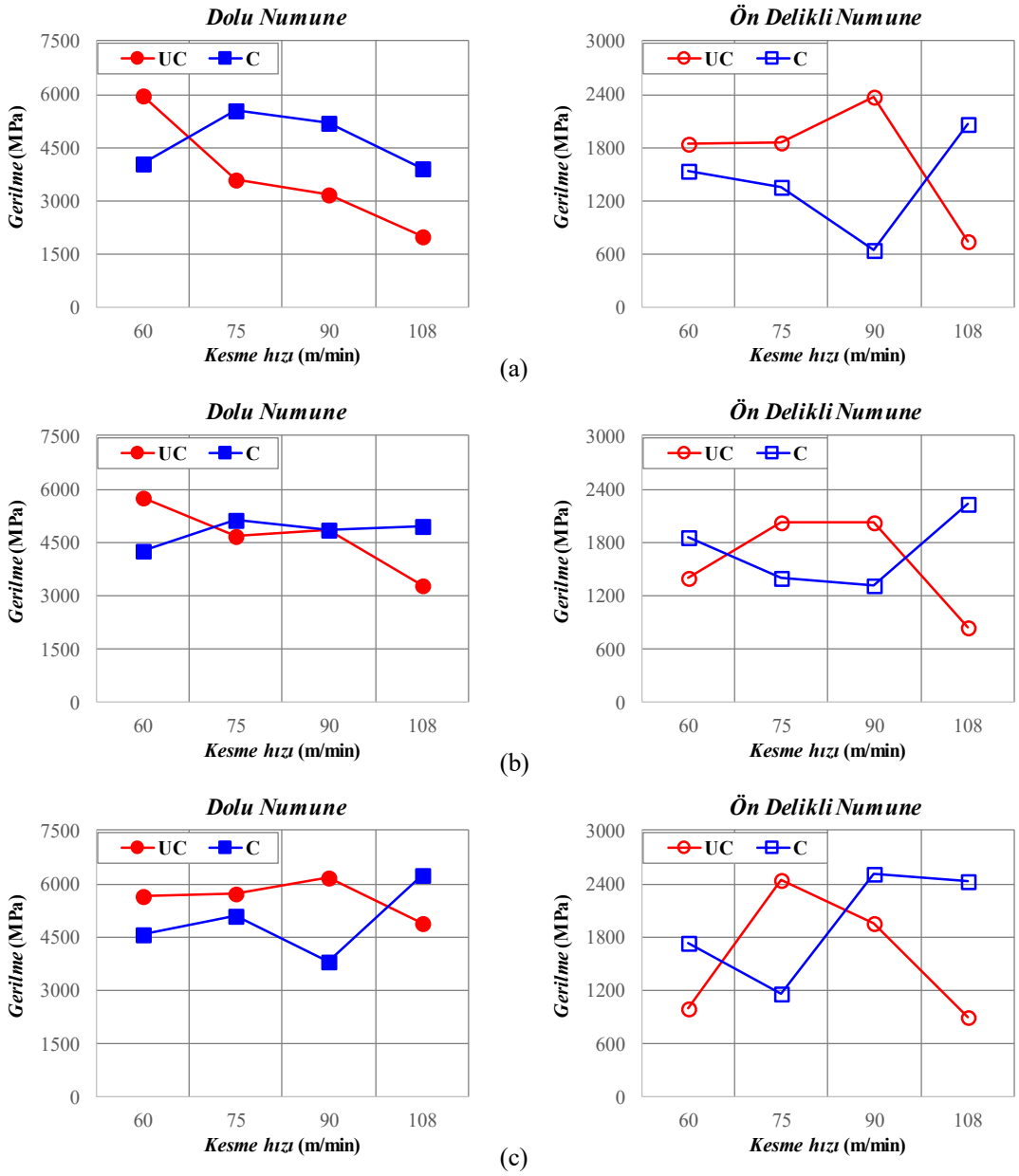
Çekme biçimindeki en büyük asal gerilme (σ_1) sonuçlarının kesme hızıyla değişimi Şekil 5.11'de verilmiştir. En yüksek σ_1 gerilmeleri; dolu numuneler için 90 m/min ve 0,25 mm/rev kesme şartlarında kaplamasız matkapta yaklaşık 4500 MPa ve ön delik delinmiş numunelerde ise kaplamalı matkapta 108 m/min ve 0,25 mm/rev'de yaklaşık 1600 MPa olarak gerçekleşmiştir. Dolu numuneler için elde edilen en büyük asal gerilmeler ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıkmıştır. Genel olarak kesme hızı arttıkça kaplamasız matkaplarda gerilmelerin azaldığı buna karşılık kaplamalı matkaplarda ise gerilmelerde kısmen yükselmelerin olduğu görülmüştür. Genel olarak ilerleme değerindeki artışlar neticesinde gerilmeler de artmaktadır.



Şekil 5.11. Kesme hızına göre en büyük asal gerilme (σ_1) değerlerinin değişimleri
a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

Basma biçimindeki en küçük asal gerilme (σ_3) sonuçlarının kesme hızıyla değişimi Şekil 5.12'de verilmiştir. 0,25 mm/rev ilerleme değerinde elde edilen en yüksek σ_3 gerilmeleri; dolu numuneler için kaplamasız matkapta 90 m/min'de yaklaşık 6200 MPa ve kaplamalı matkapta da 108 m/min'de yaklaşık 6300 MPa ve ön delik delinmiş numunelerde ise kaplamasız matkapta 75 m/min ve kaplamalı matkapta da 90 m/min'de yaklaşık 2500 MPa olarak gerçekleşmiştir. Matkabın ilerleme yönündeki basma biçimindeki büyük ilerleme kuvvetleri etkisiyle σ_3 gerilmeleri, σ_1 gerilmelerine kıyasla daha yüksektir (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12). Dolu numuneler için elde edilen en büyük asal gerilmeler ön delik delinmiş

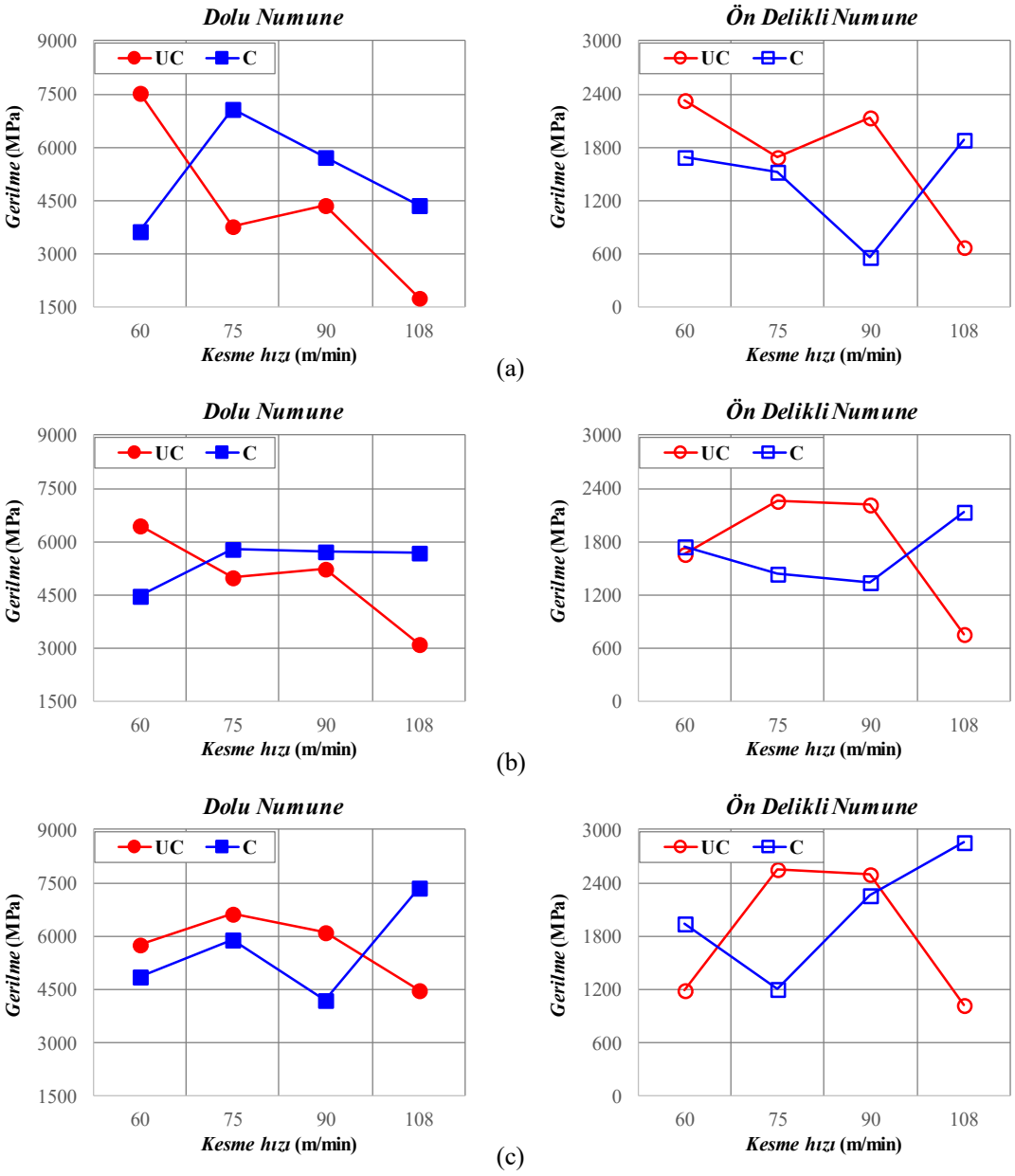
numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıkmıştır. Genel olarak kesme hızı değerindeki artışlar neticesinde gerilmelerin de arttığı söylenebilir.



Şekil 5.12. Kesme hızına göre en küçük asal gerilme (σ_3) değerlerinin değişimleri
a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

Efektif gerilme (σ_{vM}) sonuçlarının kesme hızıyla değişimi Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Dolu numuneler için elde edilen ilerleme kuvveti ve döndürme momentlerinin ön delik delinmiş numunelerdeki kuvvet ve momentlere göre daha yüksek olması ve kesicinin daha büyük yüzeyle temasta bulunması sebebiyle dolu numuneler için elde edilen efektif gerilmeler ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha

yüksek çıkmıştır. En yüksek efektif gerilme; dolu numuneler için 60 m/min ve 0,15 mm/rev kesme şartlarında kaplamasız matkapta yaklaşık 7500 MPa ve ön delik delinmiş numunelerde ise kaplamalı matkapta 108 m/min ve 0,25 mm/rev'de yaklaşık 2900 MPa olarak gerçekleşmiştir. 0,15 mm/rev için gerilmeler kesme hızındaki artışla düşme eğilimde iken ilerlemenin artmasıyla birlikte büyüyen talaş kesiti etkisiyle gerilmelerin yükselme eğilimde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13.Kesme hızına göre efektif gerilme (σ_{vM}) değerlerinin değişimleri
a) 0,15 mm/rev b) 0,20 mm/rev c) 0,25 mm/rev

Bilindiği üzere efektif gerilme (veya von Mises gerilmesi) hasar kriterlerinden biridir ve malzemede oluşabilecek muhtemel hasar durumları için kestirim yapma amacıyla kullanılır. Bu sebeple dolu numunelerin delinmesi sırasında kaplamasız matkaplar için düşük kesme şartlarının (60 m/min ve 0,15 mm/rev) ve kaplamalı matkaplarda ise yüksek kesme şartları (108 m/min ve 0,25 mm/rev) kullanılarak delik delinmesi sırasında çok daha dikkatli olmak gerekir. Benzer bir yaklaşımla ön delik delinmiş numunelerin delinmesi sırasında özellikle yüksek ilerleme değerinde (0,25 mm/rev) kaplamasız matkaplar için 75 m/min ve kaplamalı matkaplar için 108 m/min kullanılarak delik delinmesi sırasında çok daha dikkat edilmesi gerekir.

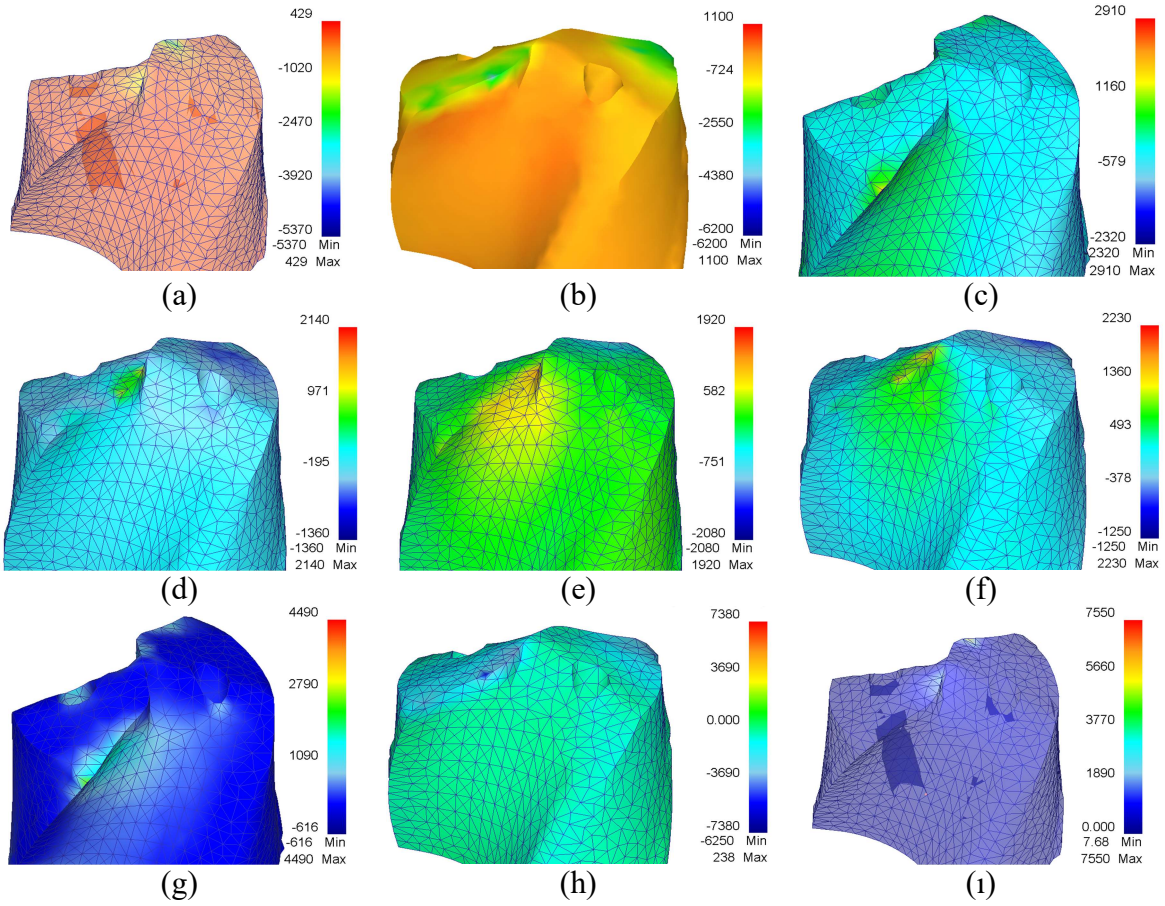
5.3. Gerilme Dağılımları

Bölüm 4.2.7'de verilen prosedür uygulanarak, simülasyonlar tamamlandıktan sonra, matkapta oluşan normal gerilmeler (σ_x, σ_y, σ_z), kayma gerilmeleri (τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}), en büyük ve en küçük asal gerilmeler (sırasıyla σ_1, σ_3) ve efektif gerilme (σ_{vM}) için gerilme dağılımları elde edilmiştir. Şekil 5.14'te verilen gerilme dağılımları en yüksek gerilme değerlerinin elde edildiği dolu numune üzerinde kaplamasız matkaplarda yapılan analizlerden alınmıştır.

σ_x normal gerilme dağılımı (Şekil 5.14a) ve σ_{vM} efektif gerilme dağılımı (Şekil 5.14ı) 60 m/min kesme hızı ve 0,15 mm/rev ilerleme değerinde kesme şartlarına sahip simülasyondan elde edilmiştir. σ_y normal gerilme dağılımı (Şekil 5.14b), τ_{zx} kayma gerilmesi dağılımı (Şekil 5.14f) ve σ_3 en küçük asal gerilme dağılımı (Şekil 5.14h) 108 m/min kesme hızı ve 0,25 mm/rev ilerleme değerinde kesme şartlarına sahip simülasyondan elde edilmiştir. σ_z normal gerilme dağılımı (Şekil 5.14c), τ_{xy} ve τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları (Şekil 5.14d-e) ile σ_1 en büyük asal gerilme dağılımı (Şekil 5.14g) 90 m/min kesme hızı ve 0,25 mm/rev ilerleme değerinde kesme şartlarına sahip simülasyondan elde edilmiştir.

Şekil 5.14'te gösterilen gerilme dağılımlarından gerilmelerin genellikle matkaptaki (bakınız Şekil 2.6) radyal ağız çevresinde ve kesici ağızlar üzerinde yoğunlaştığı ve etkilerinin yanak ve kısmen de topuk kısmına kadar devam ettiği görülmüştür. Muhtemel matkap aşınması, körelme veya daha da ilerleyen durumlarda kırılmanın radyal ağız çevresinden başlayabileceği düşünülmektedir. Şekiller'de verilen gerilimlerin

dağılımlarından da görüldüğü üzere, olası matkap aşınması veya hasarının aşınma veya körelmenin, matkabın keski kenarı etrafında olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5.14. Gerilme dağılımları a) σ_x b) σ_y c) σ_z d) τ_{xy} e) τ_{yz} f) τ_{zx} g) σ_1 h) σ_3 ı) σ_{vM}

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

AISI 1050 imalat çeliği üzerinde yapılan delme deneyleri ile kesici takım kaplaması, kesme hızı ve ilerlemenin kesme bölgesinde oluşan ilerleme kuvveti ve döndürme momentine etkisinin incelendiği ve kesici takım gerilmelerinin araştırıldığı bu çalışmayla elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Ölçülen kesme kuvveti bileşenleri içerisinde delme sırasında büyük öneme sahip olan ilerleme kuvveti esas alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda kaplamasız ve kaplamalı matkaplarla yapılan deneylerin tamamında sabit kesme hızında ilerleme hızı arttıkça ilerleme kuvvetlerinde de bir artış görülmüştür.
- İlerleme miktarının, ilerleme kuvvetleri üzerindeki etkisinin kesme hızına göre daha belirgin olması sebebiyle, düşük ilerleme miktarlarında düşük ilerleme kuvvetleri elde edilmiştir.
- Kaplamasız ve kaplamalı matkapların her ikisinde de ilerleme değerine göre ilerleme kuvvetindeki değişimler paralellik arz etmektedir. Bütün kesme parametreleri kombinasyonlarında kaplamalı takımlardan elde edilen ilerleme kuvveti değerleri kaplamasız takımlarla elde edilenlerden daha düşük olmuştur.
- Kaplamalı takımlarla elde edilen ilerleme kuvveti değerleri kaplamasız takımlarla elde edilenlere göre yaklaşık %20-%90 seviyelerinde daha düşük çıkmıştır.
- Talaş hacminin önceden % 50 oranda boşaltılmış olması (ön delikli numune) ilerleme kuvvetlerinin ve döndürme momentlerinin dolu numunelerdeki değerlere nazaran daha düşük elde edilmesini sağlamıştır.
- Kesme hızı ve ilerleme miktarının ilerleme kuvveti üzerinde etkisi olduğu kadar moment değerleri üzerinde de etkisinin olduğu görülmektedir. Artan ilerleme miktarları ve kesme hızlarıyla birlikte moment değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.
- Takımlara kaplama yapılmış olmasının moment değerlerinde de kayda değer bir düşüşe sebep olduğunu söylemek mümkündür. Düşük sürtünme katsayısı sebebiyle ilerleme kuvvetleri düşmüş, dolayısıyla bu durum moment değerlerine de yansımıştır.
- Deneylerle ölçülen ilerleme kuvveti ve döndürme momenti sonuçlarıyla simülasyonlarla elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıklar vardır. Ancak simülasyonlarla elde edilen kuvvet ve moment değerlerinin genel olarak delme

deneyleri sırasında dinamometre yardımıyla ölçülen sonuçlarla paralellik arz ettiği söylenebilir.

- Deform programı kullanıcı dostu (kullanımı kolay) bir program olmasına rağmen, çözüm süresi (simülasyon) inanılmaz derecede çok uzun sürmektedir. Simülasyonlarla elde edilen talaş oluşumları gerçekçi sonuçlar ortaya koymaktadır.
- Dolu numuneler için elde edilen gerilmelerin ön delik delinmiş numunelerdeki gerilmelere kıyasla belirgin bir biçimde daha yüksek çıkmıştır.
- Genel olarak kesme hızı arttıkça gerilmelerin yükselme, buna karşılık ilerleme değerindeki artışla gerilmelerin kısmen küçülme eğiliminde olduğu söylenebilir.
- Daha büyük olmaları sebebiyle; matkabın kesme yüzeyleri ve muhtemel deformasyonu açısından normal gerilmelerin çok daha etkili olduğu söylenebilir.
- Genel olarak kesme hızı ve ilerleme değerindeki artışlar neticesinde kaplamasız matkaplarda gerilmelerin azaldığı buna karşılık kaplamalı matkaplarda ise gerilmelerde kısmen yükselmelerin olduğu görülmüştür.
- Matkabın ilerleme yönündeki basma biçimindeki büyük ilerleme kuvvetleri etkisiyle σ_3 gerilmeleri, σ_1 gerilmelerine kıyasla daha yüksektir.
- Efektif gerilme sonuçları doğrultusunda; Dolu numunelerin delinmesi sırasında kaplamasız matkaplar için düşük kesme şartlarının (60 m/min ve 0,15 mm/rev) ve kaplamalı matkaplarda ise yüksek kesme şartları (108 m/min ve 0,25 mm/rev) kullanılarak delik delinmesi sırasında çok daha dikkatli olmak gerekir.
- Benzer bir yaklaşımla ön delik delinmiş numunelerin delinmesi sırasında özellikle yüksek ilerleme değerinde (0,25 mm/rev) kaplamasız matkaplar için 75 m/min ve kaplamalı matkaplar için 108 m/min kullanılarak delik delinmesi sırasında çok daha dikkat edilmesi gerekir.
- Gerilme dağılımlarından gerilmelerin genellikle matkaptaki radyal ağız çevresinde ve kesici ağızlar üzerinde yoğunlaştığı ve etkilerinin yanak ve kısmen de topuk kısmına kadar devam ettiği görülmüştür.
- Muhtemel matkap aşınması, körelme veya daha da ilerleyen durumlarda kırılmanın radyal ağız çevresinden başlayabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Tonshoff, H. L., Spintig, W., Konig, W. and Neises, A. (1994). Machining of holes: Developments in drilling techonolgy. *Annals of the CIRP*, 43, 551-560.

2. Kıvak, T. (2007). *Inconel 718'in delinebilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-34.

3. Sandvik Coromant. (1994). *Modern Metal Cutting*, Sweden: Sandvikens Tryckeri, 2-61.

4. Şahin, Y. (2003). *İmal Usulleri*. Gazi Kitapevi, Ankara, 248-259.

5. Yağmur, S. (2011). *Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-26.

6. Çakır, M.C. (2000). *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*. Bursa: Vipaş A.Ş, 350-390.

7. Şeker, U. (1997). *Takım Tasarımı Ders Notları*. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 5-11.

8. Bağcı, M. (1960). *Tesviyecilik Teknolojisi*. Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları, Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı, 170-175.

9. Lazar, M. B. (2012). *Cutting force modelling for drilling of fiber-reinforced composites*. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology.

10. Akkurt, M. (1998). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 56-72.

11. Palmer, W.B. and Oxley, P.L.B. (1959). Mechanics of orthogonal machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 173, 623-654.

12. Kaynak, Y. (2006). *Matkap ile delik delme esnasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve sıcaklığın değişimine etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 60-66.

13. Avuncan, G. (1998). *Talaş Kaldırma Ekonomisi ve Kesici Takımlar*. İstanbul: Makine Takım Endüstri A.Ş., 34-41.

14. 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.

15. Topçu, M. ve Taşgetiren, S. (1998). *Mühendisler İçin Sonlu Eleman Metodu*. Denizli: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayın No: 007, 225-230.

16. Chandrupatla, T.R. and Belegundu, A.D. (1997). *Introduction to The Finite Elements in Engineering* (2nd edition). New Jersey: Prentice Hall, 1-11, 137-141, 226, 280-285.

17. Bakır, S. (2014). *Dış yüzeye kanal açma sırasında kesici takıma etkiyen gerilmelerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-20.

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*, USA: American Mathematical Society Proceedings Volume II, 210-252.

19. Ugural, A.C. and Fenster, S.K. (1995). *Advanced Strength and Applied Elasticity* (3rd Edition). New Jersey: Printice Hall, 28-31.

20. Sekmen, M. (2013). *Talaş açısının kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmeler üzerindeki etkilerinin simülasyonu ve deneysel olarak doğrulanması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 50-54.

21. Deform-3D V10.0 User's Manual. (2009). *Deform*, Ohio.

22. İnternet (Nisan, 2015): Simulating drilling processes with Deform-3D, Web: http://home.zcu.cz/~sbenesov/PDF/DEFORM3D_Machining/Simulating_Drilling_Processes_with_DEFORM.pdf adresinden 7 Nisan 2015'te alınmıştır.

23. Wan, Y., Tang, Z.T., Liu, Z.Q. and Ai, X. (2004). The assessment of cutting temperature measurements in high speed machining, *Materials Science Forum*, 162-166.

24. Q'Sullivan, D. and Cotterell, M. (2001). Temperature measurement in single point turning. *Journal of materials Processing Technology*, 118: 301-308.

25. Kalidas, S., DeVor, R.E. and Kapoor, S.G. (2001). Experimental investigation of the effect od drill coatings on hole quality under dry and wet drilling conditions. *Surface and Coatings Technology*, 148: 117-128.

26. Kelly, J.F. and Cotterell, M.G. (2002). Minimal lubrication machining of aluminium alloys. *Journal of Materials processing Technology*, 120: 327-334.

27. Dörr, J., Mertens, T.H., Engering, G. and Lahres, M. (2003). In-Situ'temperature measurement to determine the machining potential of different tool coating. *Surface and Coatings Technology*, 174-175, 389-392.

28. Zeilmann, R.P. and Weingaertner, W.L. (2006). Analysis of temperature during drilling of Tİ6Al4V with minimal quantity of lubricant. *Journal of Materials processing Technology*, 18-23.

29. Endo, H., Murahashi, T. and Marui, E. (2007). Accuracy estimation of drilled holes with small diameter and influence of drill parameter on the machining accuracy when drilling in mild steel sheet. *Internatioanl Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 175-181

30. Çakır, A. (2009). *Al 7075 ve Al 6013 alüminyum malzemelerin delme operasyonları esnasındaki kesme parametrelerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 67-85.

31. Bagci, E. and Özcelik, B. (2006). Finite element and experimental investigation of temperature changes on a twist drill in sequential dry drilling. *Int J. Adv. Manufacturing Technology*, 28: 680-687.

32. Meral, G. (2009). *AISI 1050 malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve delik kalitesi üzerindeki etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-55.

33. Kaplan, Y. (2010). *Delik delmede farklı parametrelerin kesme kuvveti, moment, titreşim, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 38-51.

34. Ertunc, H.M. and Loparo, K.A. (2001). A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling. *Internatioanl Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41: 1347-1362.

35. Hashmi, K., Graham, I.D. and Mill, B. (2000). Fuzzy locig based data selection for the drilling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 55-62.

36. Mohan, N.S., Ramachandra, A. and Kulkarni, S., M. (2005). Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites. *Composite Structures*, 71: 407-413.

37. Özer, A., Özçatalbaş, Y. (2011). Delik delme yöntemiyle kalıcı/kalıntı gerilmelerin ölçülmesi ve gerinim ölçerlerin kalibrasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 26(3), 657-666.

38. Şekerci, K.N. (2012). *AISI 316L malzemesinin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı, kesme kuvvetleri ve delik kalitesi üzerindeki etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

39. Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U., and Günay, M. (2013). Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin kesme bölgesindeki sıcaklığa etkisinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1). 1-6.

40. Tekaud, İ., Demir, H., Seker, U. (2018). Experimental Analysis and Theoretical Modelling of Cutting Parameters in the Drilling of AISI H13 Steel with Coated and Uncoated Drills. *Transactions of Famena*, 42(2): 83-96

41. Agapiou, J.S. and DeVries, M.F. (1990). On the determination of thermal phenomena during drilling - Part I-Analytical models of twist drill temperature distributins. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 30: 203–215.

42. Agapiou, J.S. and Stephenson, D.A. (1994). Analytical and experimental studies of drill temperatures. *Journal of Engineering for Industry*, 116(1), 54-60.

43. Nedelik, J. and Lux, B. (1999). Improved tool performance by aplication of head spreading diamond layers within a multi-layer coating. *International Journal of Refractory Metals and Hard materials*, 17: 275-282.

44. Bono, M. and Ni, J. (2001). The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41: 2261-2270.

45. Li, R. and Shih, A.J. (2007). Spiral point drill temperature and stress in high-throughput drilling of titanium. *Internatioanl Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47 (12-13): 2005-2017.

46. Marasi, A. (2013). Modeling the effects of cutting parameters on the main cutting force of Ti6Al4V alloy by using hybrid approach. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 2 (5), 6-14.

47. Poutord, A., Rossi, F., Poulachon, G., M'Saoubi, R., and Abrivard, G. (2013). Local approach of wear in drilling Ti6Al4V/CFRP for stack modelling. *Procedia CIRP*, 8, 315-320.

48. Gao, F., Tian, X., Liu, S., and Li, B. (2012). The simulation on drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *In Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*. Atlantis Press, Paris, France, 1215-1218.

49. Sha, Z. H., Wang, F., and Zhang, S. F. (2013). Drilling simulation of carbon fiber reinforced plastic composites based on finite element method. *Advanced Materials Research*, 690, 2519-252.

50. Singh, I., Bhatnagar, N., and Viswanath, P. (2008). Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study. *Materials and Design*, 29(2), 546-553.

51. Kyratsis, P., Bilalis, N., and Antoniadis, A. (2011). CAD-based simulations and design of experiments for determining thrust force in drilling operations. *Computer-Aided Design*, 43(12), 1879-1890.

52. İnternet (Nisan, 2015): Choi, J., Min, S., Dornfeld, D., Alam, M. and Tzong, T. (2003). Modeling of inter-layer gap formation in drilling of a multi-layered material. Web: https://escholarship.org/uc/item/74f6w73f adresinden 7 Nisan 2015'te alınmıştır.

53. İnternet (Nisan, 2015): Choi, J., Min, S. and Dornfeld, D. (2004). Finite element modeling of burr formation in drilling of a multi-layered material. Web: https://escholarship.org/uc/item/4dz1b1xk adresinden 7 Nisan 2015'te alınmıştır.

54. Gao, X. J., Li, H., Liu, Q., Zou, P., and Liu, F. (2011). Simulation of stainless steel drilling mechanism based on Deform-3D. *Advanced Materials Research*, 160, 1685-1690.

55. Gao, X. J., Zou, P., Liu, Q., and Gao, H. H. (2011). Study on the effects of the geometrical parameter of twist drill on the drilling performance of stainless steel. *Advanced Materials Research*, 189, 2251-2254.

56. Wang, T., Ke, Y. S., and Zhou, Y. D. (2012). The simulation of the ınfluence of honed edge radius on the cutting force and torque in drilling 42CrMo with K-grade carbide drill bit. *Applied Mechanics and Materials*, 130, 1779-1784.

57. Muhammad, R., Ahmed, N., Shariff, Y. M., and Silberschmidt, V. V. (2012). Finite element analysis of forces in drilling of Ti-alloys at elevated temperature. *Solid State Phenomena*, 188, 250-255.

58. Sun, Q., Gao, B., Yang, C. C., and Chen, B. B. (2012). FEA of micro-hole drilling in stainless steel based on Deform-3D. *Advanced Materials Research*, 531, 566-570.

59. Abouridouane, M., Klocke, F., and Lung, D. (2013). Microstructure-based 3D finite element model for micro drilling carbon steels. *Procedia CIRP*, 8, 93-98.

60. Qi, L., Wang, X., and Meng, M. Q. (2014). 3D finite element modeling and analysis of dynamic force in bone drilling for orthopedic surgery. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*. 30(9): 845-56.

61. Gök, K., Türkes, E., Neseli, S. Saglam, H. and Gök, A. (2013). The validation as experimental and numerical of the values of thrust force and torque in drilling process. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 6 (3): 93-99.

62. Chatterjee, S. (2014). *A study on parametric appraisal of drilling on bio-compatible materials*. MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 19-33.

63. İnternet (Nisan, 2015): Gardner, J. D. and Dornfeld, D. (2006). Finite element modeling of drilling using Deform. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Web: https://escholarship.org/uc/item/9xg0g32g adresinden 7 Nisan 2015'te alınmıştır.

64. İnternet (Nisan, 2015): Gardner, J. D., Vijayaraghavan, A. and Dornfeld, D. (2005). Comparative study of finite element simulation software. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Web: https://escholarship.org/uc/item/8cw4n2tf adresinden 7 Nisan 2015'te alınmıştır.

65. Constantin, C., Mihai Croitoru, S. M., Constantin, G. and Florinel Bisu, C. (2010). 3D FEM analysis of cutting processes. *In Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Visualization, Imaging and Simulation*, Faro, Portugal, 41-46.

66. Attanasioa, A., Fainia F., and Outeirob, J.C. (2017). FEM simulation of tool wear in drilling. *16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations,* 440-444

67. Majeed, A., Iqbal, A. and Lv, J. (2018). Enhancement of tool life in drilling of hardened AISI 4340 steelusing 3D FEM modeling. *International Journal Advanced Manufacture Technology*, 95:1875–1889

68. Su, Y., Chen, D. D. And Gong, L. (2015).3D Finite Element Analysis of Drilling of Ti-6Al-4V Alloy. *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA)*, Bangkok, Thaıland, 18: 907-911

69. Sha, Z., Wang, F. and Zhang, S.F. (2013). Drilling Simulation of Carbon Fiber Reinforced Plastic composites Based on Finite Element Method. *4th International Conference on Manufacturing Science and Engineering* (ICMSE 2013), Dalian, Peoples R Chına, 2519-2522

70. Liu, LL., Zhou, LP. and Ying, ZJ. (2012). The FEM Dynamic Simulation in the Drilling process with Indexable Inserts. *2nd International Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials* (CEAM 2012), Guangzhou, Peoples R Chına, 1292-1297.

71. Yavuz, M., (2017) *Takım Geometrisinin Delme İşlemlerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması ve DEFORM Yazılımı İle Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara

72. Lotfi, M., Amini S., Al-Awady, Y.I. (2018). 3D numerical analysis of drilling process: heat, wear, and built-up edge. *Advances in Manufacturing*, 6(2): 204-214

73. Allaparthi, M., Khan, M.R., Teja, B. (2018). Three-dimensional finite element dynamic analysis for micro-drilling of multi-layered printed circuit board. *Materials Today: Proceedings,* 5: 7019-7028

74. Yaşar, N. (2019). Thrust force modelling and surface roughness optimization in drilling of AA-7075: FEM and GRA. *Journal of Mechanical Science and Technology* 33(10): 4771-4781

75. Jung, J., Mayor, R. and Ni, J. (2005). Development of free form grinding methods for complex drill flank surfaces and cutting edge contours. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (1): 93-103.

76. Paul, A., Kapoor, S.G. and DeVor, R.E. (2005). Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (4-5): 421-431.

77. Fetecau, C., Stan, F. and Oancea, N. (2009). Toroidal grinding method for curved cutting edge twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3460-3468.

78. Sambhav, K., Tandon, P. and Dhande, S.G., (2012). Geometric modeling and validation of twist drills with a generic point profile. *Applied Mathematical Modelling*, 36: 2384-2403.

79. Korucu, S. (2007). *Delik işlemlerinde kesiciler üzerine etki eden gerilmelerin matematiksel olarak modellenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

80. Küçüktürk, G. (2013). Modeling and analyzing the effects of experimentally determined torque and thrust force on cutting tool according to drilling parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227 (1): 84-95.

81. Tang S.H., Kong Y.M., Sapuan S.M., Samin R. and Sulaiman S., (2006). Design and thermal analysis of plastic injection mould., *Journal of Materials Processing Technologu*, 171: 259-267.

82. Soldani X., Moufki A., Molinari A., Budak E. and Özlü E. (2008). High speed machining of AISI 1050 Steel: Modelling and experimental. *International Journal of Material Forming*, 1 (1): 1439-1441.

83. Tekaud, İ., Demir, H., Seker, U. (2018). Experimental Analysis and Theoretical Modelling of Cutting Parameters in the Drilling of AISI H13 Steel with Coated and Uncoated Drills. *Transactions of Famena*, 42(2): 83-96

84. Demirel, T. (2019). *Kılavuzla vida açmada kesme parametrelerine bağlı kesici takımlarda oluşan gerilmelerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 51.



GAZİ GELECEKTİR...