## DÖNEL TAKIMLAR KULLANILARAK YAPILAN DIŞ ÇAP TORNALAMA İŞLEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Tamer VARLIK



# T.C. ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## DÖNEL TAKIMLAR KULLANILARAK YAPILAN DIŞ ÇAP TORNALAMA İŞLEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Tamer VARLIK

Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR (Danışman)

## YÜKSEK LİSANS TEZİ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2017 Her Hakkı Saklıdır

### TEZ ONAYI

Tamer VARLIK tarafından hazırlanan "Dönel takımlar kullanılarak yapılan dış çap tornalama işlemlerinin sonlu elemanlar analizi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

#### İkinci Danışman :

Başkan : Prof. Dr. M. Cema Çakır

Ulucağ Üniversites:

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü

Üye : Prof. Dr. Agah Uğuz

Uludağ Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Lekesiz

Bursa Teknik Üniversitesi

Doğa Bilimleri Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü



İmza

İmza

Îmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali Bayram

Enstitü Müdürü

14.13.2017

# U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,

- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,

- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,

- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

### beyan ederim.

../../....

Tamer VARLIK

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

### DÖNEL TAKIMLAR KULLANILARAK YAPILAN DIŞ ÇAP TORNALAMA İŞLEMLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

### **Tamer VARLIK**

### Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

### Danışman: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Yapılan çalışmada, kendiliğinden hareketli ve güdümlü dönel takımlarla ve üçgen uçlu sabit takım ile tornalama işleminin sonlu elemanlar analizi yapılmış ve sonuçlar irdelenerek her üç takım alternatifi birbiri ile karşılaştırılmıştır. Silindirik bir iş parçasının, proses çıktıları anlamında yeterli bilgi verecek kadar küçük bir kısmı modellenmiş ve farklı takımlar ile aynı tornalama prosesi parametreleri altında analiz analizi Sonlu elemanlar DEFORM-3D edilmiştir. paket programi ile gerçekleştirilmiştir. Aynı sınır şartları ve işleme koşulları altında her üç takım ile de yapılan analizler sonucunda takım sıcaklıkları, takım aşınmaları, talaş oluşumu ve talaş profili gibi çıktılar detaylı olarak irdelenmiştir. Sonuç kışmında ise bu bulgular her üç takım tipi için de hem birbirleri ile hem de literatürde bulunan bazı deneysel çalışmalarla karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dönel torna takımları, talaş kaldırma, sonlu elemanlar yöntemi 2017, vii + 81 sayfa.

### ABSTRACT

### MSc Thesis

# FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TURNING OPERATIONS WITH ROTARY TOOLS

### **Tamer VARLIK**

Uludağ University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

In this master of science thesis, finite element analysis of a turning process with driven and self-propelled rotary tools and a stable triangular turning tool has been done and results are investigated in details additionally these three tool alternatives have been compared. An analysis domain from a cylindrical work piece has been modeled and finite element analysis has been performed under same process parameters with three type of turning tools. In this work DEFORM-3D software has been used as finite element analysis tool. Tool temperatures, tool wear, chip formation and chip profile results have been investigated in details. In results and conclusion section all results which have been obtained from all three analysis, have been compared with each other and comparatively evaluated with some experimental works from literature.

**Keywords:** Rotary turning tools, machining, finite element method **2017, vii + 81 pages.** 

# İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1 Dönel Takımlarla Talaş Kaldırma	
3.2 Dönel Takımlarla Talaş Kaldırma İşleminin Kinematil	kleri13
3.3 Dönel Takımlarla Talaş Kaldırma İşleminin Mekanikl	eri20
3.3.1 Güdümlü Dönel Takımlarla Eğik Kesme İşleminin I	Mekanikleri21
3.3.2 Güdümlü Dönel Takımlarla Dik Kesme İşleminin M	Iekanikleri26
3.3.3 Kendiliğinden Hareketli Dönel Takımlarla Eğik Kes	sme
İşleminin Mekanikleri	
3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi	
3.5 Bazı Önemli Tanımlar ve Deform Sonlu Elemanlar Çö	özümü42
3.6 Deform Modellemesi	
3.6.1 Malzeme Modeli	
3.6.2 Sonlu Elemanlar Modeli ve Proses Parametreleri .	
4. BULGULAR	
4.1 Güdümlü Dönel Takım ile Yapılan Kesme Analizi Sor	nuçları63
4.2 Kendiliğinden Hareketli Dönel Takım ile Yapılan Kes	sme
Analizi Sonuçları	
4.3 Üçgen Torna Takımı ile Yapılan Kesme Analizi Sonu	çları73
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	
KAYNAKLAR DİZİNİ	80
ÖZGEÇMİŞ	81

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

В Dönel takımlarla kesme prosesinde iş parçası genişliği [mm]  $B_c$ Dönel takımlarla kesme prosesinde talaş genişliği [mm] Klasik eğik kesmede kesme genişliği [mm] h F Talaş yüzeyindeki sürtünme kuvveti [N]  $F_P$ Bileşke hız yönündeki kesme kuvveti bileşeni [N] F<sub>P</sub>'ye dik kesme kuvveti bileşeni [N]  $F_O$  $F_P$  ve  $F_O$ 'ya dik kesme kuvveti bileşeni [N]  $F_R$ Kesme düzlemindeki kesme kuvveti [N]  $F_s$ Bileşke hız yönündeki toplam kuvvet bileşeni [N]  $F_{Pt}$ F<sub>P</sub>'ye dik toplam kuvvet bileseni [N]  $F_{Ot}$ F<sub>P</sub> ve F<sub>O</sub>'ya dik toplam kuvvet bileşeni [N]  $F_{Rt}$ Eğim açısı (hız vektörü ne normal düzlem arasındaki açı) [derece] i Statik eğim açısı [derece]  $i_s$ F<sub>P</sub> yönünde birim genişlikteki kenar kuvveti [N]  $Kl_p$  $Kl_0$ Fo yönünde birim genişlikteki kenar kuvveti [N] F<sub>R</sub> yönünde birim genişlikteki kenar kuvveti [N]  $Kl_R$ l İş parçası uzunluğu [mm]  $l_c$ Talas uzunluğu [mm] Normal düzlem, kesme kenarına normal olan düzlem [birimsiz]  $P_n$ Toplam kesme gücü [Nmm/s] Р Talaş genişlik oranı [birimsiz]  $r_b$ Talas kalınlık oranı [birimsiz]  $r_t$ Mutlak talaş uzunluğu oranı [birimsiz]  $r_l$ Bağıl talaş uzunluğu oranı [birimsiz]  $r_{lr}$ İlerleme [mm/dak] f Kesme derinliği [mm] t VBileşke kesme hızı [mm/s]  $V_c$ Mutlak talaş hızı [mm/s] Bağıl talaş hızı [mm/s]  $V_{cr}$ Takım cevresel hızı [mm/s]  $V_r$  $V_s$ Kesme düzlemindeki hız [mm/s] İş parçası hızı [mm/s]  $V_w$ Pn düzlemindeki normal talaş açısı [derece]  $\alpha_n$ Sürtünme acısı [derece] ß Normal sürtünme açısı [derece]  $\beta_n$ Bağıl talaş akış açısı [derece]  $\eta_c$ Sürtünme kuvveti açısı [derece]  $\eta'_c$ Kesme akış açısı [derece]  $\eta_s$ Kesme kuvveti [derece]  $\eta'_s$ Kesme düzlemindeki kesme gerilmesi [derece] τ P<sub>n</sub> düzlemindeki normal kesme [derece]  $\Phi_n$ Mutlak talas akıs açısı [derece] Ψ

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Konvansiyonel tornalama işlemi	2
Sekil 1.2 Dönel torna takımları örnekleri	3
Šekil 1.3 Dönel takımlarla tornalama işlemi	3
Şekil 3.1 Dönel takımlarla tornalama.	12
Şekil 3.2 Uzayda sabit bir noktaya göre (a) ve takım üzerindeki bir noktaya	
göre (b) dönel kesme işlemi	13
Şekil 3.3 Güdümlü ve kendiliğinden hareketli dönel kesme işlemleri	15
Şekil 3.4 Güdümlü eğik dönel kesme ve bunlara eşdeğer klasik	
kesme modelleri	16
Şekil 3.5 Güdümlü dönel dik kesme ve buna denk klasik dik kesme işlemleri	
Şekil 3.6 Güdümlü eğik dönel kesme modeli, deformasyon, hızlar ve kuvvetler.	22
Şekil 3.7 Güdümlü dik dönel kesme modeli, deformasyon, hızlar ve kuvvetler	27
Şekil 3.8 Kendiliğinden hareketli eğik dönel kesme modeli	30
Şekil 3.9 Çizgi elemanlar	34
Şekil 3.10 Yüzey elemanlar	34
Şekil 3.11 Hacim elemanlar	
Şekil 3.12 Elemanların ve düğüm noktalarının numaralandırılması	35
Şekil 3.13 Doğrusal yay elemanın serbest cisim diyagramı	35
Şekil 3.14 Doğrusal yaylardan oluşan sistem (üst) ve sonlu	
elemanlar modeli (alt)	37
Şekil 3.15 Doğrusal yaylardan oluşan bu sistem için olası çözüm halleri	41
Şekil 3.16 Doğrusal yay sistemi için nihai sonuç	42
Şekil 3.17 Basma durumu için mühendislik gerilme ve gerinmesi	44
Şekil 3.18 Çekme durumu için gerçek gerinme ve gerinme	45
Şekil 3.19 Elastik deformasyon diyagramı	46
Şekil 3.20 Plastik deformasyon diyagramı	46
Şekil 3.21 Akış gerilmesi (flow stress) konsepti	47
Şekil 3.22 Akış gerilmesinin (flow stress) sıcaklık ve	
deformasyon hızı ile değişimi	
Şekil 3.23 Minimum iş hızı prensibi	49
Şekil 3.24 Eksenel simetrik dövme işlemi ve iki boyutlu	
sonlu elemanlar modeli	50
Şekil 3.25 Hesaplama sonrası düğüm noktalarının konumları	50
Şekil 3.26 Bir boyutlu bir eleman için doğrusal şekil fonksiyonu	
Şekil 3.27 lki boyutlu bir eleman için doğrusal şekil fonksiyonu	
Şekil 3.28 Tornalama işlemindeki temel bileşenlerin birbiri ile etkileşimi	
Şekil 3.29 Deform yazılımında tornalama işlemi için analiz modeli örneği	53
Şekil 3.30 AISI 1045 sabit sıcaklıkta, deformasyon hizina	
gore akma gerilmesi	
Şekil 3.31 AISI 1045 sabit deformasyon hizinda, sıcaklıga	
Şekil 3.32 AISI 1045 için sıcaklıga bağlı olarak elastik modülü	
Şekil 3.33 AISI 1045 için sıcaklıga bağlı olarak isil genleşme katsayısı	
Şekii 5.54 AISI 1045 için sıcaklıga baglı olarak isil iletkenlik degeri	
Şekii 5.55 AISI 1045 için sıcaklıga baglı olarak isi sigasi	
Şekii 5.56 KUNIX 3209 MU takım için sonlu elamanlar	

modeli ve detayı	60
Şekil 3.37 TNMA 160408 KR3025 takım için sonlu elemanlar	
modeli ve detayı	60
Şekil 3.38 Dönel takımlarla kesme işlemi için hazırlanan iş parçası	
sonlu elemanlar modeli ve detayı	61
Şekil 3.39 Konvansiyonel kesme işlemi analizi için hazırlanan	
iş parçası sonlu elemanlar modeli ve detayı	61
Şekil 3.40 Sınır şartı olarak model, alt yüzeydeki düğüm	
noktalarından sabitlenmiştir	63
Şekil 4.1 Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar	64
Şekil 4.2 Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar	
Şekil 4.3 Kesici kenar üzerindeki bir düğüm noktasının analiz	
süresince sıcaklık değişimi	65
Şekil 4.4 Takım aşınması	66
Şekil 4.5 Takım aşınması	66
Şekil 4.6 Talaş oluşumu ve talaş profili	67
Şekil 4.7 Talaş oluşumu ve talaş profili	67
Şekil 4.8 Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar	69
Şekil 4.9 Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar	69
Şekil 4.10 Kesici kenar üzerindeki bir düğüm noktasının analiz	
süresince sıcaklık değişimi	70
Şekil 4.11 Takım aşınması	71
Şekil 4.12 Takım aşınması	71
Şekil 4.13 Talaş oluşumu ve talaş profili	72
Şekil 4.14 Talaş oluşumu ve talaş profili	72
Şekil 4.15 Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar	74
Şekil 4.16 Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar	74
Şekil 4.17 Üçgen torna takımı uç kısmında	
kesme analizi süresince sıcaklık değişimi	75
Şekil 4.18 Takım aşınması	76
Şekil 4.19 Takım aşınması	76
Şekil 4.20 Talaş oluşumu ve talaş profili	77
Şekil 4.21 Talaş oluşumu ve talaş profili	77

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Problemin fiziğine göre serbestlik dereceleri ve kuvvet vektörleri	34
Çizelge 3.2 Elemanların ve global sistemin düğüm numaraları	
ve birbiri ile ilişkileri	.37
Çizelge 3.3 Her üç analiz için işlem parametreleri	62



## 1. GİRİŞ

Talaşlı imalat; kesici takımlar yardımıyla hammaddeden malzemenin talaşlar halinde kaldırılması işlemidir. Talaş kaldırma işlemi metalik malzemelere uygulandığında "metal kesme" işlemi adını da alır. Malzemeden, istenilen geometri ve boyutlarda, son derece hassas toleranslar içerisinde ürünler elde etmemizi sağlayan bu imalat yöntemi sanayide en yaygın kullanılan imalat yöntemidir. Günümüzde kullandığımız birçok ürün ve imalat sektöründe kullanılan makine ve donanımların birçoğu üretilirken talaş kaldırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Bir ürün, başka bir şekil verme yöntemi ile üretilmiş olsa dahi, boyutlarının ve yüzey özelliklerinin istenilen kaliteye getirilmesi için talaşlı imalata tabi tutulmak durumundadır. Yaygın kullanımından dolayı ve daha düşük maliyetlerle daha kaliteli işlem yapabilmek için talaşlı imalat yöntemi, araştırmacıların oldukça dikkatini çeken ve üzerine çok çalışılan bir konu olagelmiştir.

En bilinen talaş kaldırma işlemleri, tornalama, frezeleme, delik delme, taşlama gibi işlemlerdir. Bu çalışmada incelenecek olan tornalama işlemi, en temel talaş kaldırma yöntemi olup, silindirik şekilli ve dönen iş parçası üzerinden kesici takım vasıtası ile malzeme kaldırılması yöntemidir.

Tornalama işleminde malzemenin plastik deformasyonu, yani malzemedeki atomlar arası bağların kopması ve de takım ile iş parçası arasındaki sürtünme etkilerinden dolayı ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu ısı enerjisi birbiri ile etkileşimde olan iş parçası – takım – talaş üçlüsü üzerinde yayılır ve dolayısı ile kesici takım sıcaklığını da arttırır. Artan bu sıcaklık kesici takımın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek takımın yumuşamasına ve daha hızlı aşınmasına neden olur. Aşınan takım işlenmiş parçada istenilen yüzey kalitesini veremez ve takım kullanılmaz duruma gelir. İşleme devam edebilmek için yeni bir takımın devreye alınması gerekir ki bu da imalat maliyetlerini arttıran bir durumdur. Ortaya çıkan bu ısının takıma iletilmeden ortamdan uzaklaştırılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Kesme sıvılarının kullanılması bu yöntemlere bir örnek olarak verilebilir. Talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan ısı, kesme sıvıları ile ortamdan uzaklaştırılmakta ve ayrıca bu sıvıların takım – iş parçası – talaş ara yüzlerinde yağlayıcı özelliklerinden de faydalanılmaktadır. Fakat çevre bilincinin önem kazandığı şu günlerde hem insan sağlığına hem de çevreye olumsuz etkisi olduğu bilinen bu sıvıların kullanılmasına sıcak bakılmamaktadır. Çevreye olan olumsuz etkilerinin yanı sıra ortam sıcaklığından dolayı buharlaşabilen bu kesme sıvıları çalışanlarda nefes alma sorunları ve cilt rahatsızlıklarına sebep olmaktadırlar.



Şekil 1.1. Konvansiyonel tornalama işlemi

Kesici takımın oluşan ısıdan etkilenmesini engellemek için kullanılan diğer bir yöntem de, kesme işlemi yapılırken aynı zamanda kendi ekseni etrafında da dönme hareketi yapabilen "dönel takımlar" kullanmaktır. İlk olarak 1865 yılında James Napier tarafından kullanımına rastlanan dönel kesici takımlar üzerinde bilimsel nitelikteki ilk çalışmaları 1953 yılında Shaw ve çalışma arkadaşları başlatmıştır. Günümüzde is bu tip takımlarla kesme işlemi endüstride kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. Dönel torna takımları örnekleri

Dönel kesici takımlara dönme hareketi, dışarıdan kontrollü bir güç ile verilebileceği gibi kesme sırasında oluşan kuvvetler yardımıyla da verilebilir. Dışarıdan bir güç ile döndürülen takımlara "güdümlü dönel takımlar" denirken, işleme esnasında kendiliğinden dönen takımlara ise "kendiliğinden hareketli dönel takımlar" denir. Bu dönme hareketi sayesinde talaş kaldırma sırasında konvansiyonel takımlarda olanın aksine kesici ağız devamlı değişir. Bu özellik ile takımın o anda işlemde olmayan bölgelerinin soğuması, yani sürekli olarak takımın yenilenmiş, soğumuş kısmının talaş kaldırma işlemi yapması sağlanır. Dolayısıyla konvansiyonel takımlardaki gibi mekanik ve termal yükler devamlı aynı noktaya etkimez, takımın tüm çevresine yayılır. Ayrıca belirtildiği gibi dönme sırasında soğuma da sağlanmış olur. Böylelikle takım aşınması tüm çevreye yayılarak takım ömrü oldukça uzatılmış, takım maliyeti ve takım değiştirme maliyetleri de düşürülmüş olur.



Şekil 1.3. Dönel takımlarla tornalama işlemi

Fakat dönel kesici takımlar; hâlihazırda oldukça karmaşık bir kinematiği olan talaş kaldırma işleminin kinematiklerini daha da karmaşık hale getirmektedirler. Bu karmaşık işlem için en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi hem zaman, hem maliyetler, hem de iş kalitesi açısından çok önemlidir. Bu amaçla en uygun kesme parametrelerini bulabilmek için deneysel, analitik ve sayısal olmak üzere analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar çıktı olarak güvenilir sonuçlar verse de maliyetleri çok yüksek olmaktadır. Analitik yöntemler ise talaş kaldırma işlemi için daha önceden başarılı bir şekilde kullanılmış, kurulan analitik modeller üzerinden başarılı öngörüler yapılabilmiştir. Fakat dönel takımlarla yapılan kesme işlemi yukarıda da belirtildiği gibi daha karmaşık olduğundan analitik yöntemlerden ziyade sayısal çözüm yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar analizi, kesme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilecek en uygun yöntemlerden biridir. Problemin fiziği sayısal modele doğru ve yeterli bir şekilde aktarıldığında yüksek doğrulukta sonuçlar veren bu yöntem ile kesme parametrelerinin etkisinin hızlı ve daha az maliyet ile tespit edilmesi mümkün olabilmektedir.

### 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dönel kesici takımların son yıllarda kullanımının yaygınlaşmaya başlaması ile birlikte bu tip takımlar üzerinde yapılan çalışmalar da artmıştır. Oldukça karmaşık kesme mekaniği olan dönel takımlar ile talaş kaldırma işlemi, birçok araştırmacı tarafından deneysel olarak incelenmiş, farklı kesme parametrelerin sonuçlara nasıl etkidiği bu deneylerde ölçülmüştür. Ayrıca standart tip torna takımlarıyla talaş kaldırma işleminin, çeşitli sonlu elemanlar yazılımları ile iki boyutlu veya üç boyutlu olarak simüle edildiği ve simülasyon sonuçlarının deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırıldığı birçok çalışma vardır. Fakat maalesef dönel kesici takımlar ile yapılan bir sonlu elemanlar analizine – takım üzerindeki sıcaklık oluşumlarını inceleyen bir çalışma hariç – rastlanmamıştır.

Bu bölümde, son dönemlerde dönel torna takımları ile yapılan deneysel çalışmaların ve talaş kaldırma işleminin modellendiği ve nümerik çözümünün yapıldığı sonlu elemanlar analizleri çalışmaları hakkında genel bir literatür sunulmuştur.

S.S. Joshi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al/SiCp kompozitlerin tornalanmasında dönel karbür takımların kullanılmasının fizibilite çalışmasını yapmışlardır. Bu çalışma için bir dönel takım tutucu tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneyler, işleme sırasında dönel karbür takımların serbest yüzey aşınması üzerinde çeşitli faktörlerin ve bunların aralarındaki etkileşimlerin etkisini analiz etmek için Taguchi Yöntemleri kullanılarak tasarlanmıştır. İşlem, takım ve malzeme bağımlı parametrelerin dönel karbür takım serbest yüzeyi aşınması üzerindeki etkilerinin tanımlanması için bir takım – ömür modeli geliştirmişlerdir (S.S. Joshi ve ark.1999).

E. Ceretti ve arkadaşları, çalışmalarında tornalama işleminin üç boyutlu sonlu elemanlar analizine yer vermişlerdir. Sonlu elemanlar analizi programı olarak DEFORM 3D yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda dik kesme ve açılı kesme işlemleri modellenerek simülasyon sonuçları literatürde bulunan deneysel çalışmalarla ve diğer simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kesme işlemlerinde talaş akışının sonlu elemanlar analizi ile öngörülebileceği doğrulanmıştır (E. Ceretti ve ark. 2000).

Vahid Kalhori, yaptığı doktora tezi calışmasında talaş kaldırma işleminde, talaş oluşumu, kesme kuvvetleri, takım – talaş ara yüzündeki basınç ve sıcaklık dağılımı, iş parçası üzerindeki artık gerilmeler gibi verileri öngörebilmek için sonlu elemanlar analizleri üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmada, talaş ayrılması için fiziksel ve geometrik olmak üzere iki farklı modelleme yaklaşımı kullanılmıştır ve talaş oluşumunu modellemek için fiziksel modelin kullanımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Geometrik modelde önceden tanımlı bir çatlak izinde gerilmeler belirli bir değerin üzerine çıktığında talaş ayrılması gerçekleşmekte, fiziksel modelde ise talaş ayrılması, elemanlardaki plastik deformasyon ile gerçekleşmektedir. Elemanlar üzerindeki aşırı çarpılmayı önlemek için analiz süresince sıklıkla yenilenen bir sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. Ayrıca bir önceki pasonun iş parçası üzerinde yarattığı artık gerilmenin talaş oluşumu üzerine etkisi de bu çalışmada incelenmiş, ancak bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yani sadece ilk pasonun simule edilmesinin sonuçların güvenilirliği açısından yeterli olduğu sonucu elde edilmiştir. İlerlemenin ve kesme hızının da artık gerilmelere olan etkisi incelenmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Kesme hızı arttıkça artık gerilmelerin de arttığı çalışmada gösterilmiştir (Kalhori 2001).

Shuting Lei ve Wenjie Liu; çalışmalarında Ti – 6Al – 4V titanyum alaşımının yüksek hızlı talaşlı imalatı için güdümlü dönel kesici takım geliştirmişlerdir. Bu dönel takım; kompakt bir yapıda, gerekli rijitlikte ve minimum kenar salgısı olacak şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneylerde karşılaştırma amaçlı dönel takım ile aynı takımın dönme hareketi engellenmiş hali kullanılmıştır. Sonuçlar, belirli kesme şartları altında, güdümlü dönel takımın hareketsiz takıma nazaran takım ömrünü yaklaşık 60 kat arttırdığını göstermiştir. Ayrıca takımın dönme hızı da deneysel olarak incelenmiştir. Takım dönme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinde de düşüş olduğu gözlenmiştir. Belirli bir takım dönme hızı aralığında, takım dönme hızı arttıkça takım aşınmasının da arttığı elde edilen diğer bulgular arasındadır (Lei ve Liu 2002).

Halil Bil, yüksek lisans tezinde, dik kesme işlemi için geliştirilmiş çeşitli sonlu eleman modellerini birbirleriyle ve deneylersel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Sürtünme koşulları ve ayrılma kriterleri gibi parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Simülasyon aracı olarak, kapalı kodlar olan MSC.Marc ve Deform2D ile açık bir kod olan Thirdwave AdvantEdge yazılımları kullanılmıştır. Kesme kuvvetleri, kayma açısı, talaş kalınlığı ve kalem ile talaş arasındaki temas uzunluğu gibi sonuçlar analiz sonucunda öngörülebilmektedir. Sonuçların doğrulanması için değişik kesme koşullarında (kesme açısı ve ilerleme hızı) deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, ticari yazılımlarının dik kesme işlemlerini kabul edilebilir sınırlar içerisinde simüle edebileceğini göstermiştir. Sürtünme koşullarının simülasyonu etkileyen en önemli parametre olduğu bulunmuştur. Ayrıca çalışma sonucunda hasar modellerinin talaşın iş parçasından ayrılması amacı ile kullanılmasının uygun olmadığı görülmüştür. Talaş ayrılması için yeni ağ tanımlanması yöntemi ise iyi sonuçlar vermesine rağmen, iş parçası malzemesinde çatlak oluşması gibi bir kavram hatasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, hem iyi bir fiziksel modelleme yapılması hem de işlem değişkenlerinin doğru tahmin edilebilmesi için yeni bir ayrılma kriterine ihtiyaç duyulduğu saptanmıştır (Bil 2003).

H.A. Kishawy ve J. Wilcox çalışmalarında sertleştirilmiş çeliğin dönel takımlar ile tornalanmasını incelemişlerdir. Talaş morfolojisi, takım aşınması, takım malzemesi ve geometrisinin etkileri üzerinde çalışılmıştır. Aşınma direncini görebilmek için karbür, kaplanmış karbür, seramik gibi malzemelerin de içinde bulunduğu birçok malzeme test edilmiştir. İşleme süresince oluşan sıcaklığın karakteristiği de araştırılmıştır. Görülmüştür ki takım sıcaklığını düşürmek difüzyon aşınmasını ortadan kaldırırken abrasif aşınmayı arttırır. Ayrıca takım dönme hızı arttırıldığında talaş – takım ara yüzündeki maksimum sıcaklığın, kesme ağzına doğru kaydığı sonucu elde edilmiştir (Kishawy ve Wilcox 2003).

Dessoly Vincent; çalışmasında dönel kesici takımların olumlu yönlerini ortaya koyabilmek adına, bu tip takımla yapılan bir tornalama işleminde kesme sıcaklıklarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirmiştir. Kurduğu bu sonlu elemanlar modelinin verimliliğini saptayabilmek için, kızıl ötesi termal kamera ile takım-talaş

yüzeyinde sıcaklık ölçümleri yapmıştır. Çalışmada ayrıca dönel takımların ve aynı dönel takımların dönme hareketi engellenmiş halinin takım üzerinde oluşan sıcaklılar açısından kıyaslaması yapılmış ve böylelikle takım dönüşünün etkisinin de ölçülmesi sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi; AISI 52100 sertleştirilmiş çeliğinin (58 HRC) dış çap sert tornalama işlemi için gerçekleştirilmiştir. Analizler ile öngörülen ve deneyler ile ölçülen takım kesici kenar sıcaklıkları birbiri ile örtüşen sonuçlar göstermiştir. Aynı kesme koşulları altında, hareketli dönel kesici takımlarda ölçülen sıcaklıklar, dönmesi engellenmiş sabit dönel takımlarda elde edilenden 50°C daha düşük olarak ölçülmüştür. Takım sıcaklık dağılımı modeli, dönel takımlarla tornalama işleminde takımda oluşacak sıcaklıkları öngörebilmek için kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar takım aşınması ve takım ömrü uzatılması açısından da umut verici olduğu görülmüştür (Vincent 2004).

H.A. Kishawy ve arkadaşları kendiliğinden hareketli dönel kesici takımların titanyum alaşım malzemelerin talaşlı imalat performansını ve işlenmiş yüzey kalitesini değerlendirmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Farklı çaplarda ve farklı malzeme/kaplamalarda dönel takımlar geliştirilmiştir. Takım performansını değerlendirme kriterleri olarak, takım aşınma modları ve işlenmiş yüzeyin topografisi göz önünde tutulmuştur. Kıyaslama için ise aynı kesme şartlarında dönme hareketi engellenmiş takımlar kullanılmıştır. Deney sonuçları, kendiliğinden hareketli dönel takımlarla havacılık malzemelerinin işlenmesinde optimum ve güvenli kesme koşullarının tanımlanması amacıyla kullanılmıştır (Kishawy ve ark. 2004).

Yahya Işık çalışmasında, talaşlı imalatta kesici takımların kırılma öncesi davranışlarını inceleme amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizleri yapmıştır. Belirli kesme parametrelerinde, WC kesici takım (DNMG 150608) ve soğuk iş takım çeliği AISI O1 (60 HRC) ile yapılan deneylerde ölçülen kesme kuvvetleri harmonik analizde giriş zorlama değerleri olarak modele uygulanmıştır. Deneylerde kesme kuvvetleri dinamometre ile ölçülmüştür. Modal analizde kesici takım ve kater modellenerek mod şekilleri ve bu mod şekillerine ait doğal frekanslar bulunmuştur. Modal analiz sonucunda kesici uçta en büyük genlikler ve doğal frekanslar belirlenmiştir. Harmonik analiz bu doğal frekansta kırılmaya neden olan kesme

kuvvetlerinin modele ilave edilmesi ile yapılmıştır. Harmonik analiz sonucu kesici takımın en fazla hangi noktalardan zorlandığı ve kırılma anında gerilme ve yer değiştirme değerlerine hangi noktalarda ulaştığı belirlenmiştir. Kesici takımın kırılma analizi için von Mises akma kriteri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarının incelenmesinde kesici takımın kırıldığına ait veriler deneysel sonuçlarla paralellik göstermektedir (Işık 2004).

L. Li ve H.A. Kishawy çalışmalarında kendiliğinden hareketli dönel takımlar için bir kuvvet modeli sunmuşlardır. Torna takımlarıyla açılı (oblik) kesme işlemindeki kesme kuvveti öngörüleri gözden geçirilmiş ve kendiliğinden hareketli dönel takımlar ile kesme işlemi süresince oluşan kesme kuvveti öngörüsü için kullanılmıştır. Kuvvet modeli, Oxley'in analizini temel almış ve tipik bir kendiliğinden hareketli dönel kesici takım kullanılan bir test ile doğrulanmıştır. Kesme şartlarının geniş bir aralığı için, test sonucunda ölçülen kuvvetlerle, model ile öngörülen kuvvetler arasında uyuşma gözlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, farklı kesme şartlarının, talaş – takım ara yüzü boyunca sürtünme katsayısı üzerindeki ve takım – talaş yüzeyi normal kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir (Li ve Kishawy 2005).

Suryadiwansa Harun ve arkadaşları yaptıkları çalışmada güdümlü dönel takımlar ile tornalama işlemini araştırmışlardır. Çalışmanın ana amacı özellikle takım dönme hızı ve dönme yönü gibi işlem parametrelerinin, kesme kuvveti bileşenleri, talaş oluşumu ve sıcaklık üzerine olan etkilerinin incelenmesidir. Deneysel çalışmalar şunu göstermiştir ki, belli bir kesme hızı aralığında takım dönme hızı artar ise kesme sıcaklığı düşmektedir. Takımın saatin tersi yönünde dönüş devrindeki artma radyal kuvveti de arttıracağı için tırlama oluşumunu tetiklediği de elde edilen bir diğer sonuçtur (Harun ve ark. 2008).

Hiroyuki Sasahara ve arkadaşları bu çalışmada Inconel 718 malzemesinin 500 m/dak kesme hızı altında dönel kesici takımlarla tornalanması incelemişlerdir. Yapılan bir dizi deneylerin sonuçları sonlu elemanlar metodu analizi ile elde edilen takım sıcaklıkları sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ana kesme kuvveti yönü ile takımın en rijit olduğu yönü çakıştırmak için, en uygun takım eğim açısının, takım devir hızının ve takım çapının seçilmesinin çok önemli olduğu görülmüştür. Tercih edilen kesme koşulları altında 500 m/dak gibi yüksek kesme hızlarında bile takım talaş yüzeyi üzerinde sıcaklık termal kamera ile 300°C olarak ölçülmüştür ve takım aşınmasının konvansiyonel takımlara nazaran çok düşük olduğu görülmüştür (Sasahara ve ark. 2008).

Hiroshi Nakajima ve arkadaşları çalışmalarında SUS304 paslanmaz çelik üzerinde güdümlü dönel kesici takımın talaşlı imalat performansını incelemişlerdir. Bu çalışmadaki amaç tornalama işleminde takım duruş pozisyonunun etkisinin incelenmesidir. Çalışma sonucunda, takım eğim açısının artmasıyla takım sıcaklığı ve talaş akış açısının arttığı görülmüştür (Nakajima ve ark. 2008).

Murat Kıyak ve Erhan Altan çalışmalarında kesme parametrelerinin, yumuşak çeliklerin kendiliğinden hareketli dönel kesici takımlarla tornalama işleminde işlenmiş parçanın yüzey pürüzlülüğü üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bunun için gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, eğim açısı 20°, 30°, 45° ve talaş açısı 0° ve -5° olan takımlar kullanılmıştır. Kesme hızları 60m/dak ve 120 m/dak olarak belirlenmiştir. İlerleme 0,1-0,2 - 0,4 mm/dev, kesme derinliği ise 0,25 mm olarak ayarlanmıştır. Deneyler süresince takımın dönmesi için gerekli minimum eğim açısının 10° olması gerektiği görülmüştür. Eğim açısı 45°'ye arttırıldığında talaş açısı 0° olan takımlar yüzey kalitesi açısından çok daha iyi sonuç vermişlerdir. -5° talaş açısı olan takımlar için ise sonuç biraz daha karmaşıktır. Bu takımlarda yüksek ilerlemelerde yüzey kalitesi kötüleşirken küçük eğim açılarında daha iyi yüzey kalitesi görülmektedir. Ayrıca, dönel takımlarda, kesme hızı ve ilerlemenin etkisinin standart tip torna takımlarındaki etkisine çok benzer olduğu görülmüştür. 0° talaş açısı ile kesme hızı arttığında yüzey kalitesinin iyileştiği buna karşın -5° talaş açısında artan ilerlemeye bağlı olarak kesme hızındaki artışın daha kötü bir yüzey kalitesi ortaya çıkardığı görülmüştür. Artan ilerleme sadece 0° talaş açısı, 45° eğim açısı 0,4 mm/dev ilerleme hızı durumunda olumlu sonuç vermiştir, diğer tüm şartlarda yüzey kalitesi kötüleşmiştir. Çalışmada en iyi yüzey kalitesi 1,68 µm olarak 0° talaş açısı, 45° eğim açısı 0,1 mm/dev ilerleme ve 120 m/dak kesme hızlarında elde edilmiştir (Kıyak ve Altan 2012).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Dönel Takımlarla Talaş Kaldırma

Talaş kaldırma yöntemi en eski ve en bilinen şekil verme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde istenilen geometri; iş parçası ile etkileşimde olan ve iş parçasına göre hareketli olan bir takım vasıtasıyla, iş parçası üzerinden malzeme kaldırarak oluşturulur. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere tornalama ile talaş kaldırma işleminde plastik deformasyondan dolayı metaller arası bağların kopması sonucu büyük miktarda ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu ısı enerjisi takım sıcaklığını arttırmakta dolayısı ile de takım mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek takım aşınmasını hızlandırmakta ve takım ömrünü kısaltmaktadır.

Bu olumsuzluğun giderilmesi için birçok çalışma yapıla gelmiştir. Bulunan yöntemlerden biri, devamlı değişen takım kesici kenarının iş parçası ile temasa geçmesidir. Örneğin sonsuz uzunlukta bir kamayı kesme kenarı boyunca hareket ettirerek kesme işlemini yaptığımızda bunu sağlamış oluruz fakat bu uygulanabilir bir yöntem değildir. Bunun yerine geliştirilen bir yöntem dairesel kesitli dönel kesici takımların kullanılmasıdır. Bu durumda kesme işinin yapan kenar sürekli olarak değişmese de çevrimsel olarak değişmektedir. Kendi ekseni etrafında dönebilen, disk şeklinde olan bu torna takımının tüm çevresi kesici kenar olarak davranmaktadır. Kendi ekseni etrafında yaptığı dönme hareketi kesme sırasında kesici ağzın devamlı soğumuş ve tazelenmiş kısım ile yenilenmesini sağlamaktadır. Böylelikle tornalamadan gelen mekanik ve ısıl yükler takım üzerinde tek noktada yığılmak yerine tüm çevreye yayılmakta ve takım sıcaklığı standart tipteki torna takımlara göre daha düşük kalmaktadır ve dolayısı ile takım aşınması azalarak takım ömrü uzamaktadır. Böyle takımlara dönel kesici takımlar, bunlarla yapılan kesme işlemlerine de dönel takımlarla kesme işlemi denilmektedir.

Yukarıda bahsedilen torna takımının kendi ekseni etrafında dönme hareketi kendiliğinden olabildiği gibi dışarıdan sağlanan bir kuvvet vasıtası ile de olabilmektedir. Talaş oluşumu sırasında, takım ve iş parçası arasındaki etkileşimden kaynaklanan kuvvetler ile takım kendi kendine dönebileceği gibi harici bir güç kaynağı vasıtası ile de kontrollü bir şekilde döndürülebilir.

Güdümlü dönel takımlar iş parçasına göre dik veya eğik olarak konumlandırılabilirler. Fakat kendiliğinden hareketli dönel takımların dış bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan dönebilmeleri için iş parçası eksenine göre eğik olarak konumlandırılmaları diğer bir deyişle iş parçası hızı  $V_w$  takım kesme kenarına dik olmamalı, normal düzlem  $P_n$ 'e göre statik eğim açısı  $i_s$  kadar eğik olmalıdır (Şekil 3.1(b)). Böylelikle takım işlem sırasında uygun yönde kendiliğinden dönebilecektir.



Şekil 3.1. Dönel takımlarla tornalama

Takım kesme kenarı iş parçası hız vektörüne dik olduğunda ise (Şekil 3.1(a)) takım kendiliğinden dönemez dışarıdan bir güç kaynağı ile döndürülmeye ihtiyaç duyar, bunlara güdümlü dönel takımlar denir.

Standart tip torna takımlarına kıyasla kendiliğinden hareketli dönel takımlarda oluşan ısının azalması şu şekilde de açıklanabilir; standart tip takımlarla kesmede tüketilen enerjinin çok büyük bir kısmı ısıya dönüşür fakat dönel takımlarla kesmede takımı döndürmek için bir miktar enerji gerekir ve bu kinetik enerjiye dönüşür. Böylelikle ısı oluşumu azalmış olur (Wuyi ve ark. 1991).

### 3.2 Dönel Takımlarla Talaş Kaldırma İşleminin Kinematikleri

Dönel takımlarla tornalamada iş parçası dönüşü ve takım ilerleme hareketine ek olarak üçüncü bir hareket olarak takım dönme hareketi söz konusudur. Bu ek hareket, işlemin kinematikleri ve mekaniklerini etkiler.

Dönel takımlarla kesme işleminin kinematik ve mekanik ilişkilerinin elde edilmesi ve kesme modellerinin geliştirilmesi için, tüp şekilli bir iş parçası örneği üzerinde çalışılmıştır. Dönel takım çapı ve iş parçası çapı iş parçası et kalınlığına göre oldukça büyük olduğundan ve ilerleme hızı kesme hızı yanında ihmal edilebilir dolayısıyla takım kesici kenarı düz bir kenarmış gibi kabul edilmiştir (Şekil 3.2 a, b).



**Şekil 3.2.** Uzayda sabit bir noktaya göre (a) ve takım üzerindeki bir noktaya göre (b) dönel kesme işlemi

İş parçası et kalınlığı boyunca iş parçası hızı  $V_w$  sabit kabul edilebilir. Ayrıca kesme derinliği *t* ile ilerleme *f*'nin aynı olduğu kabul edilmiştir. Mutlak hız  $V_w$ 'nin normal düzlem  $P_n$ 'ye göre oryantasyonu, yani statik eğim açısı *i*<sub>s</sub>, dönel takımın iş parçası ekseni üzerinde olup olmadığına bağlıdır. Takım çevresel hızı  $V_r$ 'nin yönü ve büyüklüğü ise takımın güdümlü veya kendiliğinden hareketli olup olmamasına bağlıdır. Güdümlü dönel takım için  $V_r$ 'nin büyüklüğü ve yönü dış kaynak ile kontrol edilebilir ve  $V_w$  ve *i*<sub>s</sub>'den bağımısızdır.

Dönel takımlar ile tornalama üç temel sınıfa ayrılabilir;

- Güdümlü dik kesme
- Güdümlü eğik kesme
- Kendiliğinden hareketli kesme

Statik eğim açısı  $i_s$  yani kesme hızı  $V_w$  ile normal düzlem  $P_n$  arasındaki açı sıfır ise bu işlem dik kesme olarak adlandırılır. Eğer bu açı sıfırdan farklı ise bu eğik kesmedir.

Kendiliğinden hareketli takımlarda, dönme hareketinin oluşması için takım ya eğik konumlandırılmış olmalı ya da iş parçası ekseninin altında veya üstünde konumlanmış olmalıdır. Her iki durumda da  $i_s \neq 0^\circ$  olacaktır.

Dönel takımlarla kesme işleminin temellerini anlamak, iyi bilinen klasik kesme prosesleriyle olan ilişkisini kavramak ve kesme modeli mekaniklerini geliştirebilmek için Şekil 3.3'de gösterildiği gibi tüp şekilli bir iş parçası üzerinde dönel takımlarla kesme işlemini modellemek mümkündür.



Şekil 3.3. Güdümlü ve kendiliğinden hareketli dönel kesme işlemleri

Dönel takım ve iş parçası çapları, iş parçası et kalınlığı yanında oldukça büyükse ve ilerleme hızı  $V_f$  iş parçası hızı  $V_w$  yanında ihmal edilebilecek kadar küçükse dönel takım bir kama gibi düşünülebilir. İş parçası hızı  $V_w$  et kalınlığı boyunca sabit kabul edilebilir. Ayrıca  $V_w$  hız vektörü, iş parçası et kalınlığına eşit *B* kalınlığında modellenen dikdörtgen parçanın kenarlarına paraleldir. Ayrıca kesme derinliği *t* ilerleme *f* ile aynı kabul edilmiştir. Mutlak hız  $V_w$ 'nin modellenen kama normal düzlemi  $P_n$ 'ye göre yönü, yani statik eğim açısı  $i_s$  Şekil 3.3'de gösterildiği üzere, dönel takımın iş parçası merkezinde olup olmamasına bağlıdır. Benzer olarak, dönel takım çevresel hızı  $V_r$ 'nin büyüklüğü ve yönü takımın güdümlü veya kendiliğinden hareketli olup olmamasına bağlıdır. Güdümlü dönel takımlar için  $V_r$ 'nin büyüklüğü ve yönü bir dış kaynak tarafından kontrol edilir,  $V_w$  ve  $i_s$ 'den bağımsızdır. Kendiliğinden hareketli dönel takımlarda ise  $V_r$ ' nin yönü  $V_w$ 'nin yönüne, büyüklüğü ise  $V_w$  ve  $i_s$ 'nin büyüklüklerine bağlıdır.

Dönel takım Şekil 3.3(b)'deki gibi iş parçası merkezinin üzerinde konumlandığında ve saat yönünde döndürüldüğünde  $V_r$  pozitif olarak tanımlanır ve işlem Şekil 3.4(a)'daki gibi modellenebilir. Bu durumda *B* kalınlığındaki iş parçası ve  $V_w$  hızı,  $P_n$  normal düzlemine göre statik eğim açısı  $i_s$  kadar eğiktir. Böyle bir işlem eğik dönel kesme olarak adlandırılır. Bileşke hız *V ise*  $P_n$  normal düzlemine göre eğim açısı *i* kadar eğiktir.

Güdümlü dönel eğik kesme işlemi için bileşke kesme hızı V ve eğim açısı i aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir;

$$V = \sqrt{(V_w \cos i_s)^2 + (V_r + V_w \sin i_s)^2}$$
(1.1)

$$\tan i = \frac{V_r + V_w \sin i_s}{V_w \cos i_s} \tag{1.2}$$

$$V_{w} = V \frac{\cos i}{\cos i_{s}} \tag{1.3}$$

$$V_r = V \frac{\sin(i - i_s)}{\cos i_s} \tag{1.4}$$

Şekil 3.4(a)'daki şartlarda bağıl talaş hızı  $V_{cr}$  yönü ve buna tekabül eden bağıl talaş açısı  $\eta_c$  Şekil 3.4(a)'da gösterilmiştir. Uzaydaki sabit bir noktaya göre talaş hareketli takım vasıtasıyla  $V_r$  yönünde ilerleyecektir. Yani gözlemciye göre talaş, mutlak talaş hızı  $V_c$ hızı ve yönünde oluşur.



Şekil 3.4. Güdümlü eğik dönel kesme ve bunlara eşdeğer klasik kesme modelleri

Güdümlü dönel eğik kesmede başlıca değişken takım çevresel hızı  $V_r$ 'dir. Dönel eğik kesmede  $V_r$ 'nin pozitif değerlerden negatif değerlere değişimi Şekil 3.4 (a) – (e) modellerinden görülebilir.  $V_r=0$  olduğunda takım hareketsizdir ve Şekil 3.4(b)'den görülebileceği üzere, (3.1) ve (3.2) numaralı denklemlere göre  $V=V_w$ ,  $i=i_s$  olur. Bu durumda dönel eğik kesme işlemi klasik eğik kesme işlemi ile aynı olur.  $V_r$  sıfıra düştüğünde *i* ve *V* azalır. Bu durumda takım durağan olduğundan, bağıl ve mutlak talaş açıları ve hızları birbirine eşittir (Şekil 3.4 (b)).  $V_r$ 'nin sıfıra düşmesiyle mutlak talaş akış açısı yönü terse döner yani işaret değiştirir.

Şekil 3.4 (c)'den görülebileceği gibi  $V_r$  negatif yönlü ve düşük hızda olduğunda eğim açısı *i*, *i*<sub>s</sub>>*i*>0 olacak şekilde azalır.  $V_r$ 'nin ters yönlü ve mutlak talaş akış açısının  $\psi$ negatif olmasından dolayı, bağıl talaş akış açısı  $\eta_c$  azalır. Negatif  $V_r$ 'deki artış mutlak talaş akış açısı  $\psi$  negatif iken *i* ve  $\eta_c$ 'nin sıfır olmasına yol açar (Şekil 3.4 (d)). Ayrıca negatif  $V_r$ 'deki artış ile bileşke kesme hızı V,  $P_n$  düzleminin diğer tarafına geçer. Bu durumda eğim açısı *i* ve bağıl talaş akış açısı  $\eta_c$  negatif değer alır (Şekil 3.4 (e)).

Şekil 3.4 (a) – (e)'deki tüm farklı  $V_r$  değerleri için, malzeme kaldırma miktarı  $V_wBt$ 'dir ve sabittir.  $V_r$ 'deki değişimlerin malzeme kaldırma miktarını değiştirmez fakat kesme hızı ve diğer bazı unsurlar üzerinde etkisi vardır.

Şekil 3.4 (a) – (e)'de gösterilen güdümlü eğik dönel kesme proseslerine karşılık gelen klasik eğik kesme prosesleri Şekil 3.4 (f) – (j)'de gösterilmiştir. Şekil 3.4 (a) ve Şekil 3.4 (f) düşünüldüğünde her iki işlemde de bileşke kesme hızı V eğim açısı *i* kadar eğiktir. Fakat Şekil 3.4 (a)'daki güdümlü eğik dönel kesme için  $V_w$  ve modellenen iş parçası kenarları,  $P_n$  düzlemine göre statik eğim açısı *i*<sub>s</sub> kadar eğiktir.  $V_w$  ile bileşke kesme hızı V arasındaki açı *i* ile *i*<sub>s</sub>'nin farkı kadardır. *i* – *i*<sub>s</sub> $\neq 0$  olması ile kesme boyunca takımın farklı kısımlarının iş parçası ile temasta olması sağlanır. Fakat buna karşılık gelen klasik eğik kesme prosesinde (Şekil 3.4(f)) iş parçası kenarları,  $V_w$  ve V,  $P_n$ düzlemine göre eğim açısı *i* kadar eğiktir dolayısıyla *i* – *i*<sub>s</sub>=0 olur. Bu da kesme boyunca takımın hep aynı kısmının iş parçası ile temasta olduğunu gösterir. Bu işlemde takım durağan olduğundan, klasik eğik kesme işlemi için bu değerler aynı zamanda mutlak değerleri de ifade eder yani  $V_{cr}=V_c$  ve  $\eta_c=\psi$ .

Aynı V ve t için malzeme kaldırma miktarı birbirine eşitse, kinematik açıdan birbirine karşılık gelen iki işlem birbirine eşdeğer olarak değerlendirilebilir.

$$Vbt = V_w Bt = VBt \frac{\cos i}{\cos i_s} \tag{1.5}$$

$$b = B \frac{\cos i}{\cos i_s} \tag{1.6}$$

Yukarıdaki denklemde (3.6) *b* kinematik olarak eşdeğer klasik eğik kesme prosesindeki kesme genişliğidir. Denklem (3.6)'ya göre eşdeğer kesme genişliği *b*, eğim açısı *i* azaldıkça artar ve iki prosesin birbirine eş olduğu Şekil 3.4 (b) ve 3.4 (g)'de gösterildiği gibi  $i=i_s$  olduğunda b=B olur. Dönel eğik kesme prosesinde i=0 olduğunda yani diğer bir deyişle denklem (3.2)'ye göre  $V_r=-V_w sini_s$  eşdeğer kesme genişliği *b*, *B*'den büyüktür (denklem (3.6)) ve Şekil 3.4 (d) ve 3.4 (i)'den görülebileceği gibi maksimum değerindedir. Kesme genişliği *b*, *i* işaret değiştirdiğinde azalır (Şekil 3.4 (j)). Eşdeğer klasik eğik kesme prosesi için, aynı büyüklükte fakat farklı işaretlerdeki *i* değerleri için *b* kesme genişliği aynıdır ve bu iki işlem Şekil 3.4 (g) ve 3.4 (j)'den görülebileceği gibi birbirinin aynasıdır.

Kinematik olarak eşdeğer olan dönel ve klasik eğik kesme işlemleri dinamik olarak da birbirine denk ise her iki işlem için bağıl talaş akış açıları, talaş hızları, güç, kuvvetler, kayma ve sürtünme enerjileri vs. gibi birçok büyüklük de birbirine eşittir. Fakat dönel takımlarla eğik kesmede mutlak talaş hızı  $V_c$  ve talaş akış açısı  $\psi$  her iki işlem için farklılık gösterir.

Şekil 3.3 (a)'da olduğu gibi dönel takım iş parçası merkezinde konumlandırıldığında ve dış bir kaynak tarafından saat yönünde döndürüldüğünde ( $V_r$  pozitif) mutlak iş parçası hızı  $V_w$  ve iş parçası kenarları kesme kenarına dik yani  $P_n$  düzlemine paraleldir. Böylelikle statik eğim açısı  $i_s$  sıfırdır ve proses dönel dik kesme prosesi olarak adlandırılır. Bileşke hız V ise normal düzlem  $P_n$ 'e göre eğim açısı i kadar eğiktir. Büyüklüğü ve yönü ise takım çevresel hızı  $V_r$ 'ye bağlıdır. Farklı  $V_r$  hızları için, modellenen güdümlü dik dönel kesme prosesleri ve buna eşdeğer klasik eğik kesme prosesleri Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Statik eğim açısı  $i_s$  sıfır olduğundan her iki proses de  $P_n$  düzlemine göre simetriktir. Şekil 3.5 (b) ve 3.5 (e)'de gösterildiği gibi  $V_r=0$  ve i=0 olduğunda dönel dik kesme prosesi klasik ortogonal kesme prosesine özdeştir. Güdümlü eğik dönel kesme işlemleri için kullanılan (2.1) – (2.6) denklemleri  $i_s=0$ yerine yazılarak dik kesme durumları için de kullanılabilir ve Şekil 3.5(b) ve 3.5(e)'de ki şartlar altında  $V_r=0$  ve i=0 için eşdeğer kesme genişliği b denklem (3.6) ile ya da bu durum için aşağıda yazılan denklem (3.7) ile bulunabilir.

$$b = \frac{B\cos i}{\cos i} = B \tag{1.7}$$



Şekil 3.5. Güdümlü dönel dik kesme ve buna denk klasik dik kesme işlemleri

Takım Şekil 3.5 (a)'daki gibi iş parçası merkezinde konumlandırıldıysa ve güdümlü değilse, fakat kendiliğinden dönmeye müsaitse bile kesme başladığında dönme hareketini yapmayacaktır. Kesme prosesinin tamamen klasik ortogonal kesme prosesine eşit olduğu Şekil 3.5 (b) ve 3.5 (e)'de gösterilen durumlarda kesme işlemi sırasında oluşan bileşke kuvvet  $P_n$  düzlemi üzerinde oluşur. Dolayısıyla takımı döndürecek herhangi bir yanal kuvvet söz konusu olmaz. Bu nedenle dik dönel kesme prosesi dış bir kaynak tarafından güdümlü olmak zorundadır. Buna karşın, dönel takım iş parçası ekseninin üzerinde konumlandıysa ve kendiliğinden dönmeye müsaitse yani  $i_s \neq 0$  ise kesme işleminin başlamasıyla kesme kenarı boyunca takımı saatin tersi yönünde (negatif  $V_r$ ) döndürecek ve denge haline kadar hızlandıracak bir kuvvet oluşur. Bu durumun, Şekil 3.4 (d)'de gösterildiği üzere, bileşke hız V'nin kesme kenarına dik yani  $P_n$  düzlemine paralel olduğunda ve eğim açısı i=0 olduğunda (yani  $V_r = -V_w sini_s$ (denklem 3.2)) oluşması beklenir. Dönel takım iş parçası ekseninin altında konumlandığında (Şekil 3.3(c)) eğim açısı *i* sıfır ve statik eğim açısı  $i_s$  yine sıfırdan farklıdır fakat negatif değerdedir ve dönel takım saat yönünde  $V_r = V sin/i_s/hızıyla$ kendiliğinden döner (Armarego ve ark 1993).

### 3.3 Dönel Takımlarla Talaş Kaldırma İşleminin Mekanikleri

Yukarıdaki bölümlerden görülebileceği üzere güdümlü dönel eğik kesme en karmaşık işlemdir. Bu tip kesme işlemi; güdümlü dönel dik kesme işlemi için sıfır olan statik eğim açısı  $i_s$  ve kendinden hareketli dönel eğik kesme işlemi için sıfır olan eğim açısı i gibi değişkenleri içerir. Bu nedenle, güdümlü dönel eğik kesme işleminin analizinin, kesme mekanikleri açısından en kapsamlı sonuçları sağlayacağı ve diğer işlem tipleri için uygun  $i_s$  ve i değerlerinin yerlerine konularak istenilen sonuçların elde edilebileceği açıktır.

### 3.3.1 Güdümlü Dönel Takımlarla Eğik Kesme İşleminin Mekanikleri

Bu işlemin analizi için, klasik eğik kesme işlemindeki kesme bölgesi modeli ve buna bağlı yapılan kabuller, dönel takımlarla yapılan kesme işlemine de uygulanacaktır.

### Kabuller;

- Sürekli ve düz talaş oluşumu. Bu talaş oluşumu kesme ve talaş yüzeyindeki sürtünmeden kaynaklanır. Öyle ki oluşan bu talaş, kesme düzlemindeki ve talaş yüzeyindeki eşit, zıt, eş doğrultudaki kuvvetlerin etkisi altında dengededir.
- Kesme kuvveti  $F_s$  ve bağıl kesme hızı  $V_{s;}$  kesme kuvveti F ve bağıl talaş hızı  $V_{cr}$  de olduğu gibi eş doğrultudadır.
- Kazıma veya sürtme etkileriyle, kesme genişliği normalinin bileşke kesme hızı
   V'ye orantılı olan kesme kenarı üzerinde yoğunlaşmış kuvvetler oluşur.
- Takımın çevresel hızı  $V_r$ 'den dolayı, talaş taşınması için ekstra bir enerjiye ihtiyaç duyulmaz.

Güdümlü dönel takımlarla eğik kesme işleminin kesme bölgesi analizi, Şekil 3.6'da gösterilen geometri deformasyonu, kuvvet ve hızlar göz ününde bulundurularak geliştirilebilir.

Bu modelde proses; kuvvetleri, gücü, ek bir enerji gerektirmeyen  $V_r$ 'den kaynaklanan talaş taşınması ile birlikte bağıl talaş yönünü elde ederek, mutlak talaş akış açısı  $\psi$  ve uzayda sabit bir noktaya göre deforme olan geometriye ulaşmak için bir deformasyon prosesi gibi düşünülebilir.

Şekil 3.6 (a), talaş akış ve kesme açılarını ( $\eta_c$ ,  $\psi$ ,  $\eta_s$ ,  $\Phi_n$ ) takım geometrisini, mutlak ve bağıl talaş uzunlukları ve talaş kalınlık oranlarını ( $\alpha_n$ , *i* (veya  $V_w$ ,  $V_r$ ),  $r_l$ ,  $r_{lr}$ ,  $r_t$ ) elde etmek için kullanılan mutlak deformasyon geometrisini ve buna ilişkin hızları gösterir.



(a) Güdümlü eğik dönel kesme modeli, deformasyon ve hızlar



(b) Güdümlü eğik dönel kesme modeli, deformasyon ve kuvvetlerŞekil 3.6. Güdümlü eğik dönel kesme modeli, deformasyon, hızlar ve kuvvetler

Şekil 3.6 (a)'daki geometriden, süreklilik ve sıkıştırılamazlık şartları altında ve denklem (3.1) - (3.5) ile aşağıdaki eşitlikler türetilebilir;

$$B_c = \frac{B(\cos\psi)}{\cos i_s} \tag{1.8}$$

$$r_t = \frac{r_l \cos \psi}{\cos i_s} \tag{1.9}$$

$$r_t = \frac{r_{lr} \cos \eta_c}{\cos_i} \tag{1.10}$$

$$\tan \eta_c = \frac{\sin(i-i_s)}{r_t \cos i \cos i_s} - \tan \psi \tag{1.11}$$

$$\tan \phi_n = \frac{r_t \cos \alpha_n}{1 - r_t \sin \alpha_n} \tag{1.12}$$

ve denklem (3.8) ve (3.9)'dan  $\Phi_n$  aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\tan \phi_n = \frac{r_1 \frac{\cos \psi}{\cos i_s} \cos \alpha_n}{1 - r_1 \frac{\cos \psi}{\cos i_s} \sin \alpha_n}$$
(1.13)

$$\tan \phi_n = \frac{r_{lr} \frac{\cos \eta_c}{\cos i_s} \cos \alpha_n}{1 - r_{lr} \frac{\cos \eta_c}{\cos i_s} \sin \alpha_n}$$
(1.14)

Ayrıca Kesme akış açısı  $\eta_s$  ise aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir;

$$\tan \eta_s = \frac{\tan i \cos(\phi_n - \alpha_n) - \sin \phi_n \tan \eta_c}{\cos \alpha_n}$$
(1.15)

Deneysel olarak ölçülebilen talaş uzunluk oranı  $r_1$ , mutlak talaş hızı  $V_c$  yönündeki talaş uzunluğu  $l_c$ 'nin, mutlak iş parçası hızı  $V_w$  yönünde kesilen is parçası boyu l'ye oranıdır.

$$r_l = \frac{l_c}{l} = \frac{V_c}{V_w} \tag{1.16}$$

Buna karşın bağıl talaş uzunluğu oranı  $r_{lr}$ , dönel takım prosesleri için, talaş ve iş parçası uzunluklarından ölçülemez fakat aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$r_{lr} = \frac{V_{cr}}{V} \tag{1.17}$$

Şekil 3.6 (b)'deki talaş, kesme ve normal düzlemlerdeki kuvvet bileşenleri gösterilmiştir. Kesme düzlemi ve talaş yüzeyi üzerindeki eşit, zıt ve eş doğrultudaki kuvvetlerin etkisi altında talaşın denge hali yani R'=R'' ve  $F'_R=F''_R$  aşağıdaki denklemeleri oluşturur;

$$\tan \beta_n = \tan \beta \cos \eta_c$$
 (1.18)

$$\tan \eta_s' = \frac{\tan \eta_c' \sin \beta_n}{\cos(\phi_n + \beta_n - \alpha_n)}$$
(1.19)

$$F_{p} = \tau \beta t \cos i \frac{\cos(\beta_{n} - \alpha_{n}) + \tan \eta_{c} \sin \beta_{n} \tan i}{M \sin \phi_{n} \cos i_{s}}$$
(1.20)

$$F_{Q} = \tau B t \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{M \sin \phi_n \cos i_s}$$
(1.21)

$$F_{R} = \tau Bt \cos i \frac{\cos(\beta_{n} - \alpha_{n}) \tan i - \tan \eta_{c} \sin \beta_{n}}{M \sin \phi_{n} \cos i_{s}}$$
(1.22)

$$M = \sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c ' \sin^2 \beta_n}$$
(1.23)

Talaş yüzeyindeki bağıl talaş hızı  $V_{cr}$  ve sürtünme kuvveti F ve kesme düzlemindeki  $F_s$  ve  $V_s$  eş doğrultuda olduğunda yani  $\eta_{c=} \eta'_c$  (3.14) ve (3.18) denklemleri eşitlendiğinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\tan(\phi_n + \beta_n) = \frac{\tan i \cos \alpha_n}{\tan \eta_c - \sin \alpha_n \tan i}$$
(1.24)

Özetlemek gerekirse yukarıdaki ilgili denklemlerin yardımıyla, kuvvet bileşenleri fonksiyonel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_{p}, F_{Q}, F_{R} = f(\alpha_{n}, i, i_{s}, B, \tau, t, \phi_{n}, \beta)$$

$$(1.25)$$

Burada *i* yerine  $V_w$  veya  $V_r$ ;  $\beta$  yerine  $\beta_n$ ;  $\Phi_n$  yerine  $r_{l1}$  veya  $r_l$  kullanılabilir. Bu fonksiyonel formdan görüleceği üzere sürtünmeden ve kesmeden kaynaklanan kuvvet bileşenlerinin öngörülebilmesi için kayma gerilmeleri  $\tau$ ,  $\Phi_n$  ( $r_{l1}$  veya  $r_l$ ) ve  $\beta$  veya  $\beta_n$ 'in bilinmesi gerekmektedir.

Buna ek olarak kazıma ve sürtme hallerini de göz önünde bulundurduğumuzda, kesmenin birim genişliği için kenar kuvvet katsayıları  $Kl_P$ ,  $Kl_Q$  ve  $Kl_R$ 'nin de bilinmesi gerekmektedir. Dolaysısı ile kuvvet bileşenleri için yazılabilecek denklem aşağıdaki gibidir;

$$F_{Pt} = F_P + F_{Pe} = F_P + K l_P B \frac{\cos i}{\cos i_s}$$
(1.26)

$$F_{Qt} = F_Q + F_{Qe} = F_Q + K l_Q B \frac{\cos i}{\cos i_s}$$
(1.27)

$$F_{Rt} = F_R + F_{Re} = F_R + K l_R B \frac{\cos i}{\cos i_s}$$
(1.28)

Güdümlü dönel eğik kesmede toplam güç P iş parçasını ve takımı hareket ettiren gücü içerir ve aşağıdaki formülden elde edilebilir;

$$P = F_{Pt}V \tag{1.29}$$

Benzer olarak toplam kesme gücü aşağıdaki formül ile ifade edilebilir;

$$U = \frac{P}{BtV_w} = \frac{F_{Pt}V}{btV} = \frac{F_{Pt}}{bt}$$
(1.30)

Dönel takımlar için yazılan yukarıdaki denklemlerin birçoğu klasik eğik kesme işlemi için olanlara benzerdir. Daha önce de bahsedildiği gibi malzeme kaldırma oranı ve
kesme derinliği *t* her iki proses için de aynı ise ve  $b=Bcosi/cosi_s$  ise bu prosesler birbirine eşdeğerdir ve denklem (3.20) – (3.24) klasik eğik kesme için olanlarla aynıdır.

İki proses arasındaki ana fark dönel takımlarda takım çevresel hızından kaynaklanan talaşa iletimidir. Bu nedenle eşdeğer prosesteki mutlak talaş akış açısı  $\psi$  ve mutlak talaş uzunluk oranı  $r_l$  dönel kesme prosesindeki bağıl talaş akış açısı  $\eta_c$  ve bağıl talaş uzunluk oranı  $r_{lr}$  ile karşılaştırılmalıdır (Armarego ve ark 1993).

#### 3.3.2 Güdümlü Dönel Takımlarla Dik Kesme İşleminin Mekanikleri

Daha önce de belirtildiği gibi güdümlü dönel takımlarla dik kesmede statik eğim açısı  $i_s$  sıfır derecedir ve güdümlü dönel takımlarla eğik kesmenin özel bir hali olarak düşünülebilir. Önceki proses ile aynı kesme bölgesi modeli kullanıldığında, Şekil 3.7'deki mutlak geometri, hızlar ve kuvvetler dikkate alındığında, güdümlü dönel takımlarla eğik kesme için türetilen denklemlerde  $i_s=0$  derece olarak yerine konulduğunda güdümlü dönel takımlarla dik kesme için denklemler elde edilebilir. Bu denklemler aşağıda sıralanmıştır.

Bu denklemlerden, proses için gerekli kuvvetleri, gücü ve talaş akışını elde etmek için takım geometrisinin, kesme koşullarının, kesme kenarı kuvvet katsayıları ile birlikte temel kesme büyüklüklerinin ( $\tau$ ,  $\Phi_n$ ,  $r_1$  veya  $r_{lr}$ ,  $\beta_n$  veya  $\beta$ ) bilinmesi gerekmektedir (Armarego ve ark 1993).



(a) Güdümlü dik dönel kesme modeli, deformasyon ve hızlar



(b) Güdümlü dik dönel kesme modeli, deformasyon ve kuvvetler **Şekil 3.7.** Güdümlü dik dönel kesme modeli, deformasyon, hızlar ve kuvvetler

$$V = \sqrt{V_w^2 + V_r^2}$$
(1.31)

$$\tan i = \frac{V_r}{V_w} \tag{1.32}$$

$$V_{w} = V \cos i \tag{1.33}$$

$$V_r = V \sin i \tag{1.34}$$

$$Vbt = V_{w}Bt = VBt\cos i \tag{1.35}$$

$$b = B\cos i \tag{1.36}$$

$$r_t = r_l \cos \psi = r_{lr} \frac{\cos \eta_c}{\cos i} \tag{1.37}$$

$$\tan \eta_c = \frac{\sin i}{r_t \cos i} - \tan \psi \tag{1.38}$$

$$\tan\phi_n = \frac{r_r \cos\alpha_n}{1 - \sin\alpha_n} \tag{1.39}$$

$$\tan\phi_n = \frac{r_l \cos\psi \cos\alpha_n}{1 - r_l \cos\psi \sin\alpha_n} \tag{1.40}$$

$$\tan \phi_n = \frac{r_{lr} \frac{\cos \eta_c}{\cos i} \cos \alpha_n}{1 - r_{lr} \frac{\cos \eta_c}{\cos i} \sin \alpha_n}$$
(1.41)

$$\tan \beta_n = \tan \beta \cos \eta_c$$
 (1.42)

$$\tan \eta_s' = \frac{\tan \eta_c ' \sin \beta_n}{\cos(\phi_n + \beta_n - \alpha_n)}$$
(1.43)

$$F_{p} = \tau Bt \cos i \frac{\cos(\beta_{n} - \alpha_{n}) + \tan \eta_{c} ' \sin \beta_{n} \tan i}{M \sin \phi_{n}}$$
(1.44)

$$F_{Q} = \tau Bt \frac{\sin(\beta_{n} - \alpha_{n})}{M \sin \phi_{n}}$$
(1.45)

$$F_{R} = \tau Bt \cos i \frac{\cos(\beta_{n} - \alpha_{n}) \tan i - \tan \eta_{c} \sin \beta_{n}}{M \sin \phi_{n}}$$
(1.46)

$$M = \sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c ' \sin^2 \beta_n}$$
(1.47)

$$\tan(\phi_n + \beta_n) = \frac{\tan i \cos \alpha_n}{\tan \eta_c - \sin \alpha_n \tan i}$$
(1.48)

$$F_{Pt} = F_P + F_{Pe} = F_P + K l_P B \cos i \tag{1.49}$$

$$F_{Qt} = F_Q + F_{Qe} = F_Q + K l_Q B \cos i$$
 (1.50)

$$F_{Rt} = F_R + F_{Re} = F_R + K l_R B \cos i \tag{1.51}$$

$$F_{P_t}, F_{Q_t}, F_{R_t} = f(\alpha_n, i, B, t, \tau, \phi_n, \beta, Kl_P, Kl_Q, Kl_R)$$

$$(1.52)$$

# 3.3.3 Kendiliğinden Hareketli Dönel Takımlarla Eğik Kesme İşleminin Mekanikleri

Daha önce de belirtildiği gibi dönel takımlar sadece statik eğim açısı  $i_s$  sıfırdan farklı olduğunda kendiliğinden hareketli olurlar (Şekil 3.3 (b) ve 3.3 (c)). Takım durağan bir halde iken kesme işlemi başladığında, statik eğim açısı  $i_s$  sayesinde kesme kenarı boyunca etkiyen kuvvet, takımı denge hızı olan  $V_r$  hızına kadar döndürerek hızlandırır. Sürtünmesiz dönel takım ekseni ve talaş taşınması için denge şatları ve  $V_r$ ; bileşke kesme hızı V ve bileşke kesme kuvveti takım kesme kenarına dik olduğunda oluşur bu yüzden Şekil 3.4(d)'de gösterildiği gibi  $V_r=V_wsini_s$  iken eğim açısı i ve kesme kenarı boyunca kuvvet bileşeni sıfırdır. Mutlak deformasyon geometrisi, hızlar, kuvvetler Şekil 3.8'deki gibi bir kesme bölgesi modeli üzerinde gösterilebilir. Güdümlü dönel eğik kesme için elde edilen denklemlerde i=0 derece yerine yazılarak bu kendiliğinden

hareketli eğik dönel kesme için de gerekli denklemler elde edilebilir. Aşağıdaki denklemler kendiliğinden hareketli eğik dönel kesme analizi için gerekli denklemlerdir ve güdümlü eğik dönel kesme prosesine göre oldukça basittir. Çünkü  $i=\eta c=\eta s=0$  ve kesme kenarı boyunca etkiyen yan kuvvet  $F_R=0$ 'dır. Ayrıca takım çevresel hızı  $V_r$  yönü  $i_s$ 'nin pozitif ya da negatif olmasına göre, büyüklüğü ise  $i_s$ 'nin büyüklüğüne ve mutlak iş parçası hızına  $V_w$  yani  $V_r=V_w sini_s$  bağlıdır.



Şekil 3.8. Kendiliğinden hareketli eğik dönel kesme modeli

$$V = V_w \cos i_s \tag{1.53}$$

$$V_r = V_w \sin i_s \tag{1.54}$$

$$Vbt = \frac{VBt}{\cos i_s} = V_w Bt \tag{1.55}$$

$$b = \frac{B}{\cos i_s} \tag{1.56}$$

$$r_t = \frac{r_{lr}}{\cos i} = r_l = r_l \frac{\cos \psi}{\cos i_s} \tag{1.57}$$

$$\eta_c = 0 \tag{1.58}$$

$$\tan \psi = \frac{\sin(i - i_s)}{r_i \cos i \cos i_s} \tag{1.59}$$

$$\tan\phi_n = \frac{r_t \cos\alpha_n}{1 - r_t \sin\alpha} \tag{1.60}$$

$$\tan \phi_n = \frac{r_l \frac{\cos \psi}{\cos i_s} \cos \alpha_n}{1 - r_l \frac{\cos \psi}{\cos i_s} \sin \alpha_n}$$
(1.61)

$$\tan\phi_n = \frac{r_{lr}\cos\alpha_n}{1 - r_{lr}\sin\alpha_n} \tag{1.62}$$

$$\tan \eta_s = 0 \Longrightarrow \eta_s = 0 \tag{1.63}$$

$$F_{p} = \tau Bt \frac{\cos(\beta_{n} - \alpha_{n})}{\cos(\phi_{n} + \beta - \alpha_{n})\sin\phi_{n}\cos i_{s}}$$
(1.64)

$$F_{Q} = \tau Bt \frac{\sin(\beta_{n} - \alpha_{n})}{\cos(\phi_{n} + \beta - \alpha_{n})\sin\phi_{n}\cos i_{s}}$$
(1.65)

$$F_R = 0 \tag{1.66}$$

$$F_{P}, F_{O} = Functions(\alpha_{n}, t, B, i_{s}, V_{w}, \tau, \phi_{n}, \beta)$$
(1.67)

$$F_{P_t}, F_{Q_t} = Functions(\alpha_n, t, B, i_s, V_w, \tau, \phi_n, \beta, Kl_P, Kl_Q)$$
(1.68)

Kendiliğinden hareketli dönel kesmede kuvvetler ve toplam güç klasik ortogonal kesme analizinden eşit kesme genişliği, orijinal iş parçası *B*'den daha geniş olan  $b=B/cosi_s$ (Şekil 3.4 (d) ve 3.4 (i)). Fakat kuvvetleri ve gücü ön görebilmek için, yukarıdaki denklem (3.67)'de belirtildiği üzere kayma gerilmeleri  $\tau$ ,  $\Phi n$  ( $r_1$  veya  $r_2$ ) ve  $\beta$  ( $\beta_n$ ) gibi temel kesme büyüklüklerini bilmek gerekmektedir (Armarego ve ark 1993).

## 3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bir mühendislik sistemini analiz etmek için bu sistemin matematiksel modelinin kurulması ve bu matematik modelin çözümünün gerçekleştirilmesi gerekir. Çözümün basitleştirilmesi adına yapılan bazı kabuller ışığı altında, verilen sınır şartlarından ve diferansiyel denklemlerden oluşan matematiksel model kurulmuş olur. Karşılaşılan karmaşık sistemlerin tanımlanmasında kullanılan bu diferansiyel denklemlerin genellikle çözülmesi çok zordur. Yüksek performanslı bilgisayarlar yardımıyla bu çözülmesi zor denklemlerin çözülebilmesi mümkün hale gelir. Birçok mühendislik probleminin çözülmesi ve yaklaşık sonuçlarının elde edilmesi için çok çeşitli sayısal çözüm yöntemleri geliştirilmiş ve bu mühendislik problemlerine uygulanmıştır.

Özellikle de sonlu elemanlar yöntemi, bu sayısal çözüm metotları arasında en önde gelenlerdendir. Karmaşık mühendislik sistemlerinin fiziksel davranışlarının öngörülmesi ve benzetiminin yapılması (simule edilmesi) konusunda temel yöntem haline gelmiştir. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminin sadece teorik kullanımı değil, sonlu elemanlar çözümü yapan ticari paket programların da kullanımı akademik araştırma yapan kurumlar, ticari kurumlar, devlet kurumları gibi birçok birimde kabul görmüştür.

Fiziksel bir problem, birçok alan değişkeni içerir ve bu alan değişkenleri bütün içerisinde her bir noktada farklılık gösterirler. Bu nedenle bütün içerisinde sonsuz sayıda çözüm vardır. Sonlu elemanlar metodu ile sınırları belli olan bu bütün "eleman" olarak tanımlanan sonlu sayıda parçalara bölünür ve her bir elemanın çözümü yapılarak genel çözüme yaklaşık olarak ulaşılır. Aslında sonlu elemanlar yöntemi, bütünü elamanlara bölerek ve her eleman için alan değişkenlerini şekil fonksiyonları vasıtası ile ifade ederek, sonsuz sayıda bilinmeyene sahip olan problemi sonlu sayıda bilinmeyene düşürür. Şekil fonksiyonları belirli noktalar için alan değişkenlerinin değerleri cinsinden tanımlanır. Bu belirli noktalara da düğüm noktaları denir. Düğüm noktaları,

bütünün bölündüğü her bir elemanın sınırlarında bulunan ve elamanların birbirine bağlandıkları noktalardır.

Sonlu elemanlar yöntemi analizi aşağıdaki temel unsurlardan oluşur;

- Bütünün sonlu sayıda elemanlara bölünmesi
- Şekil fonksiyonlarının seçimi
- Her bir eleman için eleman direngenlik matrislerinin oluşturulması
- Eleman direngenlik matrislerinin global direngenlik matrisinin içine yerleştirilmesi
- Sınır şartlarının uygulanması
- Denklemlerin çözümü

Yukarıda bahsedilen bütünün bölündüğü her bir sonlu elemanın davranışını belirlemek için yazılan denklemler üç temel yaklaşım kullanılarak oluşturulur.

- 1) Direkt Yaklaşım: Nispeten basit olarak tanımlanabilecek problemler için kullanılır.
- 2) Ağırlıklı Kalanlar Yaklaşımı: Fonksiyonelleri elde edilemeyen problemlere sonlu elemanlar yönteminin uygulanabilmesini sağlayan yaklaşımdır.
- 3) Varyasyonel Yaklaşım: Fonksiyoneli ekstremize etme temeline dayanır. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değerin maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.

Daha önce de belirtildiği üzere, elemanların sınırlarında bulunan ve ona komşu elemanla ortak olarak kullandıkları noktalara düğüm noktaları denir. Düğüm noktaları, uzayda sistemin koordinatlarını tanımlarlar. Eleman denklemlerinden oluşan matris sisteminde düğüm noktalarındaki bilinmeyenler alan değişkenlerini temsil eder. Düğüm noktasındaki alan değişkenleri elemanın serbestlik derecesi olarak da tanımlanır.

Düğüm noktalarındaki serbestlik dereceleri sistemin fiziğine ve seçilen eleman tipine bağlıdır. Çizelge 3.1'de problemin fiziğine göre serbestlik dereceleri ve buna karşılık gelen kuvvetler gösterilmiştir.

Problemin Fiziği	Serbestlik Derecesi	Kuvvet Vektörü		
Yapısal/Katılar	Yer değiştirme	Mekanik kuvvetler		
Isı İletimi	Sıcaklık	Isı akısı		
Akış	Hız	Akı		
Elektrostatik	Elektriksel potansiyel	Yük yoğunluğu		
Manyeto statik	Manyetik potansiyel	Manyetik şiddet		

Çizelge 3.1 Problemin fiziğine göre serbestlik dereceleri ve kuvvet vektörleri

Problemi elemanlara bölerken dikkat edilesi gereken bir diğer husus da problemin fiziğine uygun elaman tipi seçmektir. Bu elemanlar bir boyutlu çizgisel elemanlar (Şekil 3.9), iki boyutlu yüzeysel elemanlar (Şekil 3.10), üç boyutlu hacimsel elemanlar (Şekil 3.11) şeklinde olabilirler. Bu eleman tiplerinden yaygın olarak kullanılanları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Çizgi elemanlar



Şekil 3.10. Yüzey elemanlar



Şekil 3.11. Hacim elemanlar

Her elemanın bir eleman numarası vardır ve genellikle saatin tersi yönünde bir sıralama ile numaralandırılmış düğüm noktaları ile tanımlanırlar (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Elemanların ve düğüm noktalarının numaralandırılması

Şekil 3.13'de gösterilen "k" direngenliğine sahip doğrusal yayın iki düğüm noktası vardır. Her düğün noktasına  $u_1$  ve  $u_2$  yer değiştirmelerine sebep olan  $f_1$  ve  $f_2$  kuvvetleri uygulanmaktadır.



Şekil 3.13. Doğrusal yay elemanın serbest cisim diyagramı

Bu yükler altında toplam yer değiştirme;

$$u = u_1 - u_2 \tag{1.69}$$

Buradaki toplam yer değiştirme, yaya etkiyen kuvvetle doğrudan ilişkilidir;

$$f_1 = ku = k(u_1 - u_2) \tag{1.70}$$

Kuvvetlerin denkliği gereği;

$$f_2 = -f_1 \tag{1.71}$$

Dolayısıyla;

$$f_2 = k(u_2 - u_1) \tag{1.72}$$

3.70 ve 3.72 denklemlerini birlikte düzenleyip matris formunda yazarsak;

$$\begin{vmatrix} k & -k \\ -k & k \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix} = \begin{cases} f_1 \\ f_2 \end{cases} \text{ veya } k^e u^e = f^e$$
(1.73)

Global sistem denklemleri matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$Ku = F \tag{1.74}$$

Burada;

K: Global direngenlik matrisi

u: Bilinmeyen vektörü

F: Kuvvet vektörü

Problemin doğasına göre K, u'nun bir fonksiyonu K(u) ve F zamana bağlı F(t) olabilir.

Global direngenlik matrisi ve global kuvvet vektörü aşağıdaki formüller ile elde edilebilir.

$$f = \sum_{e=1}^{E} f^{(e)}$$
(1.75)

$$K = \sum_{e=1}^{E} k^{(e)}$$
(1.76)

Burada E, sistemdeki toplam eleman sayısıdır.

Şimdi sonlu elemanlar yönteminde eleman matrislerinin oluşturulması ve global matrise yerleştirilmesi işlemini bir örnek üzerinden incelemeye çalışalım.



Şekil 3.14. Doğrusal yaylardan oluşan sistem (üst) ve sonlu elemanlar modeli (alt)

<b>Cizelge 3.2.</b>	Elemanların ve	global	sistemin	düğüm	numaraları	ve birbir	i ile i	lişkiler	i
, .		$\mathcal{O}$		$\mathcal{O}$				,	

Eleman Numarası	Eleman Lokal Düğüm Numarası	Global Düğüm Numarası
1	1	1
	2	2
2	1	2
2	2	3
3	1	2
3	2	3
4	1	3
4	2	4

3.76 denklemine göre global sistem matrisinin boyutu 4x4 olarak elde edilir ve her elemanın direngenlik matrisi bu global matris içerisine aşağıdaki gibi yerleştirilir.

2. Eleman: 
$$\begin{vmatrix} k_{11}^{(2)} & k_{12}^{(2)} \\ k_{21}^{(2)} & k_{22}^{(2)} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{11}^{(2)} & k_{12}^{(2)} & 0 \\ 0 & k_{21}^{(2)} & k_{22}^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = k^{(2)}$$
 (1.78)

3. Eleman: 
$$\begin{vmatrix} k_{11}^{(3)} & k_{12}^{(3)} \\ k_{21}^{(3)} & k_{22}^{(3)} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{11}^{(3)} & k_{12}^{(3)} & 0 \\ 0 & k_{21}^{(3)} & k_{22}^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = k^{(3)}$$
 (1.79)

Yukarıdaki bu matrislerden;

$$K = \sum_{e=1}^{4} k^{(e)} = k^{(1)} + k^{(2)} + k^{(3)} + k^{(4)}$$
(1.81)

$$K = \begin{vmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & 0 & 0 \\ k_{21}^{(1)} & (k_{22}^{(1)} + k_{11}^{(2)} + k_{11}^{(3)}) & (k_{12}^{(2)} + k_{12}^{(3)}) & 0 \\ 0 & (k_{21}^{(2)} + k_{21}^{(3)}) & (k_{22}^{(2)} + k_{22}^{(3)} + k_{11}^{(4)}) & k_{12}^{(4)} \\ 0 & 0 & k_{21}^{(4)} & k_{22}^{(4)} \end{vmatrix}$$
(1.82)

3.75 denklemine göre gloabal kuvvet vektörü 4x1 boyutunda bir matristir ve her elemanın kuvvet vektörünün bu global kuvvet vektörüne yerleşimi aşağıdaki şekildedir.

1. Eleman: 
$$\begin{cases} f_1^{(1)} \\ f_2^{(2)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1^{(1)} \\ f_2^{(2)} \\ 0 \\ 0 \end{cases} = f^{(1)}$$
 (3.83)

2. Eleman: 
$$\begin{cases} f_1^{(2)} \\ f_2^{(2)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 \\ f_1^{(2)} \\ f_2^{(2)} \\ 0 \end{cases} = f^{(2)}$$
 (3.84)

3. Eleman: 
$$\begin{cases} f_1^{(3)} \\ f_2^{(3)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 \\ f_1^{(3)} \\ f_2^{(3)} \\ 0 \end{cases} = f^{(3)}$$
 (3.85)

4. Eleman: 
$$\begin{cases} f_1^{(4)} \\ f_2^{(4)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 \\ 0 \\ f_1^{(4)} \\ f_2^{(4)} \end{cases} = f^{(4)}$$
 (3.86)

$$F = \sum_{e=1}^{4} f^{(e)} = f^{(1)} + f^{(2)} + f^{(3)} + f^{(4)}$$
(3.87)

$$F = \begin{cases} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{cases} = \begin{cases} f_1^{(1)} \\ f_2^{(1)} + f_1^{(2)} + f_1^{(3)} \\ f_2^{(2)} + f_2^{(3)} + f_1^{(4)} \\ f_2^{(4)} \end{cases}$$
(3.88)

$$u = \begin{cases} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{cases} = \begin{cases} u_1^{(1)} \\ u_2^{(1)} = u_1^{(2)} = u_1^{(3)} \\ u_2^{(2)} = u_2^{(3)} = u_1^{(4)} \\ u_2^{(4)} \end{cases}$$
(3.89)

Çözümün tek olabilmesi için global matris determinantının sıfırdan farklı olması gerekir. Global sistemin öz değerlerinden biri sıfır ise bu durum sıfır determinanta veya tekil matris durumuna sebep olur. Bu durumlarda çözüm tek değildir. Sıfır öz değere karşılık gelen öz vektör yer değiştirme durumunu, sıfır olmayan öz değerler de deformasyon durumunu gösterir.

 $k_{11}^{(e)} = k_{22}^{(e)} = k^{(e)}$  ve  $k_{12}^{(e)} = k_{21}^{(e)} = -k^{(e)}$ 'nin belirli değerleri için global matris aşağıdaki gibi elde edilir;

$$K = k^{(e)} \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix}$$
(3.90)

Öz değerleri;  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = 2$ ,  $\lambda_3 = 3 - \sqrt{5}$  ve  $\lambda_4 = 3 + \sqrt{5}$ , bunlara karşılık gelen öz vektörler ise;

$$u^{(1)} = \begin{cases} 1\\1\\1\\1 \end{cases}, u^{(2)} = \begin{cases} 1\\-1\\-1\\1 \end{cases}, u^{(3)} = \begin{cases} -1\\2-\sqrt{5}\\-2+\sqrt{5}\\1 \end{cases}, u^{(4)} = \begin{cases} -1\\2+\sqrt{5}\\-2-\sqrt{5}\\1 \end{cases} \end{cases}$$
(3.91)

Bu öz vektörlerin her biri aşağıda da gösterildiği gibi (Şekil 3.15) olası çözümleri göstermektedir.

Tek çözümün olabilmesi için sıfır öz değer elemine edilerek matris tekil olmayan hale getirilir. Bu da sınır şartları uygulanarak yapılır.



Şekil 3.15. Doğrusal yaylardan oluşan bu sistem için olası çözüm halleri

Şekil 3.15'de gösterildiği üzere 1 numaralı düğüm noktasının tüm serbestlik derecelerindeki hareketi engellenmiştir. Bu nedenle 1 numaralı düğüm noktasının yer değiştirme vektörünün değeri  $u_1 = 0$  olarak alınır;  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$  ise bilinmeyen yer değiştirme değerleridir. Kuvvetler tarafında ise  $f_1$  bilinmezken  $f_2=0$ ,  $f_3=0$  ve  $f_4=F$  olur.

Bu değerler global denklem sistemine girildiğinde;

$$k^{(e)} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{cases} = \begin{cases} f_1 \\ f_2 = 0 \\ f_3 = 0 \\ f_4 = F \end{cases}$$
(3.92)

Buradan;

$$k^{(e)} = \begin{vmatrix} 3 & -2 & 0 \\ -2 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{cases} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ F \end{cases}$$
(3.93)

$$-k^{(e)}u_2 = f_1 \tag{3.94}$$

Denklem 3.92'deki matris artık tekil değildir ve bu eşitliklerin çözümü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u_2 = \frac{F}{k^{(e)}}, u_3 = \frac{3}{2} \frac{F}{k^{(e)}}, u_4 = \frac{5}{2} \frac{F}{k^{(e)}}$$
(3.95)

Yukarıdaki denklemeler sonucu  $f_1$ =-F bulunur. Her bir düğüm noktasının nihai yer değiştirme vektörlerinin çözümleri ise aşağıda verilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda nihai çözüm Şekil 3.16'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Doğrusal yay sistemi için nihai sonuç

# 3.5 Bazı Önemli Tanımlar ve Deform Sonlu Elemanlar Çözümü

Yukarıda da bahsedildiği üzere sayısal çözümler problemin kesin sonucunu verememekle birlikte, yaklaşık çözüm elde etmemizi sağlarlar. Elde edilen sonucun gerçek sonuca mümkün olduğunca yakın olması, sonlu elemanlar modelinin doğru kurulmasına, sınır şartlarının doğru uygulanmasına, malzeme verilerinin doğru bir şekilde girilmesine vs. bağlıdır. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının doğru yorumlanabilmesi ve modelin doğru kurulabilmesi için bazı temel kavramların bilinmesi önem teşkil etmektedir.

Katı cisimler mekaniği kapsamında, birim alana etkiyen kuvvet gerilme olarak tanımlanır. Kuvvet kesite dik ise ve boy değişimlerine yol açıyorsa normal gerilme, açısal değişimlere yol açıyor ise kayma gerilmesi olarak isimlendirilir. Pozitif işaretli normal gerilme çekme, negatif işaretli normal gerilme ise basma gerilmesidir.

Malzemenin ne kadar gerilme altında olduğu, deformasyon miktarını doğrudan etkilediği için, gerilme kavramı form verme problemlerinde oldukça önemlidir.

Gerilmenin birden fazla tanımı vardır;

- Mühendislik gerilmesi; deformasyona uğramamış şekildeki birim alana düşen kuvvet.
- Gerçek gerilme; deformasyona uğramış şekildeki, yani kuvvetin o andaki kesit alanına bölünerek elde edilen gerilme değeri.

Sadece küçük şekil değiştirmelerin olduğu problemlerde mühendislik eğrisi ve gerçek eğri birbirine çok yakın olduğundan mühendislik gerilmesi ve gerinmesi değerleri ile çalışmak yeterlidir. Fakat büyük şekil değiştirmelerin olduğu, genel anlamda form verme problemlerinin analizinde gerçek gerilme ve gerinme değerleri önem kazanmaktadır.

Mühendislik gerilmesi;

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{3.96}$$

Gerçek gerilme;

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \Longrightarrow A = A_o \cdot \frac{l_0}{l}$$
(3.97)

$$\sigma_g = \frac{F}{A} = \frac{F.l}{A_0.l_0} = \sigma.(1+\varepsilon)$$
(3.98)

Yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki durumuna kıyasla şekil değiştirme durumuna gerinme (strain) denir. Gerinmenin matematiksel olarak aşağıdaki gibi iki tanımı vardır;

- Mühendislik gerinmesi; malzemenin boyundaki değişimin ilk boyuna oranıdır.
- Gerçek gerinme; logaritmik gerinme değeridir. Deformasyon süresince değişen gerinme değerlerinin integrali alınarak bulunur.

Mühendislik gerinmesi;

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \tag{3.99}$$

Gerçek gerinme;

$$d\varepsilon_g = \frac{dl}{l} \Longrightarrow \varepsilon_g = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_o} = \ln(\varepsilon + 1)$$
(3.100)

Şekil 3.17'de bir basma testi için mühendislik gerinmesi ve mühendislik gerilmesi formülleri verilmiştir. Dikkat edilirse numuneye uygulanan basma kuvvetinden dolayı oluşan kesit alanındaki şişkinlik hesaba katılmamıştır.



Şekil 3.17. Basma durumu için mühendislik gerilme ve gerinmesi

Şekil 3.18'de bir çekme testi için gerçek gerinme ve gerçek gerilme formülleri gösterilmiştir. Bu iki formülde de numunede çekmeden dolayı oluşan kesit daralması hesaba katılmıştır.



Şekil 3.18. Çekme durumu için gerçek gerinme ve gerinme

Her malzeme yapısal olarak davranışını tanımlayan karakteristik gerilme – gerinme eğrilerine sahiptir. Basitleştirme için bu eğri iki bölüm olarak incelenebilir. Baştaki doğrusal kısım elastik bölgeyi temsil eder. Elastik bölgede gerinme değerleri çok düşüktür dolayısıyla malzemeye uygulanan yük ortadan kalktığında malzeme ilk haline geri döner. İkinci bölge ise plastik şekil değiştirme bölgesidir. Burada gerinme değerleri elastik bölgenin üzerindedir dolayısıyla malzemede oluşan şekli değişikliği yükün boşaltılmasıyla ortadan kalkmaz. Sadece elastik bölge kadarki kısmı düzelir.



Şekil 3.19. Elastik deformasyon diyagramı



Şekil 3.20. Plastik deformasyon diyagramı

Deform yazılımında malzeme verisi olarak gerilme – gerinme eğrisi için kullanılan değerler efektif gerinme ve gerilme değerleridir.

Efektif (von misses) gerilme değeri;

$$\overline{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 \tau_{xz}^2)} \quad (3.101)$$

Efektif gerinme;

$$\overline{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$
(3.102)

Deform yazılımında akış gerilmesi (flow stress) kavramı kullanılır. Akış gerilmesi; malzemeyi plastik olarak deforme etme durumunu devam ettirmek için gereken gerilme değeri olarak tanımlanabilir. Plastik gerinmenin (gerçek gerinme) bir fonksiyonudur. Bu kavram artımlı plastik deformasyon içeren problemlerde önemlidir. Yani, plastik olarak deforme olmuş malzemeyi yeniden plastik deformasyona uğratmak için gerekli gerilme değeri akış gerilmesi eğrisinden elde edilir. Bu eğri gerçek gerilme – gerçek gerinme eğrisinin plastik kısmına tekabül eder. Şekil 3.21'de gösterildiği üzere malzemenin ilk olarak plastik deformasyona uğratmak için gerekleşme nedeni ile artmıştır.



Şekil 3.21. Akış gerilmesi (flow stress) konsepti

Akış gerilmesi eğrileri; deformasyona, deformasyon hızına ve sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterirler. Bu nedenle malzemenin davranışını doğru bir şekilde tanımlayabilmek için bu değişkenleri hesaba katmak çok önemlidir. Şekil 3.22'de artan

sıcaklığa ve artan deformasyon hızına göre gerilme – gerinme eğrilerinin değişimi gösterilmektedir. Diğer tüm parametrelerin aynı olması durumunda malzeme sıcaklığını arttırdığımızda deformasyon için gereken gerilme değeri ihtiyacı düşer fakat diğer tüm parametreler aynı iken deformasyon hızı arttığında ise deformasyon için gerekli gerilme değeri artar.



Şekil 3.22. Akış gerilmesinin (flow stress) sıcaklık ve deformasyon hızı ile değişimi

Elastik deformasyonun ihmal edilebileceği şekil verme problemlerinde, aşağıda formülü verilen Levy – Mises akma kuralı kullanılabilir. Bu eşitlik sayesinde deformasyon hızı cinsinden gerinme elde edilebilir.

Levy – Mises akma kuralı;

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\lambda} \dot{\varepsilon}_{ij} \tag{3.103}$$

Burada  $\lambda$  malzeme ve durum değişkenleri ve malzemenin bir fonksiyonudur.

Metal akışının hesaplanmasında minimum iş hızı kavramı da çok önemlidir. Minimum iş hızı kavramına göre malzeme direncin en az olduğu yöne doğru şekil

değiştirmektedir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.23) üç farklı basma durumu için iş parçası ve takım arasındaki sürtünme değeri malzemenin akış şeklini belirlemektedir. Sürtünme olmadığı takdirde direnç yoktur ve malzeme homojen olarak şekil değiştirir. Yüksek sürtünmeli bir durumda ise dış bölgelerde yüksek direnç vardır dolayısıyla malzeme orta kesitte daha fazla şekil değiştirir.



Şekil 3.23. Minimum iş hızı prensibi

Aşağıda minimum iş hızı prensibi matematiksel olarak tanımlanmıştır.

$$\pi = \int_{V} \overline{\sigma} \,\overline{\varepsilon} \, dV - \int_{S} F_{i} u_{i} dS \tag{3.104}$$

$$\delta \pi = \int_{V} \overline{\sigma} \delta \,\overline{\varepsilon} \, dV - \int_{S} F_{i} \delta u_{i} dS + K \int_{V} \varepsilon_{V} \,\delta \,\varepsilon_{V} dV = 0 \tag{3.105}$$

Denklem 3.103'de cisim kuvvetleri ile sürtünme kuvvetlerinin dengesi görülmektedir. Bu denklemin hızları elde etmek için olan hali denklem 3.104'de verilmiştir.

Şekil 3.24'de dövme işlemine tabi tutulmuş eksenel simetrik bir parça görülmektedir. Kesit üzerinde gösterilen dikdörtgenler bu parçanın sonlu elamanlar modeldir. Yani her bir dikdörtgen parçanın bölündüğü elemanlardan biridir. Her bir düğüm noktasındaki hız değerleri yukarıdaki denklemlerin çözümü ile elde edilir. Bu hızlar vektörel olarak şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Eksenel simetrik dövme işlemi ve iki boyutlu sonlu elemanlar modeli

Denklem 3.104'e ek olarak tek çözümün elde edilmesi için sınır şartları da tanımlanmalıdır. Bu problemde üst bölgedeki düğüm noktalarının hızı dövme takımının hızı ve takım ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısı tarafından belirlenir. Sınır şartı olarak, sol taraftaki düğüm noktalarının sağa ve sola hareketi engellenmiştir. Çünkü buradaki düğüm noktaları merkez eksen üzerindedir dolayısı ile sağ ve sola hareket edemezler. Ayrıca alttaki düğüm noktaları da simetri sınır şartı barındırdığından aşağı ve yukarı hareketleri engellenmiştir. Bu üç sınır şartı ile sonlu elemanlar modeli gerçek parça gibi davranacaktır.

Düğüm noktalarındaki hızlar elde edildiğinde düğüm noktalarının koordinatları da güncellenmelidir. Bu da ilgili zaman adımında hızın integrali alınarak elde edilir. Şekil 3.25'de düğüm noktalarının değişmiş konumları görülmektedir.



Şekil 3.25. Hesaplama sonrası düğüm noktalarının konumları

Buradan da açıkça belli olduğu üzere eğer düğüm noktaları hızlar çok küçük zaman adımlarında büyüklük ve yön değiştiriyorlarsa davranışı doğru tanımlayabilmek için çok küçük zaman adımlarına ihtiyaç vardır.

Şimdi problem denklem 3.104'ün nasıl çözüleceğidir. Bu çözüm, elemanlar üzerinden şekil fonksiyonları tanımlanarak yapılır.



Şekil 3.26. Bir boyutlu bir eleman için doğrusal şekil fonksiyonu

Genel şekil fonksiyonu denklemi;

$$\phi = \sum N_i \Phi_i \qquad (3.106)$$

Şekil 3.27. İki boyutlu bir eleman için doğrusal şekil fonksiyonu

Tüm elemanlar için denklemler yazıldıktan sonra bir araya getirilerek, tek bir global sistem halinde yazılmalıdır. Son olarak Newton-Raphson iterasyon yöntemi ile çözüm yapılır.

Genel olarak akış aşağıdaki gibidir;

- 1. Geometrinin programa alınması ve işlem şartlarının tanımlanması
- 2. Tahmini bir başlangıç hız değerinin belirlenmesi
- 3. Hız alanına ve diğer değişkenlere (gerinme, sıcaklık vb.) göre eleman davranışının hesaplanması
- 4. Hız alanına göre kuvvet ve sınır şartlarının uygulanması
- 5. Global matrisin oluşturulması ve çözülmesi
- 6. Hatanın hesaplanması
- Eğer hata çok büyükse seçilen hız tahminine düzeltme yapılarak 3. Adıma geri dönülmesi
- 8. Geometrinin güncellenmesi
- 9. İlgili çözüm adımı için sıcaklık değerlerinin hesaplanması
- 10. Analiz duruş kriterine ulaştıysa analizin bitmesi aksi takdirde 3. Adımdan itibaren işlemlerin tekrarlanması

## 3.6 Deform Modellemesi

## 3.6.1 Malzeme Modeli

Daha önce de bahsedildiği üzere sonlu elamanlar çözümü sayısal bir çözüm yöntemidir ve sistemi sonlu sayıda elemana ayırarak belirli kabuller çerçevesinde yapılan bu çözüm yönteminde tam doğru sonuca ulaşılamaz fakat doğru sonuca çok yaklaşık sonuçlar elde edilebilir, yani doğru sonuca ne kadar yakınsandığı önem teşkil etmektedir. Doğru sonuca ne kadar yakınsayacağımızı da problemin ve verilerin sonlu elemanlar modeline ne kadar doğru olarak tanımlandığı ile çok yakından ilişkilidir. Problemin fiziğinin belirlenmesi, gerekli malzeme verilerinin eksiksiz ve doğru girilmesi, sınır şartlarının

doğru ve eksiksiz tanımlanması ve sonlu elemanlar ağının yeterli hassasiyette olması gibi etkenler analiz sonucunda elde edeceğimiz değerlerin gerçek sonuca çok yakın olmasını sağlar. Dolayısıyla bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizleri modellemelerinin tüm detayları bu bölümde paylaşılmaya çalışılmıştır.

Deform yazılımında gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminin modellenmesinde yapılan yaklaşım; iş parçasının, kesme kuvvetleri, oluşan sıcaklıklar, takım aşınmaları, talaş oluşumu vb. gibi konularda yeterli bilgiler sağlayacak bir bölümünün modellenmesi analizin bu küçük bölüm üzerinde yapılması şeklindedir.



Şekil 3.28. Tornalama işlemindeki temel bileşenlerin birbiri ile etkileşimi



Şekil 3.29. Deform yazılımında tornalama işlemi için analiz modeli örneği

Yapılan bu çalışmada iş parçası olarak, kimyasal bileşimi aşağıda verilen AISI 1045 imalat çeliği malzemesi kullanılmıştır.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P≤ (%)	S≤ (%)
0,43 – 0,50	0,10-0,30	0,60 – 0,90	0,040	0,050

Çizelge 3.2. AISI 1045 imalat çeliği kimyasal bileşimi

Malzeme verisi anlamında girilmesi gereken en önemli bilgilerden biri iş parçasının akma gerilmesi verisidir. Bu akma gerilmesi verisi sıcaklık, gerinme ve şekil değiştirme hızı gibi kavramların değişimine göre de farklılık göstereceği için, işlemimizin gerçekleşeceği sıcaklık ve şekil değiştirme hızını da kapsayacak şekilde iş parçası akma gerilmesi verisi girilmelidir. Birçok malzeme için tipik şekil değiştirme hızı  $0 - 10^6$ , gerinme 0 - 5, sıcaklık ise 20 - 1200 °C arasında değişmektedir. Buna göre akma gerilmesi olarak programa girilen değerler aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir (Şekil 3.30 ve Şekil 3.31). İş parçası olarak seçilen AISI 1045 imalat çeliğinin elastik modülü sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak programa girilmiştir (Şekil 3.32).

Talaşlı imalat işleminin doğası gereği parçaların birbiriyle etkileşimde olması (sürtünme) ve plastik deformasyon nedeni ile ısı açığa çıkmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde bu ısı oluşumu ve ısı transferi hesaplamalarının doğru yapılabilmesi için malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı, ısı sığası, ısıl genleşme katsayısı gibi değerleri sıcaklığa bağlı olarak girilmiştir (Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35).



Şekil 3.30. AISI 1045 sabit sıcaklıkta, deformasyon hızına göre akma gerilmesi



Şekil 3.31. AISI 1045 sabit deformasyon hızında, sıcaklığa göre akma gerilmesi



Şekil 3.32. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı olarak elastik modülü



Şekil 3.33. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı olarak ısıl genleşme katsayısı



Şekil 3.34. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı olarak ısıl iletkenlik değeri



Şekil 3.35. AISI 1045 için sıcaklığa bağlı olarak ısı sığası

Yukarıda detaylı bir şekilde verilen tüm bu malzeme verilerinin yanı sıra AISI 1045 imalat çeliği için;

Yayınırlık (emissivity) katsayısı: 0,75

Poisson oranı: 0,3 olarak programa girilmiştir.

Talaş kaldırma işlemi plastik deformasyon içeren bir işlem olduğu için pekleşme kurallarının analizde uygulanması gerekir. Pekleşme kurallarının uygulanması için birçok yöntem vardır, bunlardan en basit olan yaklaşımlar kinematik pekleşme ve izotropik pekleşme yöntemleridir. İzotropik pekleşme yöntemi çoğunlukla sonlu elemanlar analizlerinde plastisiteyi tanımlamak için gereken matematik modellerde kullanılır. Bu çalışmada da izotropik pekleşme modeli kullanılmıştır.

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizlerinde akma gerilmesi kriteri olarak da eşdeğer gerilme (Von Mises) akma gerilmesi kriteri kullanılmıştır. Bu kritere göre çok eksenli yükleme durumundaki eşdeğer gerilme (von mises gerilmesi) malzemenin akma noktasını geçtiği anda plastik deformasyon gerçekleşir. Çok eksenli gerilme hali tek bir gerilme ile ifade edilir (bkz denklem 3.100).

Yapılan analizlerde iki farklı takım tipi kullanılmıştır. Kendiliğinden hareketli ve güdümlü dönel takım olarak ISO standartlarında RCMX 3209 M0 tipi 32mm çapında, 7° boşluk açısı olan karbür takım kullanılmıştır. Yapılan diğer kesme analizinde ise ISO standardında, TNMA 160408 KR3025 tipi TiN kaplamalı üçgen formlu karbür takım kullanılmıştır. Modellenen takımların ve takım kaplamasının malzeme özellikleri aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

- RCMX 3209 M0 ve TNMA 160408 KR3025 takımlar için malzeme özellikleri;
  - o Kaplama kalınlığı: 5μm
  - o Elastik Modülü: 468 843 MPa
  - Poisson Orani: 0,25
  - Isıl genleşme katsayısı: 7,92e-06 1/°C
  - o Isıl iletkenlik: 71,0258 N/s/°C
  - Isı sığası: 5,7945 N/mm<sup>2</sup>/°C
  - Yayınırlık (emissivity) katsayısı: 0,48

## 3.6.2 Sonlu Elemanlar Modeli ve Proses Parametreleri

Bu çalışmada üç farklı model ile sonlu elemanlar analizi yapılmış ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırmalı bir şekilde irdelenmiştir. Bu üç analiz;

- Güdümlü dönel takım ile yapılan talaş kaldırma
- Kendiliğinden hareketli dönel takım ile yapılan talaş kaldırma,
- Üçgen formlu torna takımı ile yapılan kesme işlemi

Bu bölümde her bir analiz için hazırlanmış olan iş parçası ve kesici takım sonlu elemanlar modelleri detaylı bir şekilde gösterilecektir. Ayrıca yine analizlere girilen veriler yani proses parametreleri de verilecektir.

Yapılan analizlerde kesme uzunluğu ve dolayısıyla analiz süreleri düşünüldüğünde en uygun sonlu eleman modelinin kurulması için çalışılmıştır. Analiz sürelerinin çok uzun olmaması ve diğer yandan da sonuçların doğruluğundan ödün verilmemesi adına hassasiyet çalışmaları yapılmıştır. Kesici takımların iş parçaları ile temasa girdiği, ısıl ve mekanik etkilerin yoğun olduğu yerlerde daha yoğun bir sonlu elemanlar ağı diğer bölgelerde ise daha kaba bir sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır. İş parçasında da aynı şekilde kesmenin yapılacağı, talaşın oluşacağı bölgede diğer bölgelere göre çok daha yoğun bir sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Aşağıdaki şekillerde analizlerde modellenen kesici takımlar (Şekil 3.36, Şekil 3.37) ve iş parçasının (Şekil 3.38) sonlu elemanlar ağı detaylı gösterilmiştir.



Şekil 3.36. RCMX 3209 M0 takım için sonlu elamanlar modeli ve detayı



Şekil 3.37. TNMA 160408 KR3025 takım için sonlu elemanlar modeli ve detayı



Şekil 3.38. Dönel takımlarla kesme işlemi için hazırlanan iş parçası sonlu elemanlar modeli ve detayı



Şekil 3.39. Konvansiyonel kesme işlemi analizi için hazırlanan iş parçası sonlu elemanlar modeli ve detayı

İş parçası ve takımın birbiri ile etkileşimi model içerisinde tanımlanan kontak algoritması ile kurulmuştur.
- Takım ve iş parçası arasındaki kontak parametreleri
  - Isıl iletkenlik katsayısı:45 (N/s/mm/°C)
  - Sürtünme katsayısı: 0,35

Çizelge 3.3'de yapılan her üç analiz için de işlem parametreleri bir tablo halinde sunulmuştur.

Parametre	Talaş Kaldırma Tipi		
	Kendiliğinden Hareketli Dönel Takım	Güdümlü Dönel Takım	Konvansiyonel Takım
Eğim Açısı (°)	20	0	0
Boşluk Açısı (°)	-5	<u> </u>	-5
Kesme Derinliği (mm)	1	1	1
Kesme Hızı (m/dak)	105	105	105
Kesici takım dönme hızı (dev/dak)	-	2000	-
Kesme uzunluğu (mm)	16	16	16

Çizelge 3.3. Her üç analiz için işlem parametreleri

Yapılan üç analizde de sınır şartı olarak, analizi yapılan iş parçası örneğinin alt yüzeyindeki düğüm noktalarının X, Y ve Z eksenlerindeki hareketi engellenmiş ve ayrıca iş parçasının ve kesici takımın tüm elemanlarına çevreleri ile ısı alış – verişi sınır şartı tanımlanmıştır (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. Sınır şartı olarak model, alt yüzeydeki düğüm noktalarından sabitlenmiştir

### 4. BULGULAR

Üç farklı talaş kaldırma işleminin sonlu elemanlar analizinin ve birbirleri ile karşılaştırmalarının yapıldığı bu yüksek lisans tez çalışmasının bu bölümünde güdümlü dönel takım ile kesme işlemi sonlu elemanlar analizinin sonuçları verilmeye çalışılmıştır.

### 4.1 Güdümlü Dönel Takım ile Yapılan Kesme Analizi Sonuçları

Daha önceki bölümlerde detayları verilen dönel takım geometrisi ve işleme koşulları altında, aşağıdaki şekillerden de (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) görülebileceği üzere 16mm'lik kesme işlemi sonucunda takım üzerindeki elde edilen en yüksek sıcaklığın 200°C seviyelerinde olduğu görülmüştür. Analiz süresince dönel takım kendi ekseni etrafında yaklaşık yarım tur dönmüştür ve bu dönme hareketinin takım sıcaklığına olan etkileri aşağıdaki şekillerden rahatlıkla görülmektedir. Takımın iş parçası ile temas eden ve kesme işlemini yapan kısmı yukarıda belirtilen sıcaklıklara çıkarken dönme hareketi neticesinde iş parçası ile temastan çıkan kısmı sürtünme etkisinin ortadan kalkması ve ortam havası ile teması neticesinde hızlıca soğumaya başlamıştır. Tüm bu davranışın daha rahat görülmesi için kesici kenar üzerinde bir düğüm noktası seçilmiş ve bu düğüm noktasının analiz süresince sıcaklık değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir (Şekil 4.3).

Şekil 4.3'deki grafiğe göre ilk başta iş parçası ile temasta olmayan nokta ortam sıcaklığında bulunurken, takımın kendi ekseni etrafında dönmesi neticesinde iş parçası ile temas etmeye başladığında sıcaklığı 200°C civarlarına çıkmış ve temastan çıktığında tekrar soğuduğu görülmüştür. Dolayısıyla dönme etkisi sayesinde kesme işlemi sırasında ısıl ve mekanik yüklemelerin bir nokta üzerinde sadece anlık şekilde oluştuğu daha sonra bu yüklemelerin o bölge için ortadan kalkarak diğer bölgeye etkidiği görülmüş olmaktadır.



Şekil 4.1. Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar



Şekil 4.2. Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar



Şekil 4.3. Kesici kenar üzerindeki bir düğüm noktasının analiz süresince sıcaklık değişimi

Takım aşınması durumuna bakıldığında ise, aşağıdaki şekillerden (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5) görülebileceği üzere yaklaşık olarak 1,5µm'lik bir aşınma olduğu görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, aşınmanın sadece bir bölgede kalmadığı, takımın tüm çevresine yayıldığıdır. Takım kendi ekseni etrafında döndüğü için kesme süresince sadece bir bölge ile kesme yapılmamakta, takımın tüm çevresi kesme ağzı olarak iş görmektedir. Dolayısıyla da takım aşınması tüm çevreye yayılmaktadır.



Şekil 4.4. Takım aşınması



Şekil 4.5. Takım aşınması



Şekil 4.6. Talaş oluşumu ve talaş profili



Şekil 4.7. Talaş oluşumu ve talaş profili

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 güdümlü dönel takımlar ile yapılan analizde talaşın oluşum şekli ve talaş profilini göstermektedir. Şekillerden görülebileceği gibi talaş spiral şekilde oluşmaktadır. Talaş akış yönü ise görece dar bir talaş akış açısıyla ( $\eta$ ) sağ tarafa doğru yani negatif yönlü olmaktadır.

#### 4.2 Kendiliğinden Hareketli Dönel Takım ile Yapılan Kesme Analizi Sonuçları

Bu çalışmada incelenen ve analizi yapılan bir diğer kesme işlemi, kendiliğinden hareketli yani kesme ve sürtünme kuvvetleri etkisi ile kendi ekseni etrafında dönebilen kesici takım ile yapılan kesme işlemidir. Bu bölümde bu takım ile yapılan analizin sonuçları verilmeye çalışılmıştır

Önceki bölümde de olduğu gibi analiz sonrasında incelenen parametrelerden biri yine takım sıcaklık değeridir. 16mm'lik kesme işlemin analizi sonucunda elde edilen takım sıcaklığı yaklaşık olarak 220°C civarlarındadır (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Takım kendi ekseni etrafında yaklaşık 20°'lik bir dönme hareketi yapmıştır. Bu dönme hareketinin takım sıcaklığı üzerindeki etkisi takım sıcaklık değerlerinden görülebilmektedir. Fakat bu etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için kesici kenar üzerinde bir düğüm noktasının analiz süresince sıcaklık değişimi grafiği çizdirilmiştir (Şekil 4.10).

Bu grafiğe göre kesici kenar üzerindeki bir nokta ortam sıcaklığında iken iş parçası ve takımın birbiri ile temasının yani kesme işleminin başlaması ile birlikte takım dönmeye başlamış ve bu nokta kesme işlemine dâhil olduğunda sıcaklığı hızla yükselmiştir. Dönme hareketinin devam etmesi ile de kesme bölgesinden çıkması neticesinde o noktanın soğumaya başlayarak sıcaklığının düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar



Şekil 4.9. Analiz sonucu takım üzerinde oluşan sıcaklıklar



Şekil 4.10. Kesici kenar üzerindeki bir düğüm noktasının analiz süresince sıcaklık değişimi

Analiz sonrasında incelenen diğer bir parametre de takım aşınmasıdır. Aşınma durumuna bakıldığında 16mm'lik kesme sonrasında elde edilen takım aşınmasının 2µm olduğu görülmüştür (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). Aşınma bölgesi aşağıdaki şekillerden detaylı incelendiğinde aşınmanın kesici kenar dönme miktarınca yayıldığı görülmektedir. İş parçası ve talaş ile en uzun süre temasta kalan bölgelerin 2µm'lik maksimum aşınmayı gösterdiği (kırmızı bölge) daha temasa yeni başlamış veya ilk temas anından sonra dönme etkisi ile hızlıca temastan çıkan bölgelerde beklenildiği üzere aşınmanın daha az olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.12. Takım aşınması



Şekil 4.13. Talaş oluşumu ve talaş profili



Şekil 4.14. Talaş oluşumu ve talaş profili

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 kendiliğinden hareketli dönel takımlar ile yapılan analizde talaşın oluşum şekli ve talaş profilini göstermektedir. Şekillerden görülebileceği gibi talaş spiral adımları daha seyrek olacak şekilde daha uzun ve düz formlu oluşmaktadır. Talaş akış yönü ise görece daha geniş bir talaş akış açısıyla ( $\eta$ ) sağ tarafa doğru yani negatif yönlü olmaktadır.

### 4.3 Üçgen Torna Takımı ile Yapılan Kesme Analizi Sonuçları

Yapılan bu çalışmada temel olarak, detayları önceki bölümlerde açıkça verilen üç farklı kesme işlemi değerlendirilmiştir. Bu başlık altında geometrisi ve detayları daha önce verilen üçgen torna takımı ile yapılan kesme işleminin sonuçları verilmeye çalışılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen verilere göre, 16mm'lik kesme işlemi sonunda kesici takım ucunda oluşan sıcaklık 280°C civarındadır (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16). Aşağıdaki grafikte (Şekil 4.17) kesme işleminin başladığı andan 16mm'lik kesmenin sonlandığı ana kadar takım ucunun sıcaklık değişimi görülmektedir. Bu grafiğe göre takım sıcaklığı ilk başta 20°C olan ortam sıcaklığından başlayarak işleme süresince hızla yükselmiş 16mm'lik kesme işlemi sonrasında 280°C değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca grafikten, takım sıcaklığının kararlı hale gelmediği, eğer kesme işlemine devam edilseydi takım sıcaklığının daha da artacağı görülebilmektedir.



Şekil 4.15. Analiz sonucunda elde edilen takım sıcaklık değerleri



Sıcaklık (°C)

Şekil 4.16. Analiz sonucunda elde edilen takım sıcaklık değerleri



Şekil 4.17. Üçgen torna takımı uç kısmında kesme analizi süresince sıcaklık değişimi

Diğer bir yandan, kesme sırasında oluşan ısı, sürtünme ve kesme kuvvetleri etkileriyle oluşan takım aşınmasının takım üzerinde nerelerde oluştuğu ve aşınma miktarı da aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19) görülebilmektedir. Buna göre takımın iş parçası ile temasta olduğu uç bölgesinde 16mm'lik kesme işlemi sonunda yaklaşık 0.007mm'lik bir aşınma olduğu sonucu elde edilmiştir. Takım aşınmasının oluştuğu bölge ile sıcaklığın en yüksek çıktığı bölge beklenildiği üzere paralellik göstermiştir.



## Takım aşınınası - Aşınına derinliği (mm)

Şekil 4.18. Analiz sonunda elde edilen takım aşınması bölgesi ve aşınma değerleri



Takım aşınması - Aşınma derinliği (mm)

Şekil 4.19. Analiz sonunda elde edilen takım aşınması bölgesi ve aşınma değerleri detayı

Talaş oluşumu, talaş akış yönü ve talaş profili de Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'den görülebilmektedir. Buna göre talaş sık adımlı bir spiral şeklinde oluşmuştur ve talaş akış yönü ise sağ tarafa doğru yani negatif yönlü olmaktadır.



Şekil 4.21. Talaş oluşumu ve talaş profili

### 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada üç farklı tip torna takımı ile talaş kaldırma işlemi incelenmiştir. Çalışmalar güdümlü dönel takım, kendiliğinden hareketli dönel takım ve üçgen formlu klasik torna takımı ile talaş kaldırma işlemi modelleri üzerinden yürütülmüştür. Her üç proses için de sonlu elamanlar modeli kurulmuş ve aynı sınır şartları ve proses parametreleri altında Deform – 3D yazılımı ile sonlu elemanlar analizler gerçekleştirilmiştir. Deform – 3D yazılımının seçilme neden bu tarz talaş kaldırma ve metal şekillendirme işlemlerinde özelleşmiş olması ve modelleme ve sonuç görüntüleme işlemleri için kullanışlı araçlar sunmasıdır. Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonrasında her üç takımda oluşan takım sıcaklıkları, takım aşınmaları incelenmiş talaş oluşum şekil ve talaş profilleri görüntülenmiştir.

Güdümlü dönel takım ile yapılan analiz sonucunda takım üzerinde elde edilen sıcaklık 200°C civarındadır. Takımın kendi ekseni etrafında yaptığı dönme hareketi ile iş parçası ile temastan çıkan bölgenin hızlıca soğuduğu görülmüştür. Ayarlanan takım devri düşünüldüğünde 16mm'lik kesme işlemi analiz sonunda dönel takım kendi ekseni etrafında yarım tur dönüş yapmıştır. Kendiliğinden hareketli dönel takımda ise aynı proses parametreleri altında elde edilen takım sıcaklığı 220°C seviyelerindedir. Bu takım dışarıdan herhangi bir güç ile değil kesme koşulları altında kendiliğinden bir dönüş sağladığı için dönüş hızı diğer takıma göre daha düşüktür. Dolayısıyla beklenildiği üzere takım sıcaklığı bir miktar daha yüksek olarak elde edilmiştir. Üçgen şekilli klasik torna takımında ise herhangi bir dönme hareketi söz konusu değildir, takım sabittir, hep aynı bölgenin kesme işlemini yapması neticesinde, 16mm'lik kesme sonunda takım ucunda oluşan sıcaklık 280°C'dir.

Aşınma durumu incelendiğinde ise, güdümlü dönel takıma bakıldığında 1,5µm'lik bir aşınma olduğu ve bu aşınma değerinin takım çercesine yayıldığı görülmüştür. Kendiliğinden hareketli takımda ise dönme hareketi daha yavaş olduğundan 2µm'lik bir

aşınma söz konusudur. Fakat üçgen klasik torna takımında ise beklenildiği üzere aşınma değerleri dönel takımlara nazaran 3-4 kat daha fazla olmak kaydıyla 7,5µm olarak elde edilmiştir.

Talaş profillerine bakıldığında ise literatürde bulunan deneysel çalışmalarla örtüşecek biçimde, güdümlü dönel takımda spiral şeklinde bir talaş oluşumu söz konusu iken, proses gereği eğimli olarak yerleştirilmiş kendiliğinden hareketli takımda ise daha uzun ve düz bir talaş oluşumu görülmektedir. Klasik takımla yapılan kesme işleminde ise spiral adımı dönel takımdakine göre daha sık olan spiral şeklinde talaş oluşumu görülmüştür.

Netice olarak takım aşınması anlamında bu proses şartları altındaki analiz sonuçlarına göre güdümlü dönel takım en olumlu sonuçları vermiştir.

### KAYNAKLAR

Armarego, E.J.A., Karri, V., Smith, A.J.R. 1993. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting process – I theoretical investigation. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 34: 785–801.

**Bil, H. 2003.** Dik kesme işlemlerinin sonlu eleman analizi ile simulasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., Altan, T. 2000. Turning simulations using a three-dimensional FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, 98: 99-103.

**Dessoly, V. 2004.** Modeling and Verification of Cutting Tool Temperatures in Rotary Tool Turning of Hardened Steel. *Master of Science Thesis*, Georgia Institute of Technology, Georgia, USA.

Harun, S., Shibasaka, T., Moriwaki T. 2008. Cutting mechanics of turning with actively driven rotary tool. *Journal of advanced mechanical design, systems, and manufacturing*, 2(4): 579–586.

**Işık, Y. 2004.** Talaşlı İmalatta Kesici Takımların Kırılma Öncesi Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi* Dergisi, 9(1): 103–110.

Joshi, S.S., Ramakrishnan, Nagarwalla, H.E., Ramakrishnan P., 1999. Wear of rotary carbide tools in machining of Al/SiCp composites. *Wear*, 230: 124–132.

Kalhori, V. 2001. Modelling and simulation of mechanical cutting. Ph.D. Thesis, Computer Aided Design Department of Mechanical Engineering, Lulea Universit of Technology, Sweden.

Kıyak, M., Altan, E. 2012. Effects of process parameters on surface quality in turning of mild steel with rotary cutting tool. *Advanced Material Research* 445: 137-142.

**Kishawy, H.A., Wilcox, J. 2003.** Tool wear and chip formation during hard turning with selfpropelled rotary tools. *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 433–439.

**Kishawy, H.A., Becze, C.E., McIntosh, D.G. 2004.** Tool performance and attainable surface quality during the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 152: 266–271.

Lei, S., Liu, W. 2002. High – speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool. *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 653–661.

Li, L., Kishawy, H.A. 2006. A model for cutting forces generated during machining with self-propelled rotary tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 1388–1394.

Sasahara, H., Kato, A., Nakajima, H., Yamamoto, H., Muraki, T., Tsutsumia, M. 2008. High-speed rotary cutting of difficult-to-cut materials on multitasking lathe. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 841–850.

# ÖZGEÇMİŞ

: Tamer VARLIK	
: Bursa, 1984	
: İngilizce	
: Bursa Gazi Anadolu Lisesi, 2002	
: Balıkesir Üniv. Müh. Fak. Mak.Müh., 2007	
: Bosch San. Tic. A.Ş.	
(2011- Halen devam ediyor)	
Geliştirme Mühendisi – Platform projeleri	
Figes A.Ş.	
(2008 - 2011)	
Kıdemli proje ve uygulama mühendisi	