



**CFRP KOMPOZİT MALZEME İLE  
HAFİFLETİLMİŞ FREZELEME TAKIM  
TUTUCUSUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ  
İLE ANALİZİ**

**2024  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Mert İSTEK**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Nafiz YAŞAR**

**CFRP KOMPOZİT MALZEME İLE HAFİFLETİLMİŞ FREZELEME  
TAKİM TUTUCUSUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

**Mert İSTEK**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Nafiz YAŞAR**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2024**

Mert İSTEK tarafından hazırlanan “CFRP KOMPOZİT MALZEME İLE HAFİFLETİLMİŞ FREZELEME TAKIM TUTUCUSUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Nafiz YAŞAR .....  
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/06/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ) .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rüstem BİNALİ (SÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Nafiz YAŞAR (DPÜ) .....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mert İSTEK

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

**CFRP KOMPOZİT MALZEME İLE HAFİFLETİLMİŞ FREZELEME  
TAKIM TUTUCUSUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**  
**Mert İSTEK**

**Karabük Üniversitesi**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**  
**Makine Mühendisliği**

**Tez Danışmanı:**  
**Doç. Dr. Nafiz YAŞAR**  
**Haziran 2024, 81 sayfa**

Bu çalışmada, AISI 4340 çelik malzemeli, on dört kesici ağızlı yüzey frezeleme takım tutucusu üzerine CFRP kompozit malzemesi kaplanarak titreşim ve gerilme değerleri özelinde performans iyileştirmesi yapılması amaçlanmaktadır. İlk aşamada optimizasyonu sağlanmamış takımın tutucunun sonlu elemanlar yöntemi ile frekans cevap analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre takım tutucu optimize edilerek kütlelerinden tasarruf edilmiş ve CFRP kompozit malzeme ile kaplanmıştır. İkinci aşamada, optimize edilen takım; hız ve kuvvet parametreleri sabit tutularak takım tutucunun frekans cevap analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde dört farklı hız (2000,4000,6000 ve 8000 RPM) ve kuvvet (80,120,160 ve 200 N) parametreleri kullanılmış olup bu parametreler kombine edilerek her bir takım için 16 toplamda 32 adet deney gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yapılan mühendislik optimizasyonu ile kütlede %15,879 oranında tasarruf edildiğini, uygulanan belirli hız ve kuvvet değerlerinde titreşim değerlerinin en çok %0.833 ve gerilme değerlerinin en çok %11.916 oranında iyileştirildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma ile takım üzerine

kompozit kaplama yöntemi tanıtılmış; bu yöntemin frezeleme operasyonlarında uygulanabilirliği, belirli sınır koşulları altında takım mekaniğinde değişimlerin tespiti ve bu değişimlerin kesme operasyonlarına nasıl bir etki yaratacağı literatüre kazandırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** CFRP, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Frekans Cevap Analizi, Frezeleme, Takım Tutucu.

**Bilim Kodu** : 91433

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A LIGHTWEIGHTED MILLING TOOL HOLDER USING CFRP COMPOSITE MATERIAL**

**Mert İSTEK**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Nafiz YAŞAR**

**June 2024, 81 pages**

In this study aims to enhance the performance of a fourteen-flute face milling tool holder made of AISI 4340 steel by coating it with CFRP composite material, focusing on vibration and stress values. In the first stage, a frequency response analysis was performed using the finite element method on the non-optimized tool holder. Based on the results, the tool holder was optimized to save mass and then coated with CFRP composite material. In the second stage, frequency response analyses of the optimized tool holder were carried out with fixed speed and force parameters. Four different speed (2000, 4000, 6000, and 8000 RPM) and force (80, 120, 160, and 200 N) parameters were used in the experiments, and these parameters were combined to conduct a total of 32 experiments, 16 for each tool. The results showed that with engineering optimization, a mass savings of 15.879% was achieved, and vibration values improved by up to 0.833%, while stress values improved by up to 11.916% under certain speed and force conditions. This study introduces the composite coating method for tools; it contributes to the literature by identifying the feasibility of

applying this method in milling operations, detecting changes in tool mechanics under specific boundary conditions, and understanding how these changes impact cutting operations.

**Key Word** : CFRP, Finite Element Method, Frequency Response Analysis, Milling, Tool Holder.

**Science Code** : 91433



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, her daim yanımda olan danıŐmanım sayın Doç. Dr. Nafız YAŞAR'a, bu günlere gelmemi sağlayan ve beni her konuda destekleyen sevgili Annem, Babam ve KardeŐime, kol kola yürüdüğüm sevgili Dostlarıma, analizlerde kullanılan takımın katı model desteği için YG-1 ailesine ve analizlerin yürütülmesinde program ve mühendislik desteği sağlayan SIMOFIS ailesine destekleri için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
TALAŞLI İMALATTA KULLANILAN KESİCİ TAKIMLAR .....	3
2.1. KESİCİ TAKIMLARDA KULLANILAN MALZEMELER.....	4
2.1.1. Takım Çelikleri.....	5
2.1.1.1. Karbon Takım Çelikleri.....	6
2.1.1.2. Az Alaşımli Takım Çelikleri.....	6
2.1.1.3. Yüksek Hız Çelikleri.....	6
2.1.2. Stellite.....	7
2.1.3. Sinterlenmiş Karbürler.....	7
2.1.4. Seramikler.....	8
2.1.5. Elmaslar .....	8
2.2. KESİCİ TAKIMLARDA KULLANILAN KAPLAMALAR .....	9
2.2.1. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi .....	9
2.2.2. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi .....	10
2.2.3. Titanyum Nitrür (TiN) Kaplama .....	10
2.2.4. Titanyum Alüminyum Nitrit (TiAlN) Kaplama .....	11
2.2.5. Titanyum Karbür (TiC) Kaplama .....	11

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.2.6. Titanyum Karbonitrür (TiCN) Kaplama.....	11
2.2.7. Kübik Bor Nitür (CBN) Kaplama.....	12
2.2.8. Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplama.....	12
<b>BÖLÜM 3</b> .....	<b>14</b>
<b>KESME / FREZELEME MEKANİĞİ</b> .....	<b>14</b>
3.1. TALAŞ KALDIRMA ÜZERİNE TEORİLER .....	15
3.1.1. Ernst, Merchant ve Pispaaen Yaklaşımı .....	15
3.1.2. Lee ve Shaffer Yaklaşımı .....	17
3.1.3. Shaw, Cook ve Finne Yaklaşımı .....	18
3.2. DİK (ORTOGONAL) VE EĞİK (OBLİK) KESME .....	18
3.2.1. Dik Kesme Operasyonlarında Oluşan Kuvvetler .....	19
<b>BÖLÜM 4</b> .....	<b>22</b>
<b>TİTREŞİM</b> .....	<b>22</b>
4.1. TİTREŞİM KURAMI .....	22
4.2. TEMEL TİTREŞİM MODELLERİ .....	23
4.2.1. Serbest Titreşim .....	23
4.2.1.1. Sönümsüz Serbest Titreşim.....	23
4.2.1.2. Sönümlü Serbest Titreşim.....	24
4.2.2. Zorlanmış Titreşim .....	29
4.2.2.1. Sönümsüz Zorlanmış Titreşim.....	29
4.2.2.2. Sönümlü Zorlanmış Titreşim .....	31
4.3. TIRLAMA TİTREŞİMLERİ .....	34
4.3.1. Mod Eşlenmesinden Dolayı Oluşan Tırlama Titreşimleri.....	34
4.3.2. Kendini Yenileyen Tırlama Titreşimleri .....	35
4.3.3. Termomekanik Tırlama Titreşimleri .....	35
<b>BÖLÜM 5</b> .....	<b>37</b>
<b>KOMPOZİT MALZEMELER VE KAPLAMA TEKNOLOJİSİ</b> .....	<b>37</b>
5.1. KOMPOZİTLERİN TASNİF EDİLMESİ.....	38
5.1.1. Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Tasnif Edilmesi.....	38

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.1.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler .....	38
5.1.1.2. Metal Matrisli Kompozitler .....	38
5.1.1.3. Seramik Matrisli Kompozitler .....	39
5.1.2. Kompozitlerin Takviye Elemanına Göre Tasnif Edilmesi .....	39
5.1.2.1. Tabaka Takviyeli Kompozitler .....	39
5.1.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler .....	39
5.1.2. Fiber Takviyeli Kompozitler .....	40
5.2. KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER (CFRP) KOMPOZİTLER .....	41
5.2.1. CFRP Kompozit Malzemesinin İmalat Yöntemleri .....	42
5.2.1.1. Elle Serme Yöntemi .....	42
5.2.1.2. Hazır Kalıplama Yöntemi .....	43
5.2.1.3. Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi .....	44
5.2.1.4. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi .....	44
5.2.1.5. Vakumlu Kalıplama Yöntemi .....	45
5.2.1.6. Püskürtme Yöntemi .....	46
5.2.1.7. Filaman Sarım Yöntemi .....	46
5.2.1.8. Otoklav Yöntemi .....	47
BÖLÜM 6 .....	48
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ .....	48
6.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNDE KULLANILAN ELEMANLAR .....	49
6.2. RİJİTLİK MATRİSİ (STIFFNESS MATRIX) .....	51
BÖLÜM 7 .....	52
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	52
7.1. TİTREŞİM ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	52
7.2. KOMPOZİT KAPLAMALAR ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	54
7.3. GERİLME ANALİZLERİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	58
BÖLÜM 8 .....	60
MATERYAL VE METOT .....	60
8.1. DENEY MALZEMELERİ .....	60

	<b><u>Sayfa</u></b>
8.2. TAKIM TUTUCU ANALİZ PARAMETRELERİ VE OPTİMİZASYONU	61
8.2.1. Yüzey Frezeleme Takım Tutucusunun (YFT) Ağ Yapısı .....	61
8.2.2. YFT Yük ve Sınır Koşulları .....	62
8.2.3. Yüzey Frezeleme Takımı Tutucusunun Optimizasyonu .....	64
8.2.4. OYFT Ağ Yapısı .....	65
8.2.5. OYFT Yük ve Sınır Koşulları .....	67
BÖLÜM 9 .....	68
SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	68
BÖLÜM 10 .....	72
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	72
KAYNAKLAR .....	74
ÖZGEÇMİŞ .....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2. 1.	Dört ağızlı yüzey frezeleme takımının geometrisi [3].	3
Şekil 2. 2.	Çeşitli geometrilere sahip kesici takım uçları [3].	4
Şekil 3. 1.	Farklı türdeki frezeleme operasyonları [19]	14
Şekil 3. 2.	Merchant'ın ideal talaş oluşum diyagramı [23].	16
Şekil 3. 3.	Pispaen talaş oluşum diyagramı [23].	17
Şekil 3. 4.	Lee ve Shaffer yaklaşımı, a) Kayma açısı şematığı, b) Gerilim bölgesi Mohr dairesi diyagramı [24].	17
Şekil 3. 5.	Dik ve eğik kesme modelleri, a) dik kesme, b) eğik kesme [20].	18
Şekil 3. 6.	Dik kesme operasyonlarında oluşan kuvvetler [20].	20
Şekil 3. 7.	Kesme kuvvetleri için hesaplama üçgenleri [20].	20
Şekil 4. 1.	Titreşim sistemi [28].	22
Şekil 4. 2.	Sönümsüz titreşim sistemi [28].	23
Şekil 4. 3.	Sönümsüz serbest titreşim hareketi [28].	24
Şekil 4. 4.	Sönümlü serbest titreşim sistemi [28].	24
Şekil 4. 5.	Sönümlü serbest titreşim hareketi (zayıf sönümleme) [28].	27
Şekil 4. 6.	Sönümlü serbest titreşim hareketi (kritik sönümleme) [28].	28
Şekil 4. 7.	Sönümlü serbest titreşim hareketi (kuvvetli sönümleme) [28].	29
Şekil 4. 8.	Sönümsüz zorlanmış titreşim sistemi [28].	29
Şekil 4. 9.	Sönümsüz zorlanmış titreşim sisteminde iletkenlik eğrisi [28].	31
Şekil 4. 10.	Sönümlü zorlanmış titreşim sistemi [28].	32
Şekil 4. 11.	Sönümlü zorlanmış titreşim sisteminde iletkenlik eğrisi [28].	34
Şekil 4. 12.	Kendini yenileyen tırlama titreşim modeli [31].	35
Şekil 5. 1.	Kompozit oluşum şeması [32]	37
Şekil 5. 2.	Fiberlerin farklı yönlerden serim formasyonları, a) tek yönlü serim, b) iki yönlü serim, c) üç yönlü serim [40].	40
Şekil 5. 3.	PAN ve zift hammaddesine sahip fiberlerin üretim süreçleri [43].	42
Şekil 5. 4.	Elle serme yöntemi [44].	43
Şekil 5. 5.	Hazır kalıplama yöntemi [44].	43
Şekil 5. 6.	Profil çekme yöntemi [42].	44
Şekil 5. 7.	Reçine transfer kalıplama yöntemi [42].	45

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 5. 8. Vakumlu kalıplama yöntemi [37].	45
Şekil 5. 9. Püskürtme yöntemi [35].	46
Şekil 5. 10. Filaman sarım yöntemi [45].	47
Şekil 5. 11. Otoklav yöntemi [34].	47
Şekil 6. 1. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan muhtelif elemanlar [20].	49
Şekil 6. 2. 3B standart eleman geometrisi, a) dörtyüzlü, b) kama , c) altıyüzlü [20].	50
Şekil 6. 3. 3B elemanlar ile oluşturulan ağ yapıları [20].	50
Şekil 6. 4. 3B elemanlarda ek düğümlerin yerleşimi	50
Şekil 8. 1. Deneylerde kullanılan yüzey frezeleme takım tutucusunun katı modeli.	60
Şekil 8. 2. YFT ağ sistemi.	62
Şekil 8. 3. Takım tutucusunun serbestlik derecesi.	62
Şekil 8. 4. Takım tutucusunun yük sistemi.	63
Şekil 8. 5. Takım üzerinde yapılan mühendislik optimizasyonu.	64
Şekil 8. 6. Takım tutucuya uygulanan CFRP kaplama, a) üst kısımdaki kaplama, b) alt kısımdaki kaplama.	64
Şekil 8. 7. Optimizasyon sonrası OYFT ağ sistemi.	65
Şekil 8. 8. OYFT 2D ağ sistemi, a) üst yüzey, b) alt yüzey.	66
Şekil 9. 1. Analiz sonuçlarına göre yer değiştirme yüzde değişim grafiği.	69
Şekil 9. 2. Analiz sonuçlarına göre von Mises gerilme yüzde değişim grafiği.	70

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2. 1. Takım malzemelerinin sınıflandırılması [9]. .....	5
Çizelge 5. 1. Muhtelif CFRP malzemeleri [42]. .....	41
Çizelge 8. 1. Simcenter 3D program kütüphanesine ait AISI 4340 malzemesinin mekanik özellikleri. ....	61
Çizelge 8. 2. Mahmoud (2021) çalışmasına ait CFRP malzemesinin mekanik özellikleri [77].....	61
Çizelge 8. 3. YFT ağ yapısı ve özellikleri.....	62
Çizelge 8. 4. Hız ve yük parametreleri.....	63
Çizelge 8. 5. Optimizasyon sonrası OYFT ağ yapısı ve özellikleri.....	65
Çizelge 8. 6. OYFT üst yüzeyi için 2D ağ yapısı ve özellikleri. ....	66
Çizelge 8. 7. OYFT alt yüzeyi için 2D ağ yapısı ve özellikleri. ....	66
Çizelge 8. 8. 3D kompozit ekstrüzyonunun üst kısım için ağ yapısı ve özellikleri... ..	66
Çizelge 8. 9. 3D kompozit ekstrüzyonunun alt kısım için ağ yapısı ve özellikleri....	67
Çizelge 9. 1. Analiz sonuçlarına göre yer değiştirme değerleri. ....	68
Çizelge 9. 2. Analiz sonuçlarına göre von Mises gerilme değerleri. ....	69
Çizelge 9. 3. Kütle optimizasyonu için sayısal değerler. ....	71



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Cr	: krom
V	: vanadyum
W	: tungsten
Mo	: molibden
Mn	: manganez
Co	: kobalt
WC	: tungsten karbür
Mo	: molibden
$a$	: kesme derinliği
$a'$	: çıkan talaş kalınlığı
$A_0$	: talaşın kesit alanı
$\phi$	: kayma (kesme) düzlemi açısı
$\gamma$	: talaş açısı
$\beta$	: sürtünme açısı
$F_n$	: sürtünme kuvvetine dik olan kuvvet
$F_S$	: kayma düzlemi boyunca etki eden kuvvet
$F_C$	: esas kesme kuvveti
$F_p$	: radyal kuvvet
$F$	: sürtünme kuvveti
$\sigma_k$	: malzemenin çekme dayanımı
$D$	: sönümlenme oranı
$c$	: sistemin sönümlenme katsayısı
$c_o$	: kritik sönümlenme katsayısı
$\omega$	: açısal frekans
$j$	: kesici takım ağzı

## KISALTMALAR

- CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
- SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
- $S_{EQV}$  : von Mises Gerilmesi
- $U_M$  : Yer Değiştirme
- HRC : Rockwell Sertliği
- PCD : Polycrystalline Diamond (Çok Kristalli Elmas)
- CBN : Cubic Boron Nitride (Kübik Bor Nitrür)
- HV : Vickers Sertliği
- $TiCl_4$  : Titanyum Tetraklorür
- DLC : Diamond Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)
- PVD : Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
- CVD : Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
- TiN : Titanyum Nitrür
- $Al_2O_3$  : Alüminyum Oksit
- $Si_3N_4$  : Silisyum Nitrür
- TiAlN : Titanyum Alüminyum Nitrür
- TiCN : Titanyum Karbonitrür
- TiC : Titanyum Karbür
- TaC : Tantal Karbür
- Ç.K : Çözüm Kümesi
- CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber ile Güçlendirilmiş Polimer)
- PAN : Poliakrilonitril

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Talaşlı imalat endüstrisi son beş ila altı yılda önemli bir büyüme sergilemektedir. Bu büyüme ile 2025 yılına kadar 100 milyar dolarlık bir endüstri olacağı öngörülmektedir. Bu büyümenin başlıca nedenleri, yüksek kaliteli ve yüksek karmaşıklığındaki ürünleri daha kısa üretim sürelerinde ve daha yüksek hızlarda işlenmesini sağlayan Computer Numerical Control (CNC) makinelerine talebin artmasıdır [1]. CNC makinelerinin kullanımı orta ve büyük ölçekli endüstrilerin envanterinde bulunabilir. Bu endüstriler, yüksek doğruluk ve hassasiyette birkaç kez yeniden üretilebilen bileşenler üretebilirler [2]. Frezeleme işleminde, dönme hareketi yapan kesici takım ve sabit iş parçası mevcuttur. Bu işleme prosesinde birden çok kesme kenarına sahip kesici takım, gerekli geometrilerin oluşturulması için iş parçası boyunca çalışır. Frezelemede besleme yönü kesici takımın dönme eksenine diktir. Ek olarak frezeleme işlemi, yüzey (dikey) frezeleme ve çevresel (yatay) frezeleme olarak ikiye ayrılır [3].

Frezeleme işleminde, kesici takımdan, iş parçasından ve makine yapısından dolayı titreşimler meydana gelmektedir. Kesici takım ve iş parçasından meydana gelen titreşimler kesici takım aşınmasına ve kırılmasına, iş parçasında istenilen toleranslara ulaşamamasına, kötü yüzey kalitesine, uzun vadede işleme tezgahının zarar görmesine, enerji verimliliğinin düşmesine ve yüksek seste gürültülere sebep olmaktadır. Kesici takım ve iş parçası arasında oluşan titreşim “tırlama titreşimi” olarak ifade edilmektedir. Talaşlı imalat sektöründeki teknolojik gelişmeler gün geçtikçe artmasına rağmen geçmişten günümüze frezeleme işlemlerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde işleme sırasında oluşan tırlama titreşimlerinin kompleks yapıda olması, kesme dinamiklerinin yeterli düzeyde anlaşılabilmesi ve frezeleme dinamiklerindeki dinamik kesme kuvvetlerinin lineer düzeyde olmayan farklı parametreler içermesi gibi durumlar tırlama titreşim ve analiz modellerinin

yapılmasını zorlaştırmıştır. Bu parametreler kesme derinliği, kesme hızı, süreç sönümlenmesi ve ilerleme oranının değişimine bağlı etkenlerdir [4–6] .

Bu çalışmada;

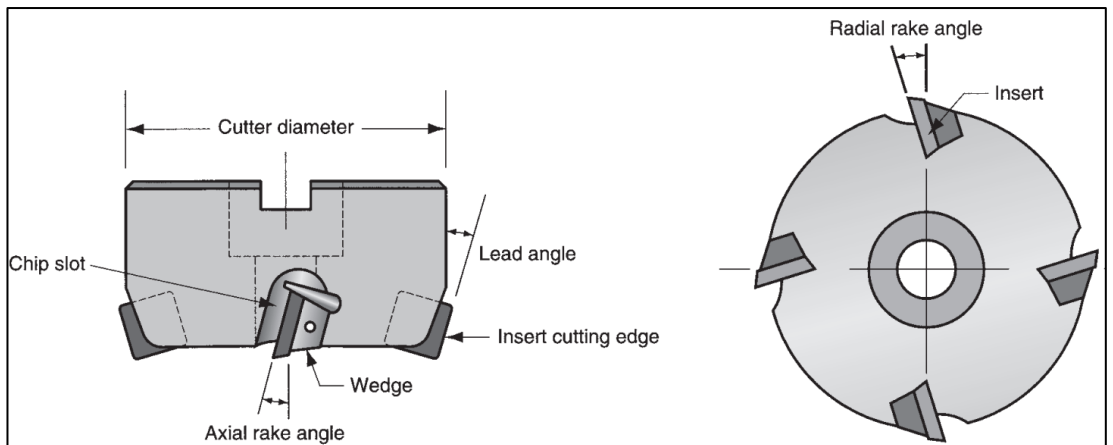
- AISI 4340 çelik malzemeli, 14 ağızlı yüzey frezeleme takım tutucusunun (YFT) farklı yüksek devir ve farklı yüksek kesme kuvvetleri altındaki değerlerinin belirlenmesi,
- Deneysel tasarımı yöntemi olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılması,
- Frezeleme takımının bilgisayar destekli mühendislik yazılımı olan SIMCENTER 3D programı ile gereken ağ yapılarının ve diğer sınır koşulları parametrelerinin girdisinin yapılması,
- Girdisi yapılan parametrelerin “SOL108 Direct Frequency Response (Frekans Cevap)” program modülüne uygulanarak takım tutucu üzerinde oluşan von Mises gerilme ( $S_{EQV}$ ) ve yer değiştirme ( $U_M$ ) değerlerinin ölçülmesi,
- $S_{EQV}$  ve  $U_M$  değerlerine göre çıkan sonuçların değerlendirilerek mühendislik optimizasyonu ile yine aynı takım tutucuya kompozit malzeme olan Carbon-Fiber Reinforced Polymer (CFRP) kaplanarak optimize edilmesi,
- Optimize edilmiş takım tutucusunun, optimize edilmemiş takım tutucu ile aynı deneysel aşamalarından geçirilerek çıktılarının alınması,
- Deneysel sonuçlarında ölçülen  $S_{EQV}$  ve  $U_M$  değerlerinin karşılaştırılması ve dolayısıyla yüzey frezeleme takım tutucusunun kesme performansının artırılması amaçlanmıştır.

## BÖLÜM 2

### TALAŞLI İMALATTA KULLANILAN KESİCİ TAKIMLAR

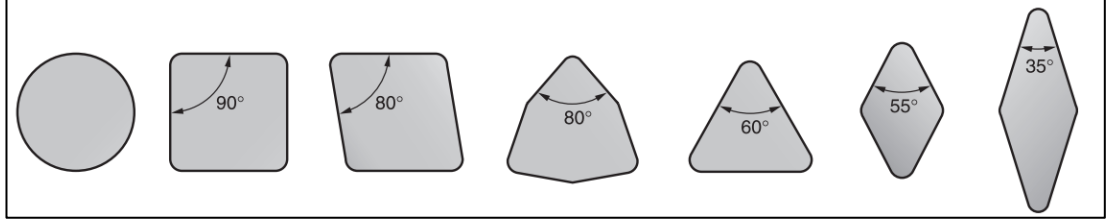
Kesme veriminin artırılmasında ve farklı türde kesme operasyonlarında kesici takım ve takım tutucu seçimi elzemdir. Bu konu incelendiğinde farklı geometrilere sahip takımlar ve takım tutucular mevcuttur. Örnek olarak: küresel frezeleme takımları, diş freze takımları, parmak frezeleme takımları vb. Takım tutucu olarak shrink-fit, pens tutucular, veldonlar vb. Bu tez çalışmasında ele alınan takım yüzey frezeleme takım tutucusudur.

Yüzey frezeleme işlemi, asıl olarak çeşitli ağız sayısına sahip freze takımında yer alan kesici uçlar (insert) tarafından yapılan birleşik kesme işlemidir. Yüzey frezelemede kesici uç, iş parçasına karşı radyal ilerleme yönüne göre döner. Bu dönme operasyonunda kesici uç, her dönüş esnasında iş parçasından talaş kaldırır ve istenilen geometri oluşturulur [3]. Dört ağızlı yüzey frezeleme takımının geometrisi Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1. Dört ağızlı yüzey frezeleme takımının geometrisi [3].

Kesici takım uçları, az maliyetli olmaları ve delik delme, frezeleme, tornalama, diş çekme vb. gibi farklı operasyon gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda karşılaşılan muhtelif kesme senaryoları için çeşitli şekil ve boyutlarda kesici takım türleri mevcuttur [3]. Şekil 2.2'de çeşitli geometrilere sahip kesici takım uçları gösterilmektedir.



Şekil 2. 2. Çeşitli geometrilere sahip kesici takım uçları [3].

## 2.1. KESİCİ TAKIMLARDA KULLANILAN MALZEMELER

Günümüzde, talaşlı imalat uygulamalarında her türlü iş parçasını işlemek için kullanılacak olan muhtelif kesici takımları bulmak mümkün hale gelmiştir. Yüksek sertlik, yüksek tokluk, aşınma direnci, ısıl şok direnci, oksidasyon direnci vb. gibi özellikler kesici takımlarda bulunması gerekmektedir. Bugün, bu tür özelliklerin tamamını barındıran bir takım malzemesi mevcut değildir. Genel olarak, yüksek mukavemetli, aşınmaya karşı dirençli takım malzemeleri; bükülme, basınç ve darbelere karşı düşük dirence sahip olup, işlenmesi zor ve maliyetli olabilmektedir. Mühendislik alanlarının çoğunda olduğu gibi, bu alanda da esas olan karşıt teknik ve ekonomik faktörleri dikkate alarak en uygun takım malzemesini belirlemektir. Takım malzemeleri cinsine, kimyasal bileşimine, sertliğine, mekanik özelliklerine ve üretim şekline göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [7–9].

Çizelge 2. 1. Takım malzemelerinin sınıflandırılması [9].

<b>Kimyasal bileşimine göre sınıflandırılması</b>	Karbon çelikleri, hız çelikleri (yüksek alaşımli çelikler), az alaşımli çelikler, demir olmayan metalik alaşımlar (stellite), sinterlenmiş karbürler (sert metaller), seramikler ve elmaslar.
<b>Cinsine göre sınıflandırılması</b>	Takım çelikleri, stellite ve sert metaller metalik özellik gösterir. Seramikler ve elmaslar metalik özellik göstermezler.
<b>Sertliğine göre sınıflandırılması</b>	Takım çelikleri, sertleştirme prosesi ile sertlik kazandırılırlar. Stellite, elmaslar ve seramikler doğal sertliğe sahiptirler.
<b>Üretim şekline göre sınıflandırılması</b>	Karbon çelikleri, az alaşımli çelikler ve hız çeliklerinin bazıları kesici uç ve sap kısmı birlikte üretilir (yekpare üretim). Stellitler, sert metaller, seramikler, bazı elmaslar ve hız çelikleri kesici uç ve sapı kaynaklanarak üretilir (kaynaklı üretim).
<b>Mekanik özelliklerine göre sınıflandırılması</b>	Yüksek sertlik, yüksek sıcaklık ve aşınma direnci özelliklerine sahip olan kesici takımlar eğilme, basma ve darbelere karşı mukavemetlidir.

### 2.1.1. Takım Çelikleri

Karbon, az alaşımli ve yüksek hız çeliklerinin ısı işlem ile sertlikleri artırılır. Bu işlem, malzemenin ısıtılıp hızla soğutulmasını içerir. Soğutma işlemi, östenitten martenzite dönüşümünü sağlayan kritik soğuma hızının üzerinde gerçekleşmelidir. Her çelik türünün, karbon içeriğine göre değişen kendine özgü bir kritik soğuma hızı vardır. Soğutma işlemi çeşitli ortamlarda yapılabilir: en yaygın olanlar tuzlu su, yağ ve hava soğutmasıdır. Soğutma hızı en yüksek olan su en düşük olan ise hava ile sağlanır. Karbon çelikleri genellikle yüksek soğutma hızı gerektirdiği için suda soğutulurken, alaşımli çelikler alaşım oranlarına göre yağda veya havada soğutulabilirler. Kesici takımlarda aranan bir diğer özellik kızıl sertliktir. Bu, kesici takımın kesme ucu kızıl sıcaklığa ulaşsa bile keskinliğini korumasını ifade eder. Ancak sertleştirme ile sertlik kazanan çelikler genellikle bu özelliğe sahip değildir. Bu yüzden

karbon ve düşük alaşımlı çeliklerin çalışma sıcaklıkları ve kesme hızları daha düşüktür [8,9].

#### **2.1.1.1. Karbon Takım Çelikleri**

Karbon takım çelikleri, %0,6 ile %1,4 karbon içeren ve elektrik fırınlarında eritilerek vakum kokil döküm yöntemiyle üretilen geleneksel malzemelerdir. Suda sertleştirildiklerinde 58 ile 64 HRC arasında bir sertlik kazanırlar, ancak bu işlem sırasında şekil bozuklukları oluşabilir. Bu çeliklerin maksimum çalışma sıcaklıkları 2000-2500°C arasındadır ve kesme hızları genellikle 10 m/dk'dır. En büyük avantajları, kolay işlenebilmeleri ve düşük maliyetleridir. Ancak günümüzde sanayileşmiş ülkelerde kullanım sıklığı yok denilecek kadar azdır [9].

#### **2.1.1.2. Az Alaşımlı Takım Çelikleri**

Karbon takım çeliklerine kesme performansını artırmak için krom (Cr), vanadyum (V), tungsten (W), molibden (Mo), manganez (Mn) gibi alaşım elementleri eklenir. Bu elementler, çeliklerin yağda veya havada sertleşebilmesini sağlar. Bu çelikler, yağ çelikleri ve hava çelikleri olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Yağ çelikleri genellikle %0,9 ile %1,45 karbon, %1 ile %1,6 manganez, %1 silisyum, %0,5 ile %0,75 krom, %0,25 ile %1,75 tungsten, %0,25 molibden içerirken, hava çelikleri %0,7 ile %1 karbon, %2 ile %3 manganez, %1 ile %5 krom, %1 molibden içerir. Yağ çeliklerinde sertleştirme sırasında bazı şekil bozuklukları oluşabilir ancak hava çeliklerinde bu durum görülmez. Az alaşımlı takım çeliklerinin kesme özellikleri, karbon takım çeliklerine benzerdir ve çalışma sıcaklıkları 2500-3000°C arasındadır. Sanayileşmiş ülkelerde bu çelikler yalnızca çok özel durumlar için tercih edilir [9].

#### **2.1.1.3. Yüksek Hız Çelikleri**

Yüksek hız çeliği, karbon ve düşük alaşımlı çeliklerden daha yüksek sıcaklıklarda sertliğini muhafaza edebilen yüksek alaşımlı bir takım çeliği türüdür. Bu çelik, günümüzde en kritik takım malzemeleri arasında yer alır. Matkaplar, kılavuzlar, kesici uçlar ve tığlar gibi karmaşık şekilli kesici aletlerin yapımında sıklıkla tercih edilir.



Sementit karbür ve seramikten oluşan diğer sert kesici aletlere kıyasla daha üstün tokluk özellikleri sunar. Taşlama işlemiyle kolaylıkla şekillendirilebildikleri için üreticiler tarafından tek noktadan kesme işlemlerinde de kullanılırlar. Kesme verimliliğini artırmak amacıyla, özellikle matkap uçları Titanyum Nitrür (TiN) kaplama ile işlemi görür.

%1,2 ile %19 arasında değişen tungsten ve %4 oranında krom içeren, oldukça yüksek alaşımlı çelik türleridir. Genellikle tercih edilen bu çeliklerin karakteristik özellikleri şunlardır: Alaşım içeriği, % C = 0,6-1,6; % Co = 2-14; % Cr = 4; % Mo = 0,7-10; % V = 1,4-5; % W = 1,2-19 aralığında değişebilir. Maksimum çalışma sıcaklıkları 600°C'yi geçmezken, sertlikleri 62 ile 65 HRC arasında ve kesme hızları 30-40 m/dk'dır. Takım çelikleri ve hız çeliklerinin kesme performansını iyileştirmek amacıyla siyanürleme, karbonitrürleme, buhar ortamında ısıl işlem ve krom elektro kaplama gibi işlemler uygulanabilir [8-10].

### **2.1.2. Stellite**

Demir olmayan bu metalik alaşımlar tungsten, krom ve kobalt elementlerinin karışımından meydana gelir. 60 ile 62 HRC aralığında sertlik derecesine ulaşabilirler ve yüksek aşınma karşıtı özellikleriyle dikkat çekerler. Bu malzemelerin işlenmesi genellikle 800°C sıcaklıkta gerçekleşir ve üretimleri döküm veya taşlama yöntemleriyle sınırlıdır. Avrupa'da pek rağbet görmeyen bu alaşımlar, Amerika'da sınırlı alanlarda kullanımı mevcuttur [9].

### **2.1.3. Sinterlenmiş Karbürler**

Sert metal olarak da bilinen sinterlenmiş karbürler WC, TiC ve TaC ile Co bağlayıcı elementinin birleşimiyle üretilirler. Bu malzemeler, toz haline getirilip karıştırıldıktan sonra yüksek basınçla preslenir ve ön sinterleme işlemi yapılır. Daha sonra taşlanarak son şekilleri verilir ve 1400-1600°C arasında son sinterleme gerçekleştirilir. Sinterleme işlemi, preslenen toz metalin gözeneklerini doldurur ve atomlar arası güçlü bağların oluşumunu sağlar. Bu işlem, malzemenin istenen özelliklerde elde edilmesi için gereklidir. Sinterlenmiş karbürler son derece sert, yüksek sıcaklık ve aşınmaya karşı dayanıklıdır; 900-1000°C çalışma sıcaklığına ve 87 ila 92 HRC sertliğe sahiptir.

Ayrıca çelik kesiminde 80-300 m/dk kesme hızı sunar. Sinterleme sonrası elde edilen bu malzemeler, kesici uç olarak metal işlemede kullanılırlar. Özellikle CNC takım tezgahlarında kullanılan bu uçlar, yüksek kesme doğruluğu ve performansı için özel olarak taşlanır. Kesici uç geometrisi genellikle presleme sırasında kullanılan kalıplarla şekillendirilir [9].

#### **2.1.4. Seramikler**

Seramik malzemeli kesici takımlar alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve silisyum nitrür ( $Si_3N_4$ ) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Sementit karbür kesici takımlara göre, bu seramikler yüksek ve sıcak sertlik, aşınma ve plastik deformasyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptir. Ancak ısı şoklarına ve kırılmaya karşı daha düşük direnç gösterirler.  $Al_2O_3$  bazlı seramik kesici takımlar dökme demir ve çelik döküm malzemelerinin yüksek hızda işlenmesi için tercih edilir. Üretim ve sinterleme süreçlerindeki gelişmelerin yanında ayrıca tokluklarını artıran çeşitli katkı maddelerinin eklenmesi sayesinde seramik kesici takımlar artan dayanıklılık, ısı şoklarına karşı direnç ve kırılma tokluğu gibi geliştirilmiş özellikler kazanmıştır. Bu iyileştirmeler, seramik kesici takımların kullanım alanlarının genişlemesine olanak tanımıştır. 1800°C çalışma sıcaklığına ve 89-95 HRC sertliğe sahiptir. Dökme demir kesiminde 100-300 m/dk ve ince talaş kesiminde 200-1000 m/dk kesme hızı sunar [8,9,11].

#### **2.1.5. Elmaslar**

Doğal elmas (tek kristalli), çok kristalli elmas (PCD) ve kübik bor nitrür (CBN), en sert kesici takım malzemeleri arasında yer alır. Doğal elmas, doğadaki en sert malzeme olarak bilinir ve sementit karbür veya  $Al_2O_3$ 'ten yaklaşık 3-4 kat daha serttir. Kristal düzlemine bağlı olarak sertliği 6500 – 12000 HV değeri arasında değişebilen anizotropik bir yapıya sahiptir. Yüksek sertliği, aşınma direnci, düşük sürtünme ve genişleme katsayıları ile ısı şok direncini artıran yüksek iletkenliği sayesinde, tek kristalli elmas kesici takım malzemesi olarak tercih edilir. Ancak düşük tokluğu, işlenmesindeki zorluklar ve yüksek maliyeti nedeniyle kullanımı sınırlıdır.

PCD kesici takımlar, grafitik karbondan yüksek sıcaklık ve basınç altında üretilen yapay elmaslardır. Metalik birleştiricilerle birleştirilen elmas parçacıkları, sıcak presleme ile kesici takım geometrisine dönüştürülür. Genellikle 0,5 – 1 mm kalınlığında PCD tabakaları, sementit karbür tabanlı kesici takımlarda kullanılır. PCD, izotropik özellikler gösterir ve doğal elmas kadar mükemmel olmasa da deformasyona karşı daha az hassas ve aşınmaya karşı oldukça dayanıklıdır. CBN, yapay elmas üretim teknolojisi kullanılarak hekzagonal bor nitritten üretilir ve elmastan sonra gelen en sert malzemedir. 1100 °C’de sementit karbürün oda sıcaklığındaki sertliğine eşdeğer sertlikte olan CBN, mükemmel aşınma direnci ve düşük sürtünme ve genleşme katsayılarına sahiptir. CBN, nikel, kobalt ve demir bazlı malzemelerin işlenmesinde kullanılırken, nitrit ve bor oluşturan alüminyum, zirkonyum ve titanyum gibi elementlerle reaksiyona girer. Standart kesimlerde 100-500 m/dk ve daha özel kesimlerde 3000 m/dk’ya kadar kesme hızı sunar [8–10,12].

## **2.2. KESİCİ TAKIMLARDA KULLANILAN KAPLAMALAR**

Bugün, işleme operasyonlarının büyük bir çoğunluğunda kaplamalı kesici takımlar kullanılmaktadır. PVD ve CVD yöntemleri kullanılarak TiN, TiAlN, TiC, TiCN, CBN, DLC (Elmas benzeri karbon) vb. gibi çeşitli kaplama malzemeleri kesici takımlara kaplanmaktadır. Takım malzemesinin ömrünü, performansını, mukavemetini, aşınma direncinin artırılması ve korozif etkilerin azaltılması kaplamaların tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasındadır [13–15].

### **2.2.1. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi**

PVD kaplama tekniği 1800’lü yıllardan günümüze bilinmekte ve geliştirilmektedir. Vakumlanmış ortamda bir ısıtıcı vasıtası ile kaplama malzemesi buharlaştırılarak, kaplanacak olan malzemeye ince bir film tabakası biriktirilecek şekilde uygulanmaktadır [14,16].180-600°C aralığında değişken sıcaklıklarda uygulanan bu yöntem ısıtılmış işlem görmüş takım çeliklerinde kaplama sorununun çözülmesinde rol oynamıştır. İyon kaplama, termal buharlaştırma ve manyetik sıçratma katot ark PVD, PVD alt yöntemleridir. Ayrıca PVD kaplama, sıkı kristal tabaka özelliklerini

bulundurması, kaplama sırasında malzeme sertliğinde düşüşün olmaması, kaplamanın çok ince kalınlıkta yapılması (1 µm-5 µm) vb. özelliklere sahiptir [13,14].

### **2.2.2. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi**

CVD yöntemi, gazlaştırmış bir kimyasalın katı bir tepkime ürünü olarak bir yüzeye çökertilmesi sürecini tanımlar. Bu yöntemde, metal veya metal olmayan atomlar, kimyasal buhar biriktirme sırasında yalnızca sınırlı bir yüzeyde difüzyon yaparak bir yüzey katmanı oluşturur. Bu süreçte kullanılan kaplama malzemeleri arasında çelikler, sert metaller, seramikler ve demir dışı metaller bulunur. Çökertilmiş katman genellikle 10-30 µm kalınlık aralığında değişir. Kaplama işlemi sırasında oluşan sıcaklık, uygulanan kaplama türüne bağlı olarak 900-1100 °C arasında değişebilir. Uygulanan kaplama kalınlığına göre işlem süresi 2-4 saat arasında değişkenlik gösterebilir. Yapılan kaplamaların metalurji açısından temel katmanla uyumlu olması gerekmektedir. TiC, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya karma kaplamalar genellikle CVD işlemiyle karbür kesici uçlara uygulanır. Kaplama için gerekli kimyasal reaksiyon, alt katmana yakın bir yerde gerçekleştirilir. Kaplama, atomların yüzeyde birleştirilmesiyle oluşturulur ve böylece kaplama ile temel katman arasında güçlü bir yapışma bölgesi meydana gelir. İnce film tabakalarının oluşturulması açısından CVD yöntemi, PVD yöntemine kıyasla daha karmaşık bir süreçtir. CVD yöntemi, ince taneli kaplamaların yüksek biriktirme hızlarında uygulanabilmesine fırsat tanır [13,14].

### **2.2.3. Titanyum Nitrür (TiN) Kaplama**

Bilinen en eski kaplama olmasının yanı sıra en çok bilinen kaplama çeşididir. Çeşitli kesici takım ve kalıpta kullanılmaktadır. Kaplanan parçaların ömür performansı yönünden 30 kata kadar artış sağlayacağı ortaya koyulmuştur. TiN yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve oksidasyon direnci olan bir kaplama türüdür. Bu kaplama farklı tipte kesici takımlara ve kesici uçların yüzeylerine 1-3 µm arasında bir kalınlıkta uygulanır. Düşük termal iletkenliği ve 2800-3000 HV arasındaki sertlik değerleri sayesinde iş parçasının kesici takıma ilettiği ısıyı büyük bir ölçüde önlemektedir. Ayrıca TiN kaplaması kimyasal tepkimelerden etkilenmediğinden dolayı kesici

takımın iş parçasına yapışmasını önlemekte ve kesici takım yüzeyinde kayganlık oluşturmaktadır [13,14].

#### **2.2.4. Titanyum Alüminyum Nitrit (TiAlN) Kaplama**

TiAlN, PVD yöntemi ile üretilen, aşınma, korozyon, sıcaklık oksidasyon direncinin yüksek olduğu ve yüksek sertlik özelliklerine sahip olan bir kaplama türüdür. 2100-2300 HV arasında sertlik değerlerine sahip olan bu kaplamalar delme uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. TiN kaplamaya kıyasla alüminyum katkısı sayesinde oksidasyon direnci arttırılmaktadır. Bu kaplama sayesinde işleme sırasında oluşan ısının talaş vasıtası ile kesici takımdan dışarı aktarıldığı, takım ömründe 3 kata kadar artışın olduğu, işleme hızlarında yüksek oranda artışın olduğu ve iyi bir yüzey kalitesi elde edilebileceği görülmektedir [13,14,17].

#### **2.2.5. Titanyum Karbür (TiC) Kaplama**

Elektrik ark fırını kullanılarak Moissan öncülüğünde ilk kez üretilen TiC, ısıtılmış bir telden  $TiCl_4$  gazı aktarılarak az miktarda elde edilmiştir. Hem dökme demir hem de çelik yüzeylerinin korunması amacıyla bu malzeme ile kaplama uygulamaları mevcuttur. Kesici takımların verimliliğini arttırmak için yapılan çalışmalarda, kaplama yapılmamış ve kaplamalı çelikler karşılaştırılmıştır. Kaplamalı olanların kesme hızını %50-100 oranında, kesici takım ömrünün ise %200-400 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, kaplama uygulanan kesici takımların üretim maliyetlerini düşürdüğünü ve kaliteye bağlı olarak önemli ekonomik avantajlar sağladığını göstermektedir [14].

#### **2.2.6. Titanyum Karbonitrür (TiCN) Kaplama**

TiCN kaplaması üstün sertlik ve düşük yüzey pürüzlülük özelliklerini sağlamaktadır. Talaşlı imalat işlemlerinde yüksek hızlara çıkılmasına ve işlenmiş parçalarda yüzey kalitesinin arttırılmasına olanak sağlamaktadır. TiCN kaplaması, metal işleme takımları ve zımbalar için mükemmel yapışma, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve çatlaklara karşı direnç gibi özellikler sunmaktadır. Bu kaplama, özellikle

yüksek sertlik gerektiren uygulamalarda, gerilim altındaki kesici uçlarda tesirli performans sergiler. Uygulama alanları arasında çeşitli zımbalar, matkap uçları, raybalar, broşlar, azdırma bıçakları ve elmas uçlar bulunmaktadır [14].

### **2.2.7. Kübik Bor Nitür (CBN) Kaplama**

CBN, elmasın ardından gelen en sert malzeme olarak bilinir. 2000°C'ye kadar olan yüksek kızıl sertliği, üstün aşınma direnci ve işleme esnasında genellikle gösterdiği kimyasal kararlılık sayesinde kesici takımlar için ideal bir malzemedir. Seramikten daha tok olmasına rağmen ısı ve kimyasal direnç açısından seramikten daha düşük performans gösterir. CBN takımları dövme çelik, sertleştirilmiş çelik, yüzeyi sertleştirilmiş dökme demir, kobalt ve demir bazlı toz metaller, perlitik dökme demir ve ısı dirençli alaşımlar gibi malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak tercih edilir. Yüksek kesme hızları ve düşük ilerleme koşullarında etkili olan CBN takımları, kesme sıvısı kullanıldığında yüksek basınç altında olmalıdır. Aksi takdirde ısı çatlak oluşumu riski artar. Keskin köşeler ve kompleks geometriler üzerinde genişletme işleminin yapılabilmesi olanağı bu takımların tercih edilme sebepleri arasında yer almaktadır [14].

### **2.2.8. Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplama**

Karbonun amorf formda bulunduğu ve temel element olarak karbon içeren DLC, son derece sert ve aşınmaya karşı dirençli bir yapıya sahiptir. Alüminyum gibi malzemelerin işlenmesi sırasında meydana gelen yapışma üretim süreçlerinde engeller yaratır. Elmas malzemelerin yapısından kaynaklanan üstün yapışmazlık özellikleri onları bu tür uygulamalar için ideal kılar. Bu sebeple DLC kaplamalar, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının işlenmesindeki yapışma sorunlarını çözmek amacıyla tercih edilir. DLC filmlerinin sertlik ve elastisite gibi mekanik özellikleri filmdeki sp<sup>3</sup> karbon bağlarının oranıyla ilişkilidir ve sertlik değerleri 10-40 GPa aralığında değişkenlik gösterir. Ancak filmlerin ağ yapısı nedeniyle 0,5-7 GPa arasında iç gerilimler oluşabilir ve bu da filmlerin kalınlığı üzerinde kısıtlayıcı bir etki yaratabilir. DLC filmlerinin düşük yüzey pürüzlülüğü, koruyucu kaplamalar için mükemmeldir ve bu filmler düz ve pürüzsüz yüzeylere sahiptir. DLC kaplama yöntemi, karbon atomlarının

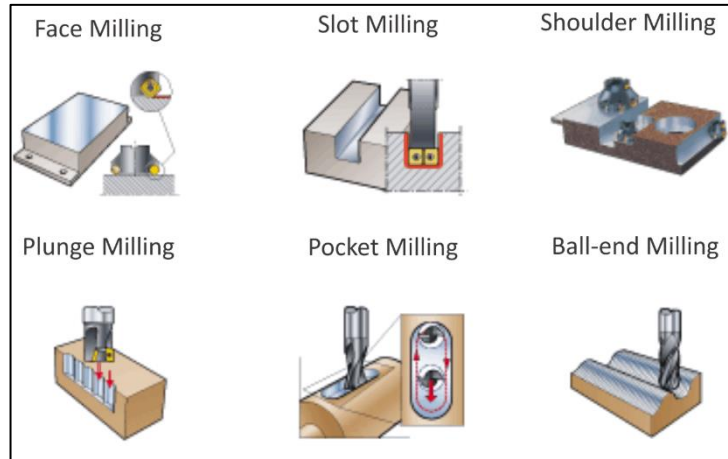
elmas benzeri özellikler kazanması için enerjisi yüksek iyon bombardımanı altında çökertilmesini gerektirir ve bu yöntem, PVD teknolojisinin geliştirilmiş bir versiyonu olarak kabul edilebilir. PVD’de olduğu gibi DLC kaplama da vakum altında iyon birikimi ile malzemeye uygulanmaktadır [13,18].

## BÖLÜM 3

### KESME / FREZELEME MEKANİĞİ

Talaşlı imalat, şekillendirilecek olan iş parçasının üzerinden istenmeyen talaş kesici takımlar veya diğer aletler vasıtasıyla kaldırma işlemidir. Dünya çapında, birden çok ülke talaş kaldırma işlemine yatırımlarını sürdürmektedir. Bunların sebebi olarak imal edilen ürünlerin çoğunun nihai boyutlarını alması için talaşlı imalat işlemlerinin uygulanmasıdır. Talaşlı imalat yöntemlerinin tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise istenilen parça kalitesine ulaşmaktır. Bu yüzden talaşlı imalat yöntemi, üretim yöntemleri arasında tercih bakımından en üst sıralarda yer almaktadır [12] .

İstenilen boyut ve tolerans aralıklarında, malzemenin nihai formuna ulaştırılmasında kesme veya bu çalışmada ele alınan frezeleme metodu, talaşlı imalat üretim metotları arasında çok önemli bir yere sahiptir. Farklı türde frezeleme operasyonları Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 1. Farklı türdeki frezeleme operasyonları [19]



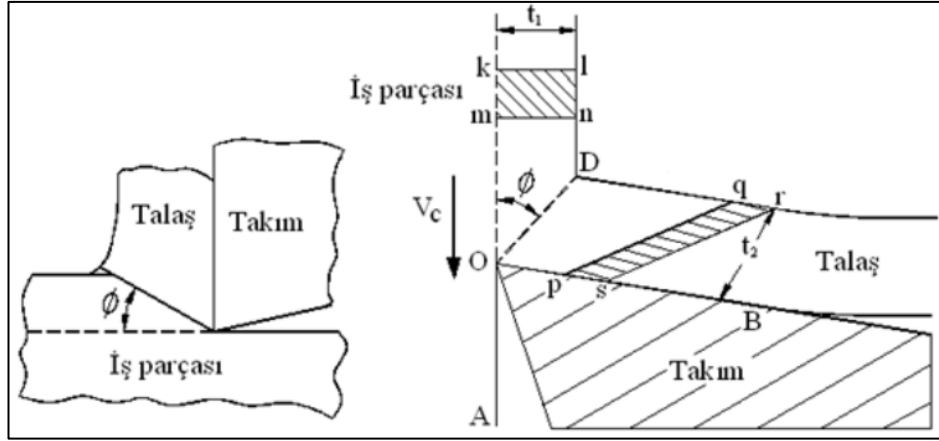
Kesme uygulamaları incelendiğinde, gözlemlenen temel konular şu şekildedir:

- Talaşlı imalat işlemlerinin genel gayesi istelere uygun parçanın oluşturulmasıdır [20].
- İş parçasının işlenebilmesi için kesici takım kenarının belirlenen paso miktarına göre iş parçasına daldırılması gerekmektedir. Bu daldırma işleminde, kesici takım ile iş parçası arasında oluşan gerilmelerin hem kesici takıma hem de iş parçasına zarar vermemesi için kesici takımın belirli kesitte olması, iş parçasına göre doğru kesici takım malzemesi seçimi ve kesici takıma boşluk açısı verilmesi gerekmektedir [20].
- Kesici takım-iş parçası arayüzünde sürtünmeden ve diğer harici kaynaklardan dolayı ısı ve titreşim açığa çıkmaktadır. Bu durumlar hem kesici takımlarda aşınmaya hem de işlenen parçanın istenilen işleme kalitesine ulaşamaması ile sonuçlanabilmektedir [21,22].

### **3.1. TALAŞ KALDIRMA ÜZERİNE TEORİLER**

#### **3.1.1. Ernst, Merchant ve Pispaeen Yaklaşımı**

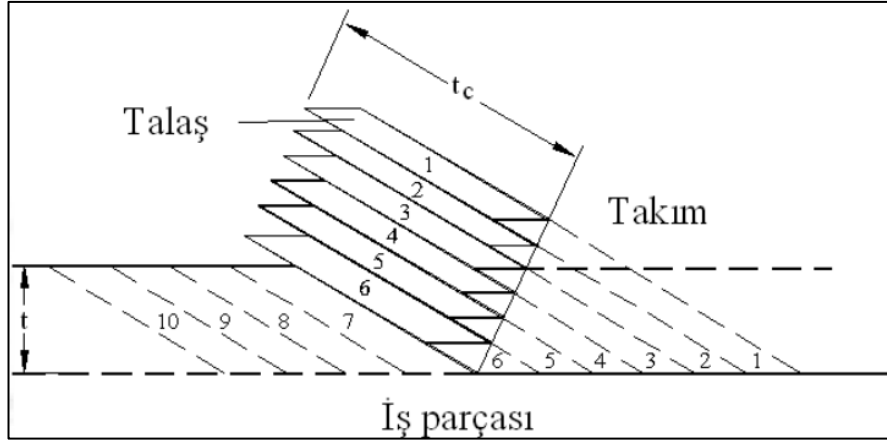
Bu yaklaşım, talaşın kesme kenarı önünde kaymasıyla oluştuğunu ve kesici kenardan iş parçası yüzeyine kadar uzanan yaklaşık olarak tek bir düzlemle sınırlı olduğunu varsaymaktadır. Ancak kayma düzleminin ve takım-iş parçası ara yüzeyinde iletilen kuvvetlerin etkisi altında dengede kalan talaşın rijit bir cisim gibi davrandığı varsayılmaktadır. Sürekli talaş oluşum mekanizması, talaşın tek yönlü kayma deformasyonuna uğradığını gösteren basit bir kart yığını modeli olarak gösterilebilir. Ancak bu yaklaşım yalnızca, sürekli talaş tipleri için geçerlidir ve bu yaklaşım diğer talaş tipleri için test edilmemiştir. Merchant, talaş kaldırma mekaniğini temel alarak hassas geometride ideal talaş oluşumu kavramını türetmiştir. Bu kavram Şekil 3.2.'de gösterilmiştir [7,23].



Şekil 3. 2. Merchant'ın ideal talaş oluşum diyagramı [23].

Merchant tarafından keşfedilen bu yaklaşımın, plastik malzemeler işlendiğinde deneysel sonuçlarla tutarlı olduğunu ancak karbür malzemeli kesici takımlarla çelik malzemeler işlendiğinde çıktılarının yaklaşımla tutarsız olduğu görülmektedir. Merchant eşitliğinin reel değeri talaş-takım arasındaki sürtünme, talaş açısı ve kayma düzlemi açısı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu ilişkiler “talaş açısının artması ve sürtünme katsayısının azalması kayma düzlemi açısı değerinin yükselmesine sebep olur” şeklinde yorumlanabilir [7].

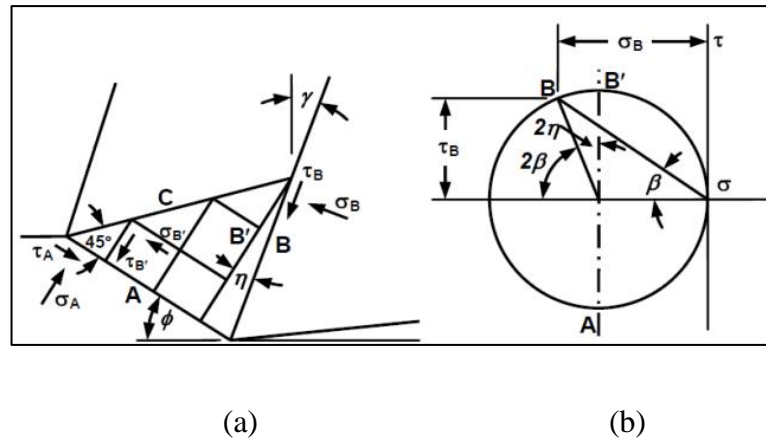
Pispaen tarafından da benimsenmiş olan bu yaklaşım, malzemenin kayma açısı nedeniyle serbest bir yüzeye çapraz olarak tutulan kart destesi şeklinde kesildiğini göstermektedir. Bunun nedeni takımın iş parçasına göre hareket ettirilmesiyle zamanla katmanın devreye girerek üst üste kaymasına neden olmasıdır (Şekil 3.3). Bu modelin temelleri “takım yüzey sürtünmesi plastik deformasyon değil elastik deformasyona yol açar, kayma kusursuz bir yüzey düzleminde gerçekleşir, talaşın sıvanmasının ihmal edilmesi ve kayma açısının seçiminin serbest olması gerekir” şeklindedir. Bu temellere ek olarak “takım keskinliğinin iyi olması, talaş derinliğinin sabit olması, stok parçanın kesici takıma göre senkron hareket etmesi ve normal gerilmelerin eş dağılımlı olması” şeklinde varsayımlar ortaya konmuştur [7].



Şekil 3. 3. Pispaen talaş oluşum diyagramı [23].

### 3.1.2. Lee ve Shaffer Yaklaşımı

Lee ve Shaffer, plastisite teorisini ideal rijitliğe sahip olan plastik bir malzeme için kullanmışlardır ve oluşan deformasyonların görece ince bir kayma düzlem yüzeyinde oluştuğunu benimsemişlerdir. Talaş içinde kesme kuvvetini kayma düzleminde takım yüzeyine aktaran bir gerilim bölgesinin olması gerektiğini varsayımlar ve bunu gerilim akma noktasının üzerinde olduğunda bile hiçbir deformasyonun meydana gelmediği kayma çizgisi bölgesinde olduğunu ortaya koymuşlardır. Analizlerinde kullandıkları model ve gerilme aralığının sınırlarındaki değerleri belirlemek için kullandıkları Mohr Dairesi Şekil 3.4'te gösterilmektedir [7,20].



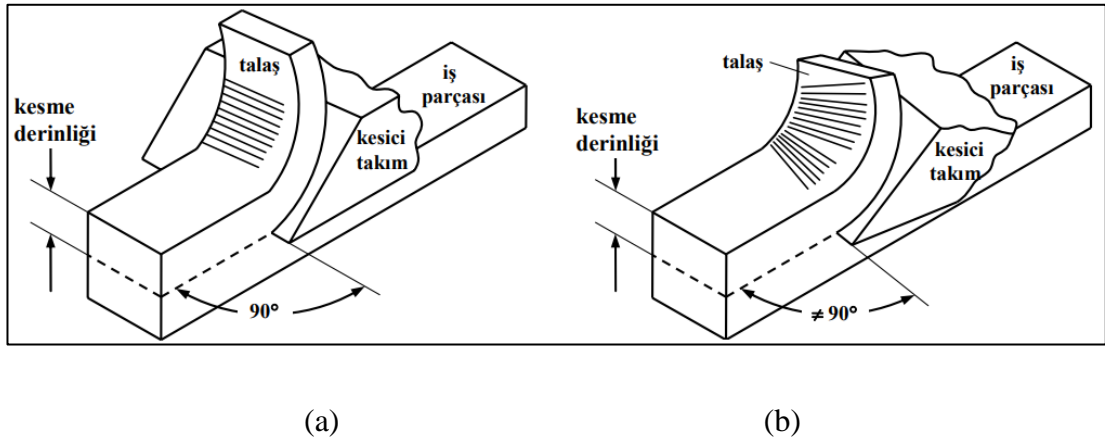
Şekil 3. 4. Lee ve Shaffer yaklaşımı, a) Kayma açısı şematığı, b) Gerilim bölgesi Mohr dairesi diyagramı [24].

### 3.1.3. Shaw, Cook ve Finne Yaklaşımı

Önceki çalışmalarda değerlendirilen kayma sürecinde, sürtünme ve kayma arasındaki ilişkiler Shaw ve ekibi tarafından göz önünde bulundurulmuştur. Kayma düzleminin en yüksek kayma gerilimi yönünde olmaması düşüncesi, kayma çizgisi yönteminin kullanılmasına yol açmıştır. Bazı düzensizliklere rağmen bu metodoloji önemli bir konsept sunmuştur. Yani sürtünme ve kayma arasındaki uygun ilişki, kesme işlemi sırasında durağan son şeklin tanımlanması açısından kritik bir unsurdur. Ancak modellemede yalnızca kayma göz önünde bulundurulduğu için iş parçası ideal plastik bir cisim olarak kabul edilir. Bu durum talaşın yönlendirilmiş kalıcı kayma gerilimine, uzamasına sahip olmasına ve kırılmadan sürekli bir şekilde devam etmesine neden olur [7].

### 3.2. DİK (ORTOGONAL) VE EĞİK (OBLİK) KESME

Kesme operasyonlarında hem kuramsal hem de deneysel tahlillerin yapılması için sıklıkla dik ve eğik kesme modellerine başvurulmaktadır. Dik kesme modeli ele alındığında daha çok iki boyutlu kesme yaklaşımı benimsenir. Bu modelde, belirli bir talaş derinliğinde bulunan hareketli kesici takım ile kesici takım hız vektörü birbirine göre diktir. Eğik kesme modeli ele alındığında, belirli bir talaş derinliğinde bulunan hareketli kesici takım ile kesici takım hız vektörü birbirine göre 90 dereceden farklı bir açıya sahiptir. Dik ve eğik kesme modelleri Şekil 3.5 'de gösterilmektedir [20–22].



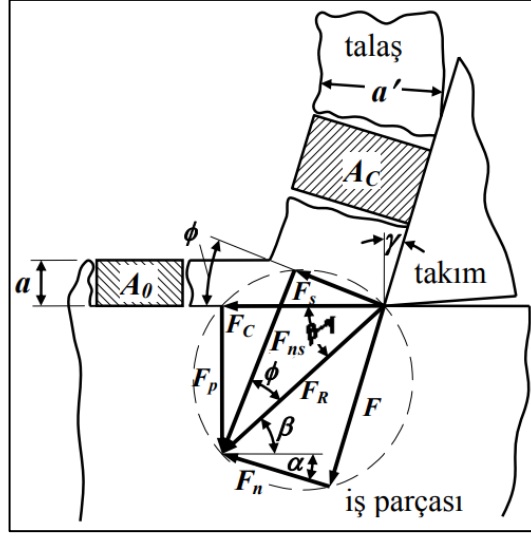
Şekil 3. 5. Dik ve eğik kesme modelleri, a) dik kesme, b) eğik kesme [20].

### 3.2.1. Dik Kesme Operasyonlarında Oluşan Kuvvetler

Talaşlı imalat işlemlerinde sürtünme kuvvetlerini yenmek ve istenilen parça kalitesine ulaşmak için kesme kuvvetleri önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca bu kuvvetlerin ölçümü kesme operasyonlarının tahlil edilmesi ve kesici takım tasarımlarının optimizasyonu için elzemdir.

Kesme işlemi sırasında kesici takımın üzerine uygulanan ana gerilme basma gerilmesidir buna ek olarak kayma gerilmesi de oluşmaktadır. İşleme operasyonlarında üç temel kuvvet mevcuttur. Bu kuvvetler: İlerleme kuvveti, radyal kuvvet ve teğetsel kuvvettir. Talaş kaldırmak için asıl kuvvet teğetsel kuvvet olarak kabul edilir. Teğetsel kuvvet sayısal olarak ilerleme kuvvetinin dört katı ve radyal kesme kuvvetinin iki katı kadardır. Kesici takım geometrisi, yaklaşma açısı, ilerleme ve radyal kuvvetlerin büyüklüklerinde etkilidir. Bu kuvvetlerin birbiri arasındaki etkileşimi, hassas operasyon gerektiren iş parçaları veya uzun kesici takım boylarında istenmeyen titreşimlerin uzaklaştırılması açısından elzemdir. Talaş açısı, radyal kesme kuvveti üzerinde etkiye sahip bir diğer faktördür. Talaş açısının pozitif yönü daha düşük kesme kuvvetleri anlamına gelmektedir. Radyal kuvvetin şiddeti, kesici takımın yaklaşma açısına ve köşe yarıçapına göre değişir. Daha küçük bir takım yarıçapı ve yaklaşma açısının 90 derece olması radyal kuvveti azaltırken aynı zamanda kesici takımın esnemesine ve titreşimlere yol açabilir. Bu da istenmeyen bir sonuçtur. Talaş açısının pozitif olduğu ve talaş kırma özellikleri iyi olan kesici takımlar kullanıldığında, yüksek kesme hızlarının ve kesme kuvvetlerinin titreşim üzerinde iyileştirici etkileri bulunmaktadır [8,25–27].

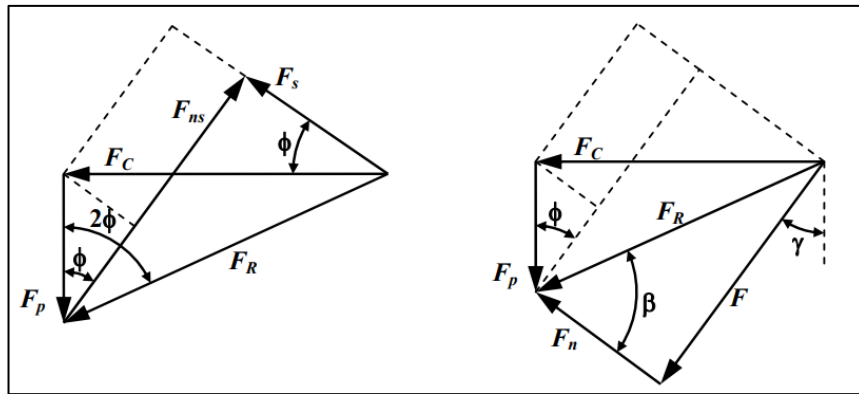
Dik kesme operasyonlarında kuvvet bağıntıları bulunurken talaş, serbest ve iş parçasından ayrılmış şekilde kabul edilmektedir. Kesici takım yüzeyine etki eden kuvvetler vasıtası ile sürtünme katsayısı ve kuvvetlerinin yönü bulunabilmektedir. Şekil 3.6'da dik kesme operasyonlarında oluşan kuvvetler gösterilmektedir [20].



Şekil 3. 6. Dik kesme operasyonlarında oluşan kuvvetler [20].

Şekil 3.6 incelendiğinde, görülen parametreler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:  $a$  kesme derinliği,  $a'$  çıkan talaş kalınlığı,  $A_0$  talaşın kesit alanı,  $\phi$  kayma (kesme) düzlemi açısı,  $\gamma$  talaş açısı,  $\beta$  sürtünme açısı,  $F_n$  sürtünme kuvvetine dik olan kuvvet,  $F_s$  kayma düzlemi boyunca etki eden kuvvet,  $F_c$  esas kesme kuvveti,  $F_p$  radyal kuvvet,  $F$  sürtünme kuvveti,  $F_R$   $F_c$  ile  $F_p$ ' değerinin bileşke kuvveti,  $F_{ns}$   $F_s$  değerine dik kuvvet [20].

Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, parametreler ve kuvvet vektörleri ile oluşturulan hesaplama üçgenleri Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Bu üçgenler yardımı ile dik kesme operasyonlarındaki kuvvet denklemleri oluşturulabilmektedir [20].



Şekil 3. 7. Kesme kuvvetleri için hesaplama üçgenleri [20].

Şekil 3.7 incelendiğinde esas kesme kuvvetlerinin bulunması için  $F_s$  ,  $\phi$  ve malzemenin çekme dayanımı olan  $\sigma_k$  parametreleri kullanılmaktadır. Bu parametrelerden elde edilen eşitlikler,

$$F_s = A_0 \sigma_k \operatorname{cosec} \phi \quad (3.1)$$

$$F_s = af \sigma_k \operatorname{cosec} \phi \quad (3.2)$$

olarak bulunur.

Şekil 3.7'deki hız üçgenleri ve eşitlik 3.2 ve 3.3 kullanılarak  $F_C$  değeri,

$$F_C = \frac{F_s \cos(\beta - \gamma)}{\cos(\phi + \beta - \gamma)} \quad (3.3)$$

olarak elde edilmektedir [20].

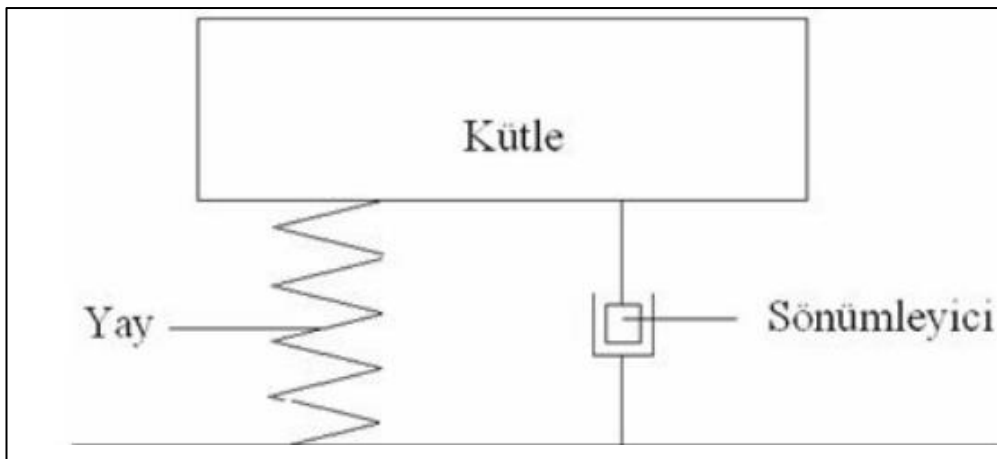
## BÖLÜM 4

### TİTREŞİM

#### 4.1. TİTREŞİM KURAMI

Titreşim, kütleye sahip bir nesnenin belirlenen bir referans noktası etrafında gerçekleştirdiği salınım hareketidir. Diğer bir tanımla, bir nesnenin sabitlenen bir nokta etrafında dögüsel şekilde hareket etmesi olarak tanımlanabilir. Bir nesnenin elastik özelliğe sahip bir komponent üzerinde oluşturduğu salınımlı hareketle titreşim meydana gelmektedir. Titreşim sistemi kütle ve elastik komponent 'den oluşur (Şekil 4.1).

Şekil 4.1'de betimlenen titreşim sisteminde, kinetik enerji kütle tarafından, potansiyel enerji ise yay tarafından depolanır. Potansiyel enerji ile kinetik enerji arasındaki dönüşüm titreşimi oluşturur. Sistemin salınımı esnasında enerjiyi yavaşlatarak durduran komponente sönümleyici adı verilir [8,26].



Şekil 4. 1. Titreşim sistemi [28].



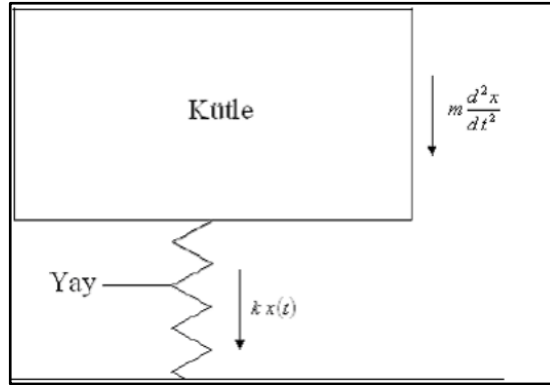
## 4.2. TEMEL TİTREŞİM MODELLERİ

### 4.2.1. Serbest Titreşim

Kütleye sahip bir nesnenin, belirli bir kuvvet ile referans noktasından ötelenerek serbest bırakılması durumunda yaptığı periyodik harekete serbest titreşim denir. Kütleye sahip nesneye sürtünmeden kaynaklı dirençlerin etki etmesi durumunda sönümlü sistem olarak adlandırılır. Ayrıca sönümlü sistemlerde sürtünme kuvvetlerinden dolayı zamanla titreşimin azalacağı bilinmektedir [8,29].

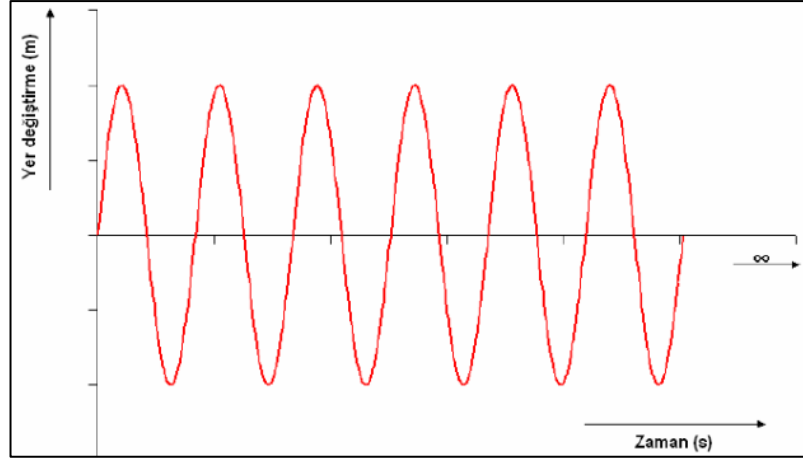
#### 4.2.1.1. Sönümsüz Serbest Titreşim

Sönümsüz titreşim kavramı teorik bir kavram olmakla birlikte mühendislik uygulamalarında hesapların anlaşılması için uygulanmaktadır ve bütün sistemler kendi içinde biraz da olsa sönümleme etkisine sahiptirler. Sönümsüz titreşim sistemi Şekil 4.2' de gösterilmiştir [8].



Şekil 4. 2. Sönümsüz titreşim sistemi [28].

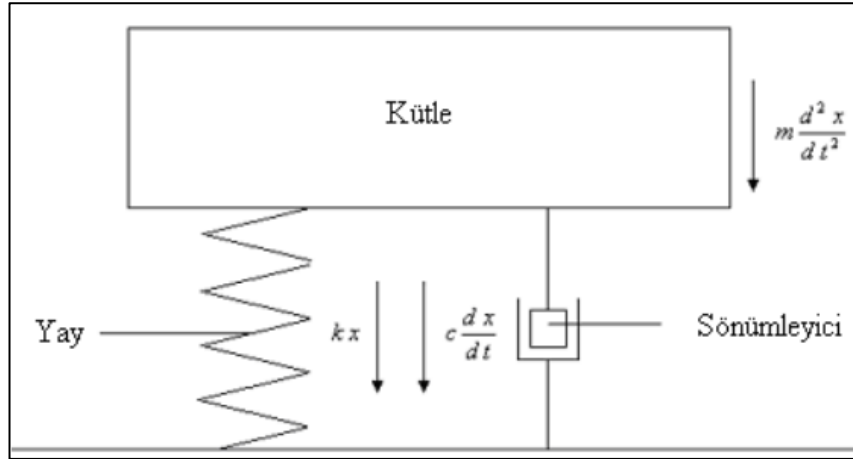
Şekil 4.2'deki sönümsüz titreşim sistemi  $m \frac{d^2x}{dt^2}$  ile  $kx(t)$  kuvvetlerinin etkisindedir. Bu sistem  $\omega_n$  doğal frekansında salınıma belirtilen kuvvetlerin etki etmesi ile hareketine başlar ve bu doğal frekans hareketi nesnenin kütlesine ve yayın katsayısına bağlıdır. Bu hareket herhangi bir sönüme sahip olmadığı için sonsuza giden bir sinüzoidal hareket yapmaktadır. Şekil 4.3'te yer değiştirme-zaman grafiğine bağlı sönümsüz serbest titreşim hareketi görülmektedir [8].



şekil 4. 3. Sönümsüz serbest titreşim hareketi [28].

#### 4.2.1.2. Sönümlü Serbest Titreşim

Sönümlü serbest titreşim sistemi (şekil 4.4), sönümsüz serbest titreşim sistemine göre bir komponent daha fazladır. Bu komponent sistemin giderek yavaşlayarak durmasını sağlayan sönümleyici olarak adlandırılır.



şekil 4. 4. Sönümlü serbest titreşim sistemi [28].

$kx(t)$ ,  $c \frac{dx}{dt}$ ,  $m \frac{d^2x}{dt^2}$  kuvvetlerinin tesirinde olan sönümlü serbest titreşim sistemi bu kuvvetler ile sönümlü salınım hareketi yapmaktadır. Bu sönümlü salınım hareketinin doğal frekans hesaplaması Eşitlik 4.1'de gösterilmiştir [8].

$$\omega_{nd} = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \quad (4.1)$$

Sistemin sönümlenme katsayısı ile kritik sönümlenme katsayısının oranı sönümlenme değerini vermektedir.

$$D = \frac{c}{c_0} \quad (4.2)$$

Cismin kütleğine ve yay katsayısına bağılı olarak titreşim sistemindeki kritik sönümlenme katsayısı elde edilir.

$$c_0 = 2\sqrt{km} \quad (4.3)$$

Diferansiyel denklem sönümlü titreşim hareketine göre şu şekilde yazılabilir;

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx(t) = 0 \quad (4.4)$$

4.4 numaralı eşitliğin diskriminant eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$\Delta = c^2 - 4mk = c^2 - c_0^2 \quad (4.5)$$

4.5 eşitliğinde elde edilen bu diskriminant eşitliğine göre 4.4 eşitliğinde genel çözümün bulunması için katsayılara değer atamak gerekir ve bu durumlar sağlandığında üç olasılık ortaya çıkmaktadır [8].

Birinci olasılık (zayıf sönümlenme),  $D < 1$  veya  $c < c_0$  olmasıdır. Bu koşullarda diskriminant değeri negatiftir. Bu değerin negatif olması çözüm kümesinde reel kök olmadığı anlamına gelmektedir. Bu olasılık incelendiğinde, hareket genliği zamana bağılı olarak eksponansiyel şekilde azalmaktadır. Bu durumun gerçekleşmesi zayıf sönüm olarak nitelendirilir (Şekil 4.5). Gerekli koşullar sağlandığında denklemin genel gidişatı aşağıdaki gibi gösterilmektedir [8].

$\Delta < 0$  durumuna göre,

$$b_1 = \frac{-c + \sqrt{(c_0^2 - c^2)}}{2m}, b_2 = \frac{-c - \sqrt{(c_0^2 - c^2)}}{2m} \text{ eşitlikleri elde edilir.}$$

$c = Dc_0$  ve  $c_0 = 2\sqrt{km}$  değerleri yeniden düzenlenip eşitliğe yazıldığında:

$$b_1 = \frac{-c + i2\sqrt{km}\sqrt{(1-D^2)}}{2m}, b_2 = \frac{-c - i2\sqrt{km}\sqrt{(1-D^2)}}{2m} \text{ eşitlikleri elde edilir.}$$

$k = m\omega_n^2$  denklemini için  $b_1$  ve  $b_2$  kökleri:

$$b_1 = \frac{-c}{2m} + i\omega_n\sqrt{(1-D^2)}, b_2 = \frac{-c}{2m} - i\omega_n\sqrt{(1-D^2)} \text{ eşitlikleri elde edilir.}$$

$\omega_{nd} = \omega_n\sqrt{1-D^2}$  eşitliği sağlandığında denklemin çözüm kümesi:

Ç.K =  $\left\{ \left( \frac{-c}{2m} + i\omega_{nd}i \right), \left( \frac{-c}{2m} - i\omega_{nd}i \right) \right\}$  eşitliği elde edilir. Bu eşitliğe göre genel çözüm:

$$x(t) = C_1 e^{\frac{-et}{2m}} e^{\omega_{nd}t} + C_2 e^{\frac{-et}{2m}} e^{-\omega_{nd}t}$$

$$x(t) = C_1 e^{\frac{-et}{2m}} (\cos \omega_{nd}t + i \sin \omega_{nd}t) + C_2 e^{\frac{-et}{2m}} (\cos \omega_{nd}t - i \sin \omega_{nd}t)$$

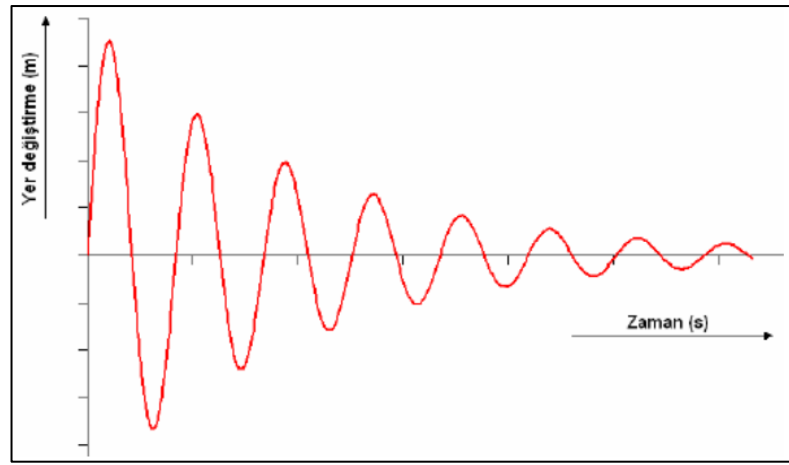
$(C_1 + C_2) = A$ ,  $(C_1 - C_2) = B$ ,  $R = \sqrt{A^2 + B^2}$  ve  $\tan \theta = \frac{A}{B}$  olduğuna göre:

$$x(t) = e^{\frac{-et}{2m}} (C_1 + C_2) \cos \omega_{nd}t + (C_1 - C_2) \sin \omega_{nd}t$$

$$x(t) = e^{\frac{-et}{2m}} A \cos \omega_{nd} t + B \sin \omega_{nd} t$$

$$x(t) = e^{\frac{-et}{2m}} R \sin(\omega_{nd} t + \theta) \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir. 4.6 eşitliği için yer değiştirme-zaman grafiği Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



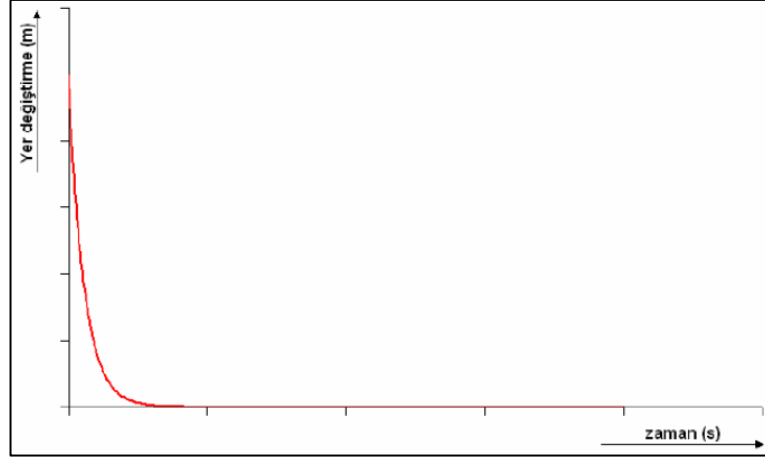
Şekil 4. 5. Sönümlü serbest titreşim hareketi (zayıf sönümlenme) [28].

İkinci olasılık (kritik sönümlenme),  $D = 1$  veya  $c = c_0$  olmasıdır. Bu koşullarda diskriminant değeri sıfırdır. Bu değerın sıfır olması denklemde bir reel kökün olduğu anlamına gelir. Bu olasılık incelendiğinde kütleyle sahip nesnenin salınım hareketine başlayamadığı yani sinüzoidal dalga oluşturamadan sönümlendiği görülmektedir (Şekil 4.6). Bu koşullar sağlandığında denklemin çözüm kümesi aşağıdaki gibi gösterilmektedir [8].

Ç.  $K = \left\{ \frac{-c}{2m} \right\}$  olarak sağlanır. 4.4 eşitliğinin genel çözümü ise:

$$x(t) = e^{\frac{-et}{2m}} (C_1 + C_2 t) \quad (4.7)$$

olarak sağlanır. 4.7 eşitliğinin yer değiştirme-zaman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4. 6. Sönümlü serbest titreşim hareketi (kritik sönümleme) [28].

Üçüncü olasılık (kuvvetli sönümleme),  $D > 1$  veya  $c > c_0$  olmasıdır. Bu koşullarda diskriminant değeri sıfırdan büyüktür. Bu değerin sıfırdan büyük olması denklemde iki farklı reel kök olduğu anlamına gelir. Bu olasılık incelendiğinde ise kütleye sahip nesnenin salınımsız hareket yaptığı görülmektedir (Şekil 4.7). Bu koşullar sağlandığında denklemin çözümleri aşağıdaki gibi gösterilmektedir [8].

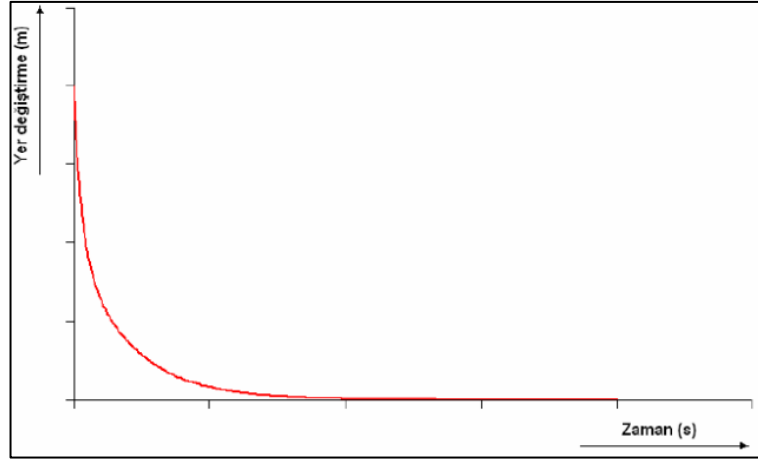
$$b_1 = \frac{-c + \sqrt{(c_0^2 - c^2)}}{2m}, b_2 = \frac{-c - \sqrt{(c_0^2 - c^2)}}{2m} \text{ eşitlikleri elde edilir.}$$

$c = Dc_0$  ve  $c_0 = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n$  eşitlikleri sağlandığında çözümleri:

$$C = \left\{ \left( \frac{-c}{2m} + \omega_n \sqrt{(D^2 - 1)} \right), \left( \frac{-c}{2m} - \omega_n \sqrt{(D^2 - 1)} \right) \right\} \text{ olarak elde edilir.}$$

$x(t) = C_1 e^{\frac{-et}{2m}} e^{\omega_n \sqrt{(D^2 - 1)}t} + C_2 e^{\frac{-et}{2m}} e^{-\omega_n \sqrt{(D^2 - 1)}t}$  denklemini düzenlendiğinde eşitliğin son hali:

$$x(t) = e^{\frac{-et}{2m}} \left( C_1 e^{\omega_n \sqrt{(D^2 - 1)}t} + C_2 e^{-\omega_n \sqrt{(D^2 - 1)}t} \right) \text{ olarak elde edilir.} \quad (4.8)$$



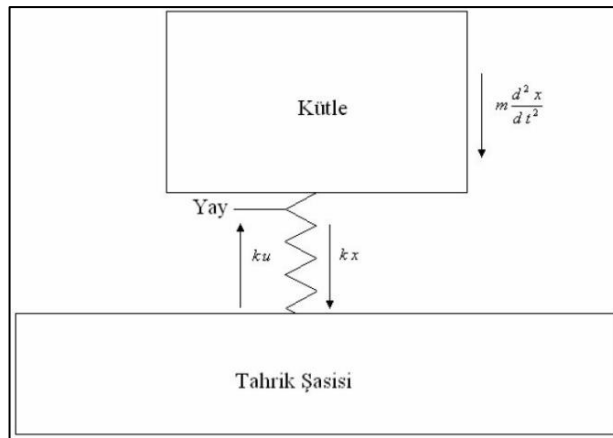
şekil 4. 7. Sönümlü serbest titreşim hareketi (kuvvetli sönümleme) [28].

#### 4.2.2. Zorlanmış Titreşim

Kütleye sahip bir cisim üzerine dışarıdan etki eden kuvvetler ile sistemi salınım hareketine başlatan titreşimlere zorlanmış titreşim adı verilmektedir. Bu titreşim hareketinde sistem, dışarıdan etki eden kuvvetler ile titreştiği kadar kendi doğal frekansı ile de titreşim hareketine zorlanır [8,26,29].

##### 4.2.2.1. Sönümsüz Zorlanmış Titreşim

şekil 4.8’de sönümsüz zorlanmış titreşim sistemi gösterilmektedir.



şekil 4. 8. Sönümsüz zorlanmış titreşim sistemi [28].

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi tahrik şasisi yaya bağlı kütleli  $u(t)$  yer değiştirme hareketi ile salınım hareketine zorlamaktadır. Görülen sistem  $m \frac{d^2x}{dt^2}$  ve  $kx(t)$  iç kuvvetleri ile  $ku(t)$  dış kuvvetlerinin tesiri altındadır. Bu durumlar ele alındığında sistemin diferansiyel eşitliği:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx(t) = ku(t) \quad (4.9)$$

şeklinindedir. Elde edilen eşitliğin diferansiyel çözümü yapıldığı ve gerekli parametreler 4.9 eşitliğinde yerine koyulduğu zaman denklemin gidişatı aşağıdaki gibidir:

$$-mX_o \sin \omega t + kX_o \sin \omega t = kU_o \sin \omega t \text{ eşitliği bulunur [8].}$$

Eşitlik düzenlendiğinde:

$$X_o \sin \omega t (k - m\omega^2) = kU_o \sin \omega t = X_o = \frac{U_o}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \text{ olarak elde edilir.}$$

Eşitliğin gidişatına göre genel çözüm:

$$x(t)_o = \frac{U_o}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \sin \omega t \text{ bulunur. 4.9 numaralı diferansiyel eşitliğinin genel çözümü}$$

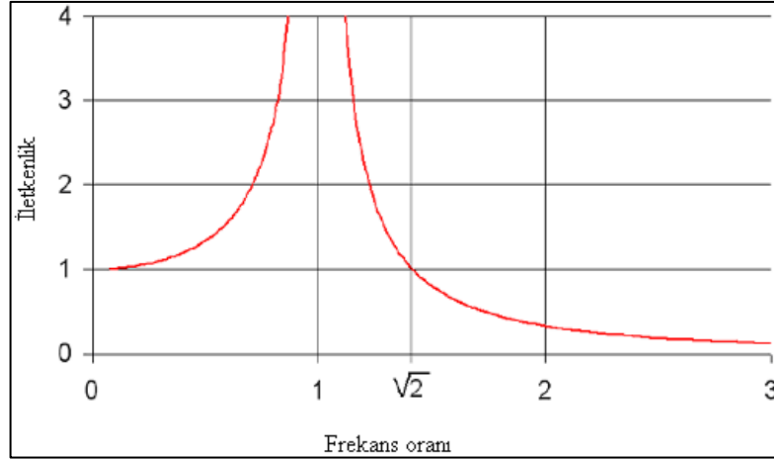
$$x(t) = X_o \sin(\omega_n t + \theta) + \frac{U_o}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \sin \omega t \quad (4.10)$$

olarak elde edilir ve iletkenlik değerini bulmak için eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$\frac{X_o}{U_o} = \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right| \quad (4.11)$$

İletkenlik değeri 4.11 eşitliğinde gösterildiği gibi tahrik edilen sistemin titreşim değerinin tahrik eden sistemin titreşim değerine oranıdır. Tahrik hareketinin frekans değeri ve sistemin sönümsüz doğal frekans değeri, iletkenlik değerine bağlıdır [8,30]. İletkenlik değeri-frekans oranı için oluşturulmuş eğri Şekil 4.9’da görülmektedir.





Şekil 4. 9. Sönümsüz zorlanmış titreşim sisteminde iletkenlik eğrisi [28].

Şekil 4.9’da gösterilen grafik üç farklı durumda incelendiğinde,

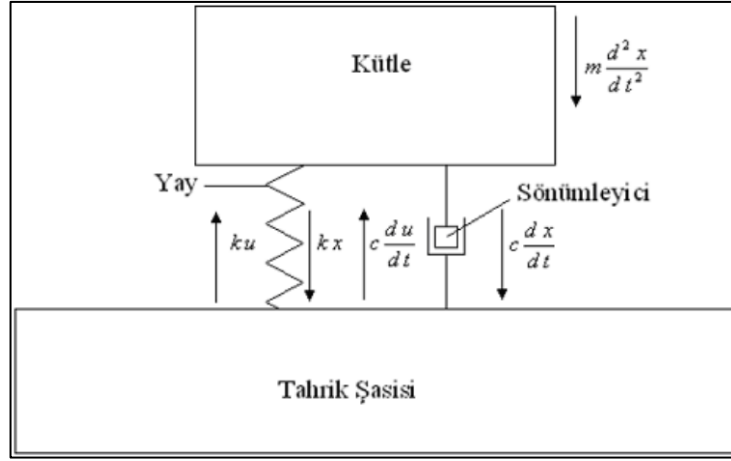
Birinci durum:  $\frac{\omega}{\omega_n} < 1$  bölgesi için iletkenlik değeri görece çok yüksek veya % 100’ün üzerinde olarak yorumlanabilir. Bu bölge için tahrik edilen sistemin titreşim değeri, tahrik eden sistemin titreşim değerinden yüksektir [8].

İkinci durum:  $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$  noktası için 4.11 eşitliğinde de görüldüğü gibi payda sıfır olacağından iletkenlik oranı sonsuza yakınsayacaktır. Bu durum sistemin rezonansa girmesine sebep olmaktadır [8].

Üçüncü durum:  $\frac{\omega}{\omega_n} > 1$  bölgesi için titreşim sistemlerinin ideal çalışma aralığı olarak kabul edilir [8].

#### 4.2.2.2. Sönümlü Zorlanmış Titreşim

Şekil 4.10’da sönümlü zorlanmış titreşim sistemi gösterilmektedir.



Şekil 4. 10. Sönümlü zorlanmış titreşim sistemi [28].

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi tahrik şasisi yaya bağlı kütleli  $u(t)$  yer değiştirme hareketi ile salınım hareketine zorlamaktadır. Görülen sistem  $m \frac{d^2 x}{dt^2}$ ,  $c \frac{dx}{dt}$  ve  $kx$  iç kuvvetleri ile  $ku(t)$  ve  $c \frac{du}{dt}$  dış kuvvetlerinin tesiri altındadır. Bu durumlar ele alındığında sistemin diferansiyel eşitliği:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = c \frac{du}{dt} + ku \quad (4.12)$$

şeklindedir.  $u(t)$  yer değiştirme hareketi ile sistem salınımına maruz kaldığında, sönüm katsayısı olan  $c$  değerinin sıfırdan daha büyük bir değer alması sonucunda doğal frekanstan doğan salınımlar sönümlenmekte ve zorlanmış titreşim frekansına uyumlu titreşim hareketi ortaya çıkmaktadır. Zorlanmış titreşim hareketi sinüzoidal periyodik hareket olmakla beraber basit harmonik hareket ile tarif edilebilir [8,26]. Bu durumlardan yola çıkarak tahrik şasisinin yer değiştirme denklemi:

$u(t) = U_0 \sin \omega t$  olarak gösterilebilir. 4.12 denklemde gösterilen hareket harmonik olduğundan dolayı titreşime maruz kalan sistem de harmonik olmalıdır. Bu durumda hareket denklemi:

$x(t) = X_0 \sin \omega t$  olmaktadır. Bu durumlar ele alındığında ve 4.12 hareket denklemine yerine yazıldığında:

$$-mX_0\omega^2\sin\omega t + cX_0\omega\cos\omega t + kX_0\sin\omega t = cU_0\omega\cos\omega t + kU_0\sin\omega t$$

$$X_0[(k - m\omega^2)\sin\omega t + c\omega\cos\omega t] = U_0(c\omega\cos\omega t + k\sin\omega t)$$

$k = m\omega_n^2$  ve  $c = Dc_0 = D2\sqrt{km} = 2D\omega_n m$  olarak ele alındığında:

$$X_0[(\omega_n^2 m - m\omega^2)\sin\omega t + 2D\omega_n m\cos\omega t] = U_0(2D\omega_n m\omega\cos\omega t + \omega_n^2 m\sin\omega t)$$

$$X_0 m[(\omega_n^2 - \omega^2)\sin\omega t + 2D\omega_n\cos\omega t] = U_0 m(2D\omega_n\omega\cos\omega t + \omega_n^2\sin\omega t)$$

$$X_0 = U_0 \frac{2D\omega_n\omega\cos\omega t + \omega_n^2\sin\omega t}{(\omega_n^2 - \omega^2)\sin\omega t + 2D\omega_n\cos\omega t}$$

$$X_0 = U_0 \frac{\sqrt{4D^2\omega_n^2\omega^2 + \omega_n^4}\sin(\omega t + \theta)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4D^2\omega_n^2}\sin(\omega t + \theta)}, x_0 = U_0 \left[ \frac{\left(2D\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) + \left(2D\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2} \right]^{1/2}$$

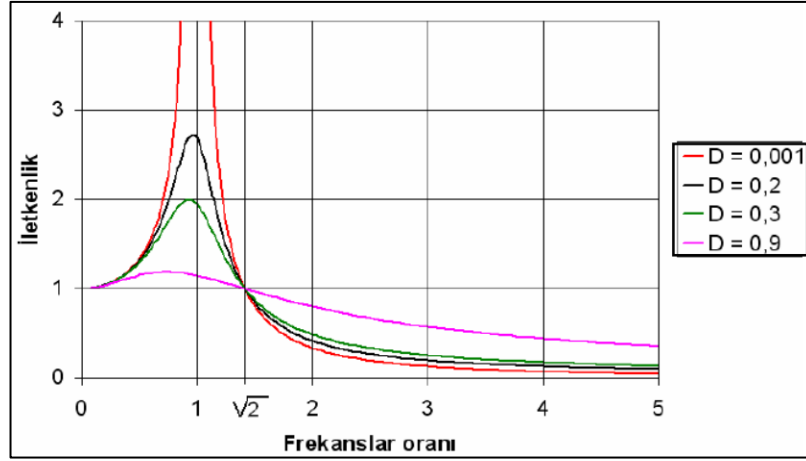
olarak bulunur. Bu eşitliğe göre 4.12 hareketinin diferansiyel çözümü:

$$(t) = U_0 \left[ \frac{\left(2D\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) + \left(2D\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2} \right]^{1/2} \sin\omega t \quad (4.13)$$

elde edilir. Buna göre iletkenlik oranı:

$$\frac{x_0}{U_0} = \left[ \frac{\left(2D\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) + \left(2D\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (4.14)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. 4.14 eşitliğinden yola çıkarak, iletkenlik eğrileri Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 11. Sönümlü zorlanmış titreşim sisteminde iletkenlik eğrisi [28].

Şekil 4.11’de gösterilen grafik üç farklı durumda incelendiğinde,

Birinci durum:  $\frac{\omega}{\omega_n} < \sqrt{2}$  bölgesi için iletkenlik değeri görece çok yüksektir ve sönümleme komponentleri kullanılmalıdır.

İkinci durum:  $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$  bölgesi için iletkenlik değeri en yüksektir. Bu bölge rezonans bölgesi olarak kabul edilir.

Üçüncü durum:  $\frac{\omega}{\omega_n} > \sqrt{2}$  bölgesi için iletkenlik değeri frekans oranları arttıkça azalmaktadır ve sistemin ideal çalışma aralığıdır [8,26].

### 4.3. TIRLAMA TİTREŞİMLERİ

Talaşlı imalat operasyonlarında kesici takıma, iş parçasına ve işleme tezgahının dinamik özelliklerine bağlı olarak gelişen ve bu özelliklerin birbirleri ile etkileşimi sonucunda oluşan istenmeyen titreşime tırlama titreşimi adı verilir. Tırlama titreşimi, kesici takımların kırılmasına, istenilen parça kalitesine ulaşamamasına, lüzumsuz kuvvetlerin iletilmesine ve parça işleme sırasında gürültüye sebep olmaktadır [6,8,26].

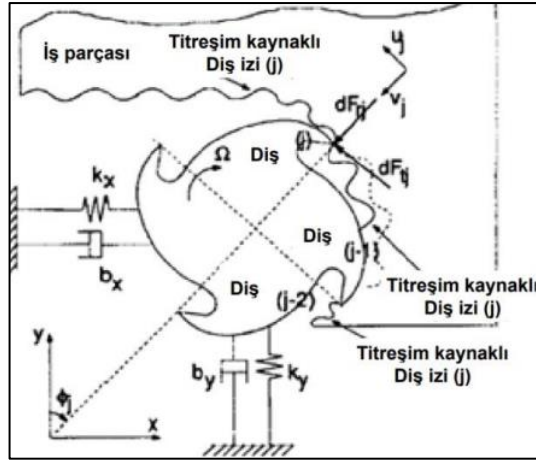
#### 4.3.1. Mod Eşlenmesinden Dolayı Oluşan Tırlama Titreşimleri

Kesme operasyonları sırasında, kesici takımın ilerleme veya tam ters doğrultusunda oluşan titreşimlere mod eşlenmesinden oluşan tırlama denir. Bu titreşim her iki yönlü

titreşimlerin eş zamanlı kesici takıma etki etmesinden dolayı oluşmaktadır. Oluşan bu duruma sistem üzerinde oluşan diğer parametreler de etki etmektedir [26,31].

#### 4.3.2. Kendini Yenileyen Tırlama Titreşimleri

Kesme operasyonları sırasında, kesici takım ucu veya ağzı (j) bir önceki takım ucunun (j-1) iş parçası üzerinde bıraktığı dalgalanmalar ile etkileşime girmesi sonucu oluşan titreşimlere kendini yenileyen veya yenilenebilen tırlama titreşimi denir [26,31]. Kendini yenileyen tırlama titreşim modeli şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 12. Kendini yenileyen tırlama titreşim modeli [31].

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi  $F_{ij}$  ve  $F_{ri}$  kesme operasyonu esnasında, takım ucu ile iş parçası arasında ilk temasın gerçekleştiği yüzey üzerinde oluşan normal ve radyal kuvvetleri temsil etmektedir [31].

#### 4.3.3. Termomekanik Tırlama Titreşimleri

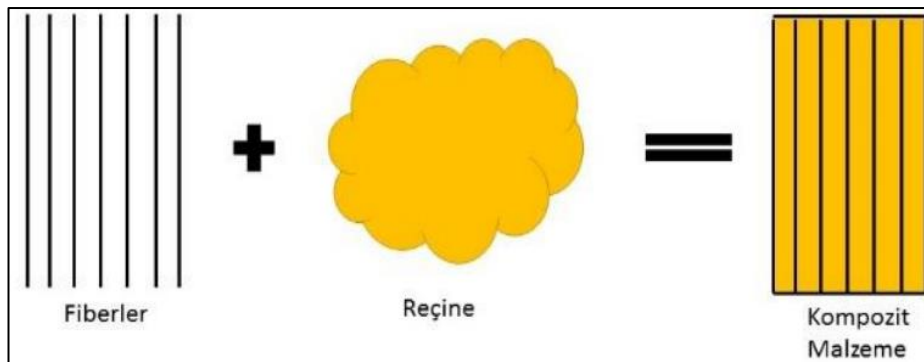
Talaş kaldırma operasyonlarında, talaş oluşumu sırasında plastik deformasyon bölgelerindeki yüksek sıcaklıklar nedeni ile oluşan titreşimlere termomekanik tırlama titreşimi adı verilir. Bu yaklaşım kapsamlı olarak ilk defa Hasting ve arkadaşları (1980) tarafından ele alınmıştır. Ele alınan bu yaklaşımda sıcaklığın ve deformasyon hızının plastik deformasyon bölgelerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu belirlemek için teorik yaklaşım geliştirmişler ve matematiksel olarak ifade etmişlerdir. Bu

yaklaşım, en az sayıda parametreden tahmin yapılarak plastik bölge talaş kalınlığı için asıl olan talaş kalınlığındaki azalma ve kesme hızındaki artış deneysel açıdan ortaya koyulmuştur. Davies ve arkadaşları (1997) yaptıkları çalışmada parçalanmış talaş oluşum mekanizmasını çalışmış ve bu mekanizmanın ilk defa kuramsal temellerini atmışlardır. Bu çalışmada, iş parçasının deformasyon ve termal yumuşama hızının zor olmasının yanında kesme sürekliliğinin formu olduğunu, talaş hızının ihmal edildiğini, kesici takım ve iş parçası ara yüzeyindeki etkileşimlerin elasto-plastik gerilim yasalarına uyacağını ve iş parçasının belli başlı ısılarda yoğunluğunun ve iletkenliğinin sabit kalacağını varsaymışlardır [26].

## BÖLÜM 5

### KOMPOZİT MALZEMELER VE KAPLAMA TEKNOLOJİSİ

İstenilen veya yeni bir özelliği elde etmek amacıyla iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde çeşitli yöntemler ile birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelere kompozit malzemeler adı verilmektedir. Kompozit malzemeler, çok türlü bir yapıya sahip olup makro düzeyde birleştirildikleri için gerekli ekipmanlar ile yapılarının birbirinden ayırt edilmesi mümkündür. Bu malzemelerin özellikleri incelendiğinde yüksek korozyon dayanımı, yüksek mukavemet, hafiflik, titreşimlere karşı sönümlenme özelliği ve ısı dirençlerinin yüksek olduğu, bu özelliklerinin yanında kompozit malzemelerinin üretiminin zor ve maliyetli olduğu, gevrek olduğu ve geri dönüşüme uygun malzemeler olmadığı bilinmektedir. Kompozit oluşum şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Bugün neredeyse her sektörde kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Savunma, havacılık, otomotiv, denizcilik gibi sektörler kompozit malzemelerinin çeşitli ihtiyaçlar doğrultusunda sıklıkla kullanıldığı sektörler arasındadırlar [32–34].



Şekil 5. 1. Kompozit oluşum şeması [32]

## **5.1. KOMPOZİTLERİN TASNİF EDİLMESİ**

Kompozit malzemeler hem matris malzemesine hem de takviye malzemesine göre sınıflandırmaktadırlar. Matris malzemeleri metal, polimer ve seramik iken takviye malzemeleri fiber, parçacık ve tabakalı olarak alt başlıklara ayrılmaktadırlar [32–34].

### **5.1.1. Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Tasnif Edilmesi**

Matris fazı kompozitlerin yapı bütünlüğünü korumakta önemli bir rol oynamaktadır. Bu faz, kompozitlerin üretiminden sonra nihai şekline ulaşmasını sağlamaktadır. Ek olarak takviye elemanına doğrudan gelecek dış etmenlere karşı koruması, kompozit malzemenin üretiminden sonraki aşamada yüzey kalitesinde kritik rol oynaması ve malzeme üzerine etki eden kuvvetleri takviye elemanına aktarması matris fazının diğer özellikleri arasında yer almaktadır [32–35].

#### **5.1.1.1. Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimerler, atom birimlerinin bir veya birden fazla kendini tekrarlaması ile oluşan uzun zincire sahip kovalent bağlı moleküllerdir. Düzenli zincirler halinde bulunan polimerlere yarı-kristal polimerler, rastgele zincirler halinde bulunan polimerlere ise amorf polimerler adı verilmektedir. Bu yapıların birbirleri veya öteki malzemeler ile birleştirilebildiği, talaş kaldırma operasyonlarının kolay olduğu, yoğunlukların düşük olduğu bilinmektedir [34,36].

#### **5.1.1.2. Metal Matrisli Kompozitler**

Elastisite modülünün yüksek olmasının yanında plastik ve hafif metal esaslı malzemelere göre tokluklarının daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu matrise sahip malzemelerin elyaflar ile birleşimindeki bağı yeterince iyi olmadığı için üretimleri zordur [33].



### **5.1.1.3. Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramik matrisli malzemeler aşınma, korozyon, yüksek sıcaklık direncine ihtiyaç duyulan uygulamalarda polimer ve metal matrisli malzemelerden daha iyi mekanik özellikler göstermekle birlikte sıklıkla kullanılmaktadır. Bu özelliklerin aksine düşük kırılma tokluğu ve çekme dayanımlarının düşük olması nedeni ile her uygulamada kullanılamamaktadır. Kullanımını arttırmak amacı ile seramik malzemelerin tokluğu elyaf ve partikül şeklindeki takviye elemanları sayesinde arttırılmaktadır [33,37].

### **5.1.2. Kompozitlerin Takviye Elemanına Göre Tasnif Edilmesi**

Kompozit üretiminde, istenilen malzeme gereksinimlerini sağlamak için takviye elemanları büyük bir rol oynamaktadır. Takviye malzemeleri kendi başlarına kompozit malzemeler ile birleştirilebildiği gibi matris malzemelerinin içerisinde de bulunabilmektedir. Ek olarak sertlik dereceleri kıyaslandığında takviye elemanlarının matris fazına sahip kompozitlerden görece daha sert olduğu bilinmektedir [32–34].

#### **5.1.2.1. Tabaka Takviyeli Kompozitler**

Aynı veya farklı özellikleri içerisinde barındıran, birden fazla tabakanın reçine vasıtasıyla bir araya gelerek birleştirilmesiyle oluşan kompozit yapıya tabaka takviyeli veya plaka takviyeli kompozit adı verilmektedir. Bu yapılarda istenilen özellikler başta mukavemet olmak üzere genel olarak ısı iletkenlik ve sertlik parametreleridir. Tabaka sayısının artması, istenilen veya aranan özelliklerin daha çok sağlanması için elzemdir [32,33,38].

#### **5.1.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler**

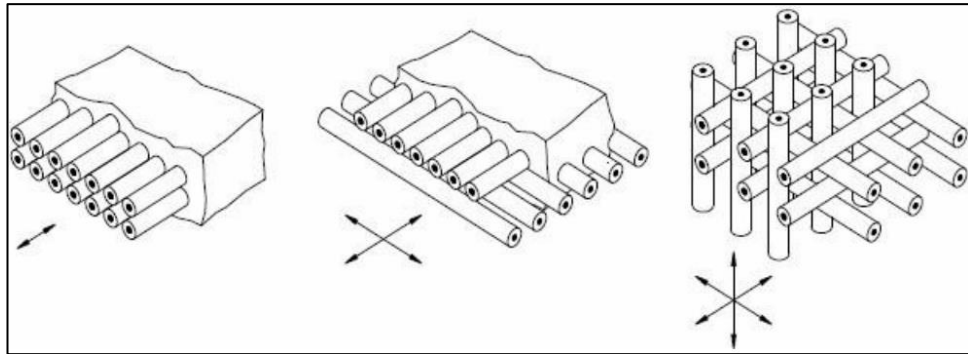
Çeşitli parçacıkların matris malzemesi ile birleştirilmesi sonucu oluşan yapıya parçacık takviyeli kompozit adı verilmektedir. Oluşturulan bu yapıdaki parçacıkların sertlik değerleri yapının mukavemet değerini belirlemektedir. Polimer matrisli malzeme özelinde, eklenen metal bazlı parçacıklar oluşturulan yapının ısı ve elektriksel iletkenliğini, eklenen seramik bazlı parçacıklar ise oluşturulan yapının

sıcaklık ve sertlik dayanımı sağlamaktadır. Ek olarak parçacık takviyesi ile oluşturulan yapılar izotropik özellik göstermektedir [33,39].

### 5.1.2. Fiber Takviyeli Kompozitler

Sürekli veya aralıklı fiberlerin matris malzemesi ile birleştirilmesi sonucu oluşan yapıya fiber takviyeli kompozit adı verilmektedir. Bu takviye malzemesi genel olarak oluşturulan yapının sünekliğinin, rijitliğinin ve dayanımının arttırılmasında önemli bir rol oynamaktadır [32–34].

Kompozit sisteminde kullanılan fiberlerin farklı açılarda serimi veya yerleşimi, oluşturulan malzemeye farklı mekanik özellikler katmaktadır. Fiberlerin matris malzemesine serimi temelde üç farklı yön formasyonu ile oluşturulmaktadır. Bu formasyonlar Şekil 5.2’de gösterilmektedir [32–34].



(a)

(b)

(c)

Şekil 5. 2. Fiberlerin farklı yönlerden serim formasyonları, a) tek yönlü serim, b) iki yönlü serim, c) üç yönlü serim [40].

Tabaka takviye malzemelerinde olduğu gibi fiber takviye malzemelerinde de eleman sayısı arttıkça istenilen özelliklere ulaşılma oranı artmaktadır. Ancak fiber seriminde, belirli bir fiber sayısına ulaşıldıktan sonraki fiber serimleri yapısal dayanımı azalmaktadır. Bu olay fiber sayısının artışı ile orantılı olarak kompozit sistemdeki polimer oranının düşmesi olarak yorumlanabilir. Bu oranın düşüşü ile matris sistemdeki fiber tutuculuğu giderek azaltmaktadır. Ek olarak kompozit sistemi

hazırlanırken fiberin mekanik özellikleri ve serim şekli, fiber kalınlığı ve hacim oranı dikkate alınmalıdır [32–34].

## 5.2. KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER (CFRP) KOMPOZİTLER

Mukavemet ve hafiflik yönünden üstün özellikler sergileyen karbon fiber takviyeli kompozitler 1960 yılından itibaren kullanılmaktadır. Uzay ve havacılık alanında sıklıkla tercih edilen bu malzemeler, gelişen otomotiv sektöründe de son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Ek olarak inşaat sektöründe konstrüksiyon dayanımının yetersiz görüldüğü koşullarda, konstrüksiyonu güçlendirme maksadı ile kullanılmaktadır [32,34].

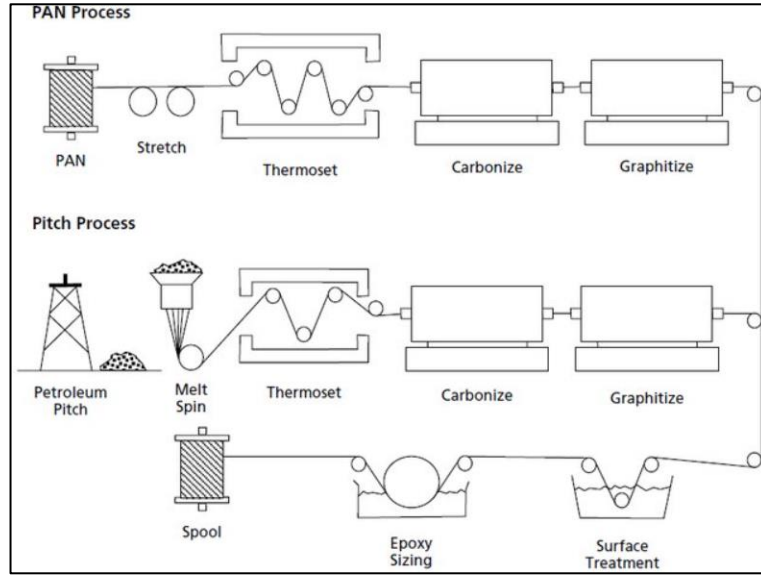
Çekme dayanımının karbon içeriğinden dolayı yüksek olmasının yanında yüksek elastisite modülü, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek kırılma tokluğu, yüksek boyutsal kararlılık, yüksek korozyon direnci ve iyi elektrik iletkenliği özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerin aksine maliyeti yüksek bir malzemedir. Karbon fiber takviyeli kompozitler, ortalamada 6-10 µm çap aralığında olan karbon fiberlerin polimer fazına çeşitli yöntemler ve serim açıları ile eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Literatürde muhtelif parametreler ile üretilen CFRP malzemeleri bulunmaktadır. Çizelge 5.1’de muhtelif CFRP malzemelerinin bir kısmı gösterilmektedir [34,35,41].

Çizelge 5. 1. Muhtelif CFRP malzemeleri [42].

Tür	Fiber Çapı (µm)	Çekme Dayanımı (GPa)	Young Modülü (GPa)
Genel maksatlı	7-15	0,7	40
Yüksek verimli	9-11	5	350
Yüksek verimli (poliakrilonitril (PAN))	4-8	2	200-800
Etkinleştirilmiş karbon fiberler	7-15	0,2	1500

### 5.2.1. CFRP Kompozit Malzemesinin İmalat Yöntemleri

En temelde CFRP malzemesinde kullanılan fiberlerin hammaddeleri çeşitli üretim aşamalarından geçerek (Şekil 5.3) genel olarak zift ve poliakrilonitril (PAN) 'den elde edilmektedir. PAN hammaddesine sahip fiberler sağlamlık ve hafiflik yönünden sürekli geliştirilirken zift hammaddesine sahip fiberler daha düşük mekanik özelliklere sahip oldukları için yapısal alanlarda her zaman kullanılamazlar. PAN hammaddesini tekrardan ele aldığımızda; sırasıyla oksidasyon, karbonizasyon, yüzey iyileştirmesi ve kaplama aşamalarından geçerek matris fazına eklenebilecek nihai ürün ortaya çıkmaktadır [32–34].



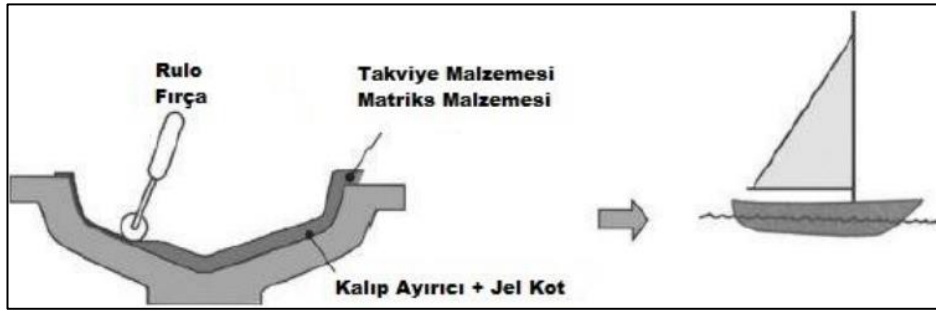
Şekil 5. 3. PAN ve zift hammaddesine sahip fiberlerin üretim süreçleri [43].

CFRP kompozitlerin üretimlerinde gerekli isterlere veya ihtiyaçlara göre muhtelif imalat yöntemleri mevcuttur. Muhtelif imalat yöntemlerinde işlem süreleri, maliyetler vb. parametrelerinde farklılıklar oluşmaktadır [32].

#### 5.2.1.1. Elle Serme Yöntemi

Elle yatırma yöntemi olarak da bilinen elle serme yöntemi hem üretim maliyetinin kolay olmasından hem de üretim aşamalarının diğer üretim yöntemlerinin aşamalarına göre daha basit olmasından dolayı kompozit imalatında en çok kullanılan ve tercih

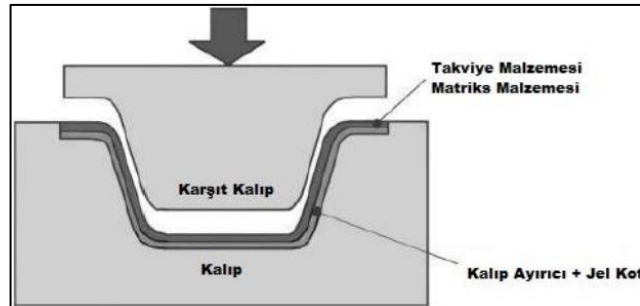
edilen yöntemler arasındadır. Yöntem incelendiğinde, ilk aşamada malzemenin serileceği kalıba kalıp ayırıcı ve duruma göre jel kot uygulaması yapılır. İkinci aşamada, ekipmanlar yardımı ile takviye malzemeleri kalıp üzerine uygulanarak en az miktarda hava kalması sağlanır. İstenilen malzeme kalınlığı elde edilene kadar ilk iki aşama tekrar edilir. Son aşamada, yeterli sertliğe ulaşan malzeme kalıptan çıkarılır [32–34]. Şekil 5.4’ de elle serme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5. 4. Elle serme yöntemi [44].

#### 5.2.1.2. Hazır Kalıplama Yöntemi

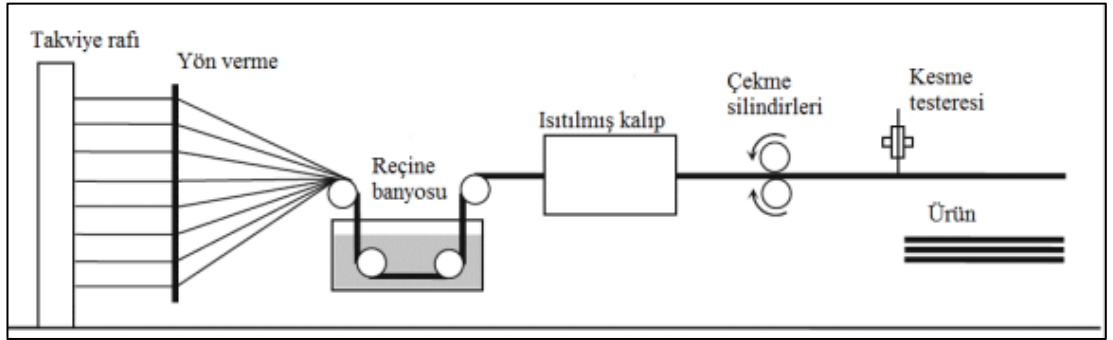
Elle yatırma yöntemi ile kıyaslandığında, aralarındaki en belirgin fark karşılık kalıbının olmasıdır. Bu karşılık kalıbı malzemeyi basınçlı şekilde sıkıştırılır. Seri üretim için uygun olan bu yöntem karmaşık geometrilerin üretimi, muhtelif malzeme kalınlıklarının elde edilmesi gibi avantajlara sahiptir [32–34]. Şekil 5.5’te hazır kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5. 5. Hazır kalıplama yöntemi [44].

### 5.2.1.3. Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi

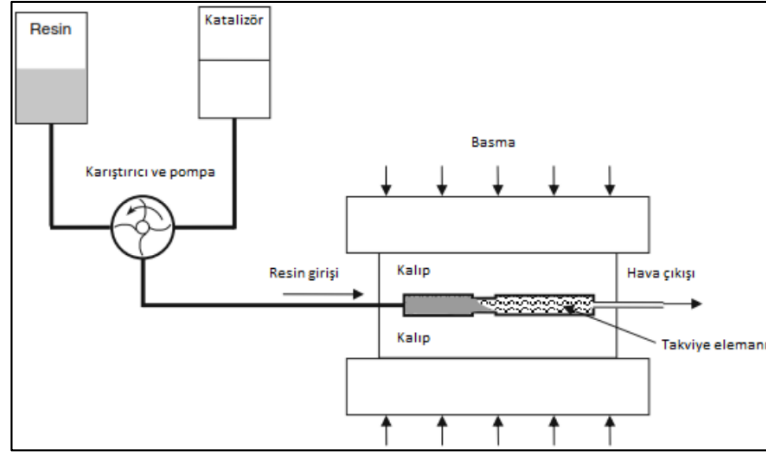
Takviye elemanı emdirilmiş malzemenin ısıtılmış belirli kalıplar ile çekilerek oluşturulduğu yönetime profil çekme veya pultrüzyon yöntemi adı verilmektedir. Bu yöntem metal ekstrüzyon yöntemlerine benzemektedir. Görece az maliyetli ve seri imalat işlerine uygun bir imalat yöntemi olarak kabul edilebilir [32–34]. Şekil 5.6’da profil çekme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5. 6. Profil çekme yöntemi [42].

### 5.2.1.4. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

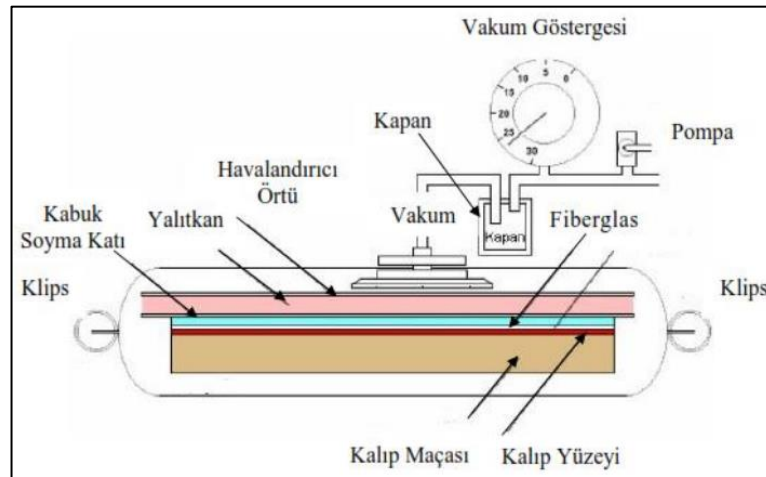
Sıvı transfer kalıplama olarak da bilinen bu yöntemde karşılıklı iki kalıp kullanılmaktadır. İmalat süreci, karşılıklı iki kalıp içerisine enjekte edilen kuru malzeme ile başlamaktadır. Bu işlem tamamlandıktan sonra kalıplara belirli sıcaklıklar uygulanır. Yapılan bu işlem kalıbın içerisindeki malzemenin katılarak şekil almasını sağlar [32,34]. Şekil 5.7’de reçine transfer kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5. 7. Reçine transfer kalıplama yöntemi [42].

### 5.2.1.5. Vakumlu Kalıplama Yöntemi

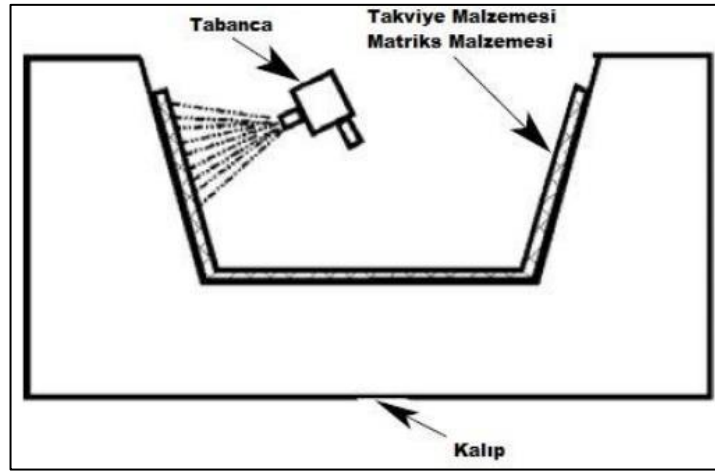
Malzemenin kalıba serilmesinin ardından vakum torbası ile kapatılarak torbadaki havanın emilmesi ile kompozit oluşturma işlemine vakumlu kalıplama yöntemi adı verilmektedir. Oluşturulan bu işlem sürecinde torbadaki basınç malzemeye yapışmaktadır. Ardından şekil alan malzeme fırın vasıtası ile belirli sıcaklıklarda takviye elemanının kür işlemi için ısıtılmaktadır [32–34]. Şekil 5.8’ de vakumlu kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5. 8. Vakumlu kalıplama yöntemi [37].

### 5.2.1.6. Püskürtme Yöntemi

Matris ve takviye malzemesinin bir püskürtme tabancası ile aynı anda kalıba püskürtülerek kompozit malzeme oluşturma yöntemine püskürtme yöntemi adı verilmektedir. Püskürtme aşaması uygulandıktan sonra malzeme genellikle oda sıcaklığında katılaşmaya bırakılmaktadır. Ayrıca bu yöntem elle serme yöntemine benzemektedir. Kayık, tekne vb. gibi denizde kullanılan araçlarının imalatında sıklıkla tercih edilmektedir [32–34]. Şekil 5.9’da püskürtme yöntemi gösterilmektedir.

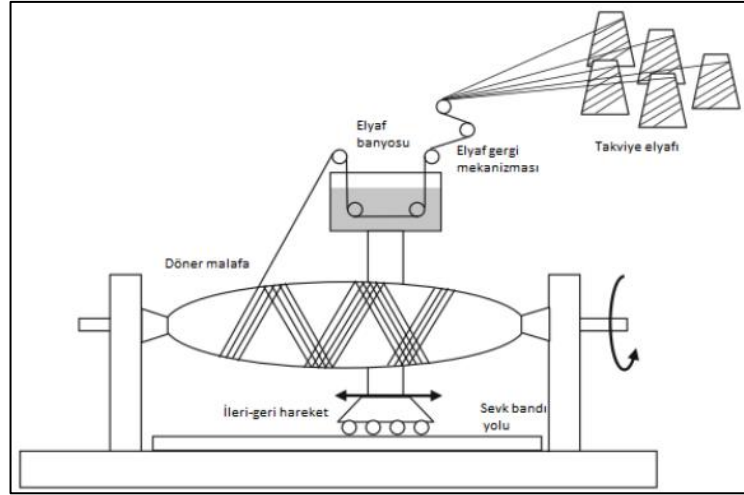


Şekil 5. 9. Püskürtme yöntemi [35].

### 5.2.1.7. Filaman Sarım Yöntemi

Takviye elemanı emdirilmiş fiberlerin dönen bir silindir veya malafa yardımı ile çekilerek sarılması işlemine filaman veya elyaf sarım yöntemi adı verilmektedir. Sarılan bu malzeme isterler doğrultusunda belirli kalınlık ve mekanik özelliklere kavuşturularak nihai ürün elde edilir [32,34]. Şekil 5.10’da filaman sarım yöntemi gösterilmektedir.

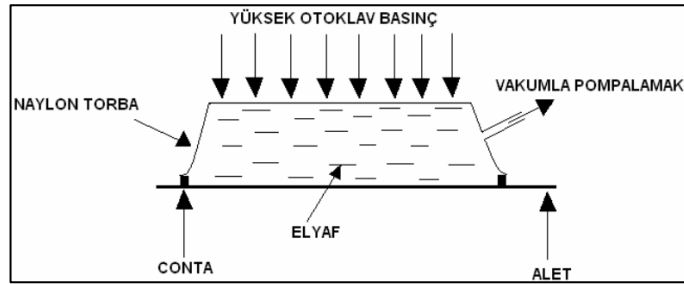




Şekil 5. 10. Filaman sarım yöntemi [45].

### 5.2.1.8. Otoklav Yöntemi

Özel uygulamalarda yüksek kaliteli kompozit üretimi için uygulanan bu yöntemde ısı, basınç vb. gibi parametreler doğrudan kontrol altında tutulabilmektedir. Diğer yöntemlere kıyasla maliyeti yüksek ve imalat süreleri uzundur [32,34]. Şekil 5.11’de otoklav yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 5. 11. Otoklav yöntemi [34].

## BÖLÜM 6

### SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler genellikle fiziksel durumların matematiksel yorumudur. Bu durumlar yapılan uygulamalara göre görece karmaşık olabilmektedirler. Karşılaşılan bu karmaşık problemlerde, lineer olmayan bir diferansiyel denklem ile karşılaşıldığında oluşturulan matematiksel modelin çözülmesi çok zor hale gelmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), bu diferansiyel denklemlerin yaklaşık olarak çözülebildiği sayısal bir yaklaşımdır [46–48].

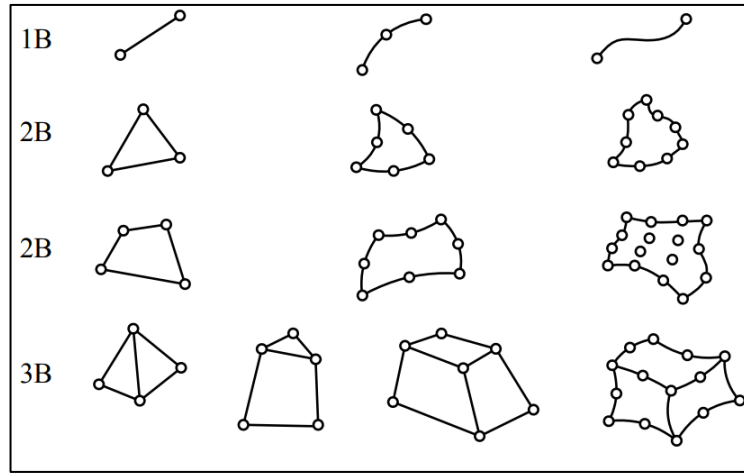
Sonlu elemanlar uygulamaları hem akademide hem de sanayide sıklıkla kullanılmaktadır ve geniş bir yelpazeye sahiptir. Sonlu elemanlar uygulamalarının kullanıldığı bazı çeşitli alanlar şu şekildedir [48]:

- Otomotivde kullanılan motorlar, hava araçları, vanalar, basınçlı kaplar, elektronik çipler ve cihazlar gibi parçaların gerilme ve termal analizlerinde;
- Tren, otomobil ve hava araçlarının çarpışma analizlerinde;
- Bina, baraj ve enerji santrallerinin sismik analizlerinde;
- Soğutma sıvıları, havalandırma sistemleri ve tesisat sistemlerinin akış analizlerinde;
- Transistör ve antenlerin elektromanyetik analizlerinde;
- Plastik cerrahi ve çene konstrüksiyonunun cerrahi prosedürlerinin analizlerinde kullanılmaktadır.

## 6.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNDE KULLANILAN ELEMANLAR

SEY' nin temelinde, girdi model veya cisimi sonlu elemanlara bölmektir. Bölünen bu yapılara genellikle "eleman" adı verilir. Bölünen bu elemanlar düğüm noktaları ile bağlanır. Bağlanan bu yapılar birleşerek ağ (mesh) yapısını oluşturur ve model ağ sistemi ile donatılmış olur [20,46].

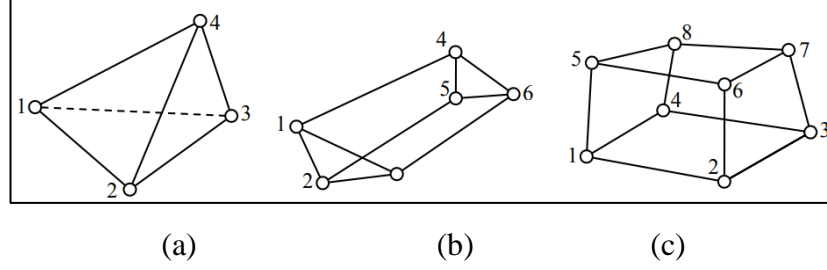
Eleman türünün belirlenmesi ve ağ yapısının oluşturulması, sonlu elemanlar analiz çözümlerinin temel taşıdır. Eleman türünün belirlenmesinde, girdi modelin veya cismin geometrik yapısı önemli bir değişkendir. Eleman türleri temel olarak üç gruba ayrılır: Bir boyutlu elemanlar (1B), iki boyutlu elemanlar (2B), ve üç boyutlu elemanlar (3B). Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan muhtelif elemanlar Şekil 6.1' de gösterilmektedir [20,46].



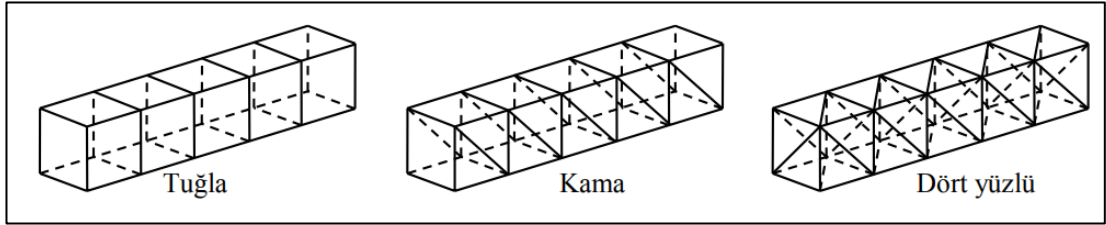
Şekil 6. 1. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan muhtelif elemanlar [20].

Sonlu elemanlarda kullanılan 2B eleman geometrileri üçgen ve dörtgen (quadrilateral) olarak temelde iki standart geometriye sahiptir. Bu standart geometrilerin dışındaki daha çok kenarlı geometriler (Şekil 6.2) özel yapılar olarak isimlendirilir. 3B sahip geometrilerde ise, dört yüzlü (tetrahedron) (Şekil 6.2a), kama (wedge) (Şekil 6.2b) ve altı yüzlü (hexahedron) (Şekil 6.2c) olarak isimlendirilen üç adet standart geometrileri mevcuttur. Bu geometrilerin düğüm noktaları veya köşeleri, dört yüzlü için dört, kama

için altı ve altı yüzlü için altı adettir. Bu geometriler harici veya dahili geometriler ile birleşerek düzenli ağ yapısını oluştururlar (Şekil 6.3).

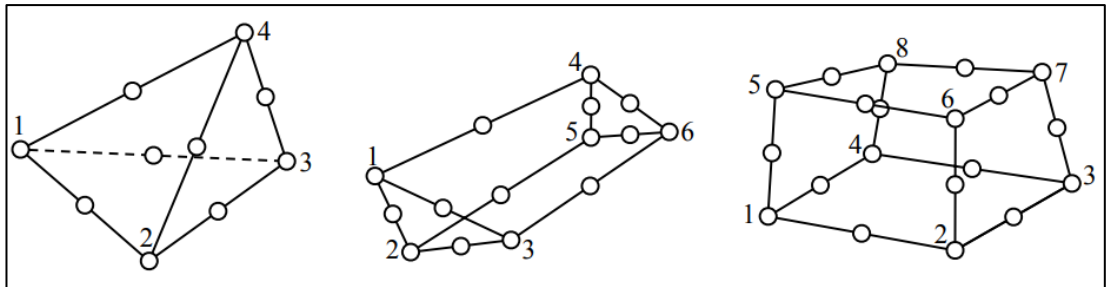


Şekil 6. 2. 3B standart eleman geometrisi, a) dörtyüzlü, b) kama , c) altıyüzlü [20].



Şekil 6. 3. 3B elemanlar ile oluşturulan ağ yapıları [20].

Bahsedilen 3B elemanlarda ek düğümler (Şekil 6.4) kullanılabilir. Kullanılan bu düğümler, sonlu elemanlar analizlerinde yaklaşık çözüm değerlerinin doğruluğunu arttırmaktadır [20,46].



Şekil 6. 4. 3B elemanlarda ek düğümlerin yerleşimi

## 6.2. RİJİTLİK MATRİSİ (STIFFNESS MATRIX)

Rijitlik matrisi, elemanın alt ve üst bölgelerinde oluşan gerilmeleri yine alt ve üst bölgelerinde oluşan yer değiştirmeler ile ilişkilendiren bir matris olarak tanımlanmaktadır [49].

Sonlu elemanlar yönteminde ağ yapısı oluşturulduktan sonra her bir eleman için rijitlik matrisi hesaplanır. Bu elemanlar hesaplandıktan sonra tüm sistem için bir rijitlik matrisi oluşturulur. Problemin çözümünde yer değiştirme değerlerinin hesaplanması, elemanları birbirlerine bağlayan düğüm noktaları üzerinden aktarılan kuvvetlerin her bir eleman için tatbik edilmesi ile oluşmaktadır. Bununla birlikte, yer değiştirme değerlerinin bulunması ile gerilme değerleri bulunur. Sistemdeki elemanlar, yay sistemine benzer bir hareket sergilerler ve sistem statik duruma geçene kadar şekil değiştirmeye devam ederler. Bu durum, çözülmesi gereken doğrusal denklem sistemlerini de ifade etmektedir. Rijitlik matrisinin bulunmasındaki denklem incelendiğinde;  $\{f\}$  elemana tesir eden kuvvetlerin vektörü,  $[k]$  elemanın rijitlik matrisi ve  $\{u\}$  elemanın düğüm noktalarındaki yer değiştirme vektörü değerleri Eşitlik 6.1 gibi ifade edilebilir [46].

$$\{f\} = [k] \cdot \{u\} \quad (6.1)$$

Sistemdeki tüm elemanlar için ise;  $\{F\} = \sum \{f\}$  düğüm noktalarının her biri için dış kuvvetler,  $\{K\} = \sum \{k\}$  sistemin rijitlik matrisi ve  $\{U\}$  yer değiştirme vektörü olmak üzere Eşitlik 6.2 gibi ifade edilebilir [46].

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (6.2)$$

## BÖLÜM 7

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 7.1. TİTREŞİM ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Quadri ve Namazi, takım aşınmasının yapısı ile makine titreşimi arasındaki ilişkinin analizini gerçekleştirmişlerdir. Fraktal analiz metodunu kullanılarak makine titreşim sinyalinin fraktal boyutu araştırılmış, analiz sonuçlarında takım aşınmasının fraktal boyutunun titreşim sinyalinin fraktal boyutu ile ters orantılı olduğunu saptamışlardır [50].

Zahaf ve Bengerhersallah, işlenmiş yüzey pürüzlülüğünün istatistiksel analizini, matematiksel modellemesini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünü ve işleme sırasında kaydedilen cevap faktörleri olarak kabul edilen iş parçası titreşim-yer değiştirmelerinin seviyesini belirlemek için 27 testten oluşan bir Taguchi deney planı benimsemişlerdir Her bir kesme parametresinin frezelenmiş yüzey pürüzlülüğü ve yer değiştirmeleri üzerindeki etki derecesini göstermek için varyans analizi ve matematiksel regresyon modellerini benimsemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlar, test edilen iki çelik durumu için, kesme hızının ve diş başına ilerlemenin, frezelenmiş yüzey pürüzlülüğü evrimi üzerinde en etkili faktör olduğunu göstermiştir [51].

Leder ve arkadaşları, kenar talaşını tanımlamak için dönen sensörün ve alet sisteminin titreşim verilerinin yorumlanmasını sağlayan bir model ortaya koymuşlardır. Kesme bölgesine yakın bir ölçüm aletini takım tutucu tarafından yapılan titreşim algılamanın, tırlamayı azaltmada yararlı olduğunu kanıtlanmışlardır. Gözledikleri etkilerin sınıflandırılmasını, deneysel sonuçlarla gösterilen ve değerlendirilen makine öğrenimi için geliştirilen yöntemlerden türetmişlerdir [52].

Kannan ve arkadaşları, monel alaşımının parmak frezeleme işlemi sırasında oluşan titreşimleri incelemişlerdir. Sonuçlar Monel alaşımının işlenmesi sırasında freze makinesinin iş mili hızı ile takım aşınması artacağını, varyans analizinde kuvvet değerinin daha yüksek olması, iş mili hızının daha düşük ilerleme ivmesi elde etmek için etkileyen parametrelerin olduğunu, kesme derinliği, iş mili dönüş hızı ve parmak frezeleme işleminin ilerleme hızı parametreleri, daha düşük ilerleme ivmesi elde etmek için bağımlı parametreler olduğunu ortaya koymuşlardır [53].

Wan ve arkadaşları, titreşim sönümleyici bölgesini optimize ederek iş parçasının frezeleme-düzeltilme işleminde titreşimleri azaltmayı hedeflemişlerdir. Kenar frezeleme işlemindeki iş parçası gibi, sönümleyicinin yerleşimi optimize edilerek sönümlemenin artırılacağını yapılan deneyler ile bu yöntemin titreşim emici düzeninin mod katılım katsayısı ve iş parçasının tepkisi üzerindeki etkisini tahmin edebileceğini göstermişlerdir [54].

Das ve arkadaşları, yüksek hızda mikro frezeleme için titreşimsiz makine yapısının bir tasarım yaklaşımını sunmuşlardır. Tasarım metodolojisinde malzeme seçimi, makine yapısının modellenmesi ve montajını içermektedir. Montajı yapılan modelin statik, modal ve harmonik tepki analizlerini SEY ile analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuç çıktılarına göre optimal titreşimsiz modeli belirlemeyi amaçlamışlardır [55].

Ostasevicius ve arkadaşları, gelişmiş kesme verimliliği için takım titreşim modu kontrolünün en etkili koşullarını belirlemek amacıyla, geliştirilen piezoelektrik uyarılmış titreşimli delme aletinin dinamik davranışını karakterize etmek için sayısal-deneysel yaklaşımını benimsemişlerdir. Hem temaslı hem de temassız vibrometrik ölçümler, kesme kuvvetlerinin ve torkların dinamo metrik ölçümleri ve yüzey kalitesi karakterizasyonu dahil olmak üzere geniş bir deneysel çalışma yelpazesi gerçekleştirilmiştir. En uygun takım uyarma koşulları belirlenmiştir: titreşimli delme aletinin aksenal modunun oluşturulması, en yüksek yüzey kalitesine ve en düşük kesme kuvvetlerine-torklarına yol açtığını gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmada, kesme sırasında üst üste binen yüksek frekanslı titreşimlerin maksimum pozitif etkisini sağlamada etkili takım modu kontrolünün önemini doğrulamaktadır [56].

## 7.2. KOMPOZİT KAPLAMALAR ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yenilmez, kalça protezlerinin hareketi sırasında oluşan aşınma ve sürtünme dayanımını arttırmak için kompozit malzeme kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Protez malzemesi olan Ti6Al4V, Ultra Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE)-Hidroksiapatitin (HAp) kompozit malzemeleri ile kaplanmıştır. Sonuçlar, UHMWPE polimer matrisine ilave edilen HAp miktarı arttıkça mekanik özelliklerin arttığı ve titanyum alaşımının sürtünme katsayısının 0.4'ten 0.02 değerlerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir [57].

Alemdar, çelik köprüler üzerinde deformasyon kaynaklı yorulma hasarının onarılması için kompozit malzeme kaplama çalışmasını gerçekleştirmiştir. Çalışmanın ilk kısmında yorulmaya uğrayan çelik kirişler üzerindeki çatlakların yapısını incelemek adına sonlu elemanlar metodu kullanmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında, farklı kalınlıklardaki 15 adet CFRP numune malzemesi ile köprü onarımını gerçekleştirmiştir. Sonuçlar kompozit kaplama yönteminin uygulanmasının çatlak değerlerini en aza indirebildiğini göstermektedir [58].

Aydın, St37 çelik malzemesi üzerine farklı akım türleri kullanarak nikel ve nikel-grafen kompozit malzemelerini kaplama işlemini gerçekleştirmiş, akım yoğunluk değerinin çeşitli akım türlerinde oluşturulan kompozit kaplamaların özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar en yüksek aşınma hızının ve en düşük sertlik değerinin pulse reverse akım ile üretilen kompozit kaplamada, en yüksek sertlik ve en düşük aşınmanın pulse ve doğru akım ile üretilen kompozit kaplamalarda olduğunu ortaya koymuştur [59].

Akgün ve Kara, AA (Aluminium Alloy) 6061 alaşımının kaplamasız ve PVD-TiB2 kaplı kesici uçlarla tormalanmasında kesme kuvveti (Fc) ve işlenmiş yüzeyin analizine odaklanmışlardır. Tormalama testleri, Taguchi L18 (21 × 33) dizisine dayalı kuru kesme koşulları altında bir CNC tormalama üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tormalama parametrelerinin Fc ve Ra üzerindeki etki düzeylerini tanımlamak için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Sonuçlar Fc ve Ra açısından en iyi performansın kaplamasız bir kesici uçta, 350 m/dak kesme hızında, 0,1 mm/dev ilerleme hızında ve 1 mm kesme



derinliğinde elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, ilerleme hızı sırasıyla %64,28 ve %54,9 ile Ra ve Fc üzerinde en etkili parametre olduğunu göstermiştir. Kesme kuvveti (Fc) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) için geliştirilen matematiksel modeller, sırasıyla %96,04 ve %92,15 belirleme katsayıları ( $R^2$ ) ile güvenilir sonuçları ortaya koymuşlardır [60].

Pimenov ve arkadaşları, delik yüzey pürüzlülüğünü, formunu ve boyutsal toleranslarını araştırmak için AA 6061 malzemesini yekpare karbür matkaplar kullanmışlardır. Kullanılan karbür matkaplar üç farklı kaplama ile kaplanmışlardır. Bu kaplamalar TiN (Titanyum Nitrür) -TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrit), TiAlN ve TiN olmak üzere üç farklı takım kaplaması durumunda AA 6061 malzemenin delinme performansını araştırmışlardır. Sonuçlar, TiN-TiAlN kaplı takımların en kötü delik silindirikliğine sahip olduğunu, bunu ardından TiAlN ve TiN takımlarının olduğunu göstermişlerdir [61].

Sousa ve arkadaşları, geleneksel TiAlN kaplamaların kompozisyonuna Si elementinin eklenmesinin takım aşınması üzerindeki etkilerini incelenmesini amaçlamışlardır. İki farklı takım geometrisi kullanılmış bunlardan birisi parmak freze takımı ikincisi ise küre freze takımıdır. Diş başı ilerleme sabit tutulmuş, üç farklı kesme hızı ve iki farklı kesme uzunluğu belirlenmiştir. Parmak freze takımı için TiAlSiN kaplamasının TiAlN kaplamasına göre benzer aşınma dirençleri gösterse de TiAlSiN kaplaması daha iyi aşınma direnci göstermiş bununla birlikte küre freze takımı için aynı kaplamalar analiz edildiğinde TiAlSiN kaplamasının takım aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığını göstermişlerdir [62].

Gökkaya ve arkadaşları, takım-iş parçası ısıl çift yöntemiyle takım-talaş temas yüzey sıcaklığı üzerinde kaplama malzemesinin etkisini araştırmışlardır. AISI 1040 çeliği ile yapılan bu deneylerde kullanılan takım kaplama malzemelerinin kesme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak takım-talaş temas yüzey sıcaklığının değişimlerini incelemişlerdir. Sonuçlar kesme hızının sıcaklık açısından daha mühim bir parametre olduğunu ve ilerlemenin etkisinin daha az olduğunu göstermişlerdir [63].

Bektaş ve Samtaş, Alüminyum 6061-T651 alaşım sınıfına ait iş parçasına yüzey frezeleme işlemleri gerçekleştirerek kesme parametrelerinin kesici takım aşınmasına etkilerini araştırmışlardır. PVD ve CVD kaplama tekniklerini ve üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı parametrelerini kullanmışlardır. Deney tasarımı ve optimizasyonu yöntemi olarak Taguchi L9 (3<sup>3</sup>) metodu kullanılmıştır. Deney sonrasında varyans analizi (ANOVA) metodundan faydalanmışlardır. Deney sonrası takım aşınması durumuna bağlı olarak Taguchi yöntemi ile optimizasyonu amaçlamışlardır [64].

Şahin, 60 HRC sertliğe kadar sertleştirilmiş AISI 1050 karbon çeliklerinin işlenmesinin araştırılmasını ve çeşitli kesici takımların farklı koşullar altında takım ömrünü ve aşınma davranışının belirlenmesini gerçekleştirmiştir. Bu deneyler kaplanmış seramik kesici takımlar ve karbür kesici takımlar kullanılarak yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kaplanmış seramik takımların, sertleştirilmiş çelikleri işlerken kaplanmış karbür takımlardan daha iyi performans sergilediğini göstermiştir [65].

Li ve arkadaşları, farklı kaplamalı takımlar kullanarak Ti-CFRP stok malzemesinin helisel frezeleme performanslarını karşılaştırmışlardır. Takım aşınma morfolojisi, bozulma mekanizmaları ve delik yüzey kalitesini detaylı olarak incelemişlerdir. Araştırma bulgularında, kaplamasız WC-Co takımların Ti-CFRP stok malzemesinin işlenmesi için elmas, TiAlN+AlCrN veya TiAlN malzeme kaplı takımlara göre daha uygun olacağı sonucuna varmışlardır [66].

Uddin ve arkadaşları, Ti6Al4V malzemesinin frezeleme operasyonunda kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür takımların aşınmasını karşılaştırmışlardır. TiAlN kaplamalı takım, 16 m'lik bir kesme mesafesinde kaplamasız takıma göre yaklaşık %44 daha düşük kenar aşınması ile daha uzun takım ömrü sergilediğini göstermişlerdir [67].

Liu ve arkadaşları, Ti6Al4v malzemesinin kuru frezelemesi esnasında AlTiN ve TiAlSN kaplanmış karbür kesici takımlarının kesme performanslarını ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. 100 m/dk'lık kesme hızında, her iki kaplamada benzer kesici takım ömrü sergilemiştir. Kesme hızı 150 ve 200 m/dk'ya yükseltildiğinde,

TiAlSiN kaplamasının takım ömrü AlTiN kaplamasının takım ömrüne göre oldukça yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır [68].

Aykut ve arkadaşları, TiN-TiCN (Titanyum Karbon Nitrür) -TiAlC (PVD) kaplamalı ve kaplamasız sert kesici uçlar kullanarak kobalt (Co) bazlı süper alaşımın yüzey frezeleme kesici takımı ile frezelemesinde oluşan kuvvetleri deneysel olarak ölçmeyi amaçlamışlardır. Sonuçlar, kesme derinliğine ve ilerleme oranına göre kesme kuvvetlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ek olarak kesme hızlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi gözlemlenememiş, kesme hızının takım aşınmasını hızlandıran bir faktör olduğunu ortaya koymuşlardır. Son olarak kesme kuvvetleri bazen kesme hızı ile artacağını ve azalacağını göstermişlerdir [69].

Lakshmanan ve Xavior, kaplamalı ve kaplamasız kesici uçların AISI 1030 çeliğinin aralıklı frezelemesindeki performanslarının ölçümünü araştırmışlardır. AISI 1030 çeliği için aralıklı kesim parametreleri arasındaki ilişkileri oluşturmuşlardır. L9 ortogonal dizisi ile sonuçlara ulaşmayı hedeflemişlerdir. Takımın iş parçası ile birleşmesi sırasında yüksek darbe yükü, takım çatlamasına ve arızalanmasına neden olacağını, kesme hızındaki değişikliğin ilerleme hızında veya kesme derinliğinde değişiklik olup olmadığına bakılmaksızın takım ömrü üzerinde baskın bir etkiye sahip olacağını göstermişlerdir [70].

Durmaz ve Yıldız, TiAlSiN, AlCrN ve TiAlN seramik filmlerin substrat üzerinde katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle geliştirilmesi ve karbür malzemenin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kaplamaların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin karakterizasyonu, prizmatik test numuneleri üzerinde standart test prosedürü uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çizilme testlerinde en yüksek kritik yük değerleri TiAlN kaplama malzemesinden elde edilmiştir. Kaplamasız ve kaplamalı karbür takımlarla yapılan yüksek hızlı frezeleme işleminden sonra, TiAlN seramik film ile kaplanmış karbür parmak freze ile frezelenen impax çelik iş parçasının yüzeyinden en düşük yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir [71].

### 7.3. GERİLME ANALİZLERİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kurt ve Şeker, Al 2007 alaşım malzemesinin farklı paso derinliklerinin (0.1,0,2 ve 0,4 mm) kesici takım üzerindeki gerilmelerini ANSYS programı ile göstermeyi amaçlamışlardır. Analiz sonuçları takımda meydana gelen normal ve kayma gerilmelerinin 0,05 mm'de en fazla olduğunu, kesici takım ucundan takım talaş arayüzey uzunluğunun sonuna doğru azaldığını göstermiştir [72].

Aslantaş, TiN kaplanmış Yüksek Hız Çeliği (HSS) kesici takımların gerilme sonuçları için iki boyutlu SEY analizi yapmıştır. Takım ve talaş arasındaki sürtünme katsayının kesici bölgesinde ve temas bölgesinde meydana gelen gerilmeler üzerindeki tesirini araştırmış, bununla birlikte, kesici takımda olası hasar oluşum alanları tespit etmeye çalışmıştır. Ek olarak sonlu elemanlar metodu kullanılmış ve nümerik çözümleme için FRANC2D programı seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre takım-talaş ara bölgesinde sürtünmenin olmadığı ( $\mu = 0$ ) varsayıldığında maksimum  $S_{EQV}$  gerilmeleri yüzey altında oluşmaktadır. Kesici takımın yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler  $x/lc=0.35$  bölgesinde maksimum bası gerilmeleri şeklinde oluşmakta ve kesici ucundan uzaklaştıkça teğetsel gerilmeler çeki gerilmelerine döndüğünü gözlemlemiştir. Artan sürtünme katsayısı ile maksimum bası gerilmeleri de arttığını ortaya koymuştur [73].

Ying ve arkadaşları, titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V'nin basınç gerilmesi ve yorulma önleyici üretimini karşılamak için, uzunlamasına-burulma ultrasonik titreşim frezeleme modeli geliştirilmiştir. ABAQUS yazılımı temel alınarak, 3 boyutlu termal-mekanik birleştirilmiş frezeleme simülasyon modeli oluşturulmuştur. Boyuna burulma ultrasonik destekli frezeleme kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve artık gerilmeleri analiz edilerek tartışılmıştır. Geleneksel frezeleme, boyuna ultrasonik destekli frezeleme ve burulma ultrasonik destekli frezeleme ile karşılaştırıldı. Sonuçlar, Boyuna burulma ultrasonik destekli frezeleme kesme kuvvetini, kesme sıcaklığını ve artık gerilmeleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir [74].

Köklü ve Aydın, Ti6Al4v alaşımının yüksek hızlı düz uçlu frezelemede kesme kuvvetlerinin tahmini için verimli bir süreç simülasyon yaklaşımı önermiştir. Parçalı talaş oluşumunun sonlu elemanlar ile modellenmesi ve frezeleme kuvvetlerinin

modellenmesi olarak iki kısımda incelemiştir. Sonuçlar ortalama teğetsel kesme kuvvetinin ağ boyutundan biraz etkilendiğini göstermiştir. Kaba bir ağ yapısına sahip yerel hasar modeli ile yapılan simülasyonda, yetersiz kesme deformasyonu nedeniyle sürekli talaş elde edilmesini test etmişlerdir. Daha ince bir ağ yapısı kullanarak, daha yüksek kesme lokalizasyonu meydana geldiğini ve talaşların segmentasyonunun arttığını göstermişlerdir [75].

Jiang ve arkadaşları, artık gerilim hacmi tanımı ve eğri yüzey üzerindeki maksimum çekme artık gerilimi ile deforme olmamış talaş hacmi arasında yapılandırılmış bir matematiksel model sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar işleme koşulları, numune boyutları ve malzeme ile ilgilidir. Eğri yüzey frezeleme süresinde, kesme derinliği ve takım yarıçapı parametreleri belirlenmiştir. Eğri yüzey, artık gerilim dağılımı üzerinde en güçlü etkileri gösterir. İşleme parametresinin optimizasyon seçimi sırasında daha büyük takım yarıçapı ve daha küçük kesme derinliğine öncelik verilmesi gerektiğini ortaya koymayı amaçlamışlardır [76].

Literatür genel olarak değerlendirildiğinde, frezeleme esnasında oluşan titreşimlerin ve takım üzerinde oluşan gerilmelerin anlaşılması, azaltılması ve giderilmesi yönündedir. Bu çalışmalar, farklı kaplama malzemesi, kesme hızı, ilerleme oranı, kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey aşınması vb. gibi farklı parametreler ile desteklenerek analiz edilmiştir. Analizler hem fiziksel hem bilgisayar destekli paket programlar yardımı ile hem de iki deney metodolojisinin kıyaslanması şeklinde olmuştur. Yapılan analizlerde özellikle kaplamaların önemi vurgulanmış, takım ve iş parçası üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Literatürde kaplama çalışmaları detaylıca incelenmesine rağmen takım tutucu üzerine CFRP malzemesinin kaplanmasına rastlanmamıştır.

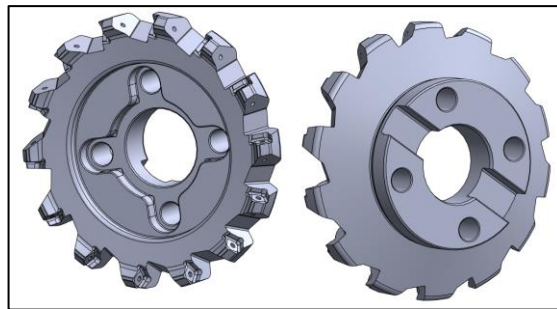
## BÖLÜM 8

### MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, AISI 4340 malzemeli, 14 ağızlı yüzey frezeleme takım tutucusuna belirli frekans ve kuvvet değerleri uygulanarak gerilme ve titreşim çıktılarının alınması, aynı geometrili takım üzerinde mühendislik optimizasyonu sağlanarak kütle değerinin azaltılması ve CFRP kompozit malzeme ile kaplanması; kompozit kaplanan takıma aynı frekans ve kuvvet değerleri uygulanarak gerilme ve titreşim çıktılarının alınması ve her iki takımdan da alınan çıktıların gerilme ve titreşim değerlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

#### 8.1. DENEY MALZEMELERİ

Deneyle veya analizler, Simcenter 3D paket programının SOL108 Direct Frequency Response modülünde yapılmıştır. Bu modül, direkt frekans cevap fonksiyonlarının kullanıldığı modüldür. Kullanılan takım, ıslah çeliği olarak da bilinen AISI 4340 çeliğinden yapılmış 14 ağızlı yüzey frezeleme takım tutucusudur (Şekil 8.1). Takımın katı modeli YG-1 kesici takımlar San. Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır. Çeliğin mekanik özellikleri Simcenter 3D program kütüphanesinden seçilerek uygulanmıştır. Deneyle kullanılan CFRP malzemesinin özellikleri Mahmoud (2021) yaptığı çalışmadan alıntılanmış ve tatbik edilmiştir.



Şekil 8. 1. Deneyle kullanılan yüzey frezeleme takım tutucusunun katı modeli.

Çizelge 8. 1. Simcenter 3D program kütüphanesine ait AISI 4340 malzemesinin mekanik özellikleri.

Özellikler (AISI 4340)	Değer
Yoğunluk	$7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Young Modülü ( $E$ )	193000 MPa
Poisson Oranı ( $V$ )	0,284
Akma Kriter Fonksiyonu	von Mises
Akma Dayanımı	1178 MPa
Maksimum Çekme Dayanımı	1240 MPa

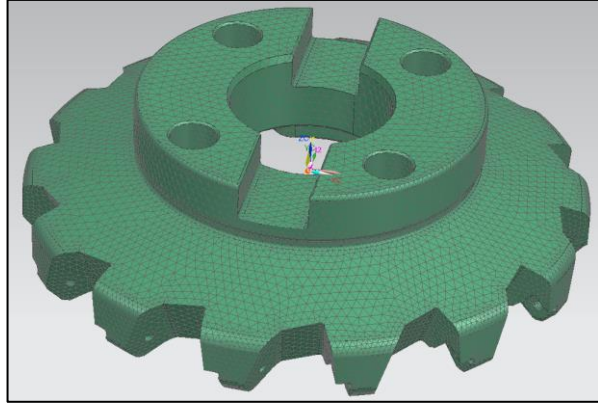
Çizelge 8. 2. Mahmoud (2021) çalışmasına ait CFRP malzemesinin mekanik özellikleri [77].

Özellikler	Değer	
Yoğunluk	$1,76 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$	
Elastisite Modülü ( $E$ )	$E_x$	230000 MPa
	$E_y$	17900 MPa
	$E_z$	17900 MPa
Poisson Oranı ( $V$ )	$V_x$	0.22
	$V_y$	0.22
	$V_z$	0.30
Kesme Modülü ( $G$ )	$G_x$	11790 MPa
	$G_y$	11790 MPa
	$G_z$	6880 MPa
Serim Kalınlığı	0.13 mm	

## 8.2. TAKIM TUTUCU ANALİZ PARAMETRELERİ VE OPTİMİZASYONU

### 8.2.1. Yüzey Frezeleme Takım Tutucusunun (YFT) Ağ Yapısı

Analiz ve optimizasyon öncesi takım tutucu için, farklı boyutlarda ağ yapıları ve eleman boyutları denenerek analiz için en uygun parametreler seçilmiştir. Eleman türü olarak CTETRA (10) (dört yüzlü piramit) üç boyutlu (3D) ağ yapısı kullanılmış (Şekil 8.2) ve eleman boyutu 4 mm olarak ayarlanmıştır. YFT ağ yapısı ve özellikleri Çizelge 8.3'te gösterilmektedir.



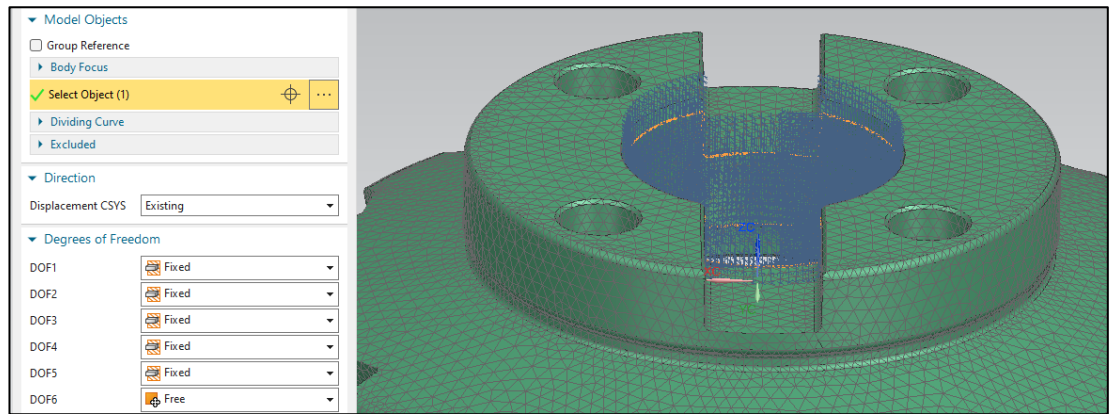
Şekil 8. 2. YFT ağ sistemi.

Çizelge 8. 3. YFT ağ yapısı ve özellikleri.

Eleman Türü	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
CTETRA (10)	4 mm	184061	285458

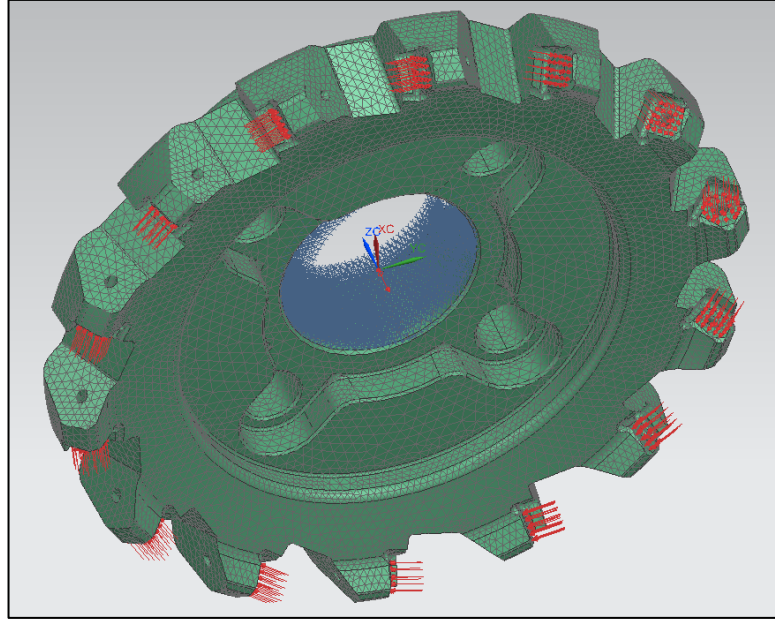
### 8.2.2. YFT Yük ve Sınır Koşulları

Takım tutucu altı serbestlik derecesi içerisinde z ekseninde dönecek şekilde ayarlanmış olup diğer eksenlerde hareketi kısıtlandırılmıştır (Şekil 8.3). Takımın dönme yönünün aksi yönünde her bir ağza belirli kuvvetler uygulanmıştır (Şekil.8.4).



Şekil 8. 3. Takım tutucunun serbestlik derecesi.





Şekil 8. 4. Takım tutucunun yük sistemi.

Dört farklı kuvvet ve dört farklı hız parametreleri farklı kombinasyonlarda uygulanmıştır. Literatür incelendiğinde esas kesme kuvvetinin diğer kesme kuvvetlerine göre daha fazla enerji tükettiği sonucuna varılmış ve esas kesme kuvveti üzerinden deneyler yapılmıştır. Uygulanan yükler hem YFT için hem de optimize edilmiş yüzey frezeleme takım tutucusu (OYFT) için Çizelge 8.4'te gösterilmektedir.

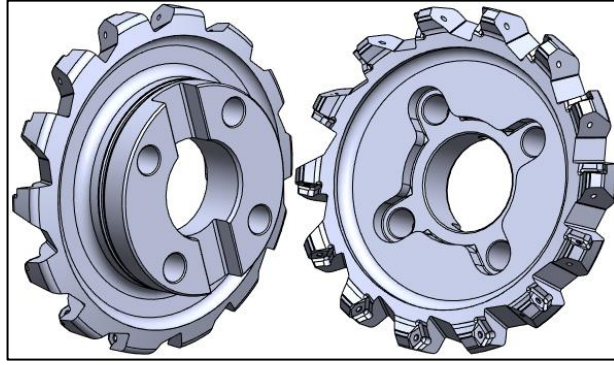
Çizelge 8. 4. Hız ve yük parametreleri.

Deney Numarası	Devir (rpm)	Kuvvet (N)
1	2000	80
2	2000	120
3	2000	160
4	2000	200
5	4000	80
6	4000	120
7	4000	160
8	4000	200
9	6000	80
10	6000	120
11	6000	160
12	6000	200
13	8000	80

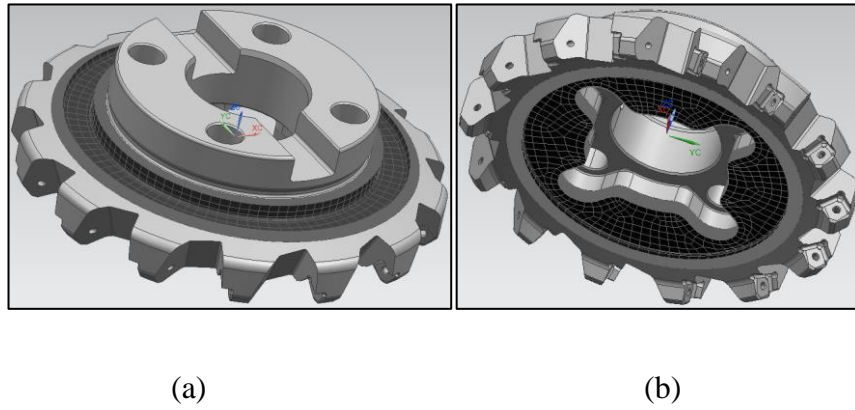
14	8000	120
15	8000	160
16	8000	200

### 8.2.3. Yüzey Frezeleme Takımı Tutucusunun Optimizasyonu

YFT için yapılan analiz sonuçlarına göre takım üzerindeki gerilmelerin az olduğu bölgelere mühendislik optimizasyonu uygulanmıştır (Şekil 8.5). Optimizasyon ile kütleden tasarruf edilmiş ve CFRP kompozit malzeme ile kaplanmıştır (Şekil 8.6). CFRP malzemenin serimi sağlanmış ve serim şekli takımın üst kısmında 46 adet elyaf  $[0,90^\circ]_{46}$ , takımın alt kısmında 60 adet elyaf  $[0,90^\circ]_{60}$  düzeninde belirlenmiştir. Belirlenen bu kaplama kalınlıkları takım üzerinde yapılan boşaltmalar ile paralellik göstermektedir.



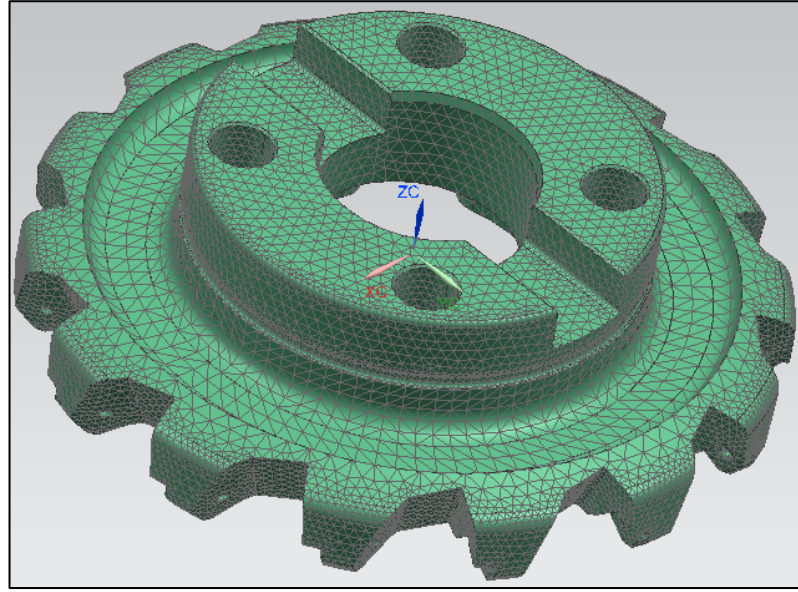
Şekil 8. 5. Takım üzerinde yapılan mühendislik optimizasyonu.



Şekil 8. 6. Takım tutucuya uygulanan CFRP kaplama, a) üst kısımdaki kaplama, b) alt kısımdaki kaplama.

#### 8.2.4. OYFT Ağ Yapısı

OYFT takımı ile analizlere başlamadan önce iki boyutlu (2D) ve 3D ağ yapıları kullanılmıştır (Şekil 8.7). Kullanılan bu yapıların takım gövdesi özelinde eleman türü ve boyutu Çizelge 8.3’ de görüldüğü gibi aynıdır. Ancak optimizasyon işleminden dolayı eleman ve düğüm sayıları farklıdır. OYFT optimizasyon sonrası 3D ağ yapısı ve özellikleri Çizelge 8.5’te gösterilmektedir.

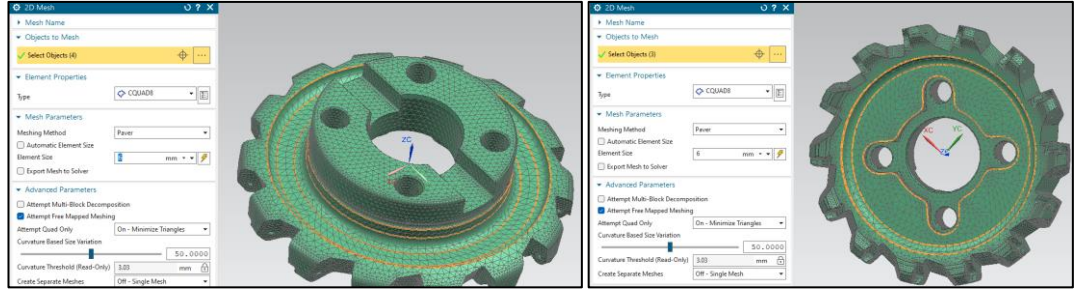


Şekil 8. 7. Optimizasyon sonrası OYFT ağ sistemi.

Çizelge 8. 5. Optimizasyon sonrası OYFT ağ yapısı ve özellikleri.

Eleman Türü	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
CTETRA (10)	4 mm	114822	187044

Programın kendi içerisinde yer alan kompozit kaplamanın 2D ağ yapısı mevcuttur. Uygulamada ağ yapısı hem üst hem de alt yüzeylere ayrı ayrı uygulanmıştır (Şekil 8.8). Bu ağ yapısında eleman türü olarak CQUAD4 kullanılmış ve 3 mm eleman boyutuna ayarlanmıştır. 2D ağ yapısının eleman türü ve boyutu aynı olmasına karşın, ağın atıldığı yüzeyler farklı olduğu için eleman ve düğüm sayıları farklıdır. Bu değerler üst yüzey için Çizelge 8.6’da ve alt yüzey için Çizelge 8.7’de gösterilmektedir. Bağlama kayma gerilmesi için yapıştırıcı tutuculuğu 43 MPa olarak varsayılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 8. 8. OYFT 2D ağ sistemi, a) üst yüzey, b) alt yüzey.

Çizelge 8. 6. OYFT üst yüzeyi için 2D ağ yapısı ve özellikleri.

Eleman Türü	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
CQUAD8	6 mm	828	2668

Çizelge 8. 7. OYFT alt yüzeyi için 2D ağ yapısı ve özellikleri.

Eleman Türü	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
CQUAD4, Tri6	6 mm	717	2331

Şekil 8.8’de gösterildiği gibi 2D elemanlar, Şekil 8.6’da gösterildiği gibi 3D kompozit ekstrüzyonunun alt yapısını oluşturmaktadır. Program özelliklerinin içerisinde bulunan Laminate modülü ile 2D ağ yapısını oluşturduktan sonraki aşamada, ağ yapısı ekstrüde edilerek 3D kompozit sistemi elde edilir. Oluşturulan bu yapıya malzeme özellikleri tanımlanarak nihai kompozit hali elde edilir. Elde edilen bu kompozitlerin ağ yapısı ve özellikleri; üst kısım için Çizelge 8.8’de ve alt kısım için Çizelge 8.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 8. 8. 3D kompozit ekstrüzyonunun üst kısım için ağ yapısı ve özellikleri.

Eleman Türü	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
HEX20	6 mm	36432	160540

Çizelge 8. 9. 3D kompozit ekstrüzyonunun alt kısım için ağ yapısı ve özellikleri.

<b>Eleman Türü</b>	<b>Eleman Boyutu</b>	<b>Eleman Sayısı</b>	<b>Düğüm Sayısı</b>
HEX20, Wedge15	6 mm	43020	190611

### **8.2.5. OYFT Yük ve Sınır Koşulları**

İki takımın kıyaslanması bakımından YFT tanımlanan yük ve sınır koşulları (Şekil 8.3, Şekil 8.4 ve Çizelge 8.4) OYFT için de aynı olarak tanımlanmıştır.

## BÖLÜM 9

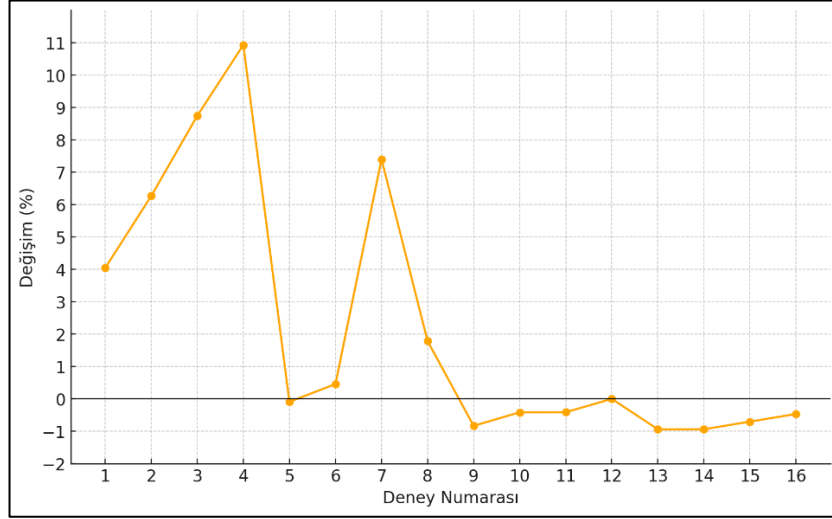
### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, toplamda 32 adet deney verisinden oluşmaktadır. Bu deneylerden 16 adeti YFT için diğer 16 adeti ise OYFT için uygulanmıştır. Deneylerde uygulanan hız, yük ve diğer sınır koşullarını içeren parametrelerden materyal ve metot bölümünde bahsedilmiştir. Hız ve yük parametreleri ele alındığında; Çizelge 8.4'te belirtilen parametreler, YFT ve OYFT takımları için ayrı ayrı uygulanmıştır. Uygulama sonucunda yer değiştirme ( $U_M$ ) ve von Mises gerilmesi ( $S_{EQV}$ ) değerleri kıyaslanmıştır. Sonuç değerleri için; yer değiştirme sonuçları Çizelge 9.1'de ve von Mises gerilme sonuçları ise Çizelge 9.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 9. 1. Analiz sonuçlarına göre yer değiştirme değerleri.

Deney Numarası	Devir (RPM)	Kuvvet (N)	$U_{M(YFT)}$ (mm)	$U_{M(OYFT)}$ (mm)	Değişim (%)
1	2000	80	0.002919	0.003037	4.042
2	2000	120	0.003127	0.003323	6.268
3	2000	160	0.003373	0.003668	8.746
4	2000	200	0.003640	0.004038	10.934
5	4000	80	0.010780	0.010770	-0.093
6	4000	120	0.010910	0.010960	0.458
7	4000	160	0.010400	0.011170	7.404
8	4000	200	0.011200	0.011400	1.786
9	6000	80	0.024000	0.023800	-0.833
10	6000	120	0.024100	0.024000	-0.415
11	6000	160	0.024200	0.024100	-0.413
12	6000	200	0.024300	0.024300	0.000
13	8000	80	0.042500	0.042100	-0.941
14	8000	120	0.042600	0.042200	-0.939
15	8000	160	0.042700	0.042400	-0.703
16	8000	200	0.042800	0.042600	-0.467

Çizelge 9.1’de gösterilen yer değiştirme analiz sonuçları için yüzde değişim grafiği Şekil 9.1’de gösterilmektedir.



Şekil 9. 1. Analiz sonuçlarına göre yer değiştirme yüzde değişim grafiği.

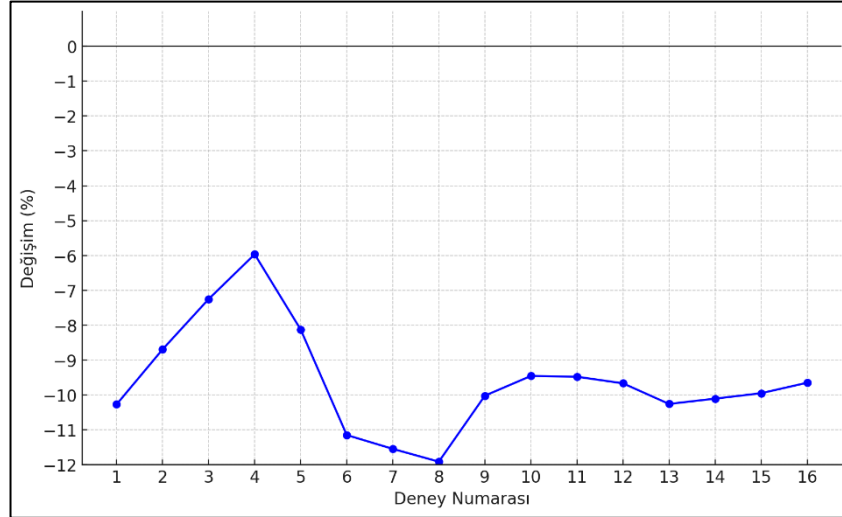
Çizelge 9.1. ve Şekil 9.1. incelendiğinde yükleme değerlerine bağlı olan yer değiştirme değerleri optimize edilmiş takım için kısmen azalmıştır. Tablonun yorumlanmasında, eksi değer alan yüzde değişim parametreleri titreşimin negatif yönde değiştiğini (azaldığını) göstermektedir. Bu duruma göre, OYFT’nin 5,9,10,11,13,14,15 ve 16 numaralı deneylerde YFT takımına göre en az %0,093 ve en çok %0.941 daha iyi titreşim performansı gösterdiği görülmektedir. Yapılan deneylerde en çok titreşim optimizasyonu 8000 RPM devir ve 80 N kuvvet ile 13 numaralı deneyde gözlemlenmektedir. Ancak 4000 RPM devir ve 200 N kuvvet altındaki deneylerde çoğunlukla YFT daha iyi titreşim performansı göstermektedir.

Çizelge 9. 2. Analiz sonuçlarına göre von Mises gerilme değerleri.

Deney Numarası	Devir (RPM)	Kuvvet (N)	SEQV(YFT) (MPa)	SEQV(OYFT) (MPa)	Değişim (%)
1	2000	80	19.08	17.12	-10.273
2	2000	120	20.36	18.59	-8.694
3	2000	160	21.65	20.08	-7.252
4	2000	200	22.96	21.59	-5.967
5	4000	80	68.9	63.3	-8.128
6	4000	120	70.12	62.3	-11.152

7	4000	160	71.35	63.11	-11.549
8	4000	200	72.59	63.94	-11.916
9	6000	80	154.44	138.96	-10.023
10	6000	120	153.53	139.01	-9.457
11	6000	160	154.44	139.8	-9.479
12	6000	200	155.66	140.61	-9.669
13	8000	80	276.03	247.71	-10.260
14	8000	120	275.12	247.31	-10.108
15	8000	160	274.21	246.92	-9.952
16	8000	200	273.3	246.92	-9.652

Çizelge 9.2’de gösterilen von Mises gerilmelerinin analiz sonuçları için yüzde değişim grafiği Şekil 9.2’de gösterilmektedir.



Şekil 9. 2. Analiz sonuçlarına göre von Mises gerilme yüzde değişim grafiği.

Çizelge 9.2. ve Şekil 9.2. incelendiğinde, yükleme değerlerine bağlı olan von Mises gerilme değerleri optimize edilen takım için tamamen azalmıştır. Tablonun yorumlanmasında, eksi değer alan yüzde değişim parametreleri takım üzerinde oluşan gerilmelerin negatif yönde değiştiğini (azaldığını) göstermektedir. Bu duruma göre, OYFT’nin tüm deneylerde YFT takımına göre en az %5,967 ve en çok %11,916 daha iyi gerilme performansı gösterdiği görülmektedir. Yapılan deneylerde en çok gerilme optimizasyonu 4000 RPM devir ve 200 N kuvvet ile 8 numaralı deneyde gözlemlenmektedir.



Yapılan çalışmada, Şekil 8.5'te gösterildiği gibi mühendislik optimizasyonu ile takım tutucuda kütle tasarrufu yapılmıştır. Yapılan kütle optimizasyonundan sonra kompozit malzemenin serimi sağlanmıştır. Yapılan kütle optimizasyonunun sayısal değerleri Çizelge 9.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 9. 3. Kütle optimizasyonu için sayısal değerler.

YFT kütle değeri (kg)	OYFT kütle değeri (kg)	Değişim (%)
5,926	4,985	-15,879

Çizelge 9.3'te gösterildiği gibi yapılan optimizasyon sonucu OYFT, YFT'den %15,879 daha hafif duruma getirilmiştir.

Sonuçlar genel kapsamda incelendiğinde,

- Göreceli olarak yüksek devirdeki kesme operasyonlarında OYFT kullanımının daha uygun olacağı sonucuna varılabilir.
- Gerilme değerlerinin azalması, takım ömrü veya yorulma konuları açısından değerlidir. Takım tutucunun ömrünün artması, daha yüksek üretim kalitesi ve kesme istikrarının artmasını sağlar. Kesme istikrarının artması, takımın daha stabil olmasını; bu durum sağlandığında ise takım üzerinde daha az mekanik titreşimlerin oluşmasına sebep olur olarak yorumlanabilir.
- Kütle optimizasyonu ile sistemde maliyet azaltılırken enerji verimliliği artırılabilir.

## BÖLÜM 10

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, frezelemede kullanılan takım tutucu için belirli parametrelerde yapısal analizler yapılmış olup;

- Analizler genel kapsamda incelendiğinde titreşim seviyelerinde dalgalanmalar olduğu ve titreşimin kısmen azaldığı gözlemlenmiştir.
- En iyi titreşim seviyesinin %0.941 iyileştirme ile 13 numaralı deneyde gözlemlenmiştir.
- Gerilme değerleri optimize edilen takım üzerinde azalmıştır.
- En iyi gerilme seviyesinin %11,916 iyileştirme ile 8 numaralı deneyde meydana gelmiştir.
- Mühendislik optimizasyonu yapılarak kütleden %15,879 tasarruf sağlandığı elde edilmiştir.

Yapılacak olan çalışmalar için:

- Farklı geometrilere sahip kesici takımlar veya takım tutucular, CFRP kompozit malzemesi ile kaplanarak istenilen kesme operasyonları için kullanılabilir.
- Optimize edilmiş takım ile farklı yapısal analiz parametreleri kullanılarak, operasyonun getirdiği zorlukların daha iyi yorumlanması sağlanabilir.

- Farklı kompozit malzemeler, sönümlenme oranlarının artırılması ve titreşimin kompozit malzemeler üzerindeki etkileri için tanımlanabilir.
- Optimizasyon metodu olarak, topoloji optimizasyonu kullanılabilir. Bu sayede program kontrollü optimizasyon gerçekleştirilebilir.
- Farklı program modülleri ile kompozit kaplanmış takımın davranışları farklı açılardan değerlendirilebilir. Örnek olarak kompozit kaplanmış takımın talaş kaldırma analizi yapılması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Sousa, V. F. C. and Silva, F. J. G., "Recent advances on coated milling tool technology-a comprehensive review", *Coatings*, 10 (3): (2020).
2. Biantoro, A. W., Maryanto, H., Hidayanto, A. K., and Hamid, A., "The Investigation Of End Mill Feeds On Cnc Router Machine Using Vibration Method", *SINERGI*, 24 (2): 117 (2020).
3. Mikell, P. G., "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems", *John Wiley Ve Sons LTD*, Hoboken, (2010).
4. Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, Y., and Özdemir, M., " AISI 1050 çeliğın tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerine etkilerinin araştırılması" *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30 (4): 220–226.
5. Yıldız, M., Saruhan H., "Experimental Vibration Analysis of Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) Coated Milling Cutting Tool Effects on Surface Roughness of AISI 4140 Steel Products", *Düzce Üniversitesi Journal of Science and Technology*, 745-753 (2018).
6. Türkeş, E., "Takım Tezgahlarının Tırlama Titreşiminde Süreç Sönümlerinin Teorik ve Deneysel İrdelenmesi" Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü*, Eskişehir (2007).
7. Oyman, E., "Kaplama Türünün ve Kesme Parametrelerinin Talaş Şekli Üzerindeki Etkisinin Araştırılması", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü*, Afyon (2012).
8. Nas, E., "Frezeleme İşleminde Kesici Uç Sayısının Titreşim ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi" *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü*, Karabük (2008).
9. Arıtaşı, A., "Dönen Takma Uçlu Kesici Takımlarla Talaşlı Şekillendirmede İşlem Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü*, İstanbul (2008).
10. Trent, E. M., "Metal cutting", *Butterworths Press*, 1–71 (1989).
11. Coromant, S., "Modern Metal Cutting : A Practical Handbook", *Arnold*, London (1994).

12. DeGamro, E. P., Black, J. T., and Kohser, R. A., "Materials and Processes in Manufacturing", *Prentice-Hall Inc*, New Jersey, 214–652 (1997).
13. Özbek, Y., "Havacılık ve Uzay Sektöründe Kullanılan 7075-T651 Alüminyum Alaşımının İşlenmesi İçin Özel İmalat Matkap Uçlarının Deney Tasarımı Yöntemi İle Performansının Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2020).
14. Yıldız, M., "AISI 4140 İslah Çeliğinin TiAlN Kaplı Frezelerle İşlenmesi Sırasında Oluşan Yüzey Pürüzlülüğü ve Titreşimin Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Düzce, (2018).
15. Gürbüz, H., "AISI 316L Çeliğın İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisi ve Kaplama Tiplerinin Yüzey Bütünlüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2012).
16. Panjan, P., Bončina, I., Bevk, J., and Čekada, M., "PVD hard coatings applied for the wear protection of drawing dies", *Surface and Coatings Technology*, 200: 133–136 (2005).
17. Grips, V. W., Selvi, V. E., Barshilia, H. C., and Rajam, K. S., "Effect of Electroless Nickel Interlayer on the Electrochemical Behavior of Single Layer CrN, TiN, TiAlN Coatings and Nanolayered TiAlN/CrN Multilayer Coatings Prepared by Reactive Dc Magnetron Sputtering", *Electrochimica Acta*, 51 (17): 3461–3468 (2006).
18. Bülbül, F., "Sert ve Yumuşak Kaplamalar", *Tek Dergi*, 4 (2): 32–41 (2014).
19. Boz, Y., "Serbest yüzey geometrili parçaların 5 eksen küresel frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Koç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2010).
20. Kurt, A., "Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).
21. Bayram, S. B., "Kesici Takım Dinamiğinin Modellenmesi Ve Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2023).
22. Karagüzel, U., "Frezeyle Tornalama Operasyonunun Geometrik, Kuvvet Ve Isıl Modellenmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2016).
23. Şahin, Y., "Talaş Kaldırma Prensipleri", *Nobel Yayın Ltd. Şti. Yayınları*, Ankara, 559 (2000).
24. Lee, E.-H. and Shaffer, B. W., "The theory of plasticity applied to a problem of machining", *Journal of Applied Mechanics*, 405–413 (1951).

25. Bahar, E. M., "Titreşim Sebepli Yüzey Kalitesi Üzerinde, Takım Tutucu Modifikasyonlarının Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2006).
26. Neşeli, S., "Tornalamada takım geometrisi ve tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2006).
27. Çakır, M. C., "Modern Talaşlı İmalatın Esasları", *Vipaş Yayınları*, Bursa, (1999).
28. Çay, C. İ., "Tarım traktörleri sürücü koltukları titreşim sönümlenme elemanları üzerine bir araştırma", Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2006).
29. Hannah, J. and Stephens, R. C., "Examples in Mechanical Vibrations", *Edward Arnold. Ltd*, London, 1–50 (1956).
30. Korucu, S., "Hidrolik kopya aparatı yardımı ile elde edilen parçalarda yüzey pürüzlülüğünün deneysel incelenmesi ", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1996).
31. Şener, B., "Frezeleme işlemlerinde meydana gelen tırlama titreşimlerinin dalgacık dönüşümü ve konvolüsyonel sinir ağları ile tespiti ", Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2021).
32. Erdoğan, G., "Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin modal analizi", *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2016).
33. Yaşar, N., "Lamine kompozitlerle istiflenmiş metal malzemelerin delinebilirliğinin araştırılması", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2017).
34. Çavuş, Y., "Karbon fiber takviyeli kompozit (KTFK) malzemelerin alışılmış takımlarla işlenebilirliği", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2015).
35. Mazumdar, S., "Composites Manufacturing : Materials, Product and Process Engineering", *1. Ed.*, Boca Raton 416 (2001).
36. Demircioğlu, G., "Kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyutunun etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).
37. Hüner, Ü., "Plastik esaslı kompozit malzemelerin sıcak birleştirme işlemlerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2008).
38. Ersoy, H. Y., "Kompozit Malzeme", *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, (2001).

39. Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", Ankara, (2000).
40. Sur, G., "Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi ", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2002).
41. Demirel, A., "Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2007).
42. Mallick, P. K., "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design", *CRC Press*, Boca Raton, 6–20 (2007).
43. Ibarra, R. M., "Carbon fiber recovery using subcritical and supercritical fluids for chemical recycling of thermoset composite materials", PhD Thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, Monterrey, (2014).
44. Gay, D., "Composite Materials: Design and Applications", *CRC Press*, Boca Raton, (2022).
45. Sheikh-Ahmad, Jamal. Y., "Machining of Polymer Composites ", *Springer*, New York, (2009).
46. Korkmaz, M. E., "Nikel esaslı süper alaşımın (Nimonic 80A) malzeme yapısal denklem parametrelerinin belirlenmesi ve uygulanabilirliğinin araştırılması", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2018).
47. Açıkgoz, A., "Evolvent düz dişli çarklarda sonlu elemanlar metodunu kullanarak eğme gerilmesi analizi ve yorulma ömrü tahmini", Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep, (2019).
48. Fish, J. and Belytschko, T., "A First Course in Finite Elements ", *Wiley*, New York, (2007).
49. Memmolo, V., Fox, L., Krozer, V., and Moll, J., "Structural Health Monitoring of Metallic Tubes inducing Guided Electromagnetic Waves", 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), *IEEE*, (2023).
50. Owais Qadri, M. and Namazi, H., "Fractal-Based Analysis of The Relation Between Tool Wear and Machine Vibration In Milling Operation", *Fractals*, 28 (6): (2020).
51. Zahaf, M. Z. and Benghersallah, M., "Surface roughness and vibration analysis in end milling of annealed and hardened bearing steel", *Measurement: Sensors*, 13: (2021).
52. Bleicher, F., Ramsauer, C. M., Oswald, R., Leder, N., and Schoerghofer, P., "Method for determining edge chipping in milling based on tool holder vibration measurements", *CIRP Annals*, 69 (1): 101–104 (2020).

53. Shihan, M., Chandradass, J., and Kannan, T. T. M., "Investigation of vibration analysis during end milling process of monel alloy", *Materialstoday: Proceedings* 695-699 (2020).
54. Wan, M., Liang, X. Y., Yang, Y., and Zhang, W. H., "Suppressing vibrations in milling-trimming process of the plate-like workpiece by optimizing the location of vibration absorber", *Journal Of Materials Processing Technology*, 278: (2020).
55. Das, A., Shukla, S., Kumar, M., Singh, C., Chandravanshi, M. L., and Bajpai, V., "Development of a vibration free machine structure for high-speed micro-milling center", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 116 (11–12): 3489–3506 (2021).
56. Ostasevicius, V., Ubartas, M., Gaidys, R., Jurenas, V., Samper, S., and Dauksevicius, R., "Numerical-experimental identification of the most effective dynamic operation mode of a vibration drilling tool for improved cutting performance", *Journal Of Sound And Vibration*, 331 (24): 5175–5190 (2012).
57. Yenilmez, E., "Ti6al4v alaşımının yüzeyinin uhmwpe-hap kompoziti ile kaplanması ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya (2019).
58. Alemdar, F., "Distorsiyondan kaynaklanan yorulma hasarı gören köprü çelik kirişlerinin onarımı", Doktora Tezi, *University of Kansas Yurtdışı Enstitü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Lawrence (2011).
59. Aydın, K., "Düşük karbonlu çeliğin yüzey özelliklerinin grafen içerikli kompozit kaplama ile iyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik (2019).
60. Akgün, M. and Kara, F., "Analysis and Optimization of Cutting Tool Coating Effects on Surface Roughness and Cutting Forces on Turning of AA 6061 Alloy", *Advances In Materials Science And Engineering*, (2021).
61. Al-Tameemi, H. A., Al-Dulaimi, T., Awe, M. O., Sharma, S., Pimenov, D. Y., Koklu, U., and Giasin, K., "Evaluation of cutting-tool coating on the surface roughness and hole dimensional tolerances during drilling of Al6061-T651 alloy", *Materials*, 14 (7): (2021).
62. Sousa, V. F. C., Silva, F. J. G., Alexandre, R., Fecheira, J. S., and Silva, F. P. N., "Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel", *Wear*, 476: (2021).
63. Gökkaya, H., Habali, K., Özçatalbaş, Y., "Kaplama Kesici Takımlarda Kaplama Malzemesinin Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", *Politeknik Dergisi Journal Of Polytechnic Cilt*, 7 (7): 23–30 (2004).



64. Bektaş, B. S. and SAMTAŞ, G., "Alüminyum 6061-T651 Alaşımının Kaplamalı Kesici Uçlarla Frezelenmesinde Kesici Takım Aşınmasının Optimizasyonu", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10 (2): 641–651 (2022).
65. Şahin, Y., "The Machining Of Hardened Carbon Steels By Coated Cutting Tools", *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 207-214 (2001).
66. Li, S., Qin, X., Jin, Y., Sun, D., and Li, Y., "A comparative study of hole-making performance by coated and uncoated WC/Co cutters in helical milling of Ti/CFRP stacks", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (5–8): 2645–2658 (2018).
67. Uddin, M. S., Pham, B., Sarhan, A., Basak, A., and Pramanik, A., "Comparative study between wear of uncoated and TiAlN-coated carbide tools in milling of Ti6Al4V", *Advances In Manufacturing*, 5 (1): 83–91 (2017).
68. Liu, J., Zhu, S. S., Deng, X., Liu, J. Y., Wang, Z. P., and Qu, Z., "Cutting Performance and Wear Behavior of AlTiN- and TiAlSiN-Coated Carbide Tools During Dry Milling of Ti–6Al–4V", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33 (3): 459–470 (2020).
69. Aykut, Ş., Bağcı, E., Kentli, A., and Yazicioğlu, O., "Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool", *Materials And Design*, 28 (6): 1880–1888 (2007).
70. Lakshmanan, S. and Xavier, M. A., "Performance of coated and uncoated inserts during intermittent cut milling of AISI 1030 steel", *Procedia Engineering*, 372-380 (2014).
71. Durmaz, Y. M. and Yildiz, F., "The wear performance of carbide tools coated with TiAlSiN, AlCrN and TiAlN ceramic films in intelligent machining process", *Ceramics International*, 45 (3): 3839–3848 (2019).
72. Kurt, A. ve Şeker, U., "Kesici Takım Gerilmelerinin Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 491-497 (2005).
73. Aslantaş, K., "TiN Kaplanmış Kesici Takımlarda Gerilme Analizi ve Takım-Talaş Ara Yüzeyindeki Sürtünme Katsayısının Etkisi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 285-190 (2003).
74. Ying, N., Feng, J., and Bo, Z., "A novel 3D finite element simulation method for longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (1–2): 385–400 (2020).
75. Aydın, M. and Köklü, U., "Analysis of flat-end milling forces considering chip formation process in high-speed cutting of Ti6Al4V titanium alloy", *Simulation Modelling Practice And Theory*, 100: (2020).

76. Jiang, X., Kong, X., Zhang, Z., Wu, Z., Ding, Z., and Guo, M., "Modeling the effects of Undeformed Chip Volume (UCV) on residual stresses during the milling of curved thin-walled parts", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 167: (2020).
77. Mahmoud, A.M., "Strengthening of concrete beams having shear zone openings using orthotropic cfrp modeling", *Ain Shams Engineering Journal*, 3.3 (2012): 177-190.

## ÖZGEÇMİŞ

Mert İSTEK, ilk ve orta öğrenimini Mersin’de tamamladı. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 2021 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir. Yüksek lisans döneminde topoloji optimizasyonu üzerine makale çalışması gerçekleştirmiştir. 2022 yılında savunma sanayide mekanik tasarım ve analiz mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve halen devam etmektedir.