

ORTOGONAL TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNDE MAKİNE  
ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI KULLANILARAK  
DENEYSEL SONUÇLARIN VE SONLU ELEMANLAR  
ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**Kadir Özdemir**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORTOGONAL TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ  
ALGORİTMALARI KULLANILARAK DENEYSEL SONUÇLARIN VE SONLU  
ELEMENLAR ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

KADİR ÖZDEMİR  
0000-0001-5119-7657

Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
**Her Hakkı Saklıdır**

## ÖZET

Doktora Tezi

### ORTOGONAL TALAŞ KALDIRMA İŞLEMİNDE MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI KULLANILARAK DENEYSEL SONUÇLARIN VE SONLU ELEMENLAR ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

**Kadir ÖZDEMİR**

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Bir çok endüstri kolunda olduğu gibi talaşla imalat endüstrisinde de üretimin verimliliğini etkileyecek verileri önceden tahmin etmek hem kesici takım maliyetlerinin hemde üretim maliyetlerinin düşürülmesi bakımından önemlidir. Bu kapsamda yıllardır kullanılmakta olan sonlu elemanlar yönteminin yanında son yıllarda karşımıza bir çok alanda kullanılan makine öğrenmesi ve yapay zeka yöntemleri çıkmaktadır. Bu öğrenme yöntemleri deneysel ve sayısal çalışmalara yardımcı olarak kullanıldığı zaman hem deney süreleri hemde sayısal hesaplama süreleri önemli derecede kısalmaktadır. Böylece hem deney maliyetlerinin azaltılması hemde sayısal hesaplama sürelerinin kısılması sağlanabilmektedir. Bunun yanında bilinmeyen veya deneyi yapılmayan parametrelerin tahmini mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada öncelikle ortogonal talaş kaldırma probleminin sayısal olarak modellenmesi üzerinde durulmuş ve modelleme sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra deneysel veriler ve sonlu elemanlar verileri makine öğrenmesi algoritmalarına öğretilmiştir. Öğretme işleminden sonra bilinmeyen veriler olan kesme kuvvetinin ve maksimum talaş sıcaklığının sadece kesme parametreleri girilerek tahmini yapılmıştır. Deneyler ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarından elde edilen verilere en doğru cevabı veren makine öğrenmesi algoritmaları Support Vector Machine, Linear Regression ve Gaussian Process Regression olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak ortogonal kesme işleminde elde edilen sıcaklık, talaş şekli ve gerilmeler tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ortogonal kesme, Johnson Cook, makine öğrenmesi, kesme kuvvetleri  
2022, x + 108 sayfa.

## ABSTRACT

PhD Thesis

### THE USE OF MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO ASSESS EXPERIMENTAL AND FINE ELEMENT ANALYSIS FINDINGS ON THE ORTOGONAL CUTTING PROCESS

**Kadir ÖZDEMİR**

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

As in many industries, it is important to predict data that will affect the efficiency of production in the chip manufacturing industry in terms of reducing both cutting tool costs and production costs. In this context, besides the finite element method that has been used for years, machine learning and artificial intelligence methods used in many fields in recent years have emerged. When these learning methods are used as an aid to experimental and numerical studies, both experimental times and numerical calculation times are shortened significantly. Thus, it can be ensured that both the experimental costs and the numerical calculation times are shortened. In addition, it is possible to estimate unknown or untested parameters. In this study, primarily numerical modelling of the orthogonal machining problem was emphasized and the modelling results were compared with the experimental data. Then, experimental data and finite element data were taught to machine learning algorithms. After the teaching process, the cutting force and maximum chip temperature, which are unknown data, were estimated by entering only the cutting parameters. Support Vector Machine, Linear Regression and Gaussian Process Regression were determined as the machine learning algorithms that gave the most correct answer to the data obtained from the finite element analysis results with the experiments. In addition to these, the temperature, chip shape and stresses obtained in orthogonal cutting process are discussed.

**Key words:** Ortogonal cutting, Johnson Cook, machine learning, cutting forces  
2022, x + 108 pages.

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmada katkısı ve değerlendirmeleri ile yanımda olan değerli hocam Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR'a, deneysel parametrelerin belirlenmesinde önemli katkısı ve yorumları ile desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ailem ve motivasyon kaynağım oğlum Rüzgar Efe Özdemir'e sevgilerimi sunuyorum.

Kadir ÖZDEMİR

.../.../.....

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Regresyon ile Makine Öğrenmesi.....	6
2.1.1. Öğrenme algoritmalarının değerlendirme kriterleri.....	8
2.2. Ortogonal Kesme İşleminin Temelleri.....	11
2.3. Merchant Kayma Düzlem Modeli.....	17
2.4. Malzeme Modeli.....	18
2.4.1. A1sı 1018 malzeme modeli.....	20
2.4.2. Kesici takım malzeme özellikleri.....	21
2.5. Sürtünme Modeli.....	22
2.6. Talaş Kaldırma Mekanizmasında Sayısal Yöntemlere Giriş.....	25
2.7. Talaş Ayrılmasının Modellenmesi ve Hasar Başlangıç Kriteri.....	28
2.8. Hasar Gelişimi.....	30
2.8.1. Doğrusal hasar gelişimi.....	31
2.8.2. Eksponansiyel hasar gelişimi.....	33
2.8.3. Talaş ayrılma kriteri.....	33
2.9. Termal Model.....	37
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	42
3.1. Deney Numuneleri.....	42
3.2. Kesici Takım ve Takım Tutucu.....	42
3.3. Takım Tezgahı.....	44
3.4. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi.....	45
3.5. Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	46
3.5.1. Deneysel yöntem için kesme parametrelerinin belirlenmesi.....	46
3.5.2. Malzeme modeli için parametrelerin belirlenmesi.....	47
3.6. Sonlu Elemanlar Modeli.....	48
3.6.1. Talaş ayrılma bölgesinin modellenmesi.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	54
4.1. Talaş Ayrılma Bölgesinin Etkisi.....	54
4.2. Deneysel ve Numerik Sonuçların Değerlendirilmesi.....	56
4.3. Kesme Kuvvetlerinin Öğrenme Yöntemi ile Tahmin Edilmesi.....	61
4.3.1. İki bağımsız değişken kullanılarak yapılan tahmin sonuçları.....	61
4.3.2. Üç bağımsız değişken kullanılarak yapılan tahmin sonuçları.....	67
4.3.3. Johnson Cook malzeme parametrelerinin değişimine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin makine öğrenmesi ile tahmini.....	74

4.4. Takım Talaş Arayüzündeki Sıcaklıkların İncelenmesi .....	78
4.4.1. Sıcaklık oluşumunun değerlendirilmesi.....	79
4.4.2. Sıcaklık değerlerinin makine öğrenmesi ile tahmini.....	90
4.5. Kayma düzleminde oluşan gerilme dağılımının incelenmesi .....	93
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	95
KAYNAKLAR .....	100
ÖZGEÇMİŞ .....	108



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A$	Başlangıç akma gerilmesi (MPa)
$\hat{T}$	Boyutsuz sıcaklık
$G_f$	Çatlak başlangıç kriteri için gerekli olan enerji (N/mm)
$a_c$	Deforme olmamış talaş kalınlığı (mm)
$a_{ch}$	Deforme olmuş talaş kalınlığı (mm)
$\beta$	Elastik olmayan ısı oranı
$T_{melt}$	Ergime sıcaklığı (°C)
$\bar{\epsilon}^{pl}$	Eşdeğer plastik gerilme
$\bar{u}^{pl}$	Eşdeğer plastik yer değiştirme
$\dot{\epsilon}_{pl}$	Gerinim artış oranı
$C$	Gerinim oranı bağımlılık katsayısı
$T_{tr}$	Hal değişim sıcaklığı (°C)
$\epsilon_D^{pl}$	Hasar başlangıcındaki eşdeğer gerinim
$\sigma_D$	Hasar gerilmesi (MPa)
$\epsilon_D$	Hasar gerinimi
$D$	Hasar parametresi
$\epsilon_f$	Her bir zaman adımındaki hasar gerinimi
$m$	Isıl mukavemet kaybı
$F_t$	İlerleme kuvveti (N)
$L$	Karakteristik uzunluk (mm)
$l_{sl}$	Kayma bölgesi uzunluğu (mm)
$\varphi$	Kayma düzlemi açısı (°)
$k$	Kayma gerilmesi (MPa)
$V_c$	Kesme hızı (m/s)
$F_c$	Kesme kuvveti (N)
$\epsilon^f$	Kırılma gerinimi
$L_c$	Kontak uzunluğu
$\tau$	Maksimum kayma gerilmesi (MPa)
$\sigma_n$	Normal gerilme (MPa)
$\sigma_m$	Ortalama gerilme (MPa)
$c_p$	Öz ısı (J/kg°C)
$B$	Pekleşme modülü (MPa)
$n$	Pekleşme üssü
$\Delta\bar{\epsilon}^p$	Plastik gerinim artışı
$\Delta\epsilon$	Plastik gerinim artışı
$\nu$	Poission oranı
$\dot{\epsilon}_{ref}$	Referans gerinim değeri
$\dot{\epsilon}_0$	Referans gerinim hızı
$T_{ref}$	Referans sıcaklık (°C)

$T$	Sıcaklık (°C)
$\tau_p$	Sınırlayıcı kayma gerilimi (MPa)
$\beta$	Sürtünme açısı (°)
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$\alpha$	Talaş açısı (°)
$V_f$	Talaş kayma hızı (m/s)
$\bar{\sigma}$	Von Mises gerilmesi (MPa)
$\sigma_{eq}$	Von Mises gerilmesi veya eşdeğer gerilme (MPa)
$l_{st}$	Yapışma bölgesi uzunluğu (mm)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$E$	Young modülü (GPa)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ALE</b>	Arbitrary Lagrangian Eulerian
<b>AutoML</b>	Automatic Machine Learning
<b>BUE</b>	Build-up Edge (yığıma kenar)
<b>EUL</b>	Eulerian
<b>GPR</b>	Gaussian Process Regression
<b>LAG</b>	Lagrangian
<b>MSE</b>	Ortalama Karesel Hata
<b>RMSE</b>	Ortalama Karesel HatanınK
<b>MAE</b>	Ortalama Mutlak Hata
<b>SVM</b>	Support Vector Machine

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. AISI1045 çeliğinin işlenmesi sırasında oluşan sıcaklık dağılımı (Duan vd. 2009).....	5
Şekil 2.2. Tahminlerin regresyon çizgisine mesafesi.....	9
Şekil 2.3. Ortogonal talaş kaldırma işleminin üç boyutlu gösterimi (Thekdi 2019).....	12
Şekil 2.4. Ortogonal talaş kaldırma işleminin şematik gösterimi (Thekdi 2019).....	12
Şekil 2.5. Deformasyon bölgeleri (Kiliçaslan 2009).....	13
Şekil 2.6. Isıl üretim bölgeleri (Fahad ve ark. 2011).....	14
Şekil 2.8. Merchant ortogonal kesme modeli (Lee & Kwak 2022).....	17
Şekil 2.9. Kesici takım talaş yüzeyindeki gerilme dağılımı (Adeyinka & Olaleke, 2020)	23
Şekil 2.10. Lagrangian ve Eulerian Yöntem (Abladey, 2014).....	28
Şekil 2.11. Hasar gelişimini gösteren gerilme-gerinim diyagramı (Nasr ve Ammar, 2017).....	30
Şekil 2.12. Doğrusal hasar gelişimi sürecinde harcanan enerji (Thekdi, 2019).....	32
Şekil 2.13. Ekponansiyel hasar gelişimi sürecinde harcanan enerji (Smith, 2009).....	33
Şekil 2.14. Talaş ayrılma çizgisi ve talaş oluşumu (Soliman vd., 2020).....	34
Şekil 2.15. LAG yöntem ile aşırı eleman bozulması ve talaş ayrılması (Soliman vd., 2020).....	35
Şekil 2.16. ALE yöntemi ile talaş oluşumu (Soliman vd., 2020).....	35
Şekil 2.17. Talaş ayrılma kriteri (Usui ve Shirakashi, 1982).....	36
Şekil 2.18. Bu çalışmada kullanılan ayrılma yöntemi.....	37
Şekil 2.19. Bu çalışmada kullanılan ayrılma yöntemi.....	37
Şekil 2.20. Kesme bölgesinde ısı oluşumu bölgeleri (Altıparmak, 2018).....	38
Şekil 2.21. Analiz sonucu sıcaklık dağılımı.....	39
Şekil 2.22. Plastik deformasyon nedeni ile ısıya dönüşen enerji oranı seçimi.....	40
Şekil 2.23. Sürtünme nedeni ile dağıtılan ısı oranının seçimi.....	40
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan iş parçası (Boy, 2004).....	42
Şekil 3.2. Ortogonal kesici takım.....	42
Şekil 3.3. Takım tucutu (Boy,2004).....	43
Şekil 3.4. JOHNFORD T35 CNC torna tezgahı (Boy, 2004).....	44
Şekil 3.5. KISLER 9257 B tipi dinamometre (Boy,2004).....	45
Şekil 3.6. Ortogonal kesme modeli.....	49
Şekil 3.7. Temas Yüzeyleri.....	49
Şekil 3.8. Sonlu elemanlar ağı.....	49
Şekil 3.9. Sonlu elemanlar ağı.....	50
Şekil 3.10. Modelleme yöntemi.....	50
Şekil 3.11. Tek elemanlı ayrılma kriteri.....	52
Şekil 3.12. Bu çalışmada kullanılan ayrılma yöntemi.....	53
Şekil 4.2. a) Kesme hızı 50 m/ dak , b) Kesme hızı 75 m/ dak.....	55
Şekil 4.3. c) Kesme hızı 100 m/ dak , d) Kesme hızı 125 m/ dak.....	55
Şekil 4.4. Kesme hızı 150 m/dak.....	56
Şekil 4.5. 50m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti.....	59
Şekil 4.6. 75m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti.....	59

Şekil 4.7.	100m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti.....	60
Şekil 4.8.	125m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti.....	60
Şekil 4.9.	Kesme hızı 50m/dak için Tahmin Sonucu.....	63
Şekil 4.10.	Kesme hızı 75m/dak için Tahmin Sonucu.....	63
Şekil 4.11.	Kesme hızı 100m/dak için Tahmin Sonucu.....	64
Şekil 4.12.	Kesme hızı 125m/dak için Tahmin Sonucu.....	64
Şekil 4.13.	Kesme hızı 150m/dak için Tahmin Sonucu.....	64
Şekil 4.14.	Cubic SVM Gerçek sonuç ve tahmin cevabı.....	67
Şekil 4.15.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm, a=2 mm , Vc= 50 m/dak).....	69
Şeki 4.16.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm ve a=2mm , Vc= 75 m/dak).....	69
Şekil 4.17.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm ve a=2mm , Vc= 100 m/dak).....	70
Şekil 4.18.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm ve a=2mm , Vc= 125 m/dak).....	70
Şekil 4.19.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm ve a=2mm , Vc= 150 m/dak).....	71
Şekil 4.20.	Johnson Cook parametrelerinin yüzdesel değişiminin kesme kuvvetlerine etkisi.....	75
Şekil 4.21.	Tahmin sonucu ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.22.	Kesici takım ve iş parçasında oluşan sıcaklık dağılımı.....	78
Şekil 4.23.	Kesme hızı 150m/dak için zamana bağlı sıcaklık değişimi.....	79
Şekil 4.24.	Kesme hızı ve sıcaklık ilişkisi.....	81
Şekil 4.25.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 50 m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	82
Şekil 4.26.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 75 m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	82
Şekil 4.27.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 100 m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	83
Şekil 4.28.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 125 m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	83
Şekil 4.29.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 150 m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	84
Şekil 4.30.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 50m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	85
Şekil 4.34.	Sıcaklık dağılımı (Vc = 150 m/dak, a = 1mm, f = 0,1mm/dev).....	87
Şekil 4.35.	Yapışma ve sürtünme yüzeylerinde sıcaklık verilerinin alındığı bölgeler.....	87
Şekil 4.36.	Yapışma yüzeyinde sıcaklık değişimi.....	88
Şekil 4.37.	Yapışma yüzeyinde sıcaklık değişimi.....	89
Şekil 4.38.	Sürtünme yüzeyinde sıcaklık değişimi.....	89
Şekil 4.39.	Sürtünme yüzeyinde sıcaklık değişim.....	90
Şekil 4.40.	Kayma düzlemindeki gerilme dağılımı ( $5,5 \cdot 10^{-4}$ s.).....	93
Şekil 4.41.	Kayma düzlemindeki gerilme dağılımı ( $1 \cdot 10^{-3}$ s.).....	94
Şekil 4.42.	Kayma düzlemindeki gerilme dağılımı ( $2,5 \cdot 10^{-3}$ s.).....	94

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.2.	Talaş tipleri..... 15
Çizelge 2.3.	AISI 1018 Fiziksel ve Termal Özellikleri..... 20
Çizelge 2.4.	AISI 1018 Çekme testi sonuçları..... 20
Çizelge 2.5.	Kalibre edilmiş Johnson Cook Parametreleri..... 21
Çizelge 2.6.	Geleneksel Johnson Cook Parametreleri (Buchely ve ark. 2019)..... 21
Çizelge 2.7.	Sinterlenmiş karbür kesici takım özellikleri (Akbar ve ark. 2008)..... 22
Çizelge 2.8.	Çözüm yöntemlerinin temel avantaj ve dezavantajları..... 28
Çizelge 2.9.	Abaqus termal temas özellikleri..... 41
Çizelge 3.1.	Takım tutucu ölçüleri (Boy, 2004)..... 43
Çizelge 3.2.	JOHNFORD T35 CNC Tezgah Özellikleri (Boy, 2004)..... 44
Çizelge 3.3.	Kistler 9257 B Dinamometre Özellikleri (Boy, 2004)..... 45
Çizelge 3.4.	Deneysel parametreler (Boy, 2004)..... 46
Çizelge 3.5.	Regresyon ile öğrenme için Johnson Cook malzeme parametreleri... 48
Çizelge 4.1.	Deneysel ve numerik sonuçların karşılaştırılması..... 58
Çizelge 4.2.	Regresyon ile öğrenme algoritmalarının karşılaştırılması..... 62
Çizelge 4.3.	Deneysel yöntem ve tahmin algoritmaları kesme kuvveti değerleri... 65
Çizelge 4.4.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu arasındaki farklar..... 66
Çizelge 4.5.	Öğrenme Algoritmaları ve Validasyon..... 68
Çizelge 4.6.	Talaş derinliği 1 mm için elde edilen sonuçlar..... 72
Çizelge 4.7.	Talaş derinliği 2 mm için elde edilen sonuçlar..... 73
Çizelge 4.8.	Öğrenme Algoritmaları ve Validasyon..... 76
Çizelge 4.9.	Deneysel sonuç ve tahmin sonucu arasındaki farklar..... 77
Çizelge 4.10.	Maksimum talaş sıcaklığı değişimi..... 80
Çizelge 4.11.	Matlab Regresyon ile Öğrenme Algoritmaları ve Validasyon..... 91
Çizelge 4.12.	Sonlu elemanlar analizi ve tahmin sonucu arasındaki farklar..... 92

## 1. GİRİŞ

Birçok endüstri kolunda olduğu gibi imalat endüstrisinin önemli bir alanı olan talaşlı imalat alanına yönelik sayısal modelleme çalışmaları yıllardır devam etmektedir. Yapılan bu çalışmaların ana odak noktası üretimi iyileştirerek daha kaliteli ve daha az maliyetli ürünler ortaya çıkarmak ve aynı zamanda olabilecek hataları önceden kestirmektir.

Bu alanda uzun yıllardır üzerinde durulan sayısal yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Son yıllarda ise mühendislik problemlerinin çözümünde makine öğrenmesi ve yapay zeka ile önceden tahmin etme yöntemleri ön plana çıkmaya başlamıştır. Tahmin etme veya öğrenme yöntemlerinin avantajı sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü uzun süren problemlerin çözüm sürelerini kısaltmak ve çözüme daha kısa sürede ulaşmaktır. Öğrenme veya tahmin etme yöntemleri sonlu elemanlar yazılımlarının içerisine gömülerek ve birlikte kullanılarak çözüm süresini kısaltmakta veya tek başına kullanılarak çözüme ulaşmaktadır.

Doğru modelleme yöntemleri ve kabuller kullanıldığı zaman sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal çözüm yöntemleri deneysel sonuçlara yakın sonuçlar vermektedir. Sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak yapay zeka veya makine öğrenmesi algoritmaları için veri çoğaltma yapılabilir. Aynı zamanda deneysel çalışmalardan elde edilemeyen verilerin elde edilmesi ile deneylerde kaybedilen zaman ve deney maliyetlerini düşürebilir.

Örnek olarak deneysel ortamda kesici takım ucundaki sıcaklıkları tam olarak ölçmek maliyetli ve zordur. Fakat sonlu elemanlar yöntemi ile kesici takım ve iş parçasını ayrıntılı olarak incelenebilir ve istenen verilere ulaşılabilir.

Bu çalışmada kullanılan tüm deneysel veriler ve ölçümler Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi laboratuvarında yapılmış olan Yüksek Lisans çalışmasından referans olarak alınmıştır (Boy, 2004). Referans alınan bu çalışmada AISI 1117 malzemesinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri ve sıcaklıklar deneysel olarak ölçülmüş ve farklı kesme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetleri ve sıcaklıklar bulunmuştur. Bu tez çalışmasında ise bu parametrelere bağlı olarak elde edilen değerler sonlu elemanlar

çözümlelerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmış ve makine öğrenmesi algoritmalarında referans olarak kullanılmıştır.

Yapılan sonlu elemanlar analizlerinin amacı deneysel veriler ile elde edilemeyen ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan Johnson Cook malzeme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini araştırmak ve farklı malzeme parametrelerine bağlı olarak makine öğrenmesi algoritmaları ile kesme kuvvetlerini tahmin etmektir.

Aynı zamanda sonlu elemanlar analizi yapılmadan sadece kesme parametrelerine bağlı olan çıktı değerleri makine öğrenme algoritmalarına öğretilmiş ve en iyi tahmini yapan algoritmaların karşılaştırılması yapılmıştır.

Sayısal çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan Abaqus/CAE 2017 sürümü kullanılarak iş parçası ve kesici takım ortogonal olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde iki boyutlu düzlem gerinim elemanları kullanılarak eksplicit sonlu elemanlar yöntemi ile talaş kaldırma simülasyonları yapılmıştır.

Regresyon ile makine öğrenmesi tahminleri için matematiksel modelleme yazılımı Matlab2022a sürümü içerisinde bulunan Statistics & Machine Learning Toolbox içerisinde bulunan Regresyon ile öğrenme uygulaması kullanılmıştır. Regresyon ve sınıflandırma algoritmaları ve AutoML (otomatik makine öğrenmesi) sayısal verilerden çıkarımlar yapılmasına ve tahmine dayalı modeller oluşturulmasına olanak tanır.

Bu çalışmada makine öğrenmesi ile elde edilen verileri tahmin eden ve en küçük hata oranına sahip algoritmalar seçilmiş ve bu veriler sonlu elemanlar analizi ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca en küçük hata oranına sahip olan makine öğrenme algoritması ile yeni bir kod oluşturularak önceden bilinmeyen verilerin tahmini yapılmıştır. Böylece bilgisayarlı öğrenme yöntemlerinin daha az sayıda analiz yapılarak çözüm süresi uzun olan sonlu elemanlar analizlerine bir alternatif olup olamayacağı araştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sonlu elemanlar yöntemi ile talaş kaldırma simülasyonları üzerine yapılmış bir çok araştırma mevcuttur. Son derece karmaşık bir mekanizma olan talaş kaldırma mekaniğinin sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesini sağlayan en önemli faktörlerin başında talaş oluşumu ve kesici takım ile talaş ilişkisi gelmektedir. Bunun yanında takım ve talaş üzerinde oluşan ısı geçişi, takım ve talaş arayüzünde oluşan temas yüzeyinde ortaya çıkan basınç ve talaş kayma hızı ise takım ömrünün değerlendirilmesi bakımından oldukça önemlidir.

Talaş kaldırma çalışmaları 150 yıl kadar eskiye dayanmaktadır. İlk çalışmalar, delik delme işleminde belirli bir malzeme hacminin kaldırılması için gerekli işin hesaplanmasına odaklanan Cocquilhat (1851) tarafından yapılmıştır. Tresca (1873), talaş oluşumunun ve talaş formunun nasıl oluştuğuna odaklanmıştır. Ernest ve Merchant (1941), ise talaş kaldırma işlemleri için basitleştirilmiş ve geniş alanda kullanılan kesme modelini geliştirmişlerdir. Lee ve Shaffer (1951), Kobayashi ve Thomsen (1962), Ernest ve Merchant modeli üzerine çalışmalar yaparak katkı sunmuşlardır. Zvorykin (1896), Tresca'nın modelinde kesme için gerekli kuvvet ve enerjiyi hesaplamış ve kesme açısını hesaplayarak fiziksel bir açıklama sağlamıştır. Oxley (1989), işlenebilirliği analitik olarak açıklamak için paralel düzlemlili kayma bölgesi modelini öne sürmüşlerdir.

Analitik modellere ek olarak sonlu elemanlar yöntemi alanında yapılan bir çok çalışma mevcuttur ve bu çalışmalar devam etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi analitik modellere göre daha gerçekçi sonuçlar vermekte ve talaş kaldırma mekaniğinin ayrıntılı şekilde incelenmesine fırsat vermektedir.

İlk sonlu elemanlar modellerinden biri Klamecki (1973) tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model, üç boyutlu bir model olmasının yanı sıra sadece talaş oluşumunu açıklamıştır ve talaş gelişimine odaklanmamıştır. Tay vd. (1974), talaş oluşumunun sürekliliğini hesaplamak için iki boyutlu ortogonal talaş kaldırma modeli kullanarak sıcaklık dağılımını hesaplamışlardır.

Shirakashi ve Usui (1974) ise talaş ayrılmasını modellemek için kesici takım uç kısmında küçük bir çatlak tanımlamıştır. Bu model talaş oluşumunu hesaplamak için iki boyutlu düzlem gerinim elemanlarını kullanan ilk modellerden biridir.

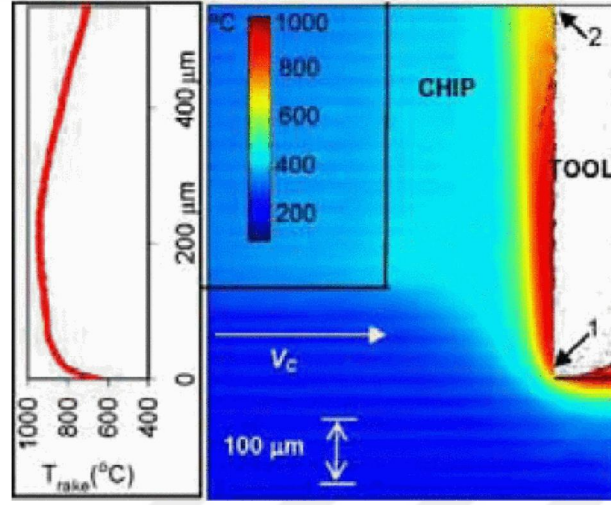
Talaş kaldırma işlemlerinde bugüne kadar yapılan araştırmalar ;

- i) Takım aşınmasının elde edilmesi,
- ii) Yüzey kalitesinin belirlenmesi
- iii) Kesici takım, kalıp ve fişürlere gelen kuvvetlerin hesaplanması
- iv) Talaş kontrolünün hesaplanması
- v) İşlenecek iş parçasının doğrulanması
- vi) Kesici takım, iş parçası ve talaş üzerinde sıcaklık dağılımının hesaplanması

gibi çalışmalardır.

Talaş formunun oluşumu ile ilgili ilk sayısal yaklaşımlar önceden oluşturulmuş bir talaş formu kullanılarak Usui ve Shirakashi (1982) tarafından yapılmıştır. Lagrangian yöntemi kullanarak yapılan ilk çalışmalarda birisi ise Strenkowski ve Carroll (1985) tarafından yapılmıştır.

Duan vd. (2009), AISI 1045 çeliğinin yüksek hızda işlenmesi sırasında kesici takım üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını ticari sonlu elemanlar yazılımı Abaqus ile simule etmişlerdir. En yüksek sıcaklıkların kesici takımın uç radyusunda olmadığını ve takım uç radyusundan belirli bir mesafede olduğunu görmüşlerdir. Aynı zamanda deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar analizleri karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sıcaklık dağılımı sonucu Şekil 2.1’de görülmektedir.



**Şekil 2.1.** AISI1045 çeliğinin işlenmesi sırasında oluşan sıcaklık dağılımı (Duan vd. 2009)

Duan vd, (2009) tarafından yapılan çalışmanın temel amacı, Johnson-Cook malzeme modeli ve ticari sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS'e dayalı kırılma kriteri kullanılarak AISI 1045 sertleştirilmiş çeliğin yüksek hızda işlenmesi sırasında kesme sıcaklığı dağılımını simüle etmektir. Sertleştirilmiş çeliğin yüksek hızda işlenmesi sırasında en yüksek sıcaklıkların takım ucu bölgesinde olmadığını ve takım ucundan belirli bir mesafede olduğunu göstermişlerdir. Simülasyonlar ve deneyler arasındaki karşılaştırma ise sonlu elemanlar simülasyonu sonucunun deneyler ile tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada sunulan sonlu elemanlar simülasyonu yöntemi, sertleştirilmiş çeliğin yüksek hızda işlenmesi sırasında kesme sıcaklığı alanını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilir.

Sayısal çalışmalara ek olarak son yıllarda yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi yöntemler ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu yöntemler hem sayısal modelleme çalışmalarını kısaltmakta hemde sayısal modelleme çalışmalarına gerek olmadan sadece deneysel verilerin kullanılması ile farklı parametrelere bağlı çıktı tahmini yapılabilmektedir.

Hernández vd. (2021), AISI 1045 çeliğinin soğutma sıvısı olmadan yüksek hızlı tornalanması sırasında kesme kuvvetleri ve spesifik enerji tüketimini bir sinir ağı topolojisine uygun fonksiyon kullanarak modellemiştir. Bu amaçla MATLAB ortamında geliştirilen bir model

ile deneysel parametreler öğrenilmiştir. Böylece farklı kesme koşulları altında spesifik enerji tüketimi tahmininin örtüştüğü kanıtlanmıştır.

Peng vd. (2019), kesme kuvvetlerinin tahmini için supervised machine learning (SVM) yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada deneysel ve sonlu elemanlar çalışmaları hibrid şekilde kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemi ile lineer regresyon analizi karşılaştırıldığında makine öğrenmesi yöntemlerinin daha doğru sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Vijay ve Borkar (2016), ortogonal kesme işleminde takım aşınmasının tahmini için deneysel verilere bağlı olarak istatistik bir yaklaşım yapmışlardır. Kesme kuvvetleri, kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği parametrelerine bağlı olarak takım aşınmasını regresyon analizi ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada takım aşınması üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğunu ve regresyon analiz sonuçlarının deneysel takım aşınması sonuçları ile örtüştüğü sonucuna varmışlardır.

## **2.1. Regresyon ile Makine Öğrenmesi**

Bilgisayarlı görme, sınıflandırma, doğal dil işleme ve biyoinformatik gibi birçok farklı alanda kullanılan makine öğrenmesi, giriş verileri ile çıkış verileri arasında doğrusal bir formül ile ifade edilemeyen problemleri çözebilmek için geliştirilmiş güncel ve esnek hesaplama sistemlerine verilen genel addır (Metlek ve Kayalp, 2020).

Makine öğrenmesi, matematiksel ve istatistiksel yöntemler kullanarak mevcut verilerden çıkarımlar yapan, bu çıkarımlarla bilinmeyenlere dair tahminlerde bulunan modelleme ve algoritmalarından oluşan yapay zekanın bir alt dalıdır. Makine öğrenmesinin temel amacı, doğru kestirimler yapmaktır. Fakat kestirim fonksiyonlarını yorumlamak ve belirli bir olasılık modeli ile ilişkilendirmek zor olabilmektedir (Akay ve Çağlayan, 2018).

Literatüre bakıldığında makine öğrenme algoritmaları ile tahmin etme konusunda çalışmalar çok eski değildir ve son yıllarda araştırmacıların odak noktası haline gelmeye başlamıştır.

Dubey vd. (2021), kesme hızı, talaş derinliği ve ilerleme parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesi konusunda farklı makine öğrenme algoritmalarını kullanarak çalışmalar yapmışlar ve lineer regresyon ile rastgele orman (Random Forest) algoritmalarının diğer algoritmalara göre daha doğru tahminler yapabildiği sonucuna varmışlardır.

George vd. (2021), optimal talaş kaldırma parametrelerinin belirlenmesi için makine öğrenme algoritmalarını kullanmışlar ve sonuç olarak neural ağlarının ve makine öğreniminin mühendisler için güçlü araçlar olduğu, ancak endüstriyel uygulamalar için uygulanabilecek verileri elde etmek için yaratıcı bir şekilde kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kant ve Sangwan (2015) ise çalışmalarında optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi için yapay sinir ağları ve destekleyici vektör regresyon modellerini kullanmışlardır. Sonuç olarak yapay sinir ağlarının destekleyici öğrenme modeline göre göreceli olarak daha doğru sonuç verdiğini ve kullanılan öğrenme yöntemlerinin deneysel sonuçlar ile yakın olduğunu görmüşlerdir.

Chengwen vd. (2020), AISI 304 gibi işlenmesi zor malzemeler için Supported Vector Machine algoritmasının kullanıldığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak kesme parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili yaptıkları çalışmada Supported Vector Machine algoritmasının yüksek doğruluk oranı sağladığını görmüşlerdir.

Makine öğrenmesinde doğru algoritma seçimi yapmak verilerimizi en doğru şekilde analiz etmek bakımından önemlidir. Bu algoritmalar açık kaynak kodlu ve ticari yazılımlar içerisinde gömülmüş şekilde kullanıcılara sunulmaktadır. Makine öğrenme algoritmaları için en iyi açık kaynak kodları Python arayüzünde kullanılan Scikit-learn yazılımıdır ve Python arayüzü için makine öğrenme algoritması kütüphanelerini içerir. Bunun dışında yine açık kaynak olarak kullanılabilir bir yazılım olan ve makine öğrenme algoritmalarını içeren ve akademisyenler tarafından kullanılan JASP yazılımıdır.

Ticari olarak kullanılan bir yazılım olan ve yine içerisinde makine öğrenme algoritmaları içeren ve tek işlemde tüm algoritmaların test edilebilmesine ve bu algoritmaların doğruluğunun karşılaştırılmasına imkan veren Matlab yazılımıdır. Bu çalışmada çalışmamızda Matlab2022a sürümü içerisinde yer alan Statistic ve Machine Learning aracı kullanılarak farklı öğrenme algoritmaları arasındaki farklar karşılaştırılmıştır.

### 2.1.1. Öğrenme algoritmalarının değerlendirme kriterleri

Deneysel veriler Matlab yazılımının regresyon ile öğrenme algoritmasına transfer edildikten sonra aynı anda tüm öğrenme algoritmaları çalıştırılarak en iyi tahmin yapan algoritma seçilebilmektedir. Öncelikle kesme hızı ve ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen veriler Matlab yazılımının regresyon ile öğrenme algoritmasına transfer edilmiş ve tüm algoritmalar aynı anda çözümlenerek en az hatayı veren algoritma seçilmiş ve bu algoritmalar test edilmiştir.

Tahmin etmeye ilişkin iki önemli adım bulunmaktadır; birincisi veriyi tahmin etmek için hazırlamadır. İkincisi ise farkı tahmin edici modellerin karşılaştırılmasıdır. Modelleri karşılaştırma ölçütleri; doğruluk, hız, sağlamlık, ölçeklenebilirlik, yorumlanabilirliktir. Yapay Sinir Ağları ve makine öğrenmesi yöntemlerinin performans değerlendirmelerinde kullanılan temel performans göstergeleri arasında  $R^2$ ,  $MSE$ ,  $RMSE$  ve  $MAE$  sayılabilir (Karasu ve ark., 2018).

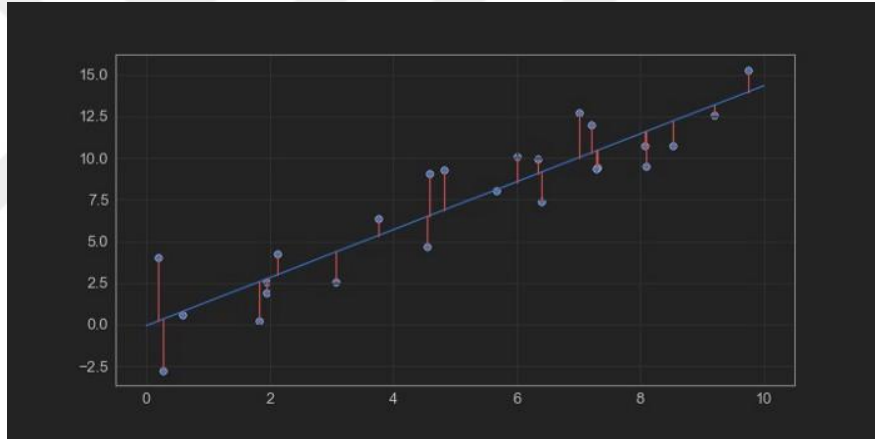
Modelin açıklayıcılık katsayısı olan  $R^2$  modelin tahmin ilişkisi ile doğru orantılıdır.  $MSE$ ,  $RMSE$  ve  $MAE$  modelin performansıyla ters orantılı hata ölçüleridir. Düşük  $MSE$ ,  $RMSE$  ve  $MAE$  değerleri yüksek performansı gösterir (Chen, J. L. vd 2015).

Bu performans ölçüleri içerisinde  $R^2$ , modelin doğruluk oranı karar verme katsayısıdır. Bu katsayı değerinin yüksek olması tahmin ilişkisinin iyi olduğu gösterir.  $MSE$ ,  $RMSE$  ve  $MAE$  ise birer hata ölçüsü olması nedeniyle düşük sonuçlar, performans ile ters orantılı olarak yüksek performansı gösteren ölçülerdir (Wang ve Xu, 2004). Örneğin  $RMSE$  sıfıra eşit olması durumunda iyi bir performans göstermektedir (Çınaroğlu, 2017).

Birçok regresyon modeli, en iyi sonuca yakınsamayı belirlemek için uzaklık ölçütlerine dayanır. En iyi sonucun tanımının bazı ölçütlerle nicel olarak açıklanması gerekir. Kullanılan ölçütler genellikle, ortalama mutlak hata ( $MAE$ ), ortalama karesel hata ( $MSE$ ) veya ortalama karesel hata karekökü ( $RMSE$ ) şeklindedir.

$MAE$ , tüm tahminlerin ortalamasını alarak, tahminlerin (veri kümesinin girişleri) bir regresyondaki tahminlere mutlak mesafesini değerlendirir. Negatif hataların doğru hesaplanabilmesi için ise mesafelerin mutlak değerini kullanılır. Şekil 2.2, bu durumu tam olarak göstermektedir.  $MAE$  'nin hesaplanması Denklem 2.1 'de görülmektedir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |y_i^{gerçek} - y_i^{tahmin}| \quad (2.1)$$



**Şekil 2.2.** Tahminlerin regresyon çizgisine mesafesi

Bunu yapmanın başka bir yolu, sonuçların pozitif olması için mesafenin karesini almaktır. Tahmin edilen değerler gerçek değerlere ne kadar yaklaşırsa  $MSE$  değeri de o kadar küçülür.  $MSE$ , modelin hatalarının karelerinin ortalamasını ifade eder (Denklem 2.2).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i^{gerçek} - y_i^{tahmin})^2 \quad (2.2)$$

$RMSE$ ,  $MSE$  hatasını karekökünü alarak orijinal birime döndürmek için kullanılır.  $RMSE$ , tahmin hatalarının ne kadar yayıldığıнын ölçüsüdür.  $MSE$  değerinin kareköküdür ( Denklemler 2.3).

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.3)$$

Bu çalışmada ise tüm bu parametreler değerlendirilmiş ve kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarının daha yakın tahminde bulunduğu tespit edilmiştir. Çizelge 2.1, Matlab yazılımı içerisinde bulunan makine öğrenme algoritma kütüphanesini göstermektedir.

**Çizelge 2.1.** Matlab yazılımı içerisinde bulunan makine öğrenme algoritmaları

<b>Kullanılan Algoritmalar</b>
Linear Regression (Interactions Linear)
Linear Regression (Linear)
Linear Regression (Robust Linear)
Stepwise Linear Regression
Tree (Medium Tree)
Tree (Coarse Tree)
Tree (Fine Tree)
SVM (Linear SVM)
SVM (Medium Gaussian SVM)
SVM (Cubic SVM)
SVM (Coarse Gaussian SVM)
SVM (Fine Gaussian SVM)
Gaussian Process Regression (Squared Exponential GPR)
Gaussian Process Regression (Matern 5/2 GPR)
Gaussian Process Regression (Rational Quadratic GPR)
Gaussian Process Regression (Exponential GPR)
Ensemble (Boosted Trees)
Ensemble (Bagged Trees)

## 2.2. Ortogonal Kesme İşleminin Temelleri

Talaş kaldırma işlemleri işleme kinetiğine bağlı olarak geleneksel ve geleneksel olmayan talaş kaldırma işlemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Geleneksel talaş kaldırma işlemleri tornalama, frezeleme, delme ve aşındırıcı ile kesme işlemlerini içermektedir. Geleneksel olmayan yöntemler ise aşındırıcı su jeti ile kesme ve lazer ile işlemeyi içermektedir.

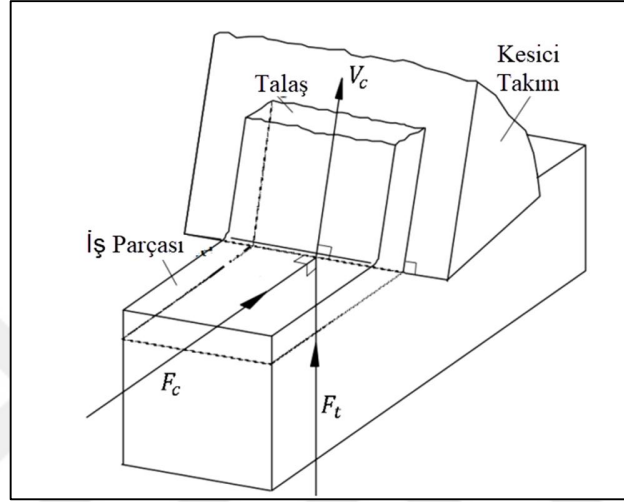
Konvansiyonel işleme, takımın ilerleme açısına ve kesme yönüne bağlı olarak ortogonal ve eğik kesme olarak ikiye ayrılabilir. Ortogonal işleme, kesici takımın kesici kenarının ilerleme hareketi yönüne dik olduğu bir talaş kaldırma işlemidir ve talaşın yana kıvrılmasının olmadığı iki boyutlu bir mekanik talaş kaldırma işlemi temsil eder. İki boyutlu gösterimi nedeniyle ortogonal işleme birçok bağımsız değişkeni ortadan kaldırır; örneğin, üçüncü yöndeki kesme kuvveti göz ardı edilir. Öte yandan, eğik kesme, kesici takımın ilerleme yönüne eğimli olduğu bir kesme türüdür ve daha pratik talaş akışı gösterimi ile üç boyutlu problemlere karşılık gelir. Bu temsil daha karmaşıktır ve talaş kaldırma problemlerinde üç kuvvet bileşeninin tümünün dikkate alınması gerekir.

Üç boyutlu talaş kaldırma mekaniğinin karmaşık bir proses olması sebebi ile kesme mekaniği problemlerinde ortogonal kesme veya talaş kaldırma modeli tercih edilir. Shaw ve Cookson (2005), ortogonal talaş kaldırma modelini, homojen olmayan gerinimleri yok saydığı yani deforme olmuş talaş boyunca gerinim dağılımının düzgün olması varsayımına dayandırarak ideal bir model olarak kabul etmiştir.

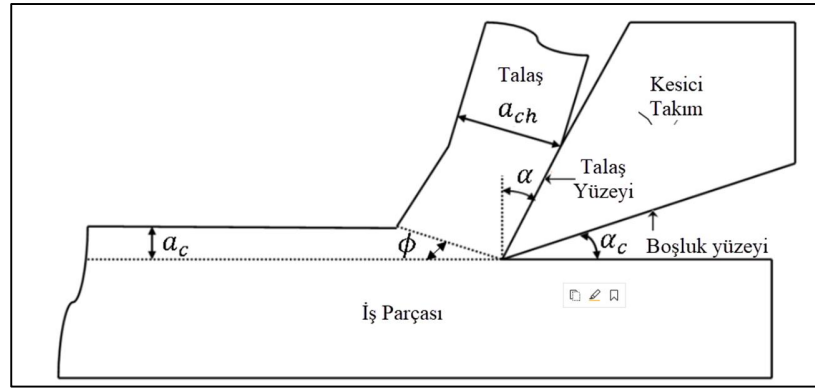
Ortogonal talaş kaldırma işlemin için yapılan kabuller aşağıda listelenmiştir. (Fahad, 2012)

- Kesici takım tamamen keskindir ve boşluk yüzeyi boyunca temas yoktur
- Kesici kenarı yüzeye dik uzanan düz bir çizgidir ve kesme işlemi boyunca düz bir yüzey oluşturur.
- Talaş akışı sadece iki düzlemde gerçekleşir.
- Kesme genişliği sabittir.
- Sürekli talaş oluşum vardır.

Bu çalışmada Şekil 2.3 ve Şekil 2.4' te gösterildiği gibi ortogonal talaş kaldırma işlemi ele alınacaktır. Bu şekilde,  $a_c$  deforme olmamış talaş kalınlığı veya derinliği,  $a_{ch}$  ise deforme olmuş talaş kalınlığıdır.  $\alpha$  talaş açısı,  $\phi$  kayma düzlemi açısı,  $V_c$  kesme hızı,  $V_f$  talaş kayma hızı,  $F_c$  kesme kuvveti, ve  $F_t$  ilerleme kuvveti olarak temsil edilir (Thekdi, 2019).



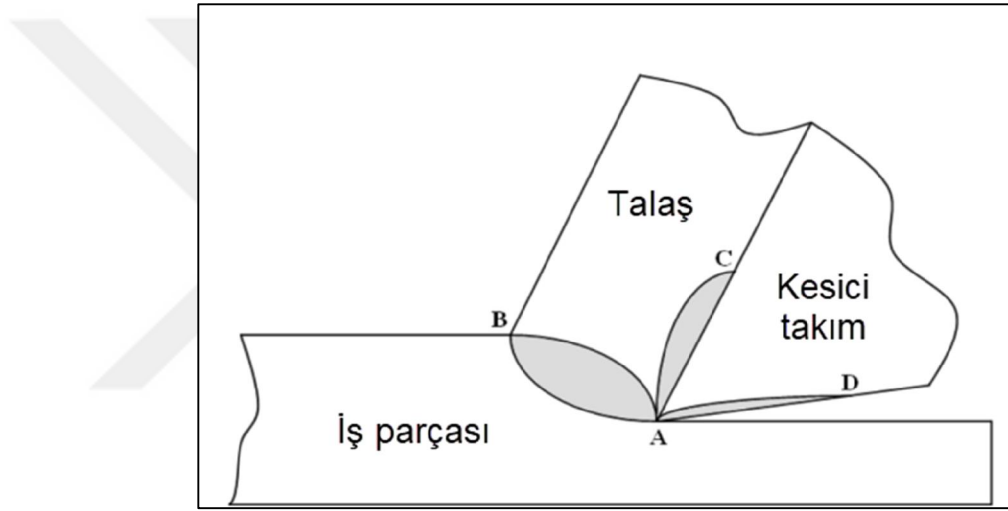
Şekil 2.3. Ortogonal talaş kaldırma işleminin üç boyutlu gösterimi (Thekdi 2019).



Şekil 2.4. Ortogonal talaş kaldırma işleminin şematik gösterimi (Thekdi 2019).

Talaş kaldırma esnasında iş parçası malzemesi plastik olarak deforme olarak kesme veya deformasyon bölgeleri oluşturur. Bu plastik deformasyon bölgeleri, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi üç ana bölgeye sahiptir (Raczy vd., 2004).

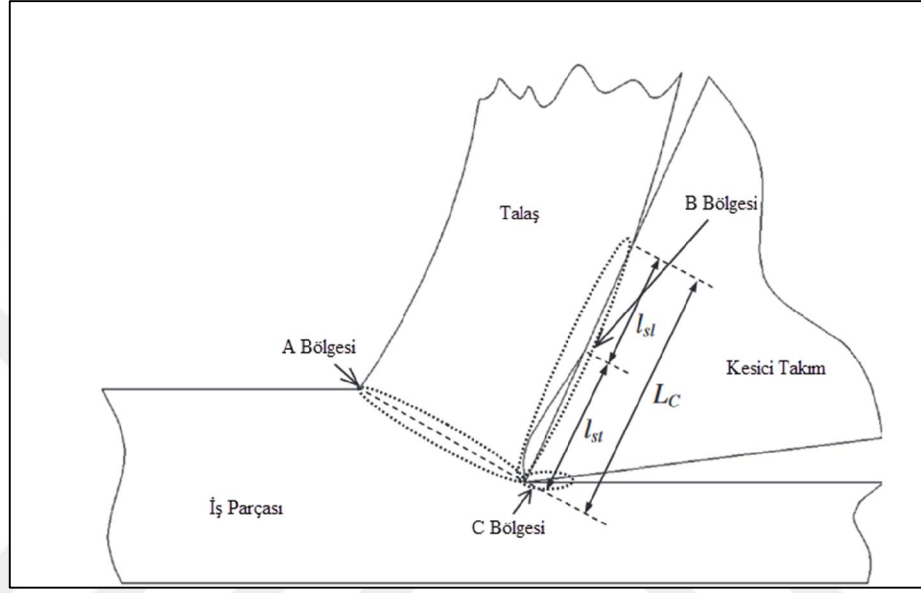
Talaş oluşumu esas olarak takımın ucundan deforme olmamış iş parçası malzemesi ile deforme olmuş talaş arasındaki bağlantıya kadar uzanan birincil kesme bölgesinde (A-B) gerçekleşir. Yüksek hızlı işlemede deformasyon, yüksek gerinim oranlarında meydana gelir ve takım iş parçası malzemesi boyunca hareket ettiğinde talaş malzemeden ayrılır ve takımın talaş yüzeyi üzerinde kayar. Kesici takımın talaş yüzeyinin yakınında ise ikincil deformasyon bölgesi (A-C) oluşur. Başlangıçta, talaş takımın eğimli yüzüne yapışır ve ardından takımın üzerinden kayar ve kıvrılarak uzaklaşır. Yeni işlenmiş yüzey takımın yan tarafı ile sürtündüğünde, üçüncül bir deformasyon bölgesi (A-D) oluşturur (Kiliçaslan, 2009).



**Şekil 2.5.** Deformasyon bölgeleri (Kiliçaslan 2009)

Talaş kaldırma esnasında oluşan tüm enerjinin tamam ısıya dönüşmesi genel olarak kabul görmektedir. Plastik deformasyon bölgeleri gibi ısı üretimi bölgeleride Şekil 2.6'da görüldüğü gibi üçe ayrılmaktadır. Kayma bölgesinde veya birincil deformasyon bölgesinde (A bölgesi) üretilen ısı, kayma düzleminde yapılan işten kaynaklanmaktadır. Takım ve talaş ilişkisinin olduğu bölgede (ikincil deformasyon B bölgesi) üretilen ısı, talaş ile kesici takımın talaş yüzeyi arasındaki kayma sürtünmesinin üstesinden gelmek için yapılan işten kaynaklanmaktadır. Bu iş yapışma bölgesinde  $l_{st}$  ve kayma bölgesinde  $l_{sl}$  meydana gelir. Bu iki faktörün toplamı kontak uzunluğu olarak  $L_c$  tanımlar. Bu bölgede üretilen ısı, esas olarak talaş yüzeyindeki krater aşınmasının kaynağıdır (Trent, 1988).

Üçüncül deformasyon bölgesinde (bölge C) üretilen ısı, takımın yan yüzü ile işlenmiş yüzey arasındaki sürtünme temasının bir sonucu olarak ortaya çıkan sürtünmenin üstesinden gelmek için yapılan iştir. Bu bölgede oluşan ısı ise yanak aşınmasının kaynağıdır (Abukhshim vd. ,2005).



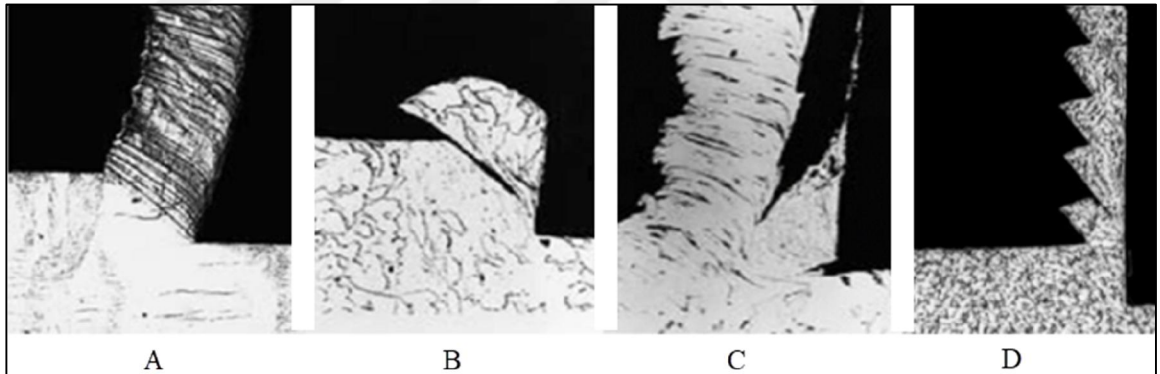
**Şekil 2.6.** Isıl üretim bölgeleri (Fahad ve ark. 2011)

Genel olarak talaşlar, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sürekli talaş, süreksiz talaş, yığılma kenar ve testere tipli talaş olarak sınıflandırılır. Sürekli talaş, çelik veya alüminyum gibi sünek malzemelerin yüksek kesme hızında kesilmesi sonucunda meydana gelir.

Yığılma kenar (BUE), sünek bir malzemenin düşük hızda işlenmesi sırasında takım ile iş parçası arasındaki düşük sıcaklıklar ve yüksek sürtünme nedeniyle üretilir. Yarı süreksiz talaş, titanyum ve östenitik paslanmaz çelik gibi daha sert malzemelerin yüksek hızda işlenmesinde oluşur. Dökme demir ve pirinç gibi kırılğan malzemeler düşük kesme hızında kesildiğinde süreksiz talaş gözlemlenir (Uhlmann vd., 2015). Çizelge 2.2'de ise talaş tipini bağlı olarak malzeme örnekleri, malzeme özellikleri ve kesme parametreleri değerlendirilmiştir.

## Çizelge 2.2. Talaş tipleri

Talaş Tipi	Malzeme Özelliği	Örnek Malzemeler	Kesme Parametresi
Sürekli talaş	Sünek Malzemeler	Pirinç, Bakır, Düşük Karbonlu Çelikler ve Alüminyum	Yüksek kesme hızları
Süreksiz talaş	Kırılgan malzemeler	Dökme demir	Düşük kesme hızları, negatif talaş açısı
Sürekli talaşa yığılma kenar oluşumu	Sünek malzemeler	Pirinç, Bakır, Düşük Karbonlu Çelikler ve Alüminyum	Tahmini zor
Testere tip talaş	Düşük termal iletkenliğe sahip malzemeler	-	-



Şekil 2.7. Talaş tipleri (Shah 2019)

A) Sürekli talaş B) Süreksiz talaş C) Yığılma kenar D) Testere tipli talaş

Sünek malzemelerin ortogonal olarak işlenmesinde, kayma düzlemi açısı işlemin verimliliğini belirler. Büyük bir kayma düzlemi açısı değeri, sürekli talaş ve mükemmel yüzey kalitesi anlamına gelirken küçük değer, süreksiz talaş ve düşük yüzey kalitesi anlamına gelir. Çok sayıda araştırmacı, kayma düzlemi açısını tahmin etmek için modeller geliştirmeye çalışmıştır (Thekdi, 2019).

Piispanen (1937), malzemenin bir iskambil destesi gibi iş parçası yüzeyine eğimli hareketler olarak kesilmesini tanımlanmıştır. Merchant ve Ernst (1941), kayma düzlemi açısını tahmin etmek için bir teori geliştirmiştir ve bu model iş parçası malzemesinin tek bir ince kesme düzlemi boyunca deforme olduğunu varsayar. Aynı zamanda mükemmel keskinlikte bir takım, sabit kesme derinliği, sabit deforme olmamış talaş kalınlığı, sabit bağıl hız ve yan yüzey boyunca temas olmadığını varsaymaktadır.

Merchant (1945), kayma düzlemi açısı  $\phi$ , eğim (talaş) açısı  $\alpha$  ve sürtünme açısı  $\beta$  arasında Denklem 2.4' teki eşitliği kabul etmektedir.

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) \quad (2.4)$$

Daha sonra Merchant minimum enerji ilkesini kullanarak Denklem 2.4 ile aynı sonucu bulmuştur.

$$\phi = \frac{\pi}{4} - (\beta - \alpha) \quad (2.5)$$

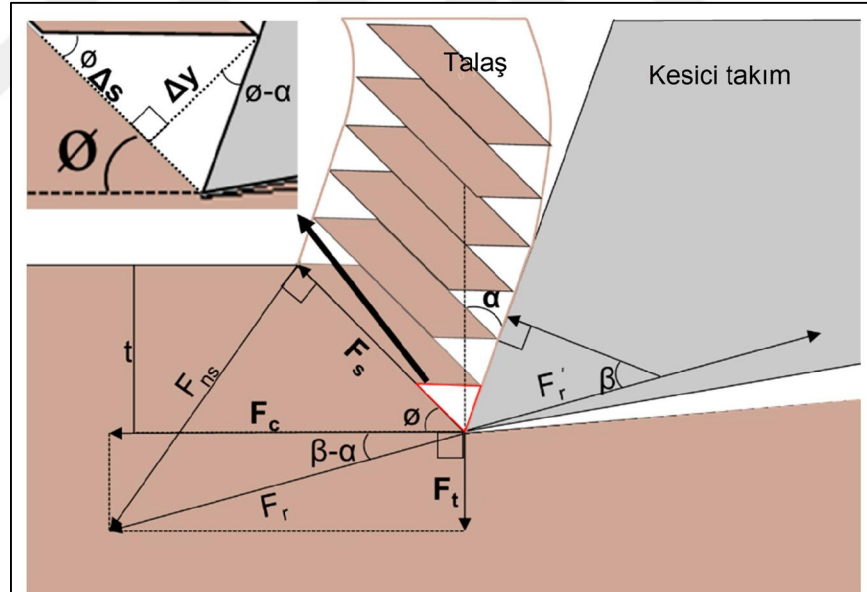
Kayma düzlemi alan teorisi, bir kesme düzleminde gerilim ve hız arasındaki ilişkiyi belirler. Bu teoride, malzeme özelliklerinin rijit ve tamamen plastik olduğu varsayılır. Bir kayma çizgisi, tüm uzunluğu boyunca maksimum kayma gerilimi yönüne teğettir. Plastik bir bölgedeki kayma çizgilerinin birleşimine kayma çizgisi alanı denir. Lee ve Shaffer (1951), düz talaşın akışını tanımlamak için ilk kaymalı alan modelini geliştirdi. Lee ve Shaffer (1951) modelinde tüm kayma çizgileri düzdür, çünkü hidrostatik basınç tüm hatlar boyunca sabittir. Kudo (1965), düz kayma çizgisini, dönen talaşlara yol açan kavisli kayma çizgisine dönüştürmüştür.

Oxley ve Welsh (1964), talaşların tek bir kesme düzlemi boyunca basit bir kesme hattında değil, sonlu bir plastik bölgede oluştuğunu gözlemlemiştir. Okushima ve Hitomi (1961) ise kalın bölge kesme modeli olarak bir kesme bölgesi önermiştir. Kalın kayma bölgesi modellerinin karmaşıklık nedeniyle, deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olmasına rağmen, kullanımı zordur. Sonunda araştırmacılar, işleme modellerini tahmin etmek için sonlu

elemanlar yöntemini kullanmaya başlamışlardır. Talaş oluşumu için ilk sayısal yaklaşım, Usui ve Shirakashi (1982) tarafından önceden tanımlanmış, önceden belirlenmiş bir talaş geometrisine bağlı olarak tanımlanmış ve iterative yöntem ile hesaplama yapılmıştır. Talaş formunu Lagrangian yöntemi yaklaşımı ile belirleyen ilk çalışmalar Strenkowskive ve Carroll (1985) ve Lin, Z. C., ve Lin, S. Y. (1992) tarafından yapılmıştır.

### 2.3. Merchant Kayma Düzlem Modeli

Ortogonal talaş kaldırma işleminde kesici kenarın önündeki malzeme yani talaş, birincil deformasyon bölgesi üzerinde kaymaya başlar ve burada bir kayma düzlemi oluşur. Bu kayma düzlemi ile işlenen yüzey arasında ise Şekil 2.7’de  $\phi$  simgesi ile gösterilen kayma düzlemi açısı oluşur. Bu kayma düzlemi açısının değeri kesici takıma gelen kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında önemlidir. Kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında en çok bilinen model Merchant diyagramıdır (Altintas ve Ber, 2001).



Şekil 2.8. Merchant ortogonal kesme modeli (Lee & Kwak 2022)

Şekil 2.8’de görülen paralel düzlemlili ortogonal kesme modelinde kayma gerilmesi ( $\tau_s$ ) Denklem 2.6’deki gibi hesaplanır.

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{wt} \quad (2.6)$$

Bu denklemde  $F_s$  kayma kuvveti,  $w$  kesme genişliği ve  $t$  ise talaş derinliğidir.

Kayma kuvveti ( $F_s$ ) ve sürtünme kuvveti ( $F_r$ ) arasındaki analitik ilişki ile, kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve ilerleme kuvveti ( $F_t$ ) belirlenebilir. ;Kuvvetlerin hesaplanabilmesi için kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve ilerleme kuvvetinin ( $F_t$ ) deneysel olarak belirlenmesi gerekir.

Merchant (1945), modeline göre kayma düzlemi açısı, sürtünme açısı ve talaş açısı ile bağlantılıdır Kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti ise kayma düzlemi açısına göre Denklem 2.7' deki gibi açıklanır.

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\beta - \alpha) = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{F_t}{F_c} \right) \quad (2.7)$$

Denklem 2.7' de  $\beta$ , talaş ile kesici takımın talaş yüzeyi arasında oluşan sürtünme açısıdır. Talaş açısı ile  $\alpha$  ile gösterilir.

Kesme işlemi sırasında talaş bir grup paralel kesme plakasının sürekli bir yapısı olarak oluşturulur. Bu nedenle, malzemenin kesme şekil değiştirmesi, Denklem 2.8 ile ifade edildiği gibi kesme deformasyonundan ve kesme plakasının kalınlığından belirlenebilir.

$$\gamma = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \quad (2.8)$$

Burada  $\Delta s$  kayma deformasyonu ve  $\Delta y$  ise birincil kayma bölgesinin kalınlığıdır.

#### 2.4. Malzeme Modeli

Akma gerilimi, malzemeyi sürekli olarak plastik olarak deforme etmek için gereken gerilimin anlık değeri olarak tanımlanır. Akma geriliminin, gerinim, gerinim oranı ve sıcaklık ile birlikte bir sabitle ilişkisi iş malzemesi için yapısal veya akma gerilim modeli olarak adlandırılır.

Johnson Cook Malzeme modeli, talaşlı imalat işlemlerinde malzeme davranışını ve talaş oluşumunu tanımlamak için kullanılan en doğru malzeme modellerinden biridir. Bu model için akma gerilimi modeli Johnson ve Cook tarafından tanımlanmıştır ve model yüksek gerinim oranları, gerinim sertleşmesi ve sıcaklığa bağlı özellikler için uygun parametreleri içermektedir. Bu model,  $10^2 \text{ s}^{-1}$ 'den  $10^6 \text{ s}^{-1}$ 'e kadar yüksek gerinim oranları için çok uygundur (Thekdi, 2019).

Johnson Cook malzemesinin matematiksel modeli Denklem 2.9'da görülmektedir.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n][1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right)][1 - \hat{T}^m] \quad (2.9)$$

Denklem 2.3'te birinci terim izotropik sertleşmeyi, ikinci terim gerinim sertleşmesini ve üçüncü terim malzemenin ısıl mukavemet kaybını tanımlar.  $\bar{\sigma}$ , Von-Mises gerilmesi,  $\bar{\epsilon}^{pl}$ , eşdeğer plastik gerinim,  $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$  ise eşdeğer plastik gerinim hızıdır ve  $\dot{\epsilon}_0$  ise referans gerinim hızıdır. A, başlangıç akma gerilmesi, B, pekleşme modülü, n, pekleşme üssü, C, gerinim oranı bağımlılık katsayısı, m ise ısıl mukavemet kaybı katsayısıdır.

Denklem 2.9'da görülen boyutsuz sıcaklık terimi olan  $\hat{T}$ , Denklem 2.10'da gösterildiği gibi tanımlanmaktadır. Bu denklemde  $T_{melt}$  erime sıcaklığı ve  $T_{tr}$  ise hal değişim sıcaklığıdır.

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & T < T_{tr} \quad \text{için} \\ \frac{T - T_{tr}}{T_{melt} - T_{tr}} & T_{tr} \leq T \leq T_{melt} \quad \text{için} \\ 1 & T > T_{melt} \quad \text{için} \end{cases} \quad (2.10)$$

Bu terimler yüksek gerinim hızlarında yapılan Hopkinson Basınç Bar (HBB) test tekniği ile elde edilmektedir. Bu test yöntemi malzemeleri yüksek deformasyon hızlarında test etmek için 1949 yılında Kolsky tarafından geliştirilen Hopkinson Basınç Bar (HBB) test tekniğidir (Kolsky, 1949).

#### 2.4.1. Aisi 1018 malzeme modeli

Bu çalışmada AISI 1018 malzemesi referans alınmıştır ve bu malzemeye ait fiziksel ve termal özellikler Çizelge 2.3'te, farklı gerinim hızlarında ve farklı sıcaklıklarda yapılmış olan çekme testleri Çizelge 2.4'te, kalibre edilmiş Johnson Cook malzeme parametreleri, Çizelge 2.5'te ise geleneksel yöntem ile elde edilmiş Johnson Cook ise Çizelge 2.6' da verilmiştir.

Buchely vd. (2019), çalışmasında Johnson Cook malzeme modelinin parametrelerini geleneksel yöntemler ile bulduktan sonra genetik algoritmalar kullanarak malzeme parametrelerini optimize etmişler ve çalışmalarını hem deneysel yöntemler ile hemde sonlu elemanlar analizleri ile doğrulamışlardır.

**Çizelge 2.3.** AISI 1018 Fiziksel ve Termal Özellikleri (Buchely ve ark. 2019)

$\rho(\frac{kg}{m^3})$	$E(GPa)$	$\nu$	$c_p$ (j/kgK)	$\beta$	$T_{ref}(K)$	$T_{melt}(K)$
7900	200	0.3	440	0.9	298	1793

**Çizelge 2.4.** AISI 1018 Çekme testi sonuçları (Buchely ve ark. 2019)

Gerinim Hızı( $s^{-1}$ )	Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )	Akma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Gerçek Gerilme (MPa)	Maksimum Uniform Uzama	Hasar Gerinimi
0,001	25	749	784	0,033	0,5
1	5	757	807	0,043	0,63
5	25	778	827	0,05	0,66
10	25	792	835	0,049	0,69
15	25	829	855	0,054	0,71
1	80	725	760	0,029	0,62
1	100	715	746	0,026	0,6
1	250 $^{\circ}C$	680	699	0,017	0,44

**Çizelge 2.5.** Kalibre edilmiş Johnson Cook Parametreleri (Buchely ve ark. 2019)

A (MPa)	B (MPa)	n	c	<i>m</i>	$\dot{\epsilon}_0$
735,7598	392,779	0.6145	0.0233	1.1433	0.6297
D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	$\bar{u}_{pl}$
0.0075	0.3921	2.8140	0.1672	-4.7944	0.2

**Çizelge 2.6.** Geleneksel Johnson Cook Parametreleri (Buchely ve ark. 2019)

A (MPa)	B (MPa)	n	c	<i>m</i>	$\dot{\epsilon}_0$
735,8	309,8	0.4396	0.0064	1.05	1
D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	$\bar{u}_{pl}$
0.1555	0.99	1.889	0.042	-1.8235	0.2

#### 2.4.2. Kesici takım malzeme özellikleri

Talaş kaldırma işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesinde kesici takıma ait mekanik özelliklerin tanımlanması önemlidir. Bu özellikler sıcaklık dağılımını doğrudan etkilemektedir. Çünkü talaş kaldırma işleminde takım ve talaş arasındaki ısı iletimi ve bu ısı iletimi vasıtası ile oluşacak sıcaklık değişimleri iş parçasının mekanik özelliklerini etkilemektedir.

Moriwaki vd. (1993), bakırın elmas kesici takım ile 138 m/dak ve 276 m/dak kesme hızları ile işlenmesi sırasında takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısının yarısının iş parçasına ve diğer yarısının ise takıma dağıldığını göstermiştir. Takeuchi vd. (1982) ise P15 karbür kesici takım kullanarak karbon oranı %0,55 olan çeliğin işlenmesinde üretilen ısının % 10 ila %30'unun kesici takıma iletiildiği sonucuna varmışlardır. Wright vd. (1980), 10 m/dak ile 175 m/dak arasında değişen kesme hızlarında M34 yüksek hız çeliği ile düşük karbonlu demiri işlerken talaş yüzeyinde üretilen ısının %80 ile %90'ının talaşa iletiildiğini göstermişlerdir.

Yapılan araştırmalardan görüldüğü üzere ısı dağılımını etkileyen en önemli faktörler, kullanılan kesici takım malzemesi, iş parçası malzemesi ve kesme koşullarıdır. Bu çalışmada

kullanılacak olan kaplamasız sinterlenmiş karbür kesici takıma ait mekanik ve ısıl özellikler Çizelge 2.7’de görülmektedir.

**Çizelge 2.7.** Sinterlenmiş karbür kesici takım özellikleri (Akbar ve ark. 2008)

Kaplamasız sinterlenmiş kesici takım özellikleri	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
Young Modülü(GPa)	534	-	-	-	-	-	-	-	-
Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	11900	-	-	-	-	-	-	-	-
Termal İletkenlik(W/m°C)	40,15	44,35	48,55	52,75	56,95	61,15	65,35	69,55	73,73
Öz Isı(J/kg°C)	346,01	358,01	370,01	382,01	394,01	406,01	418,01	430,01	442,01

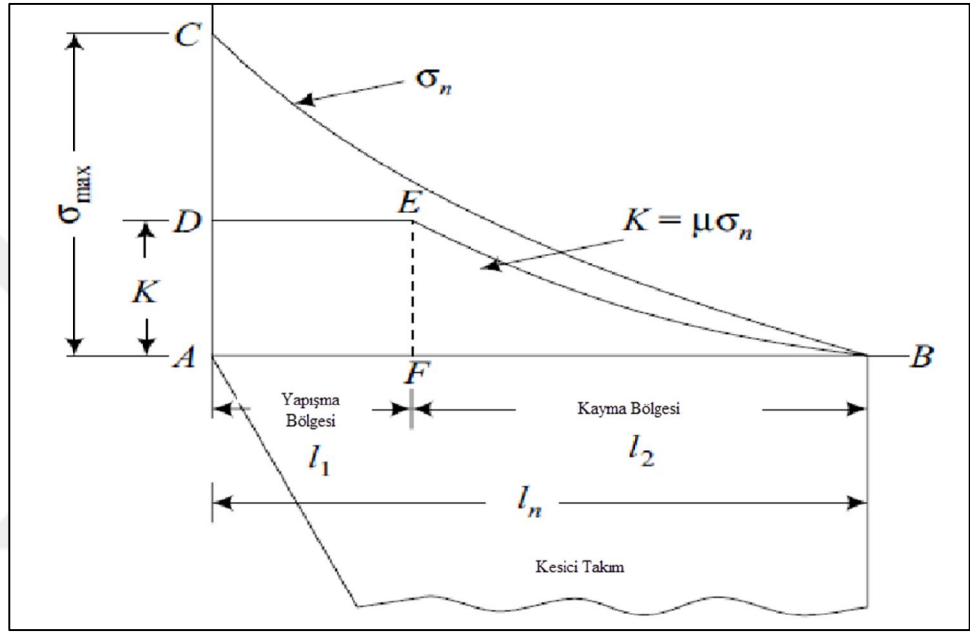
## 2.5. Sürtünme Modeli

Takım ve talaş arayüzü sürtünme modeli, sonlu elemanlar simülasyonlarının en önemli parçasıdır. Güvenilir talaş kaldırma simülasyonu için doğru bir sürtünme modeli uygulamak önemlidir. Sürtünme, iş parçasının yüzey kalitesini, talaş formunu, kesme sıcaklığını ve takım aşınmasını etkiler. Lokal bir bölgede meydana gelen yüksek gerilim ve sıcaklık nedeniyle takım ve talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin belirlenmesi zordur. Bu nedenle sürtünme modellemesi, yapılan ilk araştırmalarda göz ardı edilmiş veya Coloumb yasasına dayalı sabit bir sürtünme katsayısı kabul edilmiştir (Filice vd., 2007).

Daha gerçekçi bir yaklaşım, talaş yüzeyindeki gerilmelerin gerçek dağılımı ile ilgilidir, oldukça karmaşıktır ve doğrusal değildir. Normal gerilme takım kenarından talaşın takımdan ayrıldığı noktaya kadar azalır. Bunun tam tersi olarak sürtünmeden kaynaklı gerilim takım kenarına yaklaştıkça kayma gerilimine eşit olur ve daha sonra azalır. Takımın talaş yüzeyi boyunca ideal stres dağılımı, Şekil 2.7’de gösterilmiştir (Zorev, 1963).

Yapışma teması, kesici takım ucunun yakınında meydana gelir ve takım talaş arayüzündeki sıcaklık ile kayma gerilmesinin büyüklüğünden etkilenir. Yapışma bölgesinde, sabit bir kayma gerilmesi değeri varsayılır (Molinari vd., 2011).

Yapışma bölgesinden sonra yani takım talaş temas uzunluğunun sonunda kayma gerilmesi doğrusal olarak sıfıra düşer. Kayma gerilmesinin artık var olmadığı bölge kayma bölgesi olarak adlandırılır ve burada Coulomb'un sürtünme yasaları geçerlidir (Şekil 2.9). Şekil 2.9'da görülen  $l_1$ , yapışma bölgesi uzunluğu,  $l_2$ , kayma bölgesi uzunluğu,  $K$ , kayma gerilmesi,  $\sigma_n$ , normal gerilme ve  $\mu$ , sürtünme katsayısıdır.



**Şekil 2.9.** Kesici takım talaş yüzeyindeki gerilme dağılımı (Adeyinka & Olaleke, 2020).

Özel (2006), Lagrange yöntemi kullanarak yaptığı ortogonal talaş kaldırma çalışmasında kesici takım ucu arayüzünde beş farklı temas modelini değerlendirmiş ve bu sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Özel'in dikkate aldığı beş kontak modeli aşağıda listelenmiştir:

- i) Takım-talaş arayüzünün tamamında sabit sürtünme; tüm takım-talaş arayüzünde sabit sürtünme katsayısı uygulanmıştır (Denklem 2.11).

$$m = \frac{\tau}{k} \quad (2.11)$$

Burada  $m$ , kesme sürtünme faktörüdür.  $k$  kayma gerilmesidir ve  $\tau$  maksimum kayma gerilmesidir.

ii) Yapışmada sabit kayma sürtünmesi ve kayma bölgesinde Coulomb sürtünmesi;

Bu yaklaşımda takım-talaş arayüzü yapışma bölgesi ve kayma bölgesi olmak üzere ikiye ayrılır,  $l_p$  yada Şekil 2.9'da gösterilen  $l_1$ , yapışma bölgesinin uzunluğu ve  $l_c$  veya Şekil 2.9'da gösterilen  $l_n$  temas uzunluğudur. Kayma sürtünme faktörü  $m$ , yapışma bölgesi üzerine uygulanır ve sürtünme katsayısı  $\mu$ , kayan bölge üzerine uygulanır.

iii) Takım-talaş arayüzünün tamamında değişken kesme sürtünmesi:

Denklem 2.11'i değiştirerek, tüm takım-talaş arayüzündeki değişken kesme oranının ampirik ilişkisi denklem 2.12' deki gibi elde edilebilir.

$$m = \tau_p/k[1 - \exp\{-(\sigma^n/\tau_p)^n\}]^{\frac{1}{n}} \quad (2.12)$$

burada  $n$  bir sabittir ve  $\tau_p$  sınırlayıcı bir kayma gerilimidir.

iv) Takım-talaş arayüzünün tamamında değişken sürtünme katsayısı:

Kayma gerilimini sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olarak ele alarak, takım boyunca değişken sürtünme katsayısı denklem 2.13' teki gibi tanımlanabilir;

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n} = f(\sigma_n) \quad (2.13)$$

v) Yapışma bölgesinde değişken kayma sürtünmesi ve kayma bölgesinde değişken sürtünme katsayısı: Bu modelde, yapışma bölgesi üzerinde üçüncü yaklaşımdan  $m$  ve kayan bölge üzerinde dördüncü yaklaşımdan  $\mu$  kullanmıştır.

Özel (2006), tüm takım-talaş arayüzünde değişken sürtünme modelleri kullanıldığında deneysel ve simülasyon verileri arasındaki hatanın minimum olduğunu belirlemiştir. Bu nedenle talaş kaldırmanın sonlu elemanlar simülasyonunda daha doğru bir sonuç elde etmek için değişken sürtünme modelleri kullanılmalıdır (Thekdi, 2019).

Zorev (1963) tarafından deneysel çalışmalara bağlı olarak geliştirilen bir model üzerinde, Usui vd. (1981), doğrusal olmayan kayma gerilmesi ve normal gerilmeyi Denklem 2.14' teki gibi ilişkilendirir.

$$\tau_f = \frac{k_f}{\sqrt{3}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\mu\sigma_n}{k}\right)\right) \quad (2.14)$$

Bu denklemde normal gerilme, yapışma bölgesinde sonsuza yaklaştıka ( $\sigma_n \rightarrow \infty$ ), kayma bölgesinde sifıra ( $\sigma_n \rightarrow 0$ ), yaklaşır.

Talaş kaldırma problemlerinin zmn için sürtünme modelleri üzerinde yapılan çok sayıda çalışma olmasına rağmen, takım ve talaş arayüzünün tam ilişkisi hala belirsizliğini korumaktadır. Bunun nedeni, takım ve talaş arasındaki ilişkinin deneysel yöntemler ile tam olarak belirlenememesidir. Sürtünme modellerinin tam olarak doğrulanabilmesi için kesici takımın talaş yüzeyi üzerinde oluşan normal ve kayma gerilmelerinin dağılımının tespit edilmesi gerekir. Bunun için deneysel yaklaşımlar belirlenmeli ve kesici takımın talaş yüzeyinin Gordon, (1967) tarafından açıklandığı gibi ayırma metodu (split tool method) ile ayrılması gerekir (Rex, 2013).

Sürtünme modelleri üzerinde çok sayıda çalışma olmasında rağmen araştırmacıların çoğu hala Coulomb sürtünme modeline güvenmektedir. Bunun nedeni; geliştirilen sürtünme modellerinde bulunan sabit katsayıların belirlenmesinin ve karar verilmesinin zor olması ve sonlu elemanlar üzümlerinde sayısal yakınsama sorunlarına yol açmasıdır (Rex, 2013). Yapılan deneysel çalışmalarda sürtünme katsayısını belirlemek zor olduğu için bu bu çalışmada, yapışma ve kayma bölgelerinde aynı sürtünme katsayıları uygulanmıştır.

## 2.6. Talaş Kaldırma Mekaniiğinde Sayısal Yöntemlere Giriş

Talaş kaldırma mekaniğinin sonlu elemanlar ile modellenmesi ile ilgili literatürde Lagrangian modelleme yaklaşımı çok yaygın ve temel yöntem olması ile birlikte beş farklı sayısal yöntemden söz edilebilir. Bu yöntemler; Lagrangian(LAG), Eulerian(EUL), Remeshing, Arbitrary Eulerian-Lagrangian (ALE) ve Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL)

yöntemleridir. Soliman vd. (2020) talaş kaldırma simülasyonlarının, LAG, EUL, ALE olmak üzere üç yöntem ile yapılabileceğini açıklamışlardır.

LAG yaklaşımın talaş morfolojisinin elde edilmesinde deneysel sonuçlar ile yakın olduğu görülmektedir. LAG modelleme yöntemi, sayısal ağın metal deformasyonunuyla birlikte hareket etmesine dayanır. Bununla birlikte önceden bir talaş geometrisinin bilinmesine ihtiyaç yoktur. Fakat sayısal ağın aşırı deformasyonu dolayısı ile yüksek deformasyon gösteren talaş kaldırma problemlerinin çözülmesinde zorluklar ile karşılaşmaktadır. Yinede talaş formunun elde edilmesindeki başarısından dolayı araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır (Thekdi, 2019).

EUL yaklaşımında ise sayısal ağ elemanları bir hacimde sabitlenir ve malzeme elemanların yüzeyi boyunca bir akışkan gibi hareket eder. Bu modelleme yöntemine akışkanlar dinamiği örnek verilebilir. Bu sayede herhangi bir numerik problem ile karşılaşmadan yüksek deformasyonlar çözülebilir. Bu yöntemin dezavantajı eleman ayrılmasına ve talaş kırma mekanizmasına izin vermemesidir. Ek olarak bu formülasyon önceden bilinen bir talaş geometrisine ihtiyaç duyar ve talaş geometrisinin deneysel ortamda önceden bilinmesi gerekir (Umer vd., 2008).

ALE yönteminin avantajı ise LAG ve EUL yöntemlerini birlikte kullanmasıdır. ALE yönteminde ise malzeme ile birlikte sayısal ağ düğüm noktalarında hareket eder. İki yöntem arasındaki ilişki sayesinde sayısal ağı oluşturan elemanların bozulmasının önüne geçilebilir ve kesici takımın uç bölümünde oluşan talaş ayrılmasının doğru şekilde modellenmesi sağlanabilir.

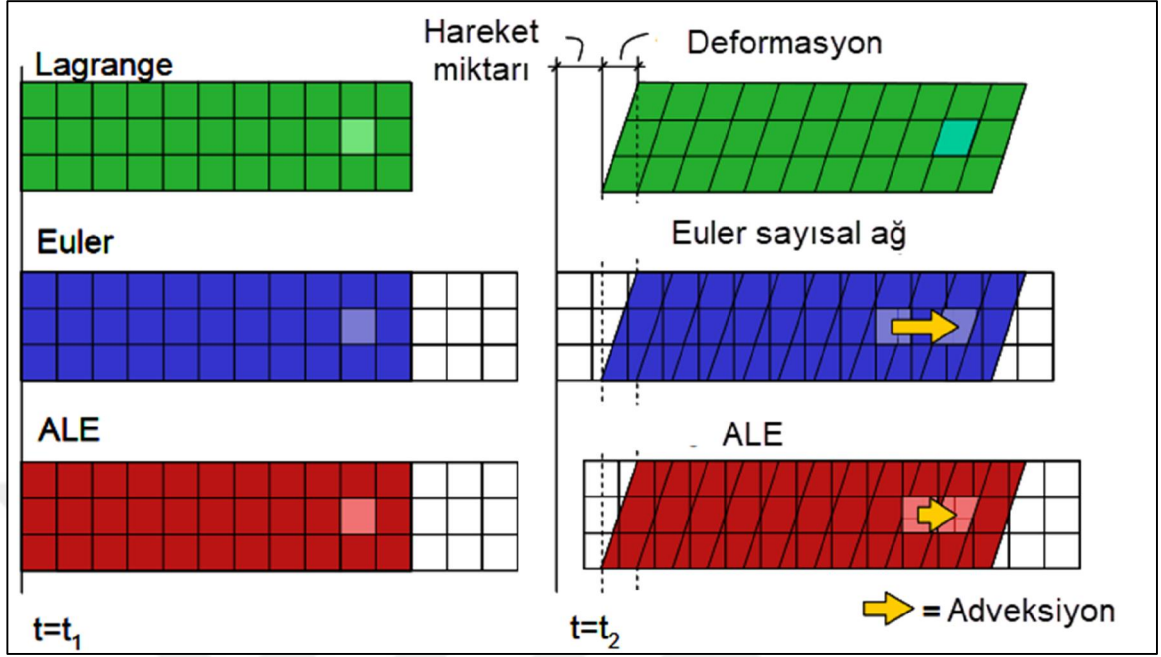
LAG yöntem ile EUL yöntem arasındaki temel fark EUL yönteminin durağan (steady state) kesme koşullarının modellenmesinde daha çok tercih edilmesidir. Sonuç olarak LAG yöntemi tercih edildiği zaman talaş formu ve kalınlığı kesme koşulları tarafından belirlenebilmektedir. EUL yöntemde ise önceden bilinen bir talaş şekline ihtiyaç vardır.

Ek olarak LAG formülasyonunda bir takım eksikler bulunmaktadır. En önemlisi, talaş gelişimine bağlı olarak yüksek plastik deformasyondan dolayı sayısal ağ önemli derecede

bozulmakta ve tekrar sayısal ağ oluşturmaya gerek duyulmaktadır. İkincisi, kesici takım geometrisine özellikle uç radyusuna ve talaş açısına bağlı olarak düğüm noktası ayrılmasının belirlenememesidir ve bunun belirlenmesi için farklı değerler ile denemeler yapıp en uygun modelin tespit edilmesi gerekir. Fakat bu problemler daha yoğun bir sayısal ağ ve daha sık yeniden sayısal ağ oluşturma ile önlenebilir.

Bu problemler sayısal ağ sabit durumda olduğu için Eulerian formülasyonunda görülmemektedir. Böylece yüksek plastik deformasyondan dolayı oluşan sayısal ağ bozulması problemleri görülmez ve yeniden sayısal ağ oluşturmaya ihtiyaç duyulmaz. Böylece Eulerian formülasyonunun sünek malzemeler için kesme kenarı etrafındaki bölgenin modellenmesinde daha verimli olduğu söylenebilir. Daha öncede bahsedildiği gibi talaş kalınlığının ve kesici takım talaş temas uzunluğunun sabit kabul edilmesi bu yöntemin en önemli dezavantajıdır. Talaş kalınlığının doğru şekilde modellenmesi başlıca çıktıdır ve proses boyunca hesaplanan tüm parametreleri etkiler. Talaş kalınlığının sabit olarak kabul edilmesi fiziksel değildir (Abushawashi vd., 2011). Sonuç olarak Eulerian formülasyonu, gerçek deformasyon prosesine doğru şekilde cevap veremez.

Grissa vd. (2018), bu üç yöntemde uygulayarak ortogonal talaş kaldırma simülasyonları gerçekleştirmiştir ve bu yöntemleri deneysel veriler ile karşılaştırarak en gerçekçi talaş kaldırma sonucuna LAG ve ALE yöntemleri ile ulaşımlardır. Yapılan araştırma ve çalışmalar neticesinde bu çalışmada LAG ve EUL yöntemlerinden oluşan ALE yönteminde karar kılınmıştır. LAG yöntemi, EUL ve ALE yöntemleri arasındaki farklar Şekil 2.10' da şematik olarak görülebilir. Ayrıca bu yöntemler arasındaki temel farklar Çizelge 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.10. Lagrangian ve Eulerian Yöntem (Abladey, 2014)

Çizelge 2.8. Çözüm yöntemlerinin temel avantaj ve dezavantajları

Çözüm Yöntemi	Avantajı	Dezavantajı
Lagrangian Yöntemi	Doğru talaş geometrisi	Sayısal ağ bozulması
Eulerian Yöntemi	Ağ bozulması yoktur Talaş ayrılma kriteri gerekmez	Talaş geometrisinin önceden bilinmesi gerekir
Arbitrary Eulerian Lagrangian Yöntemi	Sayısal ağ bozulması yoktur	Ağ değişim parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekir.

## 2.7. Talaş Ayrılmasının Modellenmesi ve Hasar Başlangıç Kriteri

Talaş kaldırma problemlerinin çözümünde takım ucunun yakınında herhangi bir ağ bozulması olmadan, kesici takımın iş parçasına doğru olan hareketini simüle etmek için bir talaş ayırma kriteri olarak hasar modeli tanımlanmalıdır. Hasar modelinin belirlenmesi için hasar başlangıç kriteri ve hasar değerlendirme kriterleri belirlenmelidir.

Hasar başlangıç kriteri, hasar öncesi malzeme durumunu belirler. Bu çalışmada Johnson-Cook hasar modeli kullanılmıştır. Bu modelin hasar parametresi  $\varepsilon_D$ , Denklem 2.15' te görüldüğü gibi eşdeğer plastik gerinim artış oranlarının  $\Delta\varepsilon^p$ , kırılma(fracture) gerinimi  $\varepsilon^f$ , oranı olarak belirlenmektedir (Smith, 2009).

$$\varepsilon_D = \sum \frac{\Delta\varepsilon^p}{\varepsilon^f} \quad (2.15)$$

Kırılma (fracture ) gerinimi ise Denklem 2.16' daki şekilde açıklanmaktadır.

$$\varepsilon_D^{pl} = \left[ d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_{ref}}\right) \right] \left[ 1 - d_5 \left(\frac{T-T_{tr}}{T_{melt}-T_{tr}}\right)^m \right] \quad (2.16)$$

$\varepsilon_D^{pl}$ , hasar başlangıcındaki eşdeğer gerinim ve  $d_1$ 'den  $d_5$ ' e kadar olan parametreler ise deneysel olarak elde edilen hasar sabitleridir.  $\sigma_m$ , ortalama gerilme,  $\sigma_{eq}$ , eşdeğer gerilme,  $\dot{\varepsilon}_{ref}$ , referans gerinim değeri,  $\dot{\varepsilon}_{pl}$ , gerinim artış oranı,  $T$ , güncel sıcaklık,  $T_{melt}$ , ergime sıcaklığı,  $T_{tr}$ , hal değişim sıcaklığı ve m ise malzeme sabitidir (Smith, 2009).

Sonlu elemanlar çözücüsü her bir zaman adımında hasar gerinimi  $\varepsilon_f$  ve plastik gerinim artışı olan  $\Delta\varepsilon$ 'yi hesaplar ve kümülatif olarak her bir elemanın hasar sabiti olan  $D$  parametresine ekler. Her bir eleman için belirlenen kümülatif hasar kanunu Denklem 2.17 ile belirlenir (Smith, 2009).

$$D = \sum \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f}\right) \quad (2.17)$$

Kırılma yani hasar oluştuğunda malzeme mukavemeti deformasyondan dolayı azalır. Gerilmeye bağlı hasar oluşumu ise aşağıdaki Denklem 2.18 ile açıklanmaktadır.

$$\sigma_D = (1 - D)\sigma_{eq} \quad (2.18)$$

$\sigma_D$ , hasara gerilmesini ve  $D$  ise hasar parametresidir.  $D$  değeri 1 olduğunda malzeme yük taşıma kapasitesini kaybeder ve hasar oluşur.



bağlıdır ve hasar gelişim yasasının belirlenmesi için bir malzeme parametresi olarak kullanılamaz. Bunun yerine hasar gelişimi yasası, eşdeğer plastik yer değiştirme cinsinden veya kırılma enerjisi cinsinden belirtilir.

Hillerborg (1978), çatlak başlangıç kriteri için gerekli enerji olan  $G_f$  parametresini malzeme parametresi olarak tanımlar. Bu yaklaşımda, hasarın başlamasından sonraki mukavemet özelliğini kaybetme tepkisi, bir gerilme-gerinim tepkisinden ziyade bir gerilim-yer değiştirme tepkisi ile tanımlanır. Bu yaklaşımda kırılma enerjisi Denklem 2.19 ile ifade edilir.

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} L \bar{\sigma}_y d\bar{\epsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \bar{\sigma}_y d\bar{u}^{pl} \quad (2.19)$$

Burada  $\bar{u}^{pl}$  eşdeğer plastik yer değiştirmedir ve  $L$ , eleman geometrisine dayalı karakteristik uzunluktur.  $L$ , eleman alanının karekökü olarak kabul edilir. Hasar gelişim yasası,  $\bar{u}^{pl}$  veya  $G_f$  cinsinden belirtilebilir. Her iki seçenek ağ bağımlılığı sonuçlarını azaltmak için karakteristik uzunluğu hesaba katar. Hasar başlatma kriterine ulaşıldığında, etkin plastik yer değiştirme  $\bar{u}^{pl}$  Denklem 2.20' deki gibi tanımlanmaktadır. (Abaqus Analysis User's Guide, version 6.14)

$$\dot{\bar{u}}^{pl} = L \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} \quad (2.20)$$

Hasar gelişimi doğrusal veya ekponansiyel form olarak tanımlanabilmektedir.

### 2.8.1. Doğrusal hasar gelişimi

Çatlak büyümesi, enerji yayılım oranı kritik enerji  $G_f$  parametresine eşit veya daha yüksek olduğunda meydana gelir. Doğrusal hasar gelişimi Denklem 2.21 ile tanımlanmaktadır. Burada  $\bar{u}_f$ , hasar durumundaki eşdeğer plastik gerinim,  $\bar{\sigma}_d$  ise hasar öncesi eşdeğer plastik gerilmedir (Smith, 2009).

$$G_f = \frac{1}{2} \bar{u}_f \bar{\sigma}_d \quad (2.21)$$

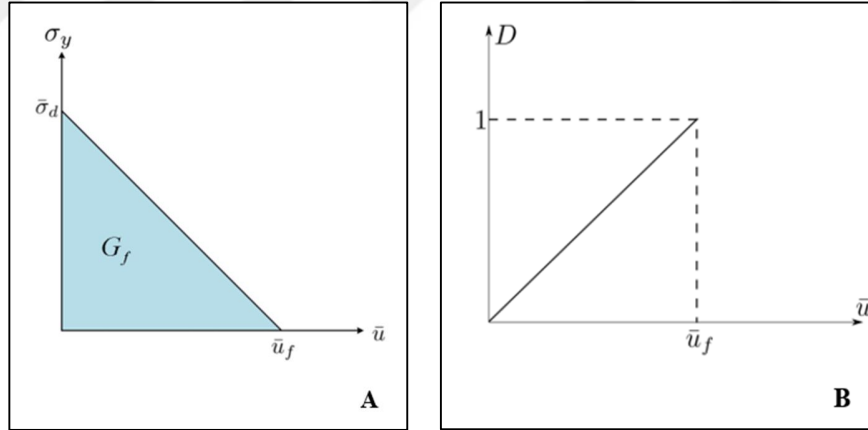
Abaqus'ta eşdeğer plastik yer değiştirme artışına dayalı olarak hasar gelişimini ölçmek için bir skaler rijitlik bozulma değişkeni (SDEG),  $D$  kullanılır. Hasar başlatma kriterleri karşılandığında, doğrusal hasar parametreleri aşağıdaki Denklem 2.22 ve Denklem 2.23' e göre artar (Smith, 2009).

$$D = \frac{L\dot{\epsilon}^{pl}}{\bar{u}^{pl}} = \frac{\dot{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} \quad (2.22)$$

$$\bar{u}_f^{pl} = \frac{2G_f}{\sigma_{y0}} \quad (2.23)$$

Burada  $\sigma_{y0}$  hasar oluştuğu durumdaki akma gerilmesidir.

Bu denklemler, hasar oluşumu sürecinde harcanan enerjinin  $G_f$  olmasını sağlar. Bir elemanda hasar parametresi olan  $D$ , 1'e eşit olduğunda eleman modelden çıkarılır. Şekil 2.12'de görülen  $\bar{\sigma}_d$  eğrisinin altındaki alanlar  $G_f$ ' yi temsil eder(Smith, 2009).



**Şekil 2.12.** Doğrusal hasar gelişimi sürecinde harcanan enerji (Thekdi, 2019).

**A)** Eşdeğer gerilmeye bağlı **B)** Hasar parametresine bağlı

### 2.8.2. Ekspansiyel hasar gelişimi

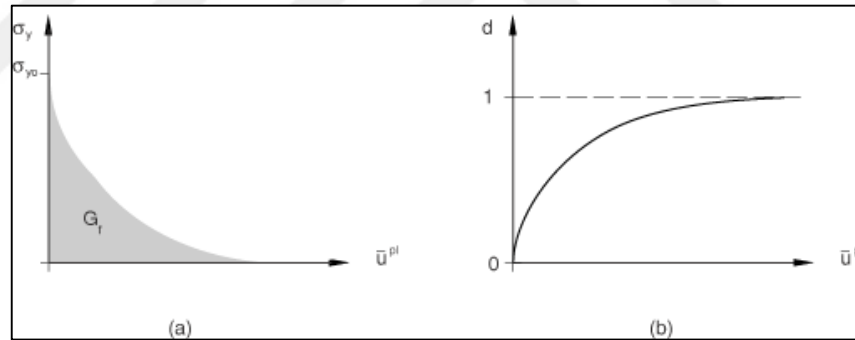
Ekspansiyel hasar gelişimi için kritik enerji yayılım oranı  $G_f$ , Denklem 2.24 ile ifade edilir.

$$G_f = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \bar{\sigma}_y d\bar{u} \quad (2.24)$$

Hassar kriteri karşılandığında ekspansiyel hasar parametreleri Denklem 2.25'e göre artar.

$$D = 1 - \exp\left(-\int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \frac{\bar{\sigma}_y}{G_f} d\bar{u}\right) \quad (2.25)$$

Modelin bu formülasyonu, hasar gelişimi süreci sırasında harcanan enerjinin  $0.99.G_f$  olmasını sağlar çünkü hasar parametresi pratikte üstel gelişim için 1 değerine ulaşamaz (Smith, 2009).



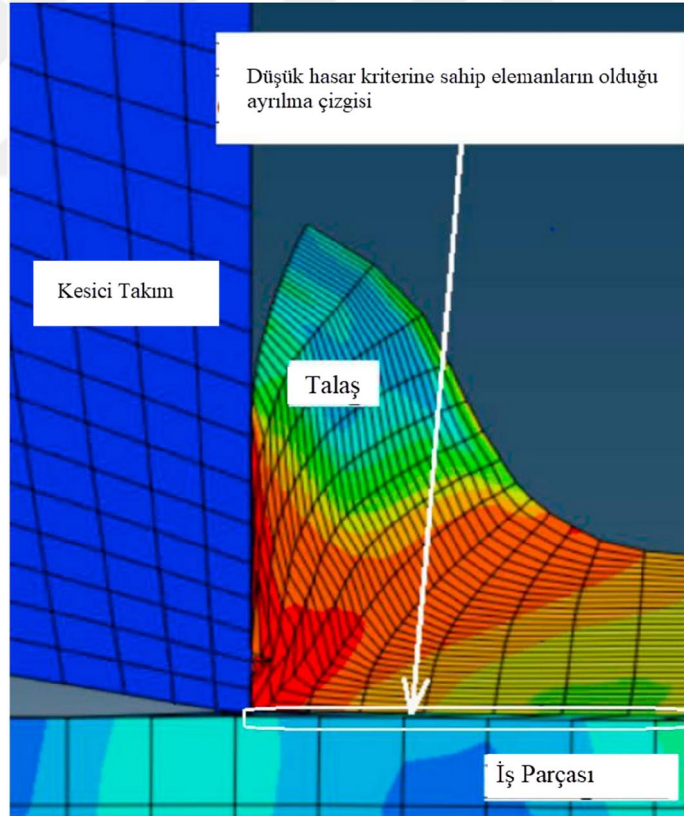
Şekil 2.13. Ekspansiyel hasar gelişimi sürecinde harcanan enerji (Smith, 2009)

### 2.8.3. Talaş ayrılma kriteri

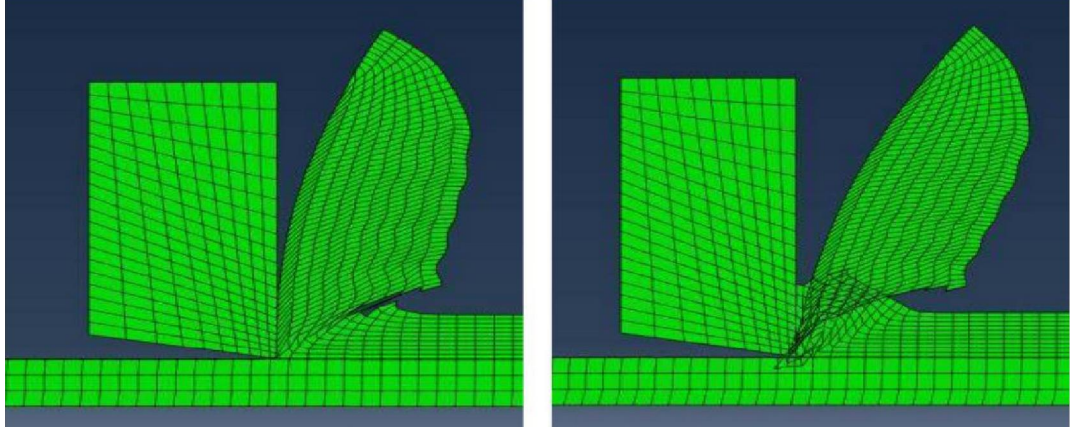
Bazı araştırmacılar ortogonal talaş kaldırma işleminde talaşı formüle etmek daha az eleman ve daha az hesaplama süresi gerektirdiği için EUL yaklaşımını kullanırken bazıları talaşın başlangıç aşamasından sabit aşamaya kadar önceden herhangi bir talaş şekli varsayımı olmaksızın modellenmesine izin veren LAG yaklaşımını kullanmaktadır. EUL yaklaşımının talaş geometrisi ve takım-talaş temas uzunluğu hakkında önceden bilgi sahibi olmayı gerektirmesi bu yöntemin dezavantajlarından biridir. LAG yöntemi ise talaşın iş parçası

malzemesinden ayrılması için talaş ayırma kriterlerini gerektirdiğinden sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yaklaşımında daha gerçekçi bir yöntemdir.

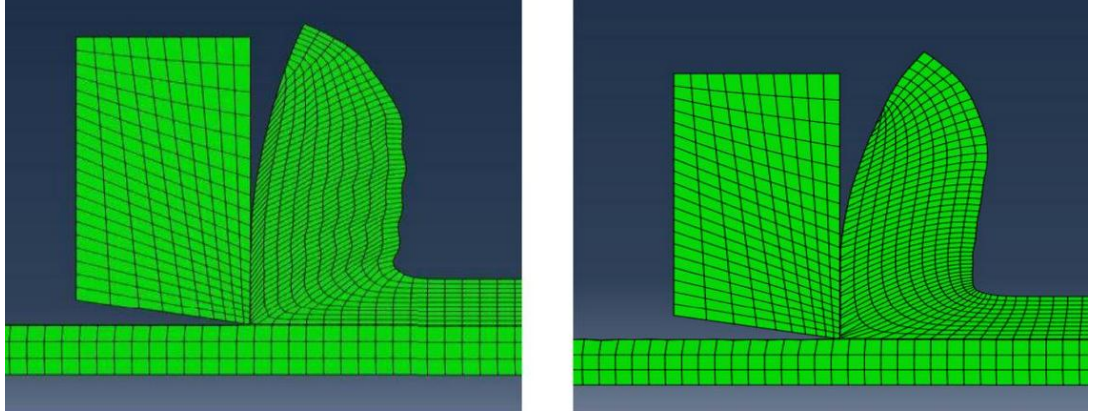
Soliman vd. (2020), AISI 1045 çeliğinin talaş kaldırma simülasyonu için iki boyutlu bir ortogonal kesme modeli oluşturmuş ve bu modelin çözümü için LAG ve ALE yöntemlerini kullanarak talaş ayrılma bölgesi için hassas değeri sıfıra yakın bir talaş ayrılma çizgisi tanımlamışlardır. Bu ayrılma çizgisi Şekil 2.14'te görülmektedir. Şekil 2.15' te görülen ve LAG yöntemi ile geliştirdikleri modelin talaş ayrılma bölgesinde eleman bozulmasına yol açtığı ve bu neden ile talaş formunda bozulduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.16' da ise ALE yönteminin eleman bozulmasına yol açmadığı ve talaş formunun istenen şekilde olduğu görülebilir. Sonuç olarak talaş kaldırmada oluşan kesme kuvvetlerinin deneysel sonuçlar ile örtüştüğünü ve maksimum hata oranının %14,4 olduğunu görmüşlerdir.



**Şekil 2.14.** Talaş ayırılma çizgisi ve talaş oluşumu (Soliman vd., 2020)



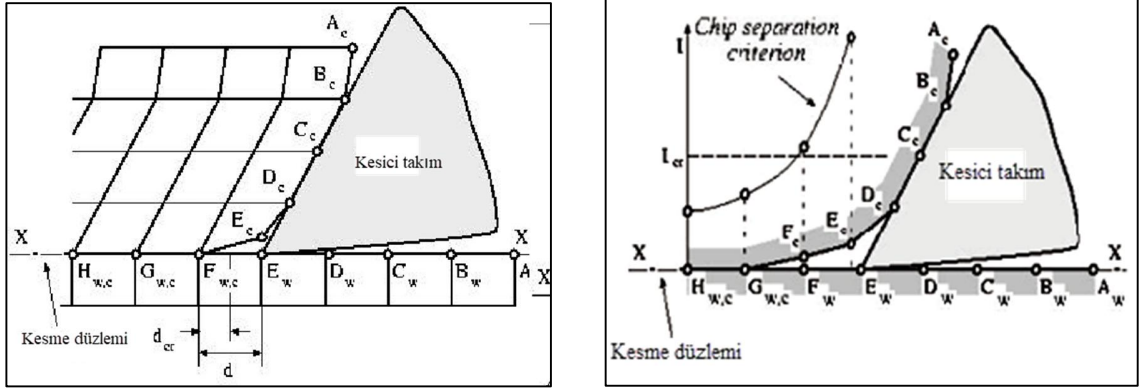
**Şekil 2.15.** LAG yöntem ile aşırı eleman bozulması ve talaş ayrılması (Soliman vd., 2020)



**Şekil 2.16.** ALE yöntemi ile talaş oluşumu (Soliman vd., 2020)

Talaşın ayrılması konusu, talaş kaldırma işlemlerinde araştırmacılar arasında her zaman bir tartışma konusu olmuştur. Bu tartışmaların net kesin veya genel bir yöntem üzerinde anlaşmaya varmadığı sayısal simülasyon çalışmalarında görülmektedir.

Usui ve Shirakashi (1982), Şekil 2.17' de gösterildiği gibi önceden tanımlanmış bir kesme hattı boyunca takım ucu ile en yakın düğüm noktası arasındaki mesafeye dayalı bir talaş ayırma kriteri önererek tartışmaya öncülük etmiştir. Kriter tamamen geometrik hususlara dayalıdır ve hattı dışında olası talaş kırılmasını hesaba katmaz. Fakat talaş ayrımı kolaylıkla kontrol edilebilir.



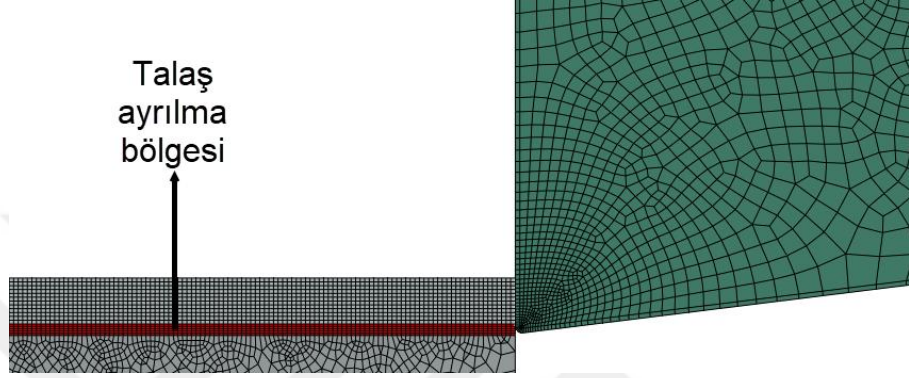
**Şekil 2.17.** Talaş ayrılma kriteri (Usui ve Shirakashi, 1982)

Strenkowski ve Carroll (1988), talaş ayrılma kriteri olarak efektif plastik gerinimi kullanmışlardır. Lin, Z. C., ve Lin, S. Y. (1992) ise talaş ayrılmasında etkin plastik gerinmenin kesme parametrelerine bağlı olduğunu gözlemlemiştir (örn. kesilmemiş talaş kalınlığı ve takım talaş açısı). Iwata vd. (1984) talaş ayrılma kriteri ve talaş gelişimi için gerilmeye dayalı sünek kırılma kriterlerini değerlendirmiştir. Fakat Chen ve Black (1994), ayırma kriterlerinin sayısal bir değer olarak kabul edilmemesi ve deneysel olarak ölçülebilen bir malzeme sabiti olarak ele alınması gerektiğine dikkat çekmiştir.

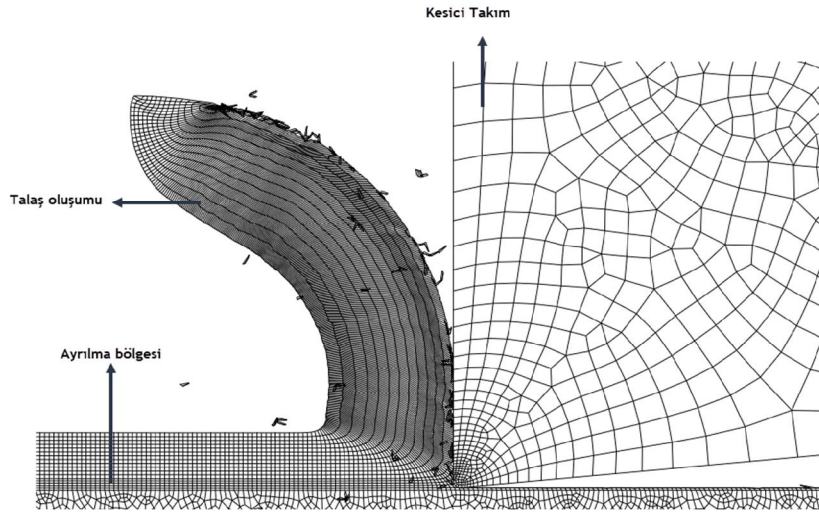
Shaw (1984), talaş kaldırma işleminde yeni yüzeyin oluşumunda talaş ayırma kriterlerinin, plastik ve sürtünme kuvvetlerine kıyasla talaş kaldırma işleminde ihmal edilebilir olan  $J/m^2$  mertebesinde enerji gerektirdiğini düşünmüştür. Bu çalışmadan sonra Atkins (2003), talaş ayırma kriterlerinin  $J/m^2$  yerine  $kJ/m^2$  aralığında olduğunu ve talaş kaldırma analizinde yeni yüzey oluşturmak için gereken kırılma enerjisinin dikkate alınmasının çok önemli olduğunu göstermiştir.

Kesici takım ilerlemesine bağlı olarak kullanılan kriterlere rağmen, tüm bu talaş ayırma kriterleri için önceden tanımlanmış bir ayırma hattı gereklidir ve bu yöntem gerçekçi değildir. Çünkü gerçek talaş kaldırma işleminde malzeme düz bir yolda ayrılmaz. Ayrıca simülasyonun yüksek deformasyon etkisinde önceden tanımlanmış bir yolu izleyeceği kesin değildir ve iş parçası ile talaş yüzeyinde hasarlar oluşabilir.

Bu tez çalışmasında her iki yöntemde dikkate alınmış ve ayrılma bölgesi Şekil 2.18’ de görüldüğü gibi tanımlanılarak talaş ayrılma kriteri kullanılmıştır. Dolayısı ile Şekil 2.19’da görüldüğü gibi talaş kaldırma işlemi boyunca talaş gelişimi ve takım-talaş ilişkisi sağlanabilmektedir.



Şekil 2.18. Bu çalışmada kullanılan ayrılma yöntemi



Şekil 2.19. Bu çalışmada kullanılan ayrılma yöntemi

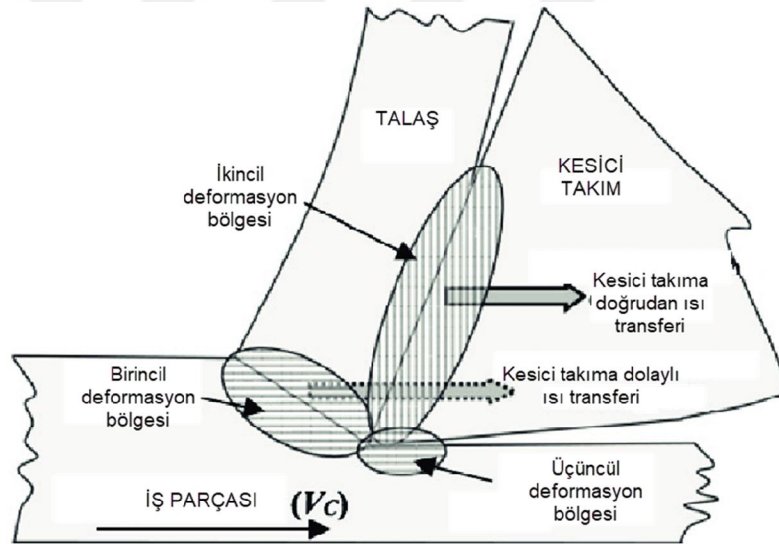
## 2.9. Termal Model

Talaş kaldırma işlemi sırasında kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünme büyük bir ısı yükü yaratmaktadır. Talaş oluşumu, aşınma mekanizmalarının gelişiminden, işlenen parçaların yüzey pürüzlülüğünden ve kesme bölgesindeki sıcaklıkların artışından

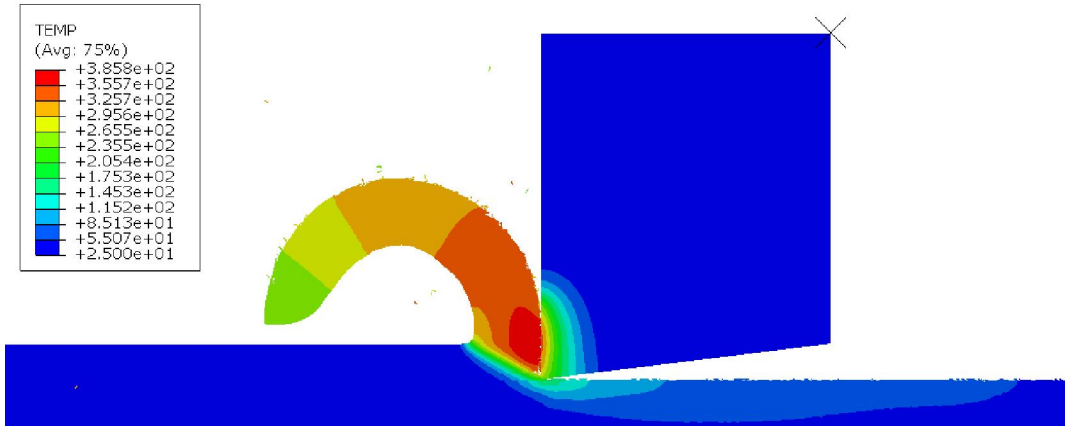
etkilenmektedir. Talaş kaldırma sırasında Şekil 2.20’de görüldüğü gibi sıcaklık artışını etkileyen üç bölge bulunmaktadır. Bu bölgeler birincil deformasyon bölgesi, ikincil deformasyon bölgesi ve üçüncül deformasyon bölgesi olarak adlandırılabilir. (Fahad, 2012).

Fahad (2012), yaptığı araştırmalarda ısının üretildiği en kritik bölgenin takım yüzeyi ile talaş arasındaki sürtünmenin neden olduğu ikincil deformasyon bölgesi olduğunu bulmuştur.

Bir çok çalışmada plastik deformasyonun %90’ının ısıya dönüştüğü kabul edilir (Agmell vd., 2013). Wedberg (2013)’e göre bu ısı enerjisi büyük ölçüde deformasyon bölgelerinde oluşur. Sürtünmeden dolayı oluşan tüm enerjinin ısıya dönüştüğü varsayılabilir ve bu ısının genellikle iş parçasına ve kesici takıma eşit olarak iletildiği kabul edilir (Xie vd., 2005).



Şekil 2.20. Kesme bölgesinde ısı oluşumu bölgeleri (Altıparmak, 2018).



**Şekil 2.21.** Analiz sonucu sıcaklık dağılımı

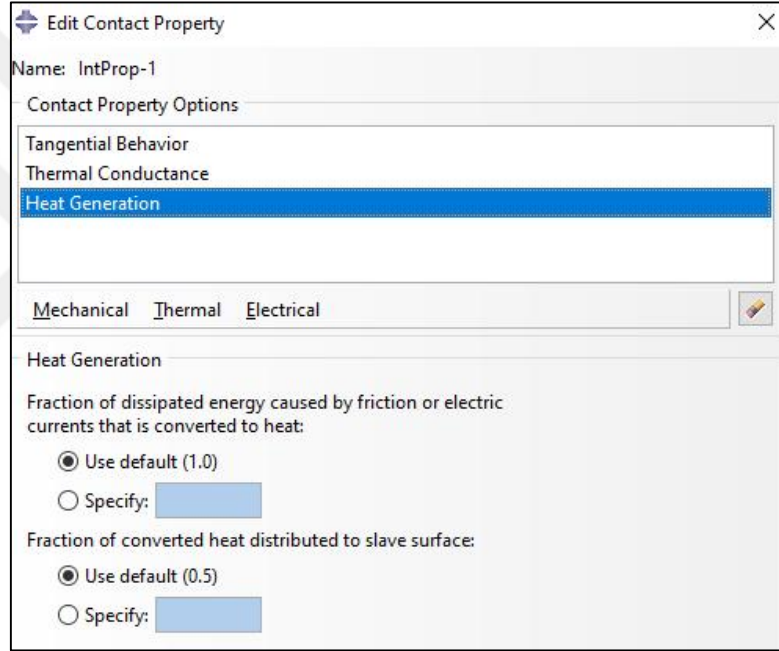
Şekil 2.21, bu çalışmada yapılan analiz sonucunda sıcaklık dağılımını göstermektedir. Burada görüleceği üzere en yüksek sıcaklıklar takım-talaş sürtünmesinin olduğu bölgede gerçekleşmektedir. Aynı zamanda sıcaklıkların önemli bir bölümünün takım ve talaş yapışma yüzeyinde olduğu ve talaşa aktarıldığı gözlenmektedir.

Talaşlı imalat gibi uygulamalarda, takım ve talaş arayüzündeki plastik deformasyon ve sürtünme nedeniyle önemli miktarda ısı enerjisi üretilmektedir. Ulaşılan sıcaklık oldukça yüksektir ve bu sıcaklık malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sonlu elemanlar modelinde, plastik deformasyon ve sürtünmeden kaynaklanan ısı üretimi, hacimsel ısı akısı olarak modellenmiştir. Isı iletimi, iş parçası malzemesi içinde ve takım-talaş ara yüzeyinde meydana gelen birincil ısı transfer modu olarak kabul edilir.

Plastik deformasyon ve sürtünme nedeniyle ısıya dönüştürülen enerjinin oranı 0,8 ile 1 arasında ve çelikler için 0,9 olarak kabul edilir. (Thekdi, P. N. (2019) Sürtünme nedeniyle oluşan ısı, iki temas yüzeyi arasında 0,5 'lik bir ağırlık faktörü aracılığıyla dağıtılır. Bu neden ile Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te görüldüğü gibi Abaqus/CAE yazılımı malzeme kütüphanesindeki Inelastic Heat Fraction değeri 0,9 olarak ve kontak özelliklerinde ise Fraction of Converted to Heat değeri 0,5 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 2.22.** Plastik deformasyon nedeni ile ısıya dönüşen enerji oranı seçimi



**Şekil 2.23.** Sürtünme nedeni ile dağıtılan ısı oranının seçimi

Abaqus/CAE yazılımında sürtünmeden dolayı ısıya dönüşen enerjinin %50'sinin aktarıldığı kabul edilmiştir. Ayrıca ısı iletim katsayısı tanımlaması Çizelge 2.9'da görülmektedir. Isıl iletim katsayısı literatürde kabul edilmiş değer olan 10 W/mK olarak alınmıştır (Xie vd., 2005).

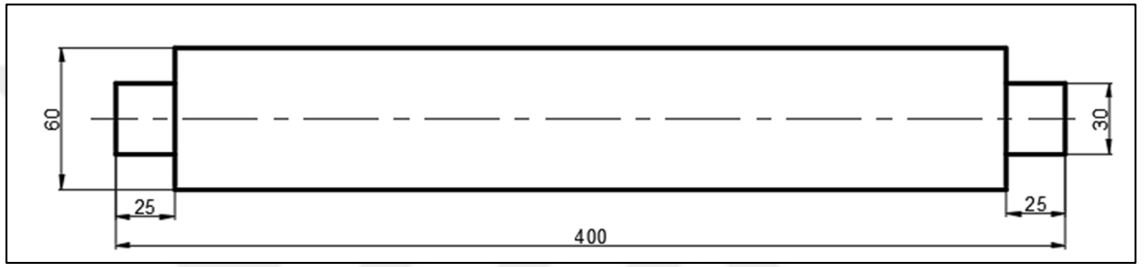
**Çizelge 2.9.** Abaqus termal temas özellikleri

Isıl İletim Katsayısı(kW/m <sup>2</sup> )	Tolerans (mm)
10	0
0	0,01

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deney Numuneleri

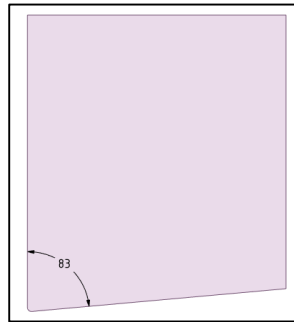
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi laboratuvarlarında yapılan deneysel çalışmalarda iş parçası çapı 60 mm ve boyu 400 mm olarak seçilmiştir (Boy, 2004). Malzemenin yüzeyi, dış yüzey tabakası sertleşmesi ihtimaline karşı başlangıçta 1 mm talaş derinliği verilerek işlenmiştir. İş parçası ölçüleri Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan iş parçası (Boy, 2004)

#### 3.2. Kesici Takım ve Takım Tutucu

Kullanılan kesici takım ISO 1832 standardına uygun olarak üretilen SCMW 12 M508-12F ve talaş kırıcısız sinterlenmiş karbür kesici takımdır. Takımın talaş açısı  $0^\circ$ , boşluk açısı ise  $7^\circ$ ’dir. Kesici takımın ortogonal modeli Şekil 3.2’de görülmektedir.

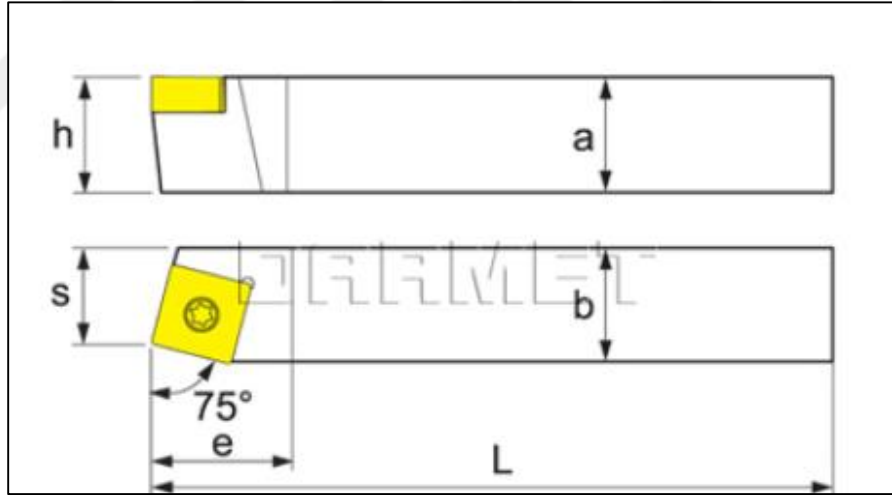


Şekil 3.2. Ortogonal kesici takım

Deneylerde takım tutucu olarak ISO 75° yanaşma açısına sahip SSBCR 25 25 M12 tip takım tutucu kullanılmıştır. Takım tutucuya ait ölçüler Çizelge 3.1 ve Şekil 3.3'te görülmektedir.

**Çizelge 3.1.** Takım tutucu ölçüleri (Boy,2004)

Parametre	Ölçü(mm)
a	25
b	25
L	150
h	25
s	22
e	25



**Şekil 3.3.** Takım tutucu (Boy,2004)

### 3.3. Takım Tezgahı

Deneyle Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi CNC atölyesinde mevcut olan ve Şekil 3.4'te görülen JOHNFORD T35 CNC torna tezgahında yapılmıştır. Bu tezgaha ait özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.4. JOHNFORD T35 CNC torna tezgahı (Boy,2004)

Çizelge 3.2. JOHNFORD T35 CNC Tezgah Özellikleri (Boy,2004)

X EKSENİ	250mm
Y EKSENİ	600mm
TEZGAH GÜCÜ	10kW
DEVİR SAYISI	4000 dev/dak.
HİDROLİK AYNA ÇAPI	250mm
HASSASİYET	0,001mm
TARET TAKIM ADEDİ	12

### 3.4. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Deneysel çalışmalarda kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için KISLER 9257 B tipi dinamometre kullanılmıştır ( Şekil 3.5). Bu dinamometreye ait özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.5. KISLER 9257 B tipi dinamometre (Boy,2004)

Çizelge 3.3. Kistler 9257 B Dinamometre Özellikleri (Boy,2004)

<b>Kuvvet aralığı</b>		-5...10kN
<b>Tepki verme</b>		<0,01N
<b>Hassasiyet</b>	$F_x, F_y$	-7,5 pC/N
	$F_z$	-3,5 pC/N
<b>Doğrusallık</b>		%1 FSO
<b>Histerezis</b>		%0,5 FSO
<b>Doğal Frekans</b>		3,5kHz
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>		0...70°C
<b>Kapasitans</b>		220 pF
<b>20°C Yalıtım Drenci</b>		1013 $\Omega$
<b>Topraklama Yalıtımı</b>		>108 $\Omega$
<b>Koruma Sınıfı</b>		IP 67
<b>Ağırlık</b>		7,5kg

Kesme işlemi esnasında kesici takımda oluşan sinyaller amplifikatör yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmış ve aktarılan verilerin Dynoware isimli paket program yardımı ile gerçek kuvvet değerlerine çevirilmesi sağlanmıştır (Boy,2004).

### 3.5. Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi

#### 3.5.1. Deneysel yöntem için kesme parametrelerinin belirlenmesi

Kesme parametreleri belirlenirken kullanılan kesici takıma ait kataloglarda yer alan değerler dikkate alınmıştır ve ilerleme değerleri 0,1 mm/dev ile 0,3 mm/dev aralığında, kesme hızları ise 50 m/dak ile 150 m/dak aralığında seçilmiştir. Talaş derinliği ise 1mm ve 2mm olarak belirlenmiştir. ISO 3685 standardı referans alınarak beş farklı kesme hızı temel alınmış ve 0,8 mm uç yarıçapına uygun şekilde talaş derinlikleri belirlenerek ISO 3685 tablolarında yer alan değerler seçilmiştir. Deneysel kesme parametreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Deneysel tümünde aynı koşullar korunarak kesici takımın sadece tek kesme kenarı kullanılmıştır (Boy,2004).

Çizelge 3.4. Deneysel parametreler (Boy,2004)

Deneysel Numarası	Kesme Hızı (m/dak)	Talaş Derinliği (mm)	İlerleme (mm/rev)		Kesme Hızı (m/dak)	Talaş Derinliği (mm)	İlerleme (mm/rev)
1	50	1	0,1	26	50	2	0,1
2			0,15	27			0,15
3			0,2	28			0,2
4			0,25	29			0,25
5			0,3	30			0,3
6	75	1	0,1	31	75	2	0,1
7			0,15	32			0,15
8			0,2	33			0,2
9			0,25	34			0,25
10			0,3	35			0,3
11	100	1	0,1	36	100	2	0,1
12			0,15	37			0,15
13			0,2	38			0,2
14			0,25	39			0,25
15			0,3	40			0,3
16	125	1	0,1	41	125	2	0,1
17			0,15	42			0,15
18			0,2	43			0,2
19			0,25	44			0,25
20			0,3	45			0,3
21	150	1	0,1	46	150	2	0,1
22			0,15	47			0,15
23			0,2	48			0,2
24			0,25	49			0,25
25			0,3	50			0,3

### 3.5.2. Malzeme modeli için parametrelerin belirlenmesi

Sonlu elemanlar modelinde hesaplanan kesme kuvvetleri üzerinde Johnson Cook malzeme parametrelerinin etkisinin araştırılması ve parametrelere bağılı olarak kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesi için talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı sabit bırakılmış ve kesme koşulları belirlenmiştir. Bu parametreler Çizelge 3.5'te görülmektedir.

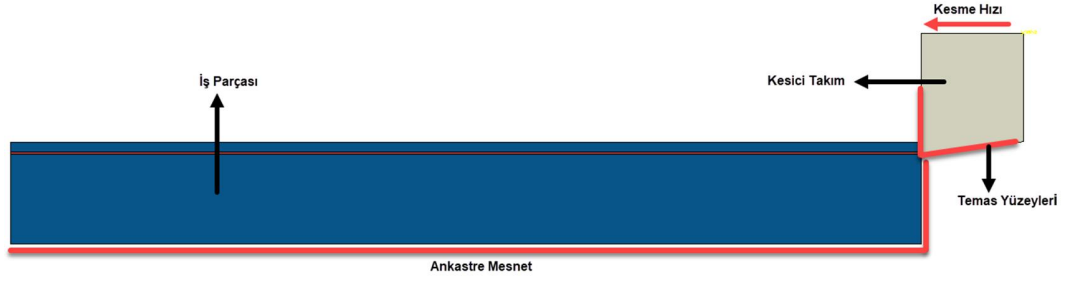
Çizelge 3.5'te yer alan A parametresi başlangıç akma gerilmesi, B parametresi pekleşme modülü, n parametresi pekleşme üsteli ve m parametresi ise sıcaklık üssüdür. Her bir parametre değerleri sabit bırakılmak şartı ile %10 aralıklar ile %30 artırılıp azaltılarak analizler gerçekleştirilmiş ve bu parametrelere bağılı kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Daha sonra Çizelge 3.5' teki parametreler ve analizler sonucu hesaplanan kesme kuvvetleri Matlab yazılımının makine öğrenmesi kütüphanesine alınmış ve öğrenme algoritmaları çalıştırılmıştır.

**Çizelge 3.5.** Regresyon ile öğrenme için Johnson Cook malzeme parametreleri

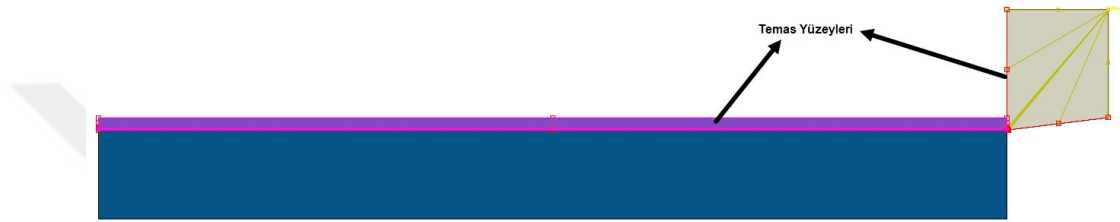
Analiz Numarası	A	B	N	M
1	735,8	309,8	0,4396	1,05
2	809,38	309,8	0,4396	1,05
3	882,96	309,8	0,4396	1,05
4	956,54	309,8	0,4396	1,05
5	735,8	340,78	0,4396	1,05
6	735,8	371,76	0,4396	1,05
7	735,8	402,74	0,4396	1,05
8	735,8	309,8	0,48356	1,05
9	735,8	309,8	0,52752	1,05
10	735,8	309,8	0,57148	1,05
11	735,8	309,8	0,4396	1,155
12	735,8	309,8	0,4396	1,26
13	735,8	309,8	0,4396	1,365
17	662,22	309,8	0,4396	1,05
18	588,64	309,8	0,4396	1,05
19	515,06	309,8	0,4396	1,05
20	735,8	308,9	0,4396	1,05
21	735,8	247,84	0,4396	1,05
22	735,8	216,86	0,4396	1,05
23	735,8	309,8	0,39564	1,05
24	735,8	309,8	0,35168	1,05
25	735,8	309,8	0,30772	1,05
26	735,8	309,8	0,4396	0,945
27	735,8	309,8	0,4396	0,84
28	735,8	309,8	0,4396	0,735
29	735,8	309,8	0,4396	1,05
30	735,8	309,8	0,4396	1,05
31	735,8	309,8	0,4396	1,05

### 3.6. Sonlu Elemanlar Modeli

Ortogonal kesme için sonlu elemanlar modeli Şekil 3.6.'da görülmektedir. İş parçası daha önce belirtildiği gibi LAG ve ALE elemanlar ile kesici takım ise rijit olarak tanımlanmıştır. Kesici takıma kesme hızı tanımlanarak iş parçasına doğru talaş kaldırması sağlanmaktadır. İş parçası kenarlarına ise Şekil 3.7'de görüldüğü gibi ankastre mesnet uygulanmıştır.

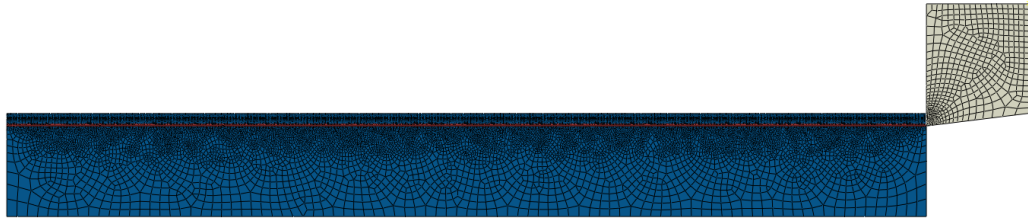


**Şekil 3.6.** Ortogonal kesme modeli

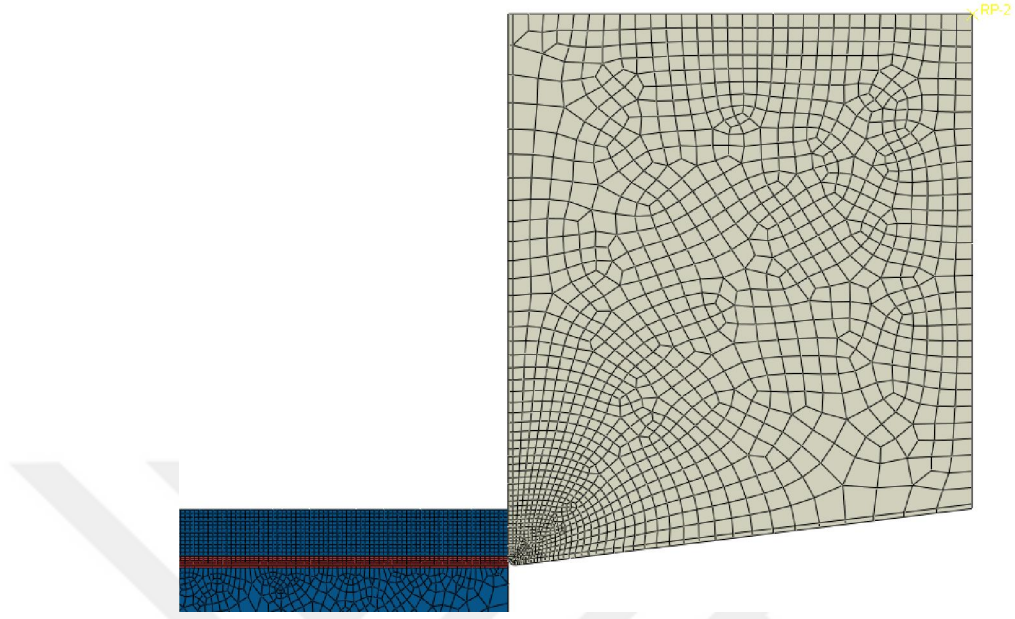


**Şekil 3.7.** Temas Yüzeyleri

İş parçası ve kesici takım arasında ise “node to surface” temas tipi ve “penalty” temas formülasyonu seçilmiştir. Kesme kuvvetinin ölçülmesi için kesici takımın sağ üst noktasına kuvvet ölçümü için referans bir nokta tanımlanmış ve bu referans nokta kesici takımın iş parçası ile temas ettiği yüzeylere rijit elemanlar ile bağlanmıştır.

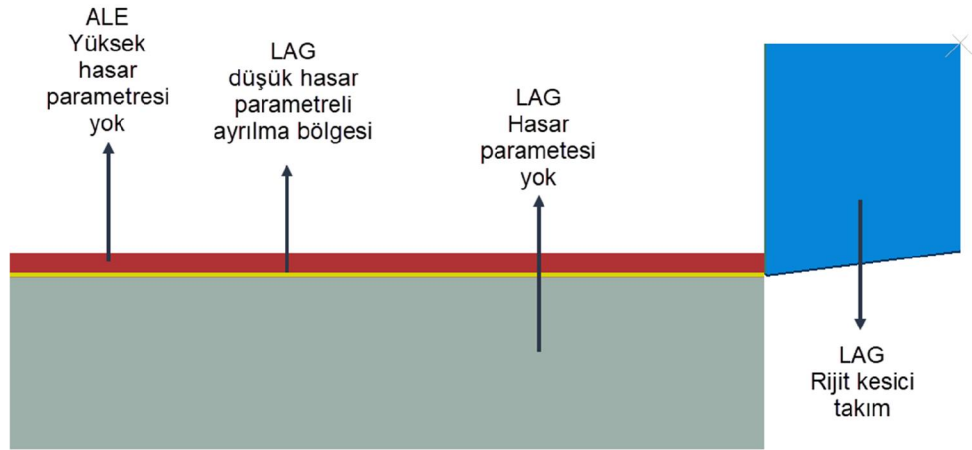


**Şekil 3.8.** Sonlu elemanlar ağı



**Şekil 3.9.** Sonlu elemanlar ağı

Sonlu elemanlar modeline ait ağı yapısı Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da görülmektedir. Kullanılan eleman tipi dört düğüm noktasına ve düzlem gerinim özelliğine sahip termal serbestlik derecesi olan CPE4RT eleman tipidir. Böylece hem yapısal hemde termal denklemlerin biribiri ile ilişki içerisinde çözülmesi sağlanmaktadır.



**Şekil 3.10.** Modelleme yöntemi

Daha önce belirtildiği gibi talaş ayrılmasının modellenmesi için bir ayrılma bölgesi tanımlanmıştır ve iş parçası ise LAG ve ALE elemanlardan oluşmaktadır. Bu model Şekil 3.10'da ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Görüldüğü gibi talaş bölgesi daha yüksek hasar parametresi ile (ALE yöntem ile), ayrılma bölgesi düşük bir hasar parametresi (LAG yöntem ile), iş parçası bölgesi ise LAG yöntemi ve hasar parametresi girilmeden modellenmiştir. Kesici takım ise rijit kabul edilerek LAG yöntemi modellenmiştir.

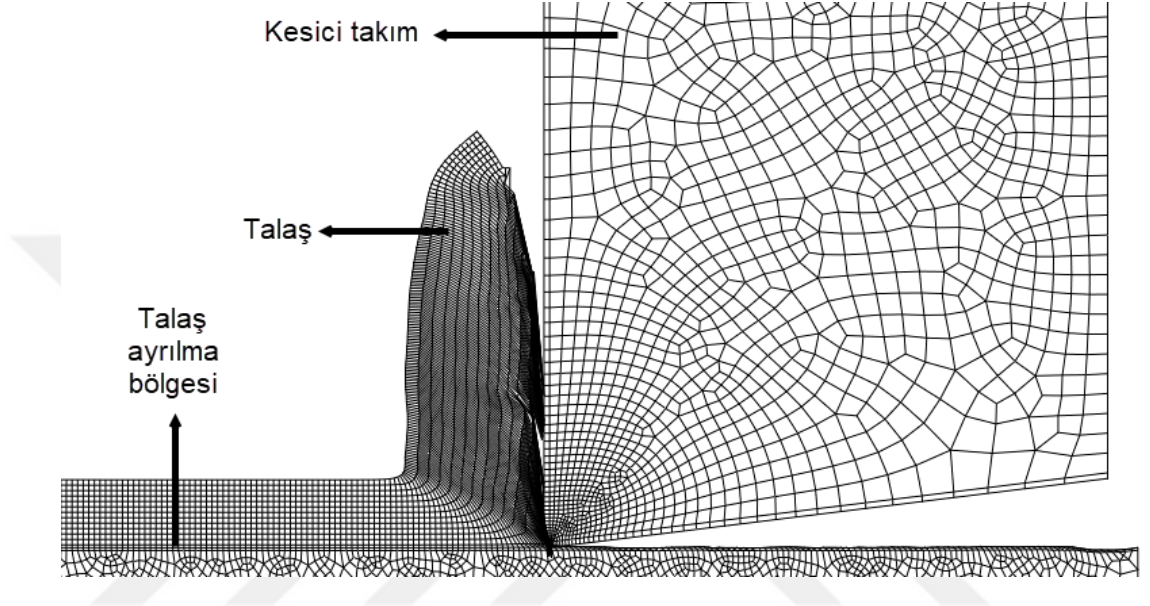
Ayrılma bölgesinin LAG yöntemi ile modellenmesinin amacı şudur ; bilindiği gibi hasar parametresi sayısal ağ boyutlarına önemli derecede bağlıdır ve sayısal ağ boyutları değiştiğinde hasar parametresini yeniden belirlemek gerekebilir. Bu işlem zamana bağlı ve sürekli değişkenlik gösteren sayısal ağ için zordur. Dolayısı ile bu bölgenin ALE yöntemi ile değil LAG yöntemi ile değerlendirilmesine karar verilmiştir. Talaş bölgesi ise sürekli değişen ve yüksek deformasyon altında olan bir bölge olduğu için sayısal ağ bozulmalarından kaynaklı olarak çözüme ulaşmak zordur. Dolayısı ile sayısal ağın deformasyon durumuna göre güncellenmesi gerekmektedir ve ALE yöntemi bu işlem için uygundur. Herhangi bir hasar veya yüksek deformasyon durumunun beklenmediği iş parçası bölgesi için ise herhangi bir hasar parametresi tanımlanmamış ve LAG yöntem uygulanmıştır.

### **3.6.1. Talaş ayrılma bölgesinin modellenmesi**

Yapılan modelleme çalışmalarında talaş ayrılmasının modellenmesi için deplasmana dayalı hasar kriteri kullanılmıştır. Literatürde yapılan çeşitli araştırmalarda sadece ayrılma çizgisine hasar kriteri tanımlanmış ve ayrılma yüzeyi tek bir eleman ile modellenmiştir. Bu tez çalışmasında ise takım ile talaş ara yüzeyinde mikro düzeyde hasarlar olacağı varsayılmış ve ayrılma hattı daha fazla elemana ayrılarak bu bölgeye hasar kriteri tanımlanmıştır. Yapılan analizlerde talaş yüzeyinde ve parça yüzeyinde mikro düzeyde hasar oluşumu gözlenmiştir. Bu yüzden bu bölgeyi bir ayırma hattı veya çizgisi olarak adlandırmak yerine talaş ayrılma bölgesi olarak adlandırmak daha doğrudur.

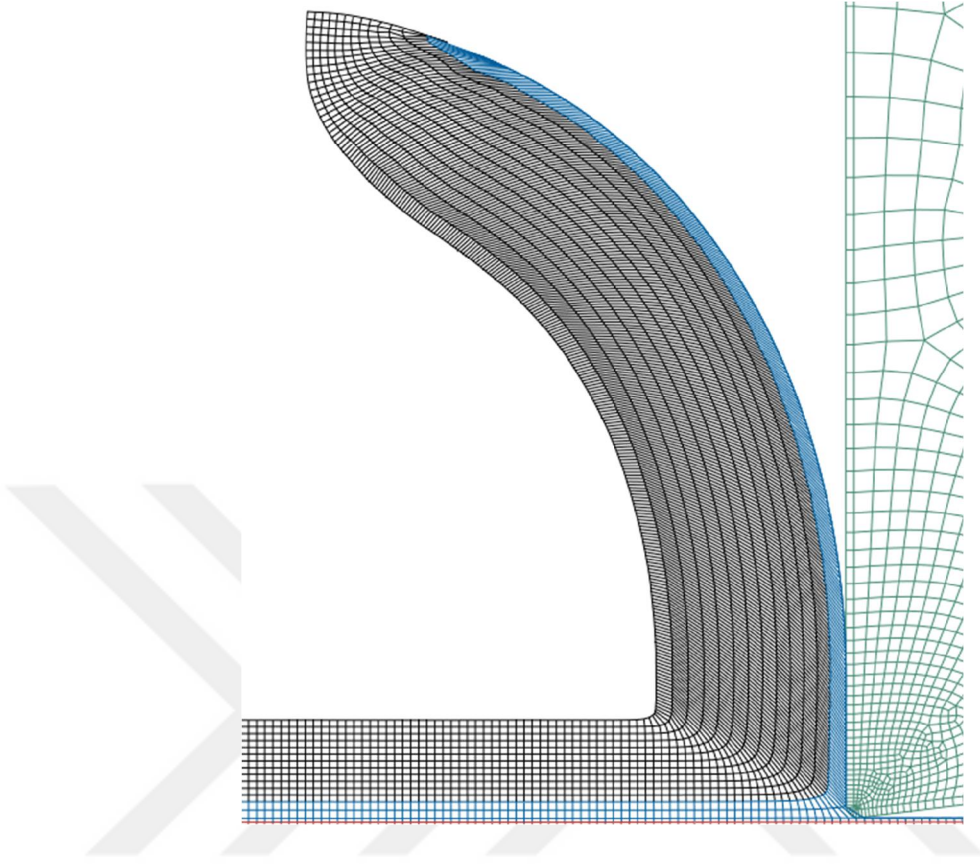
Başlangıç olarak Şekil 3.11'de görüldüğü gibi talaş ayrılma bölgesi tek bir eleman ile ve kesici takım uç radiusundan daha küçük bir alan kullanılarak modellenmiştir. Sonuç olarak

talaş formu istenen şekilde oluşmamış ve talaş ile takım arayüzündeki elemanlarda bozulmalar oluşmuştur. Bu durumda talaş yapısı ise daha rijit bir davranış sergilemektedir ve takım ile talaş ilişkisini engellemektedir. Bu yüzden bu modelleme yöntemi tercih edilmemiştir.



**Şekil 3.11.** Tek elemanlı ayrılma kriteri

Bu tez çalışmasında kullanılan talaş ayrılma bölgesi ise Şekil 3.12’de gösterildiği gibi talaş derinliği boyunca ve kesici takım radiusunun bitiş bölgesinden itibaren iki eleman ile modellenmiştir. Bu model incelendiğinde ise kesme hızının değişimine bağlı olarak kaldırılan talaş yüzeyinde mikro hasarların değiştiği gözlenmiştir.



**Şekil 3.12.** Bu çalışmada kullanılan ayrılma yöntemi

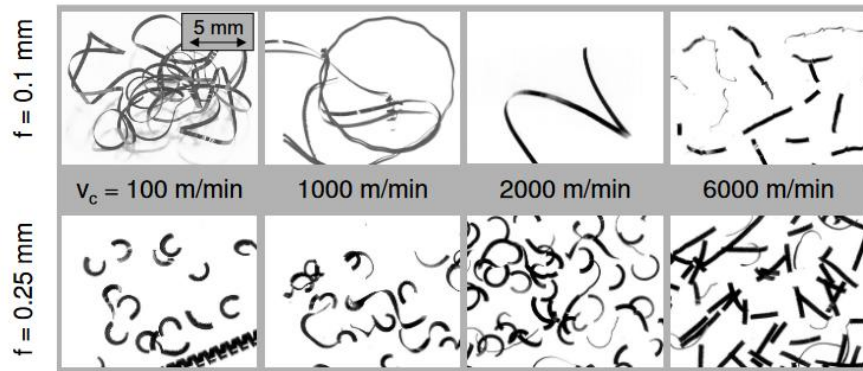
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Talaş Ayrılma Bölgesinin Etkisi

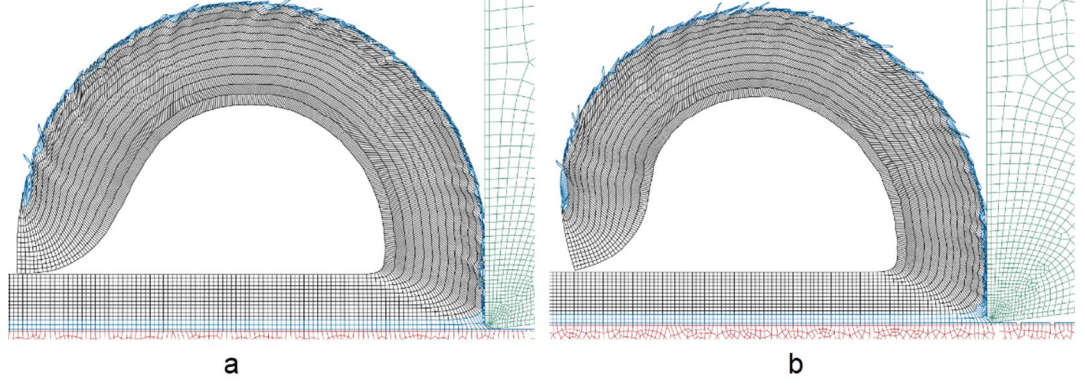
Ortogonal talaş kaldırma işleminin modellenmesinin sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması ve talaş oluşumu açısından talaş ayrılma bölgesinin doğru şekilde modellenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada literatürde sıkça kullanılan ve talaşın ayrılmasına yardımcı olan talaş ayrılma bölgesi kullanılmıştır (Soliman vd, 2020; Thean,1998).

Kullanılan ayrılma bölgesi yöntemi için talaş yüzeyi üzerindeki hasar durumu, takım ile talaş ilişkisini ve sonuçların kararlılığını etkilemektedir. Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 incelendiğinde, kesme hızı artışına bağlı olarak talaş formunun değiştiği ve talaş üzerinde oluşan mikro hasarların yüksek kesme hızlarında (125 m/dak ve 150 m/dak ) oluşmadığı görülmüştür. Bu durum malzemenin yüksek gerinim hızlarında daha sünek ve şekillendirilebilir bir hal almakta olduğunu göstermektedir.

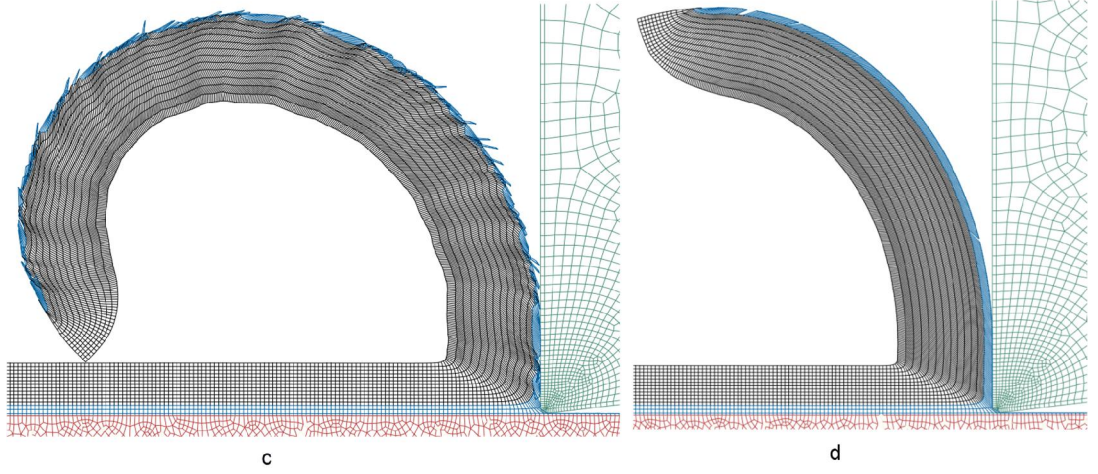
Farklı hızlarda elde edilen talaş formlarına bakıldığında düşük kesme hızlarında sarmal bir talaş formu elde edilirken, kesme hızı arttıkça talaş formunun daha düz bir hal aldığı görülmektedir. Hoppe, S. (2004), farklı malzemeler ile yapmış olduğu bir deneysel çalışmada çelikler için düşük kesme hızlarında talaş formunun sarmal bir şekil aldığını, kesme hızının artması ile birlikte talaş formunun sarmal şekilden uzaklaşarak daha düzleştiğini, böylece çıkan talaşların kesici takımdan daha kolay uzaklaştırabildiğini göstermiştir. Bu durum Şekil 4.1 'de görülmektedir.



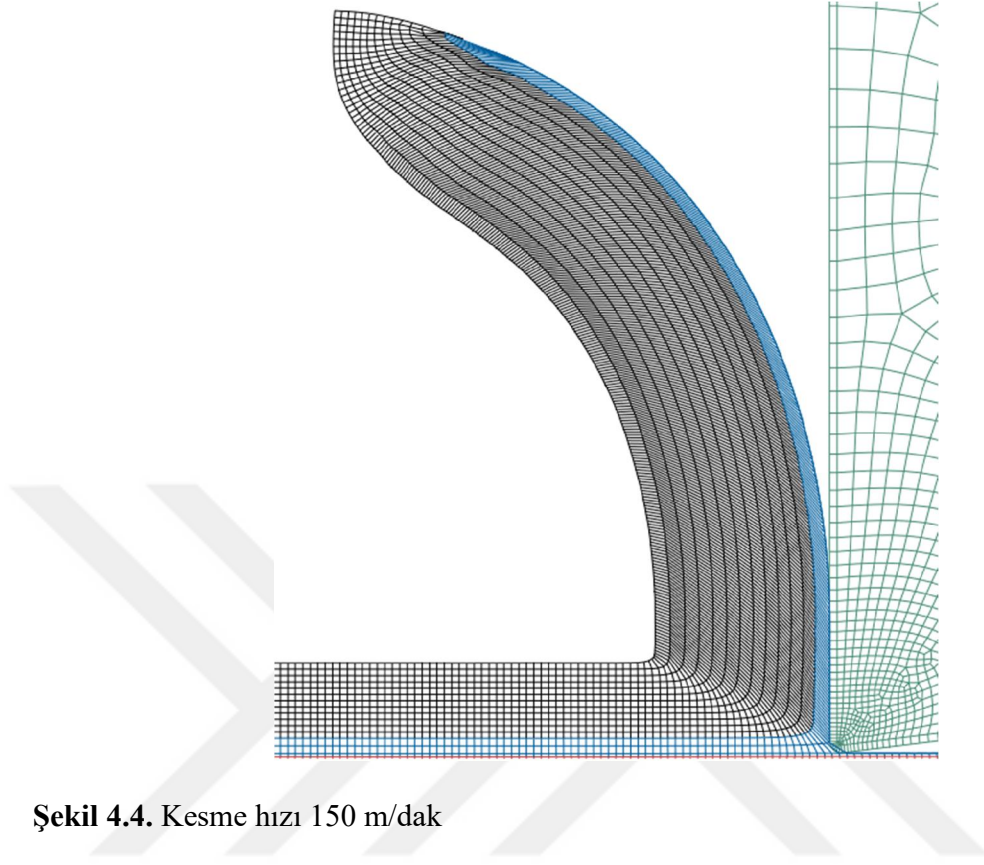
Şekil 4.1. AISI1045 çeliğinden elde edilen talaş formu (Hoppe, 2004)



Şekil 4.2. a) Kesme hızı 50 m/ dak , b) Kesme hızı 75 m/ dak



Şekil 4.3. c) Kesme hızı 100 m/ dak , d) Kesme hızı 125 m/ dak



**Şekil 4.4.** Kesme hızı 150 m/dak

Talaş ayrılma bölgesinin avantajları şöyle sıralanabilir;

- Talaş kaldırma işleminde sayısal ağ bozulmasının önüne geçer.
- Talaş şeklinin istenen şekilde oluşmasını sağlar.
- Sayısal ağdan dolayı oluşacak çözüm sürelerini kısaltır,
- Ayrılan talaş yüzeyinde ve iş parçasına oluşacak mikro hasarların görülmesini sağlar.

#### **4.2. Deneysel ve Numerik Sonuçların Değerlendirilmesi**

Çizelge 4.1, deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar analizleri neticesinde elde edilen kesme kuvveti değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Deneysel sonuçlar ve sayısal sonuçlar arasındaki farkın kesme hızına ve ilerlemeye bağlı olarak değiştiği görülmektedir. 50 m/dak kesme hızı için düşük ilerlemelerde (0,1 mm/dev) ve yüksek ilerlemelerde (0,3mm/dev) deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları arasındaki hata oranının arttığı

görülmektedir. En yakın sonuçların ise 0,15 mm/dev ilerleme için elde edildiği görülmektedir. Aynı zamanda kesme hızı artışına bağlı olarak hata oranları da artmaktadır.

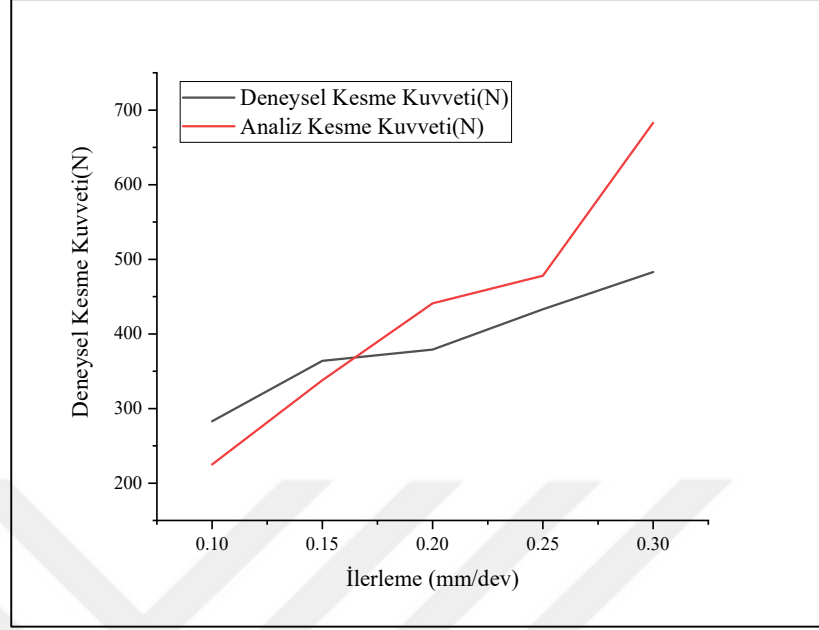
Johnson Cook malzeme parametreleri belirli gerinim hızlarında belirlenmektedir. Kullanılan model parametrelerinin bazı kesme hızlarına ve ilerleme değerlerine uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle deneysel ve sonlu elemanlar analizleri arasındaki hata oranları değişkenlik gösterebilir.

Aynı zamanda deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 1117 malzemesi ile sayısal çalışmalarda kullanılan AISI 1018 malzemesinin birbirinden farklı malzemeler olması dolayısı ile bazı ilerleme ve kesme hızlarında sonuçlar arasındaki yüzdesel farkların büyük olduğu görülmektedir. Bunun yanında Akram vd., (2018) yaptıkları çalışmalarda Johnson Cook malzeme parametrelerini kullanarak yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerini doğru tahmin edememişlerdir. Bunun nedenini ise düşük veya ortalama kesme hızlarına cevap veremeyen bir malzeme davranışının varlığı ile açıklamışlardır. Sonuç olarak yüksek kesme hızlarında oluşan kesme kuvvetlerindeki değişimi, sürtünme katsayısı ve sıcaklıktaki belirsizlik ile açıklamışlardır.

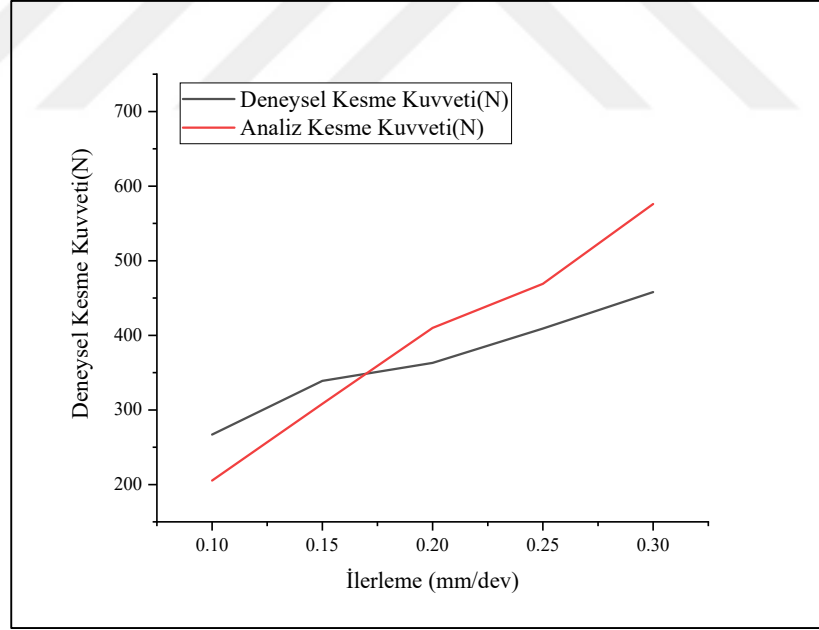
Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8' de görüldüğü gibi ilerleme artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin artması ve kesme hızı artışı ile kesme kuvvetlerinin düşmesi, deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar analizi sonuçları arasındaki değersel farklar olmasına rağmen beklenen bir durumdur ve literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında tutarlıdır (Özlü, 2021; Sivaraman vd., 2012; Boy, 2004).

**Çizelge 4.1.** Deneysel ve numerik sonuçların karşılaştırılması

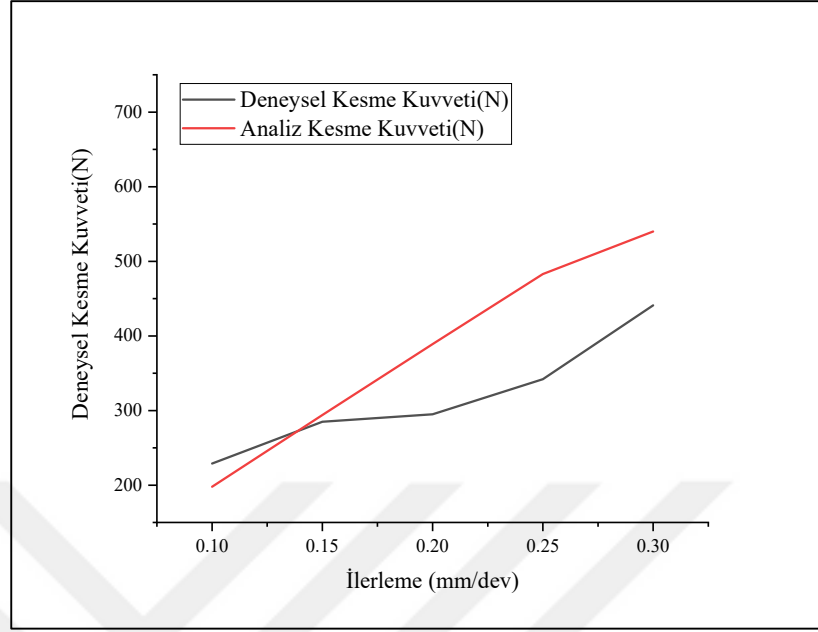
Kesme Hızı, V(m/min)	Talaş Derinliği, (mm)	İlereme (mm/dev)	Deneysel Kesme Kuvveti(N)	Analiz Sonuçları Kesme Kuvveti(N)	Fark
50	1	0,1	283	225	-20%
		0,15	364	338	-7%
		0,2	379	441	16%
		0,25	433	478	10%
		0,3	483	683	41%
75	1	0,1	267	205,4	-23%
		0,15	339	308,15	-9%
		0,2	363	410	13%
		0,25	409	469	15%
		0,3	458	576	26%
100	1	0,1	229	197,93	-14%
		0,15	285	294	3%
		0,2	295	389	32%
		0,25	342	483	41%
		0,3	441	540	22%
125	1	0,1	238	199,62	-16%
		0,15	290	300,8	4%
		0,2	290	401,7	39%
		0,25	339	494,2	46%
		0,3	422	586	39%



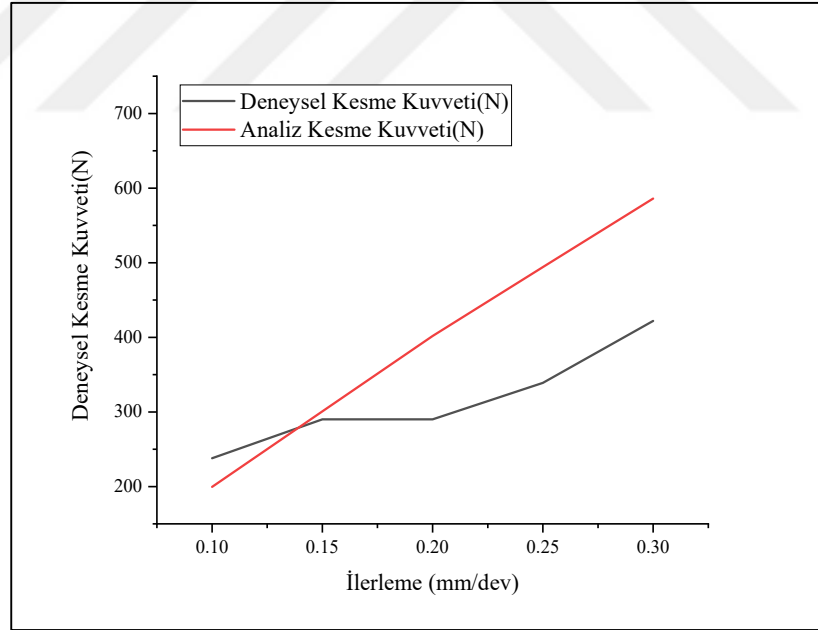
Şekil 4.5. 50m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti



Şekil 4.6. 75m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti



Şekil 4.7. 100m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti



Şekil 4.8. 125m/dak için ilerlemeye bağlı kesme kuvveti

### 4.3. Kesme Kuvvetlerinin Öğrenme Yöntemi ile Tahmin Edilmesi

Bu bölümde kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin değişimine bağlı olarak ve farklı regresyon algoritmaları kullanılarak kesme kuvvetlerinin tahmini yapılmaya çalışılmış ve aynı zamanda hangi makine öğrenme algoritmasının daha doğru sonuçlar verdiği araştırılmıştır.

Öncelikle talaş derinliği sabit bırakılmış ve iki parametre yani ilerleme ve kesme hızı bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu iki bağımsız değişkene ek olarak talaş derinliği üçüncü bağımsız değişken olarak belirlenmiştir ve tahmin algoritmalarının değerlendirilmesi yapılarak hangi tahmin algoritması yönteminin bağımlı değişken olarak belirlenen deneysel kesme kuvvetlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Tüm bu işlemler Matlab2022a sürümünde yer alan regresyon ile makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılmıştır ve bağımlı ve bağımsız değişken parametreleri yazılıma öğretildikten sonra öğrenme algoritması, farklı parametreler ile kullanılmak üzere kaydedilerek programa geri çağırılmış ve tahmin grafikleri çıkarılmıştır. Buradaki amaç sadece bağımlı değişkenlerin girilerek kesme kuvvetinin tahminini yapmak ve tahmin edilen kesme kuvvetinin deneysel değerlere ve sonlu elemanlar analizi değerlerine yakınlığını tespit ederek hangi öğrenme algoritmalarının daha doğru cevap verdiğini belirlemektir. Daha öncede belirtildiği gibi öğrenme algoritmalarının performansı  $R^2$ ,  $RMSE$ ,  $MSE$  ve  $MAE$  ölçütleri referans alınarak belirlenmiştir.

#### 4.3.1. İki bağımsız değişken kullanılarak yapılan tahmin sonuçları

Bu bölümde talaş derinliği 1 mm olarak sabit tutulup, kesme hızı ve ilerleme bağımsız değişkenler ve kesme kuvveti ise bağımlı değişken kabul edilmiş ve Matlab yazılımının regresyon ile öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Bunu yaparken deneysel sonuçlardan elde edilen kesme kuvveti değerleri kullanılmıştır.

Makine öğrenmesinde kullanılan  $R^2$ ,  $RMSE$ ,  $MSE$  ve  $MAE$  kullanılan ML algoritmasının performansını ve doğruluğunu belirlemektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında deney sonuçlara en yakın tahmini yapan algoritmanın öncelikli olarak Cubic Support Vector

Machine (Cubic SVM) algoritması olduğu, diğerlerinin ise Linear Regression ve Gaussian algoritmaları olduğu Çizelge 4.2’de görülmektedir.

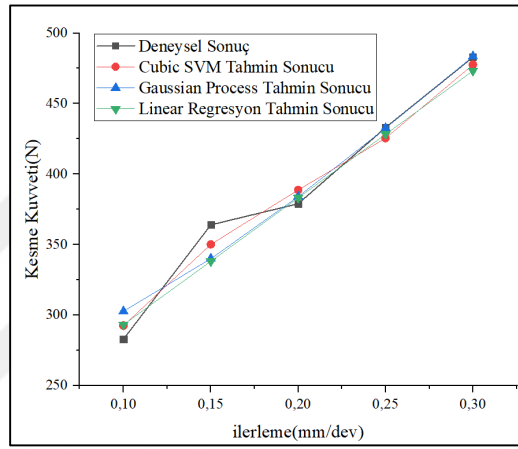
Algoritmaların doğruluk değerlendirme kriterlerine bakıldığında en yüksek  $R^2$  değerinin ve en düşük  $RMSE$ ,  $MSE$  ve  $MAE$  değerlerinin Cubic SVM algoritmasına ait olduğu görülecektir. SVM algoritması ilk olarak Drucker vd., (1996) tarafından tanıtılan ve iyi bilinen makine öğrenme yöntemlerinden biridir. SVM, çeşitli regresyon problemleri için yaygın olarak benimsenmiş ve diğer makine öğrenme modellerine kıyasla yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmiştir. SVM küçük ve yüksek boyutlu veriler, yerel minimumlu veriler ve doğrusal olmayan problemler için yakın tahminler sağlamaktadır (Guo vd., 2012).

Talaş kaldırma problemleri için yapılan çeşitli çalışmaların ortak özelliklerine bakıldığında doğruluk oranları en yüksek algoritmalar Cubic SVM, Linear Regression ve Gaussian algoritmalarıdır (Knittel vd., 2019; Alajmi vd., 2021).

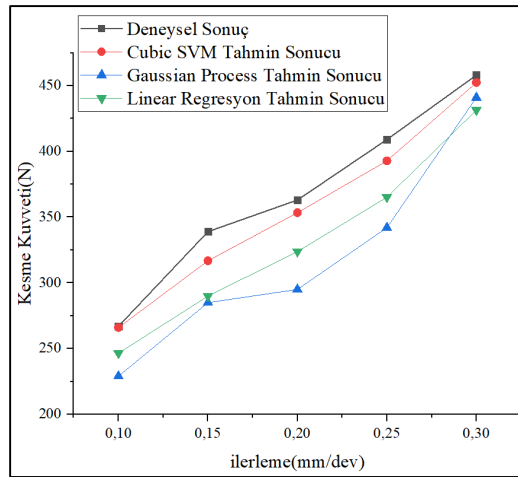
**Çizelge 4.2.** Regresyon ile öğrenme algoritmalarının karşılaştırılması

Kullanılan Algoritmalar	RMSE	$R^2$	MSE	MAE
Linear Regression (Interactions Linear)	23,441	0,91	549,48	18,607
Linear Regression (Linear)	22,089	0,9	48,93	18,642
Linear Regression (Robust Linear)	22,358	0,91	499,89	18,716
Stepwise Linear Regression	22,089	0,91	487,93	18,642
Tree (Medium Tree)	74,713	0	5582,1	63,092
Tree (Coarse Tree)	74,713	0	5582,1	63,092
Tree (Fine Tree)	51,269	0,53	2628,5	45,503
SVM (Linear SVM)	22,478	0,91	505,28	18,837
SVM (Medium Gaussian SVM)	33,09	0,79	1149,8	29,176
SVM (Cubic SVM)	19,573	0,93	383,1	16,658
SVM (Coarse Gaussian SVM)	30,644	0,83	939,03	26,287
SVM (Fine Gaussian SVM)	73,152	0,04	5351,3	61,087
Gaussian Process Regression (Squared Exponential GPR)	22,013	0,91	484,57	18,652
Gaussian Process Regression (Matern 5/2 GPR)	22,932	0,91	525,85	19,386
Gaussian Process Regression (Rational Quadratic GPR)	22,839	0,91	521,63	19,266
Gaussian Process Regression (Exponential GPR)	22,561	0,91	509,14	19,988
Ensemble (Boosted Trees)	50,841	0,54	2584,8	44,141
Ensemble (Bagged Trees)	60,588	0,34	3670,9	51,621

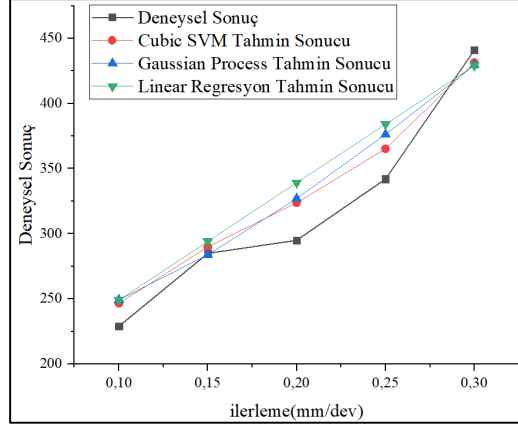
Deneyisel sonuçlar ve makine öğrenmesinden elde edilen tahmin sonuçları 50m/dak, 75m/dak, 100m/dak, 125m/dak ve 150m/dak kesme hızlarına bağlı olarak sırası ile Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te görülmektedir. Öğrenme yönteminin doğruluğunun test edilmesi için öğrenme algoritmasına kesme hızı 150m/dak değeri öğretilmemiştir ve parametrelerin yeniden elde edilmesi sırasında bu değer girilerek deneysel kesme kuvvetleri ile tahmin edilen kesme kuvvetleri ile makine öğrenmesi algoritmasının yakınlığı test edilmiştir.



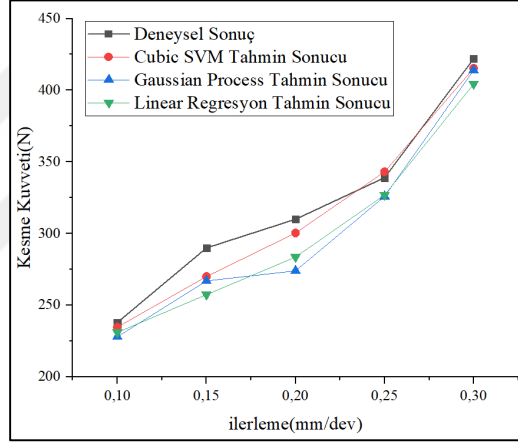
Şekil 4.9. Kesme hızı 50m/dak için Tahmin Sonucu



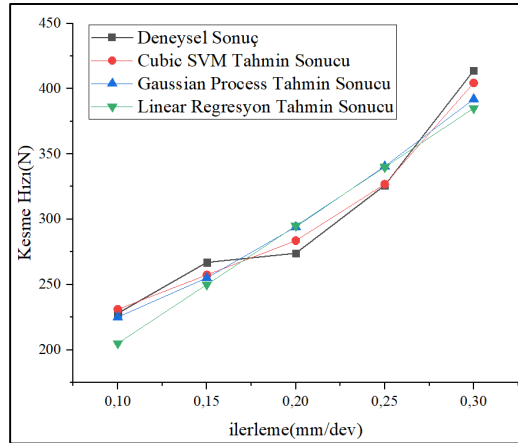
Şekil 4.10. Kesme hızı 75m/dak için Tahmin Sonucu



Şekil 4.11. Kesme hızı 100m/dak için Tahmin Sonucu



Şekil 4.12. Kesme hızı 125m/dak için Tahmin Sonucu



Şekil 4.13. Kesme hızı 150m/dak için Tahmin Sonucu

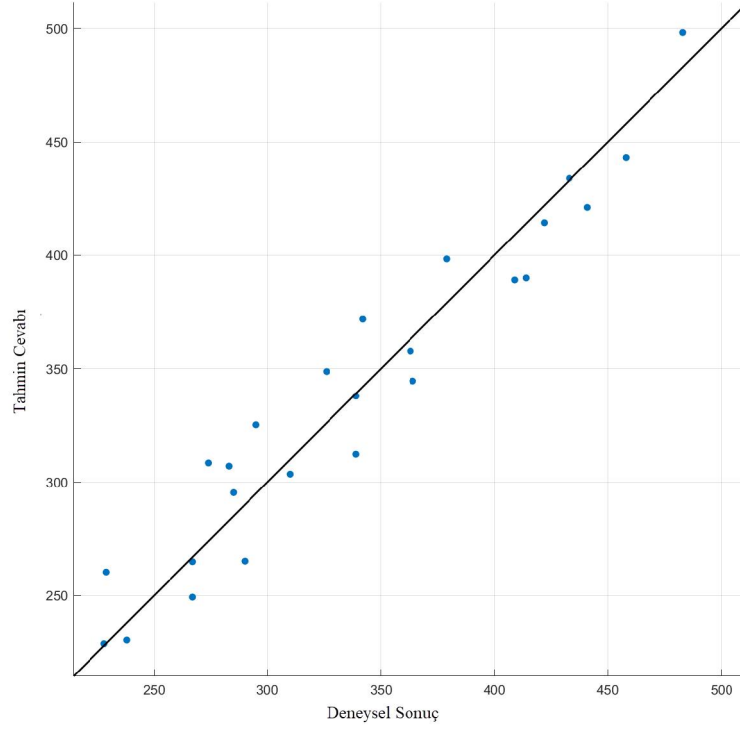
Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi Cubic Support Vector Machine algoritması en doğru tahmini veren algoritmadır. Çizelge 3.8 deneysel kesme kuvvetleri ile tahmin algoritmaları ile elde edilen kesme kuvvetlerinin değerlerini göstermektedir. Çizelge 4.3 ise makine öğrenme algoritmaları kullanılarak tahmin edilen kesme kuvveti değerleri ile deneylerden elde edilen kesme kuvveti değerleri arasındaki farkı göstermektedir. Tahmin edilen değerler ile deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu ve maksimum hata oranının Cubic Support Vector Machine için maksimum %9 civarında, Gaussian Process Regression(GPR) için maksimum %10 ve Lineer Regression için ise maksimum %15 olduğu Çizelge 4.4'te görülmektedir.

**Çizelge 4.3.** Deneysel yöntem ve tahmin algoritmaları kesme kuvveti değerleri

V <sub>c</sub> (m/dak.)	f (mm/dev.)	DENEYSEL SONUÇ(N)	SVM TAHMİN SONUCU(N)	GPR TAHMİN SONUCU(N)	LINEAR REGRESSION(N)
50	0,10	283,00	292,59	302,69	293,24
50	0,15	364,00	350,20	340,06	338,24
50	0,20	379,00	388,79	384,06	383,24
50	0,25	433,00	425,54	432,68	428,24
50	0,30	483,00	477,63	483,53	473,24
75	0,10	267,00	265,97	272,93	271,18
75	0,15	339,00	316,83	309,29	316,18
75	0,20	363,00	353,40	353,17	361,18
75	0,25	409,00	392,85	402,58	406,18
75	0,30	458,00	452,37	455,09	451,18
100	0,10	229,00	246,55	249,25	249,12
100	0,15	285,00	289,96	283,98	294,12
100	0,20	295,00	323,79	326,96	339,12
100	0,25	342,00	365,23	376,25	384,12
100	0,30	441,00	431,45	429,42	429,12
125	0,10	238,00	234,77	233,04	227,06
125	0,15	290,00	270,00	265,62	272,06
125	0,20	310,00	300,38	306,96	317,06
125	0,25	339,00	343,09	355,23	362,06
125	0,30	422,00	415,32	408,03	407,06
150	0,10	228,00	231,04	225,14	205,00
150	0,15	267,00	257,39	255,16	250,00
150	0,20	274,00	283,61	294,22	295,00
150	0,25	326,00	326,88	340,61	340,00
150	0,30	414,00	404,38	392,04	385,00

**Çizelge 4.4.** Deneysel sonuç ve tahmin sonucu arasındaki farklar

<b>V<sub>c</sub> (m/dak)</b>	<b>a (mm)</b>	<b>CUBIC SVM FARK (%)</b>	<b>GPR FARK (%)</b>	<b>LINEAR REGRESİON FARK (%)</b>
50	1	3,39	6,96	3,62
50	1	-3,79	-6,58	-7,08
50	1	2,58	1,34	1,12
50	1	-1,72	-0,07	-1,10
50	1	-1,11	0,11	-2,02
75	1	-0,39	2,22	1,57
75	1	-6,54	-8,76	-6,73
75	1	-2,64	-2,71	-0,50
75	1	-3,95	-1,57	-0,69
75	1	-1,23	-0,64	-1,49
100	1	7,66	8,84	8,79
100	1	1,74	-0,36	3,20
100	1	9,76	10,83	14,96
100	1	6,79	10,01	12,32
100	1	-2,17	-2,63	-2,69
125	1	-1,36	-2,08	-4,60
125	1	-6,90	-8,41	-6,19
125	1	-3,10	-0,98	2,28
125	1	1,21	4,79	6,80
125	1	-1,58	-3,31	-3,54
150	1	1,33	-1,25	-10,09
150	1	-3,60	-4,44	-6,37
150	1	3,51	7,38	7,66
150	1	0,27	4,48	4,29
150	1	2,32	3,05	1,8



**Şekil 4.14.** Cubic SVM Gerçek sonuç ve tahmin cevabı

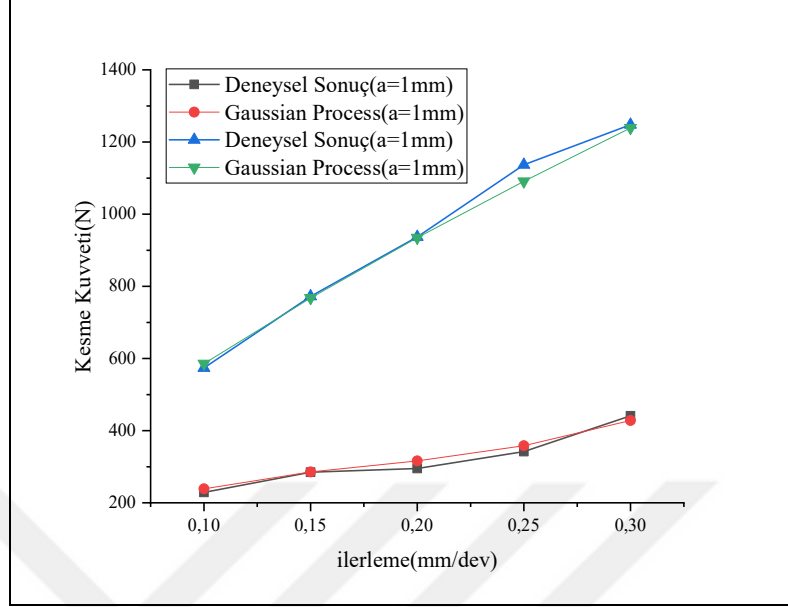
Model performansını kontrol etmek için deneysel sonuç ve tahmin grafiğini inceleniğinde modelin farklı yanıt değerleri için ne kadar iyi tahminler yaptığı anlaşılabilir. Şekil 4.14’ te görülen siyah renkli çizgiden herhangi bir noktaya olan dikey mesafe, o nokta için tahmin hatasını göstermektedir. İyi bir modelin küçük hataları vardır ve bu da tahminlerin doğrunun yanına dağıldığı anlamına gelir. Genellikle iyi bir model, diyagonal çizgi etrafında kabaca simetrik olarak dağılmış noktalara sahiptir.

#### 4.3.2. Üç bağımsız değişken kullanılarak yapılan tahmin sonuçları

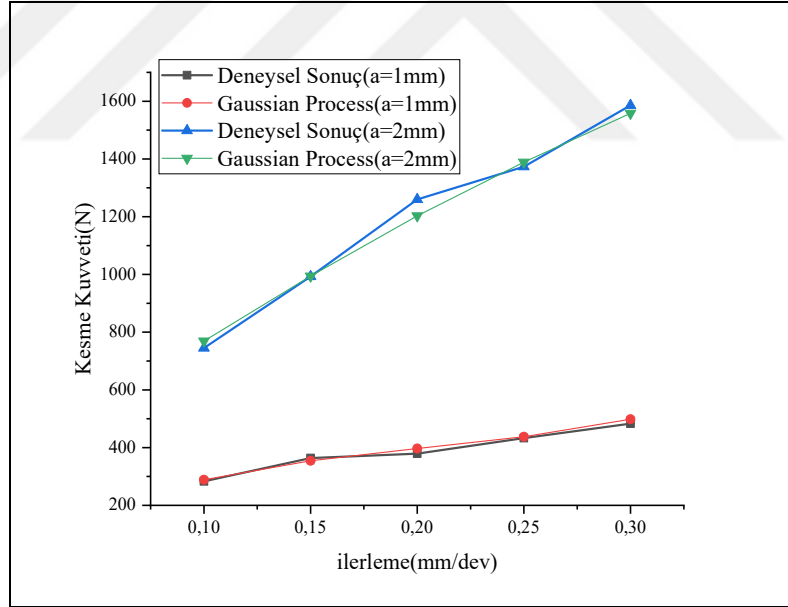
Bu bölümde ise daha önceki bölümden farklı olarak kesme hızı ve ilerlemeye ek olarak talaş derinliği dikkate alınmış ve daha fazla parametre ile hangi tahmin algoritmasının daha doğru cevap verdiği değerlendirilmiştir. Ayrıca makine öğrenme algoritmasına 150m/dak kesme hızı öğretilmemiş ve yapılan tahmin ile deneysel sonuç karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.5’ te görülen algoritmaların performans kriterleri incelendiğinde en yakın tahminin Gaussian Process Regression (GPR) ve Cubic SVM algoritmaları tarafından yapıldığı görülmüştür.

**Çizelge 4.5. Öğrenme Algoritmaları ve Validasyon**

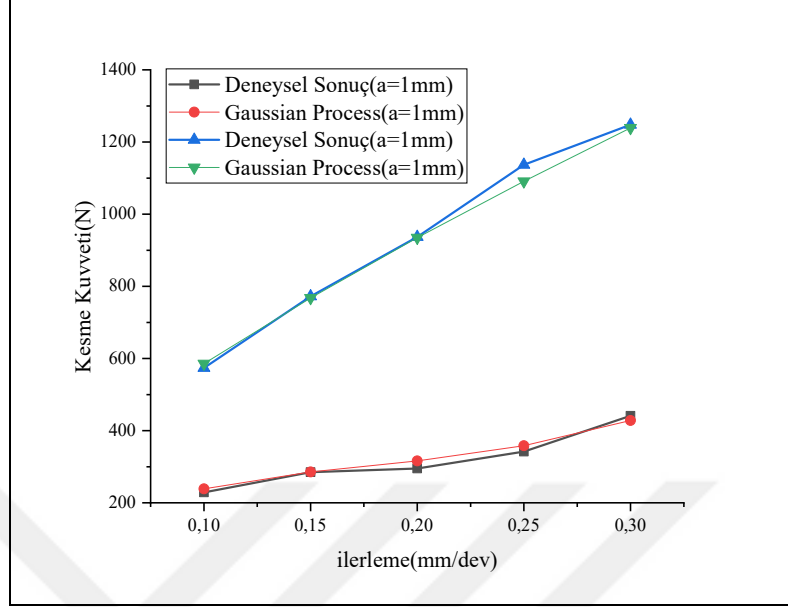
<b>Kullanılan Algoritmalar</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MSE</b>	<b>MAE</b>
Linear Regression (Interactions Linear)	46,92	0,99	2201,8	35,146
Linear Regression (Linear)	121,24	0,9	14699	95,669
Linear Regression (Robust Linear)	125,55	0,9	15763	98,627
Stepwise Linear Regression	49,256	0,98	2426,1	36,959
Tree (Medium Tree)	210,43	0,71	44282	153,34
Tree (Coarse Tree)	390,13	0	343,35	343,35
Tree (Fine Tree)	164,63	0,82	27102	112,88
SVM (Linear SVM)	142,58	0,87	20329	105,99
SVM (Medium Gaussian SVM)	105,38	0,93	11105	69,801
SVM (Cubic SVM)	51,572	0,98	2659,7	40,816
SVM (Coarse Gaussian SVM)	168,22	0,81	28299	114,84
SVM (Fine Gaussian SVM)	363,17	0,13	131890	316,04
Gaussian Process Regression (Squared Exponential GPR)	43,163	0,99	1863,1	34,137
Gaussian Process Regression (Matern 5/2 GPR)	39,782	0,99	1582,6	32,321
Gaussian Process Regression (Rational Quadratic GPR)	43,316	0,99	1859	34,112
Gaussian Process Regression (Exponential GPR)	75,386	0,96	5683	49,352
Ensemble (Boosted Trees)	151,55	0,85	22968	99,037
Ensemble (Bagged Trees)	278,71	0,49	77680	243,28



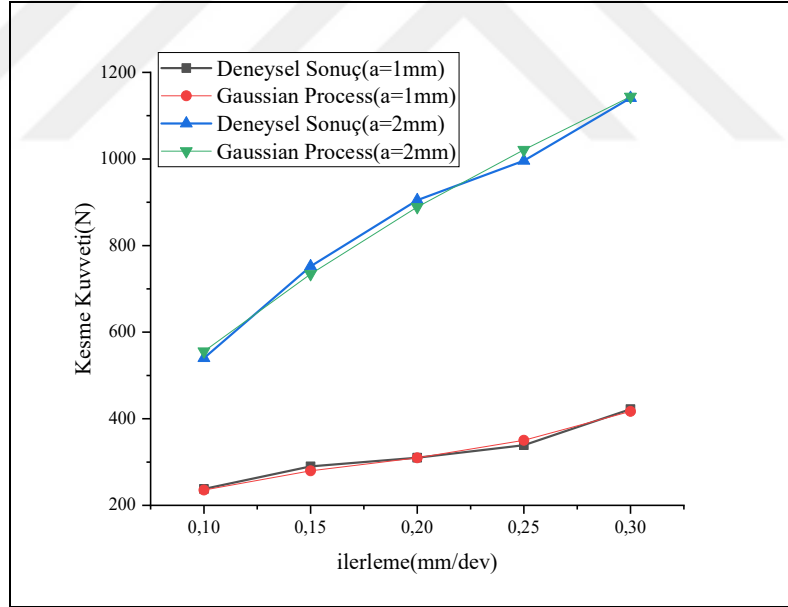
Şekil 4.15. Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm, a=2 mm ,  $V_c= 50$  m/dak)



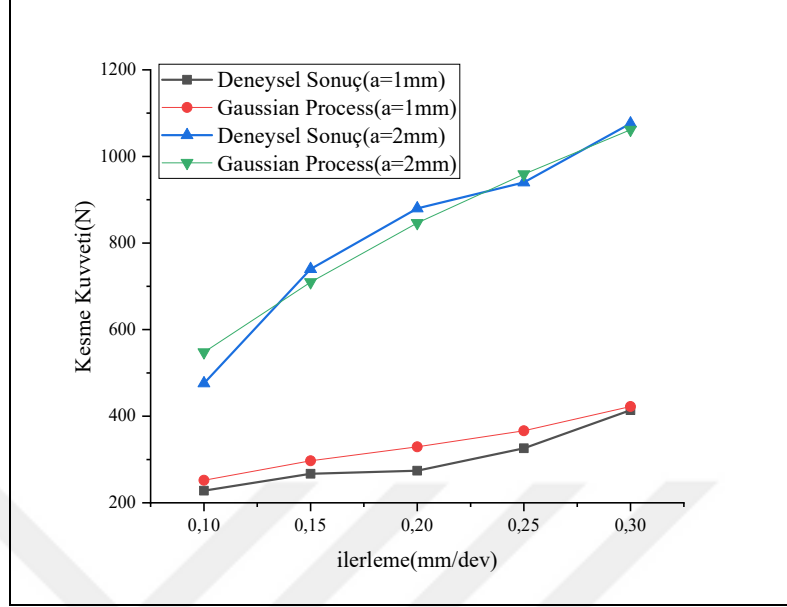
Şeki 4.16. Deneysel sonuç ve tahmin sonucu (a=1 mm ve a=2mm ,  $V_c= 75$  m/dak)



Şekil 4.17. Deneysel sonuç ve tahmin sonucu ( $a=1$  mm ve  $a=2$ mm ,  $V_c= 100$  m/dak)



Şekil 4.18. Deneysel sonuç ve tahmin sonucu ( $a=1$  mm ve  $a=2$ mm ,  $V_c= 125$  m/dak)



**Şekil 4.19.** Deneysel sonuç ve tahmin sonucu ( $a=1$  mm ve  $a=2$ mm ,  $V_c= 150$  m/dak)

Kesme hızı ve ilerlemenin yanında talaş derinliğinin üçüncü bir parametre olarak hesaba katıldığı durumda, en yakın tahminleri Gaussian Process Regression (GPR) algoritmasının verdiği görülmüştür. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’ de görüldüğü gibi deneysel yöntem ve tahmin algoritmaları arasında maksimum hata oranı %20’dir. Ayrıca bu tahminlere ait grafiksel çıktılar Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’ da incelenebilir. Deneysel sonuçlar ile yapılan tahminler incelendiğinde genellikle en yakın tahmini veren makine öğrenmesi algoritmalarının Gaussian Process Regression (GPR) ve SVM (Cubic SVM) algoritmalarının olduğu görülecektir.

**Çizelge 4.6.** Talaş derinliği 1 mm için elde edilen sonuçlar

<b>V<sub>c</sub> (m/dak)</b>	<b>f (mm/dev)</b>	<b>Deneyisel Sonuç, F<sub>c</sub> (N)</b>	<b>Tahmin Sonucu, F<sub>c</sub> (N)</b>	<b>Yüzdesele Fark (%)</b>
50	0,1	283	288,48	1,94
50	0,15	364	354,50	-2,61
50	0,2	379	396,95	4,74
50	0,25	433	437,89	1,13
50	0,3	483	498,37	3,18
75	0,1	267	263,09	-1,46
75	0,15	339	318,08	-6,17
75	0,2	363	351,83	-3,07
75	0,25	409	390,48	-4,53
75	0,3	458	453,23	-1,04
100	0,1	229	238,83	4,29
100	0,15	285	285,38	0,13
100	0,2	295	315,97	7,11
100	0,25	342	358,37	4,79
100	0,3	441	428,27	-2,89
125	0,1	238	235,33	-1,12
125	0,15	290	279,65	-3,57
125	0,2	310	309,74	-0,08
125	0,25	339	350,32	3,34
125	0,3	422	417,06	-1,17
150	0,1	228	252,06	10,56
150	0,15	267	297,16	11,3
150	0,2	274	329,31	20,19
150	0,25	326	366,36	12,38
150	0,3	414	422,43	2,04

**Çizelge 4.7.** Talaş derinliği 2 mm için elde edilen sonuçlar

<b>V<sub>c</sub> (m/dak)</b>	<b>f (mm/dev)</b>	<b>DeneySEL Sonuç, F<sub>c</sub> (N)</b>	<b>Tahmin Sonucu, F<sub>c</sub> (N)</b>	<b>YüZdesel Fark (%)</b>
50	0,1	745	769,34	3,27
50	0,15	993	994,25	0,13
50	0,2	1260	1202,90	-4,53
50	0,25	1373	1388,73	1,15
50	0,3	1586	1558,22	-1,75
75	0,1	691	656,99	-4,92
75	0,15	832	847,84	1,90
75	0,2	983	1026,31	4,41
75	0,25	1163	1198,70	3,07
75	0,3	1348	1367	1,41
100	0,1	574	585,76	2,05
100	0,15	772	767,68	-0,56
100	0,2	937	934,74	-0,24
100	0,25	1137	1091	-4,05
100	0,3	1248	1239,21	-0,70
125	0,1	540	555,72	2,91
125	0,15	752	734,28	-2,36
125	0,2	905	889,14	-1,75
125	0,25	996	1021,16	2,53
125	0,3	1141	1144	0,27
150	0,1	476	547,62	15,05
150	0,15	740	709,62	-4,10
150	0,2	880	846,29	-3,83
150	0,25	940	958	2,02
150	0,3	1076	1061	-1,33

### 4.3.3. Johnson Cook malzeme parametrelerinin değişimine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin makine öğrenmesi ile tahmini

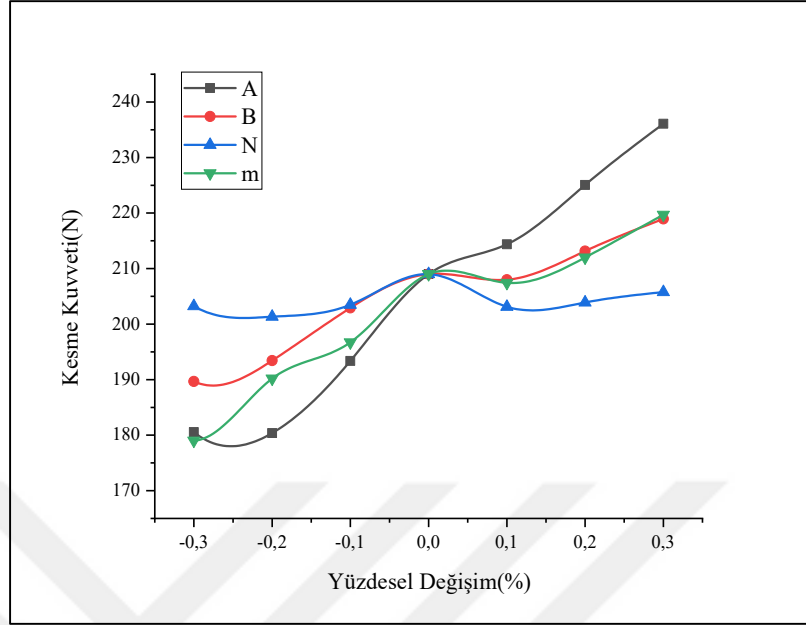
Bu bölümün amacı Johnson Cook malzemesi parametrelerinin ve bu parametrelere karşılık gelen kesme kuvveti değerlerinin makine öğrenmesi algoritmalarına öğretilerek Johnson Cook malzeme parametrelerindeki değişimin kesme kuvvetlerine etkisini araştırılmasıdır.

İlerleme 0,1mm/dev, talaş derinliği ise 1mm olarak alınmış ve Johnson Cook malzemesinin plastik şekil değişimini etkileyen A, B, n ve m parametreleri, bağımsız değişken ve kesme kuvveti parametresi ise bağımlı değişken olarak kabul edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar analizi sonuçları birbirine yakın olduğu için ve bu parametrelere bağlı deney yapma imkanı olmadığı için analizler Abaqus yazılımında yapılmıştır.

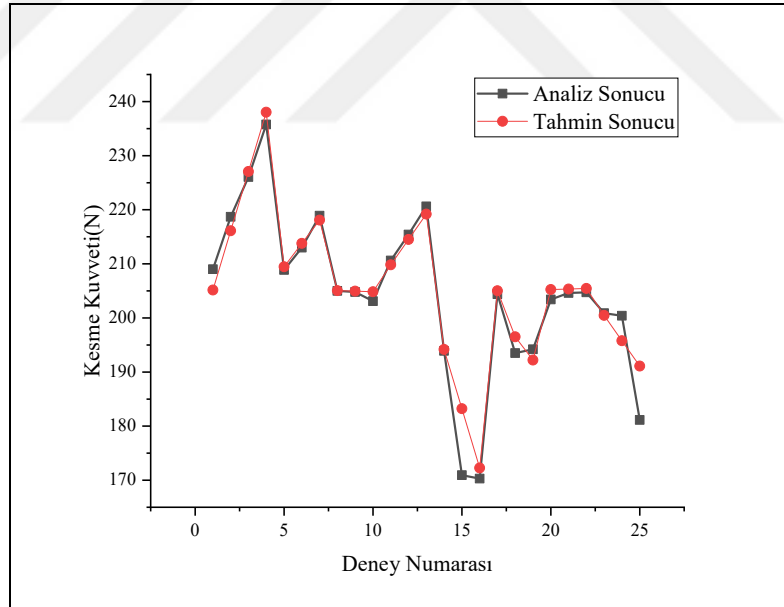
Amaç, kesme parametrelerine göre kullanılmış olan makine öğrenmesi algoritmalarının ikiden fazla bağımsız değişkenli tahminlerde etkili olup olmadığının araştırılması ve parametre sayısı fazla olduğunda en doğru tahminlerin hangi öğrenme algoritmaları tarafından yapıldığının araştırılmasıdır.

Şekil 4.20' de parametrelerinin yüzdesel değişimlerine bağlı olarak bir grafik verilmiştir. Bu grafikte kesme kuvvetleri üzerinde etkisi en büyük parametrenin başlangıç akma gerilmesi (A) olduğu, pekleşme parametresi (B) ve sıcaklık parametresi (m)'nin ise A parametresi ile karşılaştırıldığında daha az fakat birbirine yakın olduğu, pekleşme üssünün (n) değişiminin ise kuvvet artışı üzerindeki etkisinin en düşük olduğu görülebilir.

Şekil 4.21' de görülen grafik tahmin sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. En yakın tahmin ilk olarak Robust Linear Regression öğrenme algoritması ile elde edildiği ve ikinci en doğru algoritmanın ise Gaussian Process Regression (GPR) algoritmasının olduğu görülmüştür. Kullanılan algoritmaların performans değerlendirme kriterleri Çizelge 4.8' de incelenebilir. Çizelge 4.9 incelendiğinde ise maksimum hata tahmin oranının %7,2 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.20. Johnson Cook parametrelerinin yüzdesel değişiminin kesme kuvvetlerine etkisi



Şekil 4.21. Tahmin sonucu ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması

**Çizelge 4.8.** Öğrenme Algoritmaları ve Validasyon

<b>Kullanılan Algoritmalar</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MSE</b>	<b>MAE</b>
Linear Regression (Linear)	4,19	0,93	17,632	2,886
Linear Regression (Interactions Linear)	4,19	0,93	17,632	2,886
Linear Regression (Robust Linear)	3,93	0,94	15,451	2,6941
Stepwise Linear Regression	4,19	0,93	17,563	2,8646
Tree (Fine Tree)	16	0	256,17	11,844
Tree (Medium Tree)	16	0	256,17	11,844
Tree (Coarse Tree)	16	0	256,17	11,844
SVM (Linear)	4,2498	0,93	18,061	2,7146
SVM (Quadratic)	6,1388	0,85	37,685	3,9776
SVM (Medium Gaussian SVM)	12,172	0,42	112,15	6,6463
SVM (Cubic SVM)	9,1314	0,67	83,383	5,6545
SVM (Coarse Gaussian SVM)	10,59	0,56	148,16	8,5029
SVM (Fine Gaussian SVM)	15,933	0,01	253,85	12,069
Gaussian Process Regression (Squared Exponential GPR)	5,99	0,86	35,995	3,7385
Gaussian Process Regression (Matern 5/2 GPR)	5,78	0,87	33,416	3,575
Gaussian Process Regression (Rational Quadratic GPR)	5,99	0,86	35,995	3,7385
Gaussian Process Regression (Exponential GPR)	6,0351	0,86	36,422	3,9826
Ensemble (Boosted Trees)	18,16	-0,29	329,8	14,79
Ensemble (Bagged Trees)	15,963	0,01	254,81	11,819

**Çizelge 4.9.** Deneysel sonuç ve tahmin sonucu arasındaki farklar

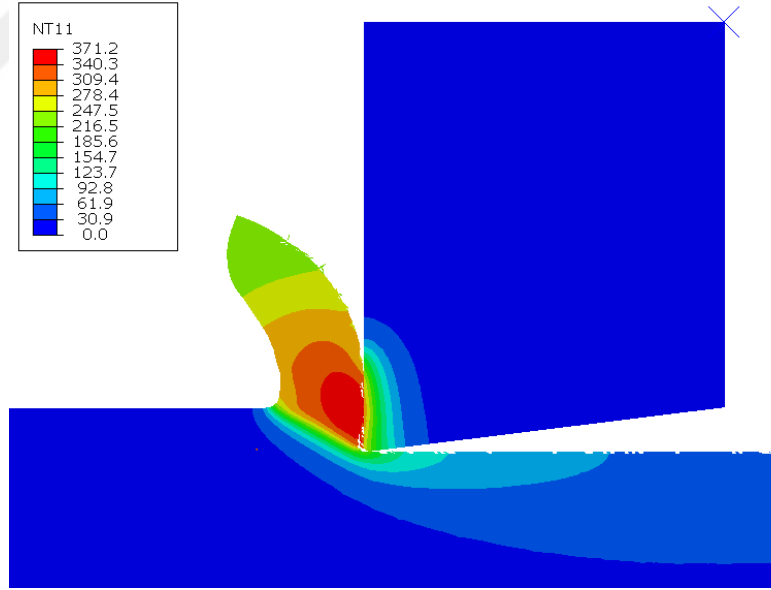
A	B	N	M	Deneysel Sonuç, F <sub>c</sub> (N)	Tahmin Sonucu, F <sub>c</sub> (N)	Hata Oranı (%)
735,8	309,8	0,4396	1,05	209	205,14	-1,84
809,38	309,8	0,4396	1,05	218,69	216,10	-1,18
882,96	309,8	0,4396	1,05	226,048	227,06	0,45
956,54	309,8	0,4396	1,05	235,76	238,02	0,96
735,8	340,78	0,4396	1,05	208,87	209,46	0,28
735,8	371,76	0,4396	1,05	213	213,77	0,36
735,8	402,74	0,4396	1,05	218,895	218,09	-0,37
735,8	309,8	0,48356	1,05	205	205,04	0,02
735,8	309,8	0,52752	1,05	204,79	204,94	0,08
735,8	309,8	0,57148	1,05	203,096	204,85	0,86
735,8	309,8	0,4396	1,155	210,612	209,83	-0,37
735,8	309,8	0,4396	1,26	215,418	214,51	-0,42
735,8	309,8	0,4396	1,365	220,63	219,19	-0,65
662,22	309,8	0,4396	1,05	193,9	194,18	0,15
588,64	309,8	0,4396	1,05	170,932	183,23	7,20
515,06	309,8	0,4396	1,05	170,3	172,24	1,16
735,8	308,9	0,4396	1,05	204,379	205,02	0,31
735,8	247,84	0,4396	1,05	193,502	196,51	1,56
735,8	216,86	0,4396	1,05	194,2	192,20	-1,03
735,8	309,8	0,39564	1,05	203,409	205,24	0,90
735,8	309,8	0,35168	1,05	204,607	205,34	0,36
735,8	309,8	0,30772	1,05	204,733	205,44	0,35
735,8	309,8	0,4396	0,945	200,88	200,46	-0,21
735,8	309,8	0,4396	0,84	200,41	195,78	-2,31
735,8	309,8	0,4396	0,735	181,138	191,09	5,50

#### 4.4. Takım Talaş Arayüzündeki Sıcaklıkların İncelenmesi

Talaşlı imalatta, birincil kesme bölgesinde yapılan iş ve takım-talaş arayüzündeki sürtünme sıcaklık artışına katkıda bulunur. Bu bölümde kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğine bağlı olarak ayrılan talaş üzerindeki maksimum sıcaklıklar değerlendirilecek ve 150m/dak kesme hızı için belirlenen parametrelerin makine öğrenmesi yöntemi ile tahmini yapılacaktır.

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi en yüksek sıcaklıklar iş parçasından ayrılan talaş üzerinde meydana gelmektedir ve bu sıcaklıkların bir kısmı kesici takım ve iş parçasına iletilmektedir. Dolayısı ile sıcaklığın büyük kısmı ayrılan talaşla birlikte uzaklaşmaktadır.

Sıcaklıklardan birincil önemde etkilenen bölge talaş, ikincil önemli bölge kesici takım (kesme kenarı) ve üçüncül önemli bölge ise iş parçasıdır.

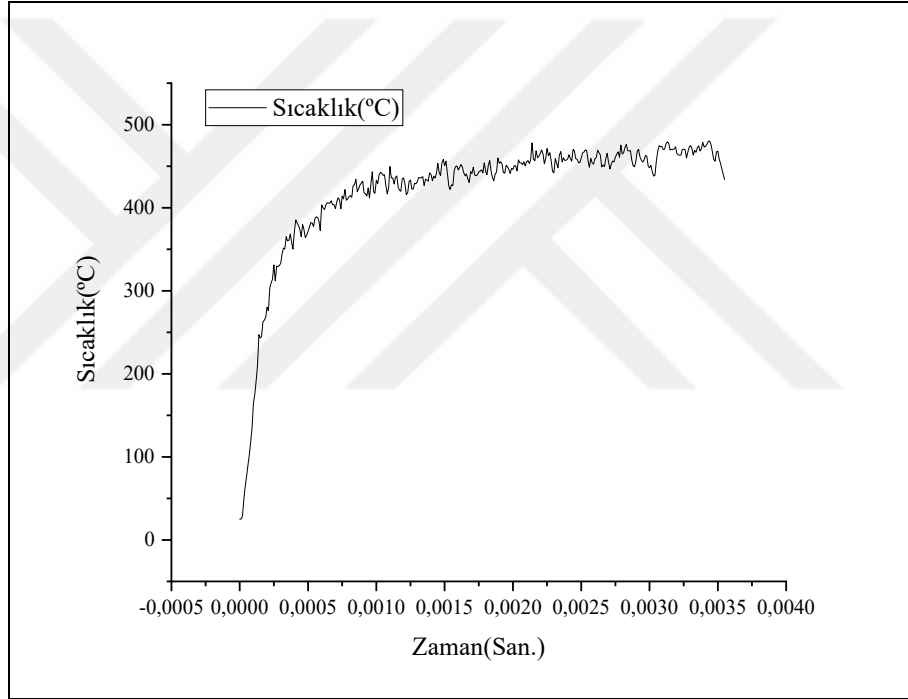


Şekil 4.22. Kesici takım ve iş parçasında oluşan sıcaklık dağılımı

#### 4.4.1. Sıcaklık oluşumunun değerlendirilmesi

Bu bölümde talaş derinliği ve ilerleme sabit bırakılarak kesme hızının değişimine bağlı sıcaklıklar ve sıcaklık dağılımı hesaplanmış ve çıkan sonuçlar yorumlanmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucu talaş ve kesici takım üzerinde hesaplanan maksimum sıcaklıklar Çizelge 4.10’da incelenebilir.

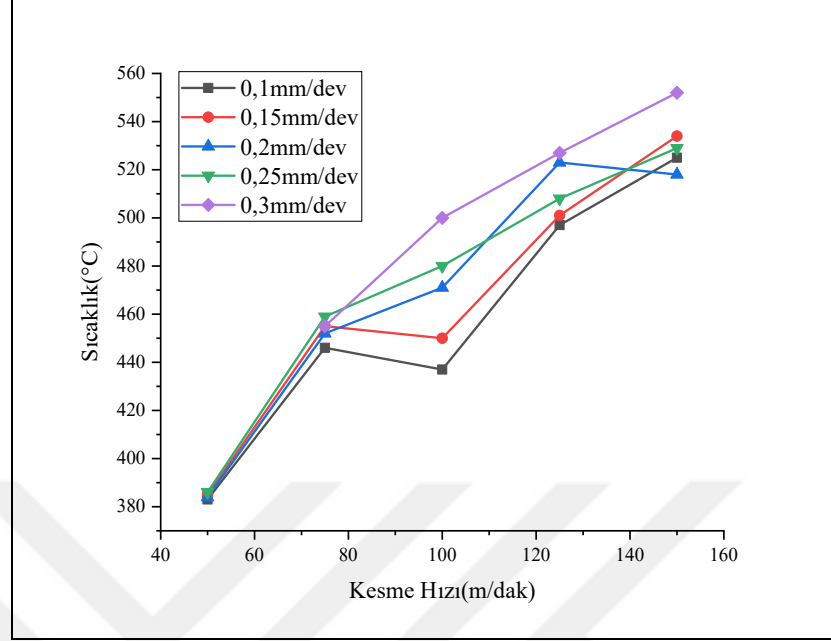
Analizler sıcaklıklar durağan duruma gelinceye kadar devam ettirilmiş ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.23’te zamana bağlı sıcaklık grafiği incelenebilir.



Şekil 4.23. Kesme hızı 150m/dak için zamana bağlı sıcaklık değişimi

**Çizelge 4.10.** Maksimum talaş sıcaklığı değişimi

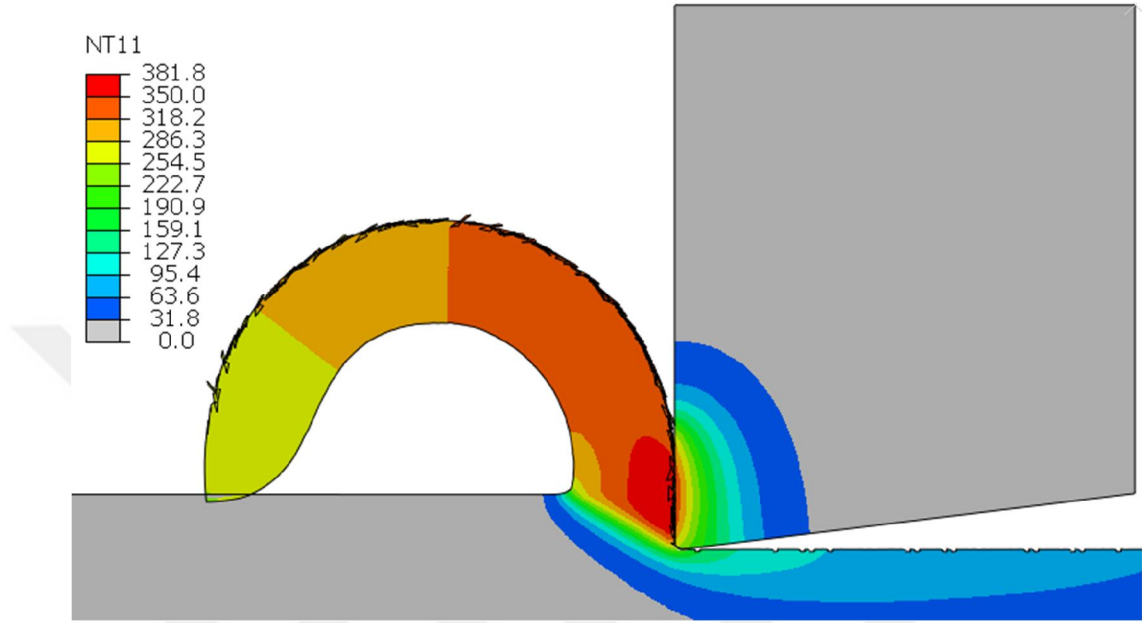
<b>Kesme Hızı(m/dak)</b>	<b>İlerleme(mm/dev)</b>	<b>Maksimum Talaş Sıcaklığı(°C)</b>
<b>50</b>	<b>0,1</b>	383
	<b>0,15</b>	385,8
	<b>0,2</b>	384,1
	<b>0,25</b>	386,1
	<b>0,3</b>	403,5
<b>75</b>	<b>0,1</b>	446
	<b>0,15</b>	455
	<b>0,2</b>	452
	<b>0,25</b>	459
	<b>0,3</b>	455
<b>100</b>	<b>0,1</b>	437
	<b>0,15</b>	450
	<b>0,2</b>	471.6
	<b>0,25</b>	480
	<b>0,3</b>	500
<b>125</b>	<b>0,1</b>	497
	<b>0,15</b>	501
	<b>0,2</b>	523
	<b>0,25</b>	508
	<b>0,3</b>	527
<b>150</b>	<b>0,1</b>	525
	<b>0,15</b>	534
	<b>0,2</b>	518
	<b>0,25</b>	529
	<b>0,3</b>	552



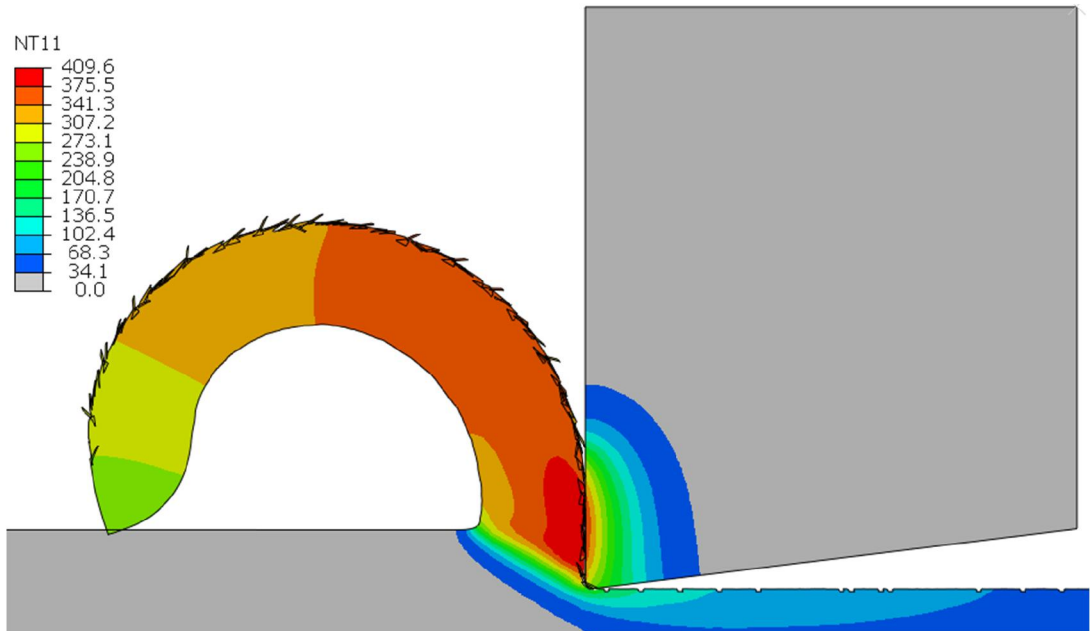
**Şekil 4.24.** Kesme hızı ve sıcaklık ilişkisi

Şekil 4.24, kesme hızına bağlı olarak farklı ilerleme değerlerinde sıcaklık değişimini göstermektedir. İlerleme ve sıcaklık artışına bağlı olarak sıcaklıkların artma eğiliminde olduğu ve sıcaklık artışında en etkili parametrenin kesme hızı olduğu görülmektedir. Kesme hızı arttıkça sıcaklıkların arttığı fakat sabit bir kesme hızında ilerleme artışına bağlı olarak sıcaklıklardaki artışın Şekil 4.24'te görüldüğü gibi çok fazla olmadığı görülmektedir. Dolayısı ile sıcaklık artışındaki en önemli etkenin kesme hızının artması olduğu söylenebilir.

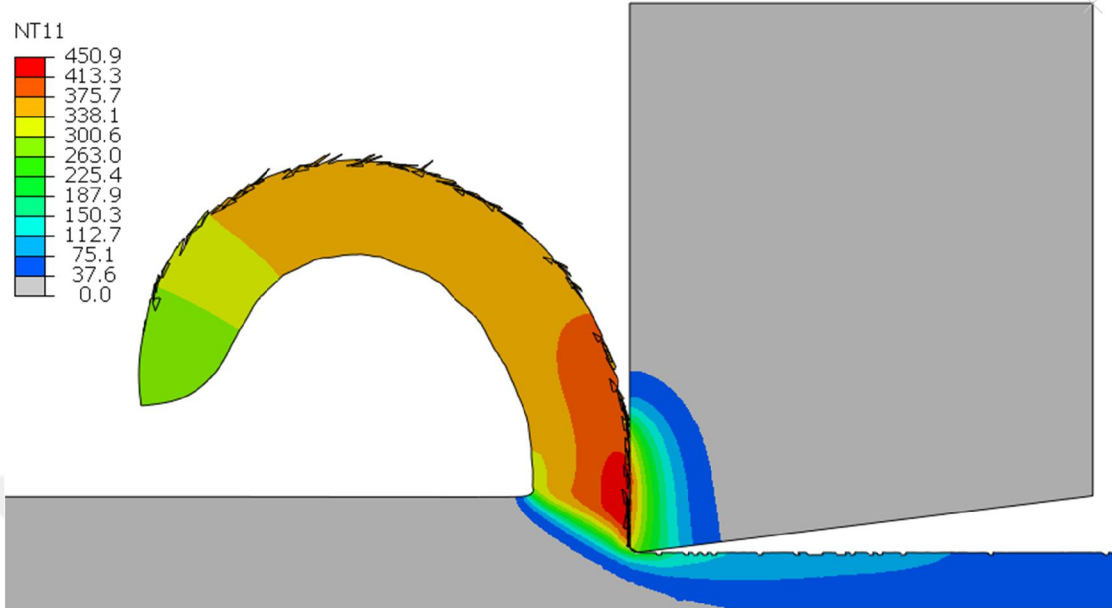
Talaş derinliği sabit bırakıldığında kesici takım ile talaş arayüzey sıcaklığının kesme hızı ile artmaktadır. B durum kesme hızına bağlı olarak ısı transferinin artışı ile ilgilidir. Sonuç olarak artan malzeme kaldırma oranından dolayı oluşan mekanik enerji ısıya dönüşür (Thekdi, 2019).



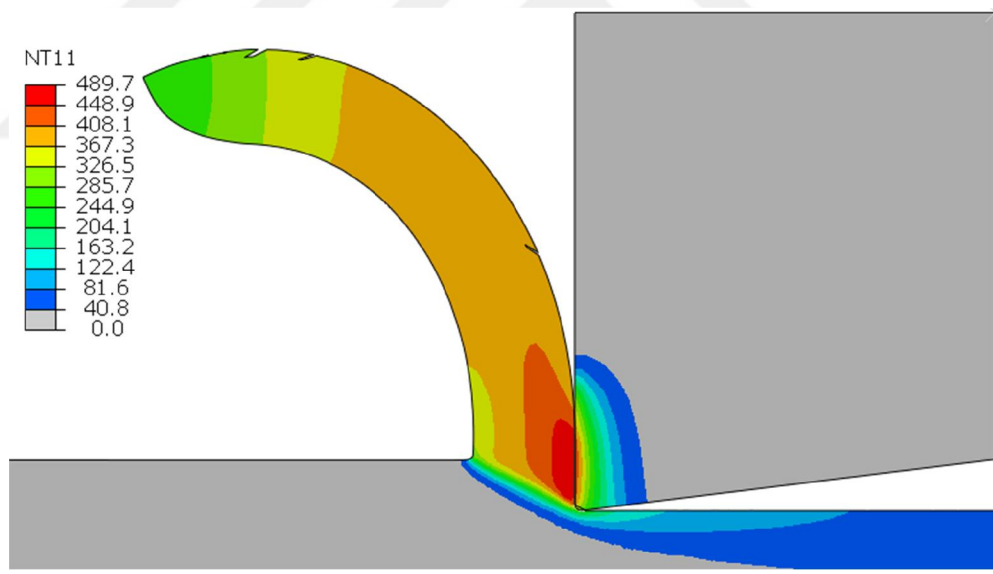
Şekil 4.25. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 50$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)



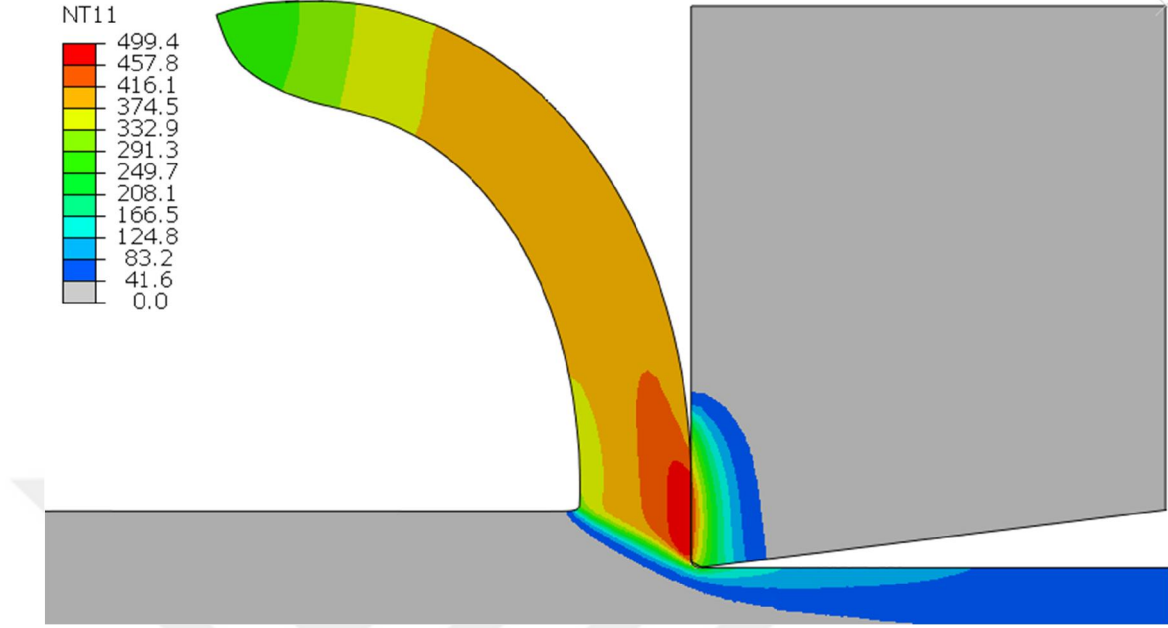
Şekil 4.26. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 75$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)



Şekil 4.27. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 100$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)

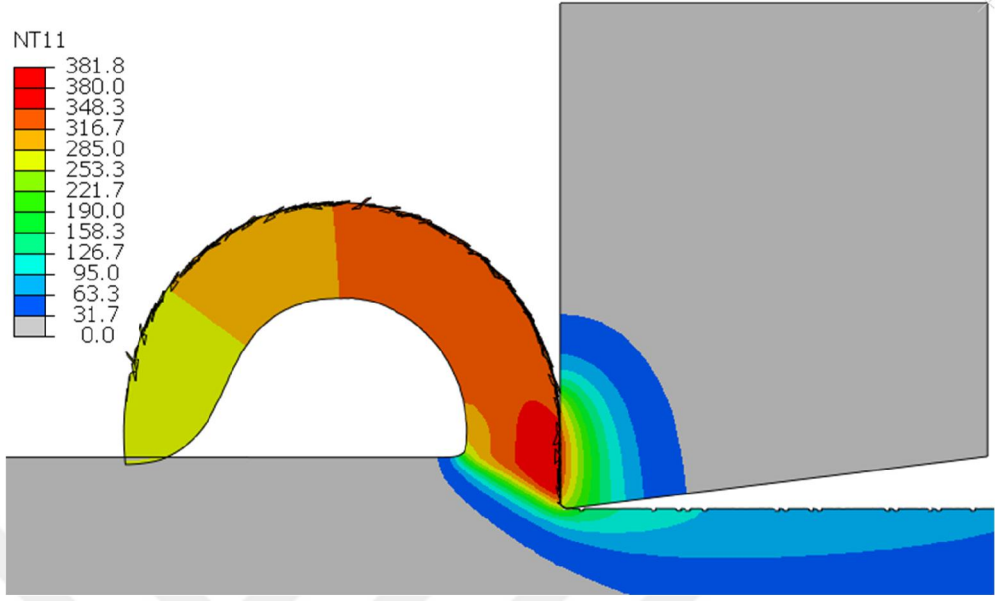


Şekil 4.28. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 125$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)

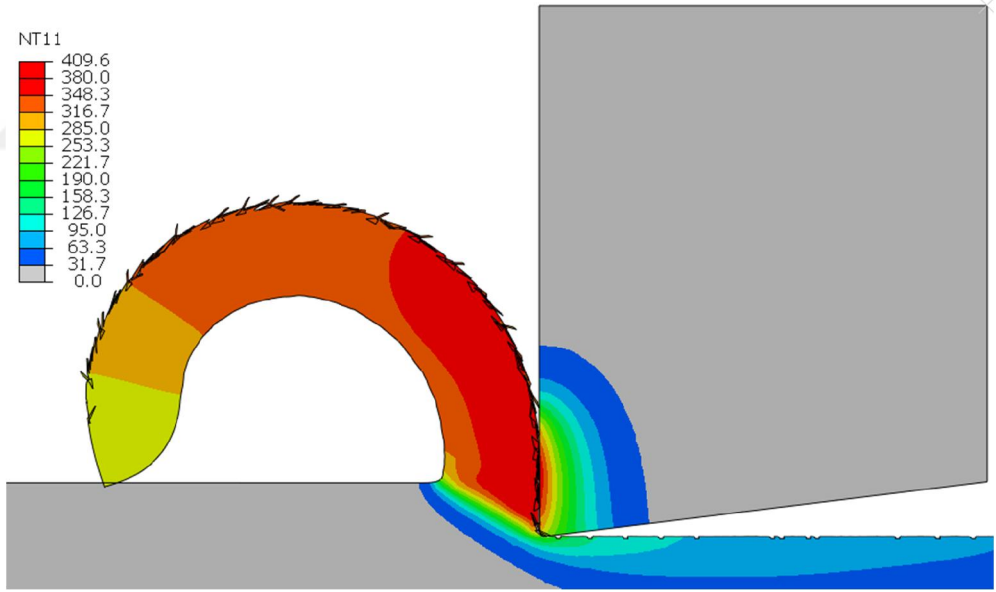


**Şekil 4.29.** Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 150$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)

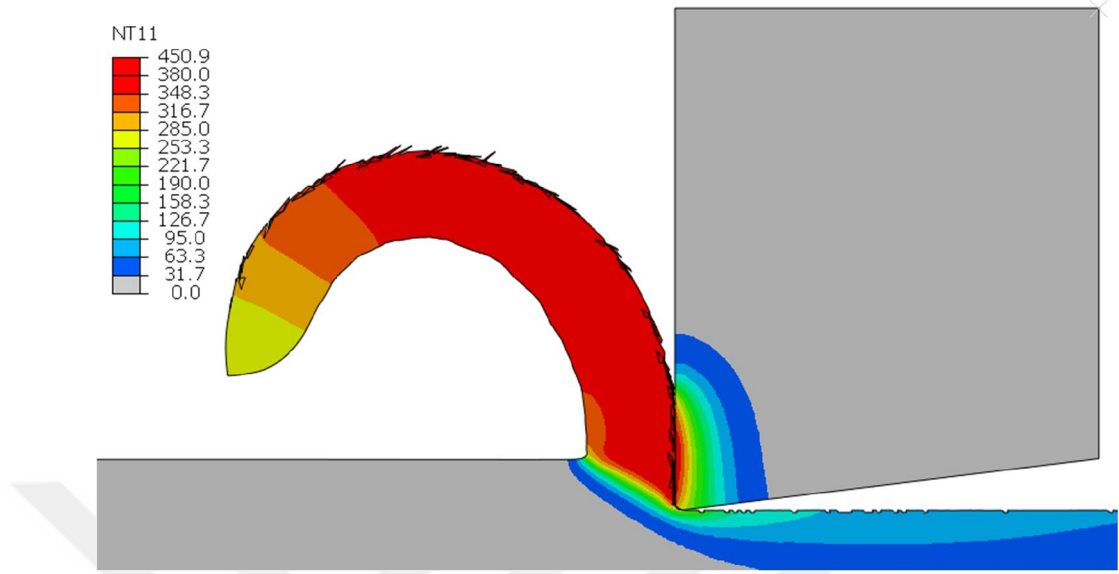
Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29' da görüldüğü gibi kesme hızı arttıkça talaş kalınlığının azaldığı görülmektedir. Talaş yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise kesme hızı arttıkça sıcaklığın talaş üzerinde daha küçük bir alanda yığıldığı görülebilir. Bu durumu daha ayrıntılı yorumlamak gerekirse, Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 incelendiğinde düşük kesme hızlarında sıcaklığın sistemden daha geç uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum bize düşük kesme hızlarında takım üzerinde yığılma kenar oluşumu olasılığının arttığını göstermektedir. Bu durumun anlaşılması için sıcaklık dağılımı  $380^{\circ}\text{C}$  ile kısıtlanmış ve ilgili şekillerde bu sıcaklık değerinden yüksek bölgeler gösterilmiştir.



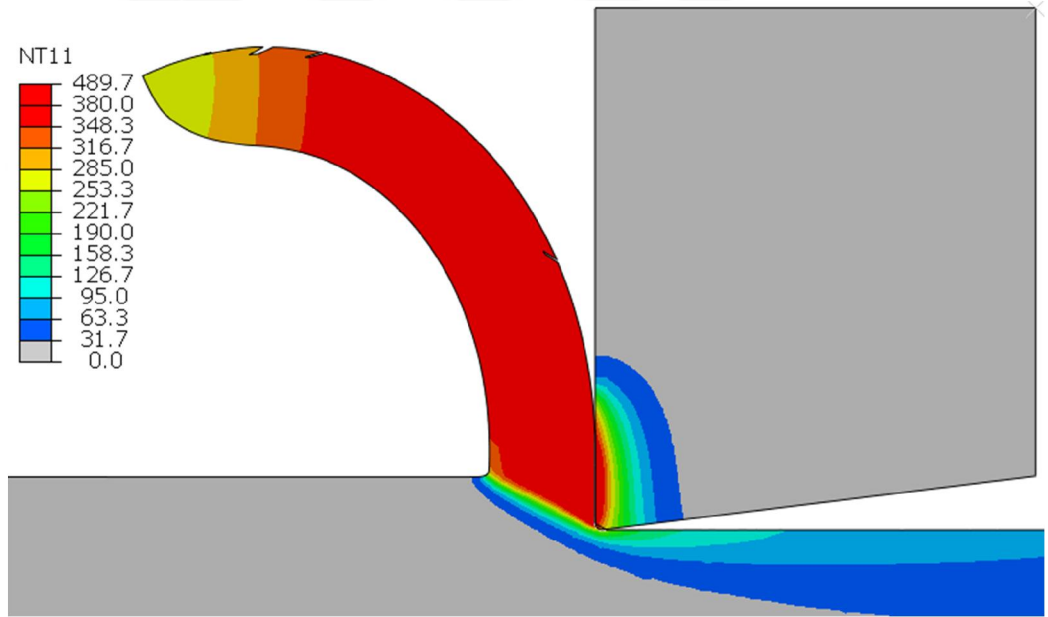
Şekil 4.30. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 50\text{m/dak}$ ,  $a = 1\text{mm}$ ,  $f = 0,1\text{mm/dev}$ )



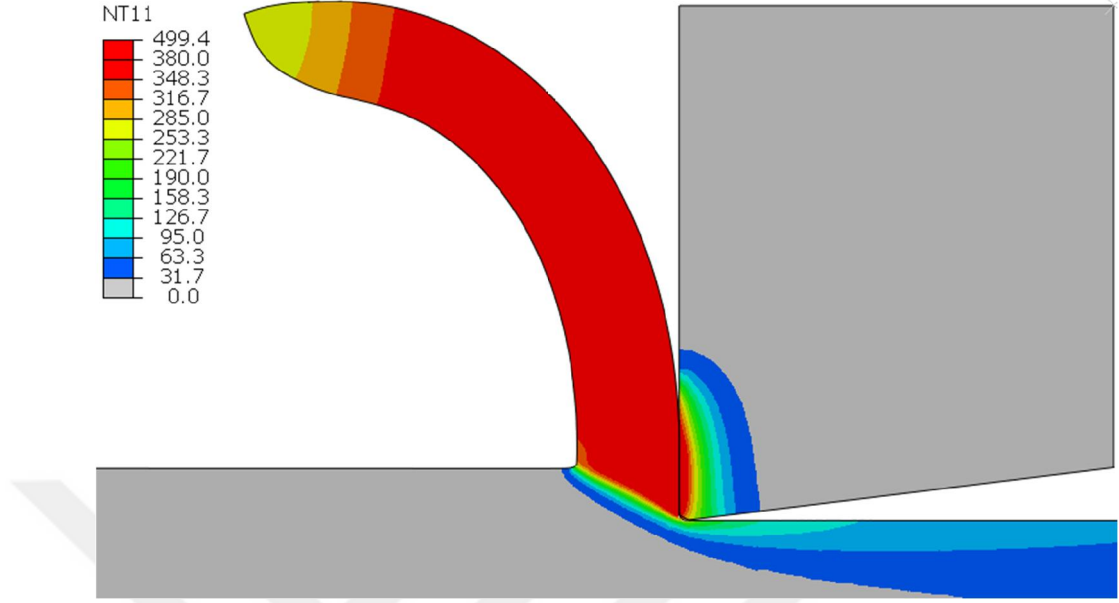
Şekil 4.31. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 75\text{ m/dak}$ ,  $a = 1\text{mm}$ ,  $f = 0,1\text{mm/dev}$ )



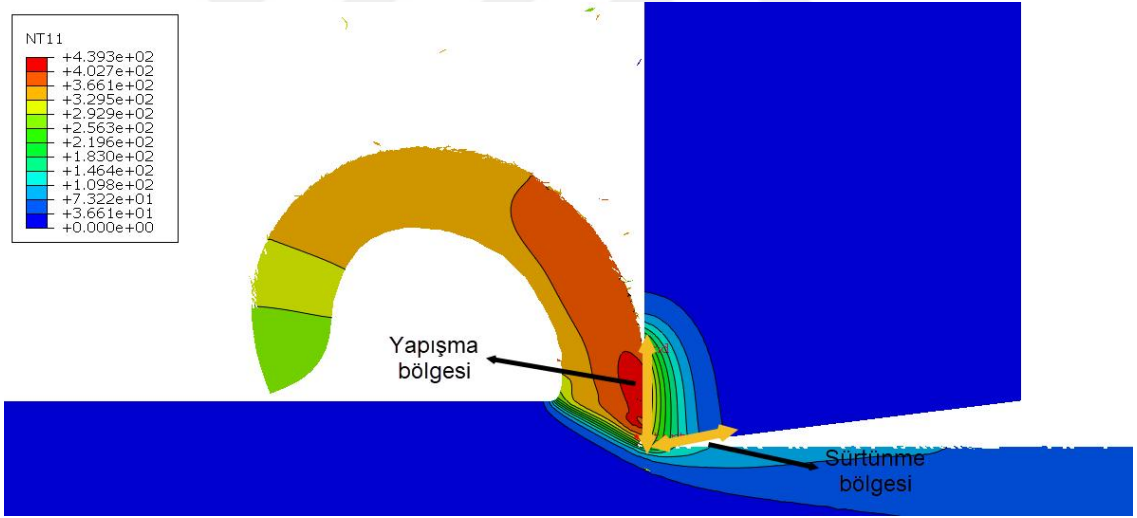
Şekil 4.32. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 100$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)



Şekil 4.33. Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 125$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)



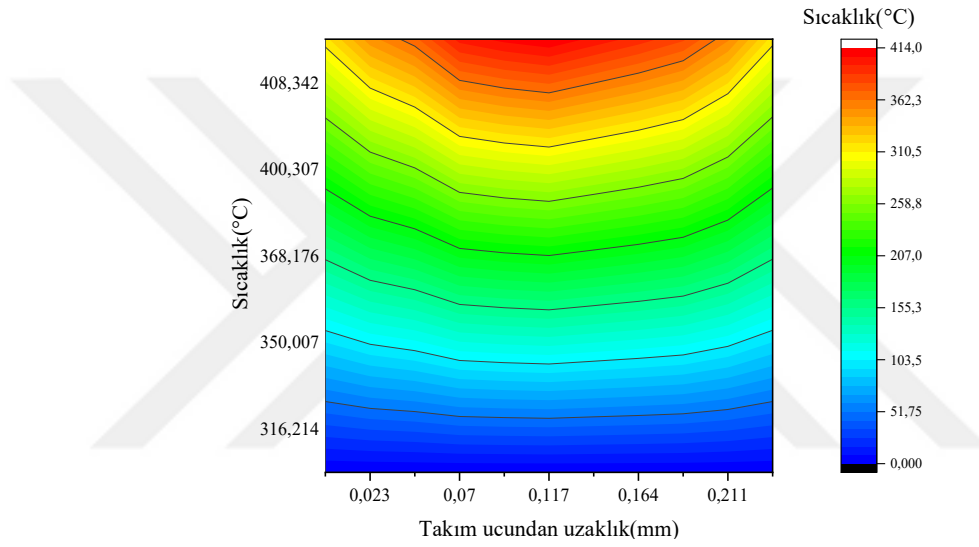
**Şekil 4.34.** Sıcaklık dağılımı ( $V_c = 150$  m/dak,  $a = 1$  mm,  $f = 0,1$  mm/dev)



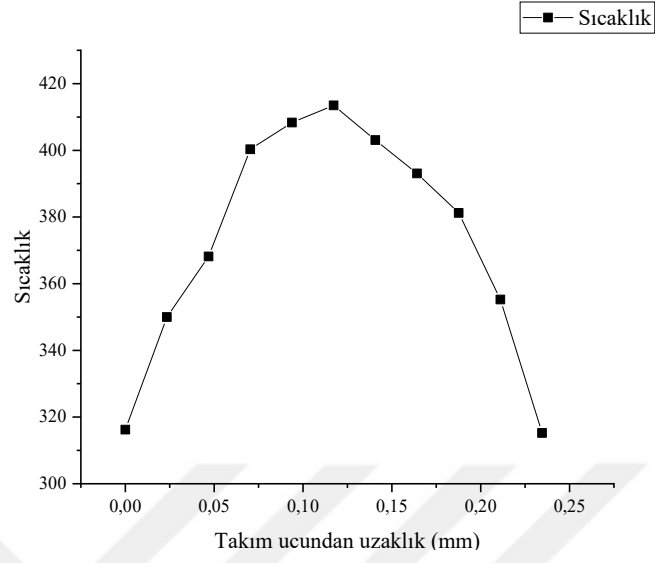
**Şekil 4.35.** Yapışma ve sürtünme yüzeylerinde sıcaklık verilerinin alındığı bölgeler

Şekil 4.35' te görülen takım ve talaş yapışma yüzeyindeki sıcaklık değişimi ile takım ve işlenmiş yüzey arasındaki sıcaklık değişimi grafikleri sırası ile Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 ile Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da görülmektedir.

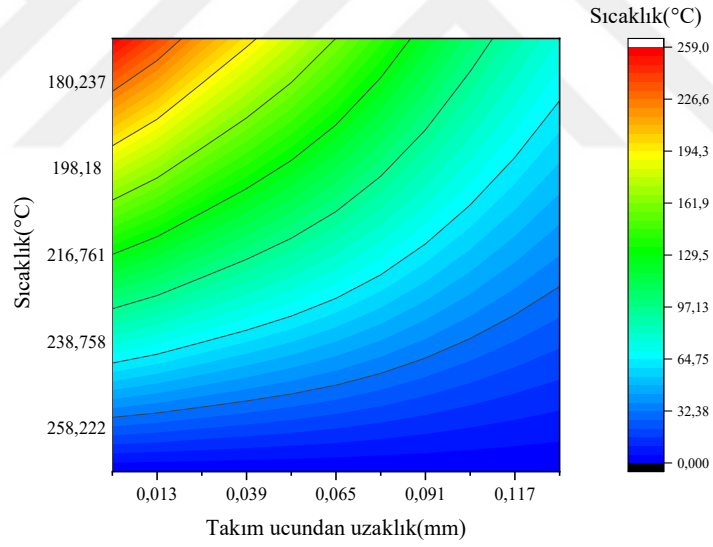
Yapışma yüzeyindeki sıcaklık değişiminin daha önce (Duan vd., 2009) tarafından yapılan çalışma ile benzer bir davranış gösterdiği görülmektedir. En yüksek sıcaklıkların birincil deformasyon bölgesinde, daha sonra ise takım ile talaşın yapışma yüzeyi olan ikincil deformasyon bölgesinde ve en düşük sıcaklıkların ise üçüncül deformasyon bölgesinde olduğu görülmüştür. Takım ve talaş yapışma bölgesindeki sıcaklık dağılımı parabolik bir etki gösterirken, üçüncül deformasyon bölgesinde oluşan sıcaklık değişimi ise doğrusala yakın bir etki göstermektedir.



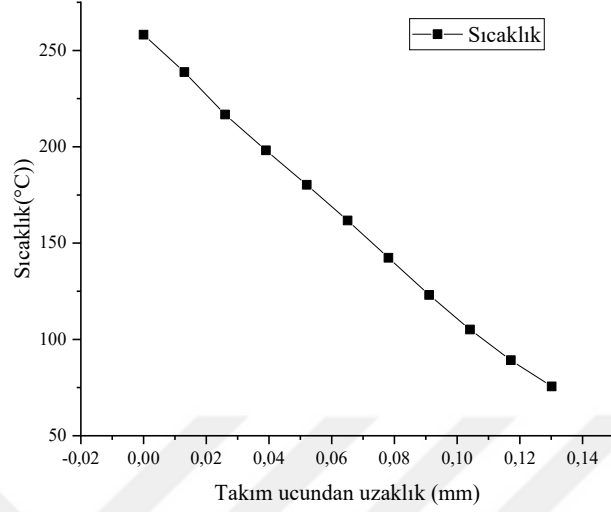
**Şekil 4.36.** Yapışma yüzeyinde sıcaklık değişimi



Şekil 4.37. Yapışma yüzeyinde sıcaklık değişimi



Şekil 4.38. Sürtünme yüzeyinde sıcaklık değişimi



**Şekil 4.39.** Sürtünme yüzeyinde sıcaklık değişim

#### 4.4.2. Sıcaklık değerlerinin makine öğrenmesi ile tahmini

Bir önceki bölümde elde edilen sayısal analiz sonuçlarının makine öğrenmesi algoritmaları tarafından tahmini yapılmış ve en yakın sonucu veren algoritma ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.11’de görüldüğü en yakın tahminler Gaussian Process Regression (GPR) algoritmaları tarafından yapılmıştır. En yakın tahminlerin yapıldığı algoritma kodu programdan dışarı kaydedilmiş ve Matlab yazılımının y(fit) kodu çalıştırılarak dışarıdan sadece kesme hızı ve ilerleme parametreleri alınarak sonucu bilinmeyen parametreler ile tahmin çıktıları alınmıştır. Bu tahmin çıktıları Çizelge 4.12’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum sonlu elemanlar analizinden elde edilen değerler ile makine öğrenmesi yöntemi ile elde edilen değerlerin arasındaki hata oranı %5,86’dır.

**Çizelge 4.11.** Matlab Regresyon ile Öğrenme Algoritmaları ve Validasyon

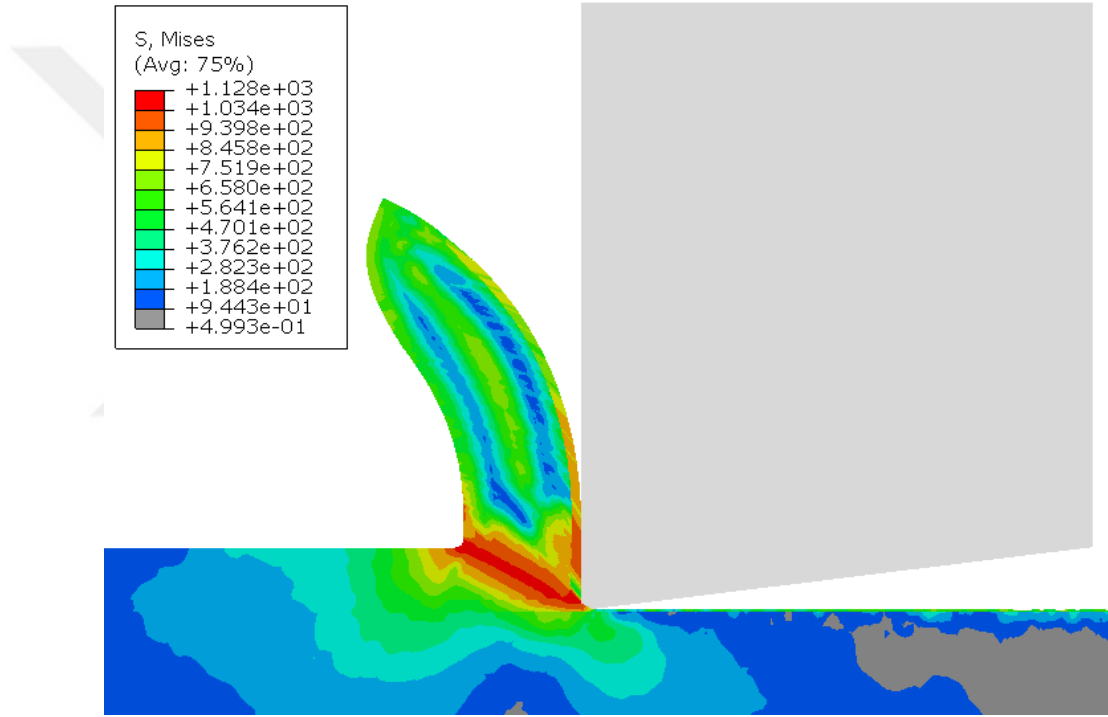
<b>Kullanılan Algoritmalar</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>MSE</b>	<b>MAE</b>
Linear Regression (Linear)	20,165	0,87	406,62	16,22
Linear Regression (Interactions Linear)	26,399	0,78	696,89	21,131
Linear Regression (Robust Linear)	20,328	0,87	413,21	16,401
Stepwise Linear Regression	21,216	0,86	450,1	18,023
Tree (Fine Tree)	30,215	0,72	912,92	20,381
Tree (Medium Tree)	56,793	0	3225,4	47,716
Tree (Coarse Tree)	56,793	0	3225,4	47,716
SVM (Linear)	22,283	0,85	496,51	17,762
SVM (Quadratic)	22,707	0,84	515,59	18,315
SVM (Medium Gaussian SVM)	30,307	0,72	918,54	24,529
SVM (Cubic SVM)	33,283	0,66	1107,8	26,586
SVM (Coarse Gaussian SVM)	28,179	0,75	794,04	21,345
SVM (Fine Gaussian SVM)	57,085	- 0,01	3258,7	48,075
Gaussian Process Regression (Squared Exponential GPR)	19,327	0,88	373,54	16,053
Gaussian Process Regression (Matern 5/2 GPR)	19,723	0,88	388,98	16,448
Gaussian Process Regression (Rational Quadratic GPR)	19,327	0,88	373,54	16,053
Gaussian Process Regression (Exponential GPR)	21,927	0,85	480,79	18,048
Ensemble (Boosted Trees)	44,876	0,38	2013,39	42,849
Ensemble (Bagged Trees)	47,419	0,3	2248,5	37,246

**Çizelge 4.12.** Sonlu elemanlar analizi ve tahmin sonucu arasındaki farklar

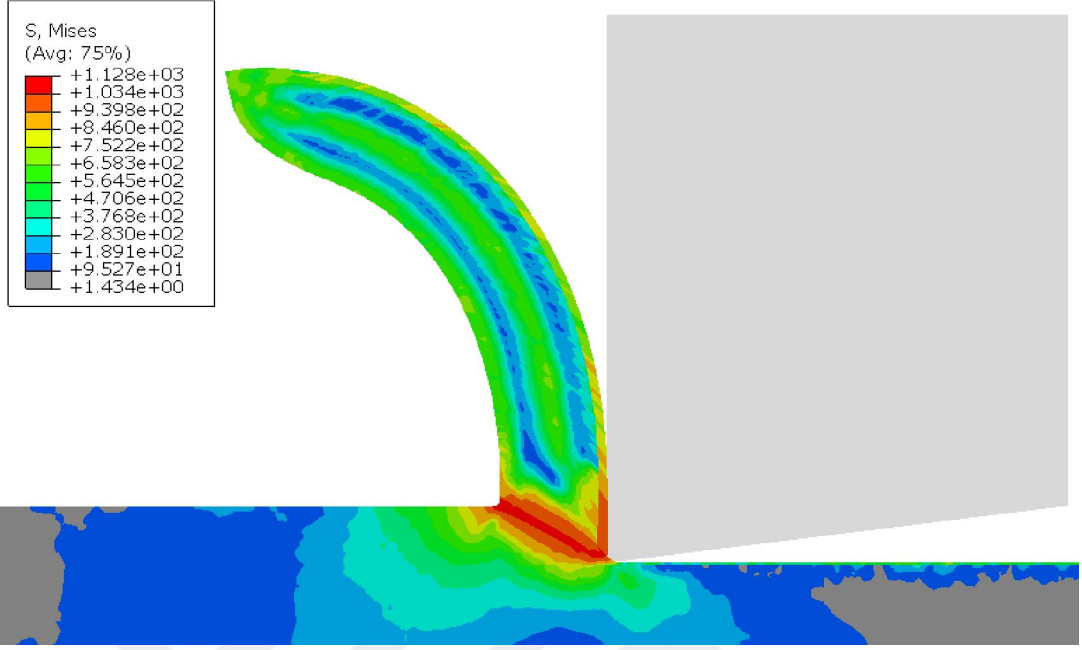
<b>Kesme Hızı(m/dak)</b>	<b>İlerleme(mm/dev)</b>	<b>Maksimum Talaş Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Tahmin Sonucu Sıcaklık (°C)</b>	<b>Yüzdese Hata(%)</b>
50	0,1	383	387,49	1,17
	0,15	385,8	393,63	2,03
	0,2	384,1	398,13	3,65
	0,25	386,1	400,94	3,84
	0,3	403,5	412,62	2,26
75	0,1	446	426,06	-4,47
	0,15	455	432,69	-4,90
	0,2	452	437,33	-3,25
	0,25	459	440,05	-4,13
	0,3	455	453,70	-0,29
100	0,1	437	462,63	5,86
	0,15	450	469,63	4,36
	0,2	471,6	474,22	0,56
	0,25	480	476,80	-0,67
	0,3	500	492,28	-1,54
125	0,1	497	495,02	-0,40
	0,15	501	502,23	0,25
	0,2	523	506,59	-3,14
	0,25	508	509,00	0,20
	0,3	527	526,03	-0,18
150	0,1	525	521,47	-0,67
	0,15	534	528,73	-0,99
	0,2	518	532,63	2,82
	0,25	529	534,90	1,12
	0,3	560	553,13	-1,23

#### 4.5. Kayma düzleminde oluşan gerilme dağılımının incelenmesi

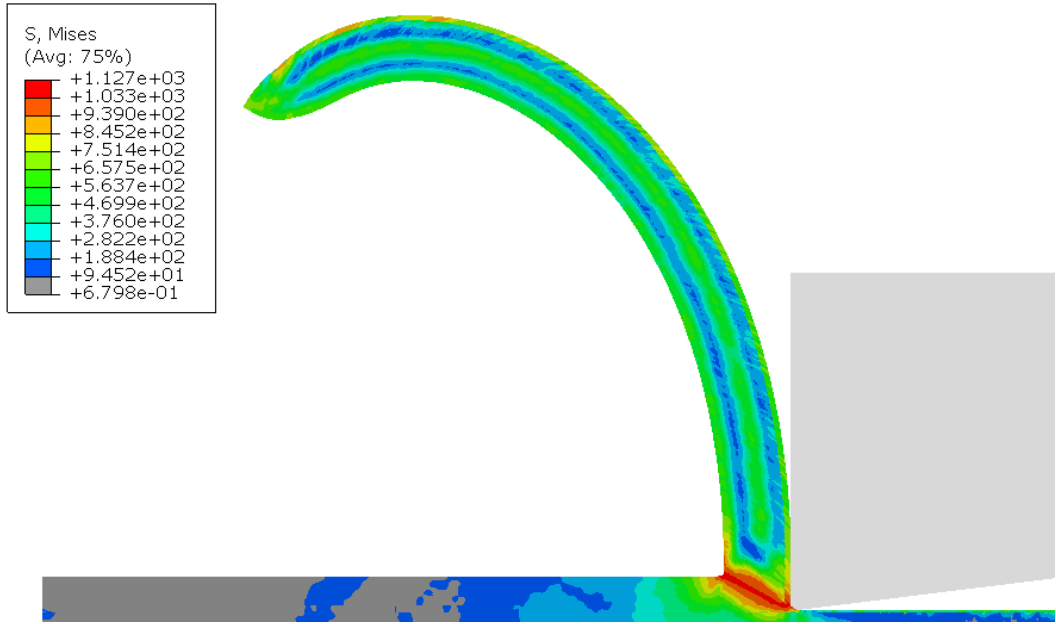
Uygulanan talaş kaldırma yönteminin kararlılığını kontrol etmek için kayma düzleminde, talaş kaldırma prosesi boyunca oluşan gerilme dağılımının değişimini incelemek önemlidir. Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de görüldüğü gibi kayma düzlemi üzerinde oluşan gerilme dağılımı zamana bağlı olarak kararlılığını korumaktadır. Kayma düzlemi üzerinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ise 1128 MPa civarındadır. Üç şekilde de oluşmuş talaş kalınlıkları birbirine yakındır.



Şekil 4.40. Kayma düzlemindeki gerilme dağılımı ( $5,5 \cdot 10^{-4}$ s.)



Şekil 4.41. Kayma düzlemindeki gerilme dağılımı ( $1.10^{-3}s.$ )



Şekil 4.42. Kayma düzlemindeki gerilme dağılımı ( $2,5.10^{-3}s.$ )

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel yöntemler ile yapılan iki tahmin senaryosu vardır. Bu senaryolardan biri sadece kesme hızı ve ilerleme değişkenlerini içeren iki parametrelili tahmin senaryosu bir diğeri ise ek olarak talaş derinliğinin değişken olarak tanımlandığı üç parametrelili tahmin senaryosudur. Deneysel parametreler ile yapılan tahminlerde en yakın tahmini yapan algoritmaların Cubic Support Vector Machine ve Gaussian Process Regression algoritmaları olduğu belirlenmiştir.

İki parametrelili tahminlerde en yakın tahmin sonucu Cubic Support Vector Machine ve Gaussian Process Regression (GPR) algoritmaları vermiştir. Cubic Support Vector Machine için maksimum tahmin hatası %9 civarında, Gaussian Process Regression (GPR) için maksimum tahmin hatası ise %10 civarındadır.

Talaş derinliğinde üçüncü bir parametre olarak belirlendiği tahmin senaryosunda ise en yakın sonucu yine Cubic Support Vector Machine ve Gaussian Process Regression (GPR) algoritmalarının verdiği görülmektedir.

Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılırken bir bağımlı değişken olan kesme hızı için belirlenen 150 m/dak değeri tahmin algoritmalarına öğretilmemiş ve sonuçların deneysel sonuçlar ile tutarlı olup olmadığı incelenmiştir. Bu durumda maksimum hata oranının iki parametrelili tahminler için %7,38 ve üç parametrelili tahminler için ise %20 civarında olduğu görülmüştür. Dolayısı ile makine öğrenmesi algoritmaları kullanılırken bağımsız değişken sayısı arttıkça tahminin gerçek değerlerden uzaklaştığı ve tahminlerin doğru şekilde yapılabilmesi için deney sayısının arttırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Tahmin sonuçları ve deneysel sonuçlar arasındaki farkların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması makine öğrenmesi algoritmalarının deneylerde kaybedilen zamanı azaltarak deney sürelerini kısaltmak için kullanılması mümkündür.

Tahmin algoritmalarının değerlendirilmesi için üçüncü önemli senaryo ise sonlu elamanlar analizlerinde kullanılan Johnson Cook malzeme parametrelerinin kesme kuvvetlerine olan etkisinin araştırılması ve bu parametrelerin değişimine bakılarak kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesidir. Sonuç olarak kesme kuvvetleri üzerinde etkisi en büyük parametrenin başlangıç

akma gerilmesi A olduğu, pekleşme parametresi B ve sıcaklık parametresi m'nin ise A parametresi ile karşılaştırıldığında daha az fakat birbirine yakın etkisi olduğu, pekleşme üssü n parametresindeki değişimin kuvvet artışı üzerindeki etkisinin en düşük olduğu görülebilir.

Dört bağımsız değişken olan A, B, n ve m parametreleri ile yapılan tahmin sonuçlarında en kesme kuvvetleri için en yakın tahmin sonucunun Robust Linear Regression algoritmasının olduğu görülmüştür.

Son bölümde 1 mm sabit talaş derinliğinde kesme hızı ve ilerleme değişimine bağlı olarak sonlu elemanlar analizinden çıktı olarak alınan sıcaklık değerlerinin makine öğrenmesi yöntemi ile tahmini yapılmıştır. Yapılan sıcaklık tahminler sonucunda ise en yakın tahmin sonucunu veren algoritma Gaussian Process Regression (GPR) algoritmasıdır ve maksimum hata oranı ise %5,86'dır.

Sonuç olarak makine öğrenmesi yöntemleri, sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler ve deneysel çalışmalar için harcanan sürenin azaltılmasında oldukça önemlidir. Tahmin algoritmalarının hata yüzdelerine bakıldığında ise en yakın tahminlerin Gaussian Process Regression, Supported Vector Machine ve Robust Linear Regression algoritmaları tarafından yapıldığı görülmektedir.

Talaş kaldırma işleminin sonlu elemanlar modeli literatürde bir çok çalışmada kabul gören Johnson Cook malzemesi ile yapılmıştır. Ayrıca talaş kaldırma işleminin kolay hale getirmek ve sayısal ağ bozulmasının önüne geçmek için ALE yöntemi kullanılmıştır. Bunun nedeni kaldırılan talaşın kesici takımın talaş yüzeyine temas ettiği bölgede oluşma olasılığı olan ve talaş yüzeyindeki mikro çatlaklardır.

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise deneysel ile analiz sonuçları arasındaki farkın maksimum %40 ve minimum %3 civarında olduğu görülmektedir. Bunun nedeni deneylerde kullanılan malzeme ile sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzemenin farklı olmasından kaynaklanma birlikte Johnson Cook malzemesi parametrelerinin yüksek kesme hızlarında doğru cevap verebilme olasılığının azalmasıdır.

Deneysel sonuçlar ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılan diğer veriler ise kesme hızı ve ilerleme artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimidir. Sonuçlar incelendiğinde ilerlemeye bağlı olarak kesme kuvvetlerinin deneysel yöntem gibi sonlu elemanlar analizlerinde de arttığı ve kesme kuvvetlerinin kesme hızının artışına bağlı olarak azaldığı gözlenmektedir.

Ortogonal kesme işleminde sıcaklıkların talaş yardımı ile sistem dışına taşındığı bilinmektedir. Maksimum sıcaklıkların takım ve talaş yapışma yüzeyinde olduğu görülmektedir ve sıcaklıklardan birincil önemde etkilenen bölgenin uzaklaşan talaş, ikincil önemli bölgenin kesici takım (kesme kenarı) ve üçüncül önemli bölgenin ise iş parçası olduğu görülmektedir.

Bilindiği gibi kesici takımlarda yığılma kenar oluşumu talaş kaldırma prosesinin verimliliği bakımında ve takım ömrü bakımından önemlidir. Bu çalışmanın son bölümünde yığılma kenar oluşumu sıcaklık dağılımına bağlı olarak ve kesme parametrelerindeki kapsayacak şekilde incelenmeye çalışılmıştır. İlerleme ve talaş derinliği sabit tutularak kesme hızının 50 m/dak, 75 m/dak, 100 m/dak, 125 m/dak ve 150 m/dak değerlerde sıcaklık değişimine bakılmıştır. Kesme hızı düştükçe talaş üzerinde oluşan sıcaklık dağılımının kesici takımdan daha geç uzaklaşacağı ve kesici takım ile etkileşime gireceği göz önüne alındığında yığılma kenar oluşumu olasılığının arttığı söylenebilir. Zira yığılma kenar oluşumu düşük kesme hızlarında meydana gelmektedir.

Ayrıca kesme hızı artışına bağlı olarak talaş üzerindeki mikro hasarların oluşmadığı ve kesme hızının artması ile talaş akışının kolaylaştığı görülmüştür. Bu durum ayrılma bölgesinin

modelleme yönteminin talaş kaldırma problemlerinde ne kadar kritik olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak bugün bir çok alanda karşımıza çıkan yapay zeka ve makine öğrenmesi ile tahmin, deneysel ve sayısal yöntemlere hala bir alternatif hale gelmemekle birlikte bu yöntemlere yardımcı olarak kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Öğrenme algoritmalarının tek başına kullanılması ve bu yöntemlere alternatif olabilmesi için çok sayıda deney ve hesaplama yapılması ve bu anlamda paylaşımına açık evrensel bir veri tabanına ihtiyaç olduğu açıktır.

Bu çalışmada elimizde olan veriler sadece AISI 1018 çeliğine ait deneysel verilerdir. Çalışmanın devamında yapılması yararlı olabilecek ve bu alana katkı sağlayabilecek çalışmalar aşağıda listelenmiştir.

- AISI 1018 malzemesine ek olarak farklı malzemelerin parametre tahminleri için deneysel çalışmalar yapılmalı ve bu çalışmada yapılan öğrenme verilerine eklenmelidir. Böylece sadece malzeme parametreleri girilerek kesme kuvveti ve sıcaklık tahminleri yapılabilir.
- Bu çalışmada kullanılan malzeme parametreleri koşullarda yapılan deneylerden alınmıştır. Çok sayıda deney yapılarak parametre sayısı arttırılmalı ve tersinir şekilde kesme kuvvetlerine karşılık gelen malzeme parametreleri tayin edilerek malzemelerin talaş kaldırma işlemleri için doğru cevabı vermesi sağlanmalıdır. Yani malzeme parametrelerinin talaşlı imalata uygun kalibrasyonu yapılmalıdır.
- Bu çalışmada sadece Johnson Cook malzeme modelinin plastik parametreleri dikkate alınmıştır. Farklı malzemeler ile testler yapılması, bu malzemelere ait parametreler ve karşılık gelen kuvvet değerlerinin öğrenme algoritmalarına öğretilmesi farklı malzemelere ait kuvvet değerlerinin deneysel sonuçlara gerek kalmadan tahminine olanak sağlayacaktır. Kalman filtreleri ve öğrenme algoritmalarının hibrid olarak

kullanılması sonucunda talaşlı imalatta kullanılan Johnson Cook malzeme parametreleri kalibre edilebilecektir.



## KAYNAKLAR

Abladey, L., & Braimah, A. (2014). Near-field explosion effects on the behaviour of reinforced concrete columns: A numerical investigation. *International Journal of Protective Structures*, 5(4), 475-499.  
<https://doi.org/10.1260/2041-4196.5.4.475>

Abukhshim, N., Mativenga, P., & Sheikh, M. (2005). Investigation of heat partition in high speed turning of high strength alloy steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(15), 1687-1695.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.008>

Adeyinka, A. M., & Olaleke, M. O. (2020). Predictive Model for Thermal Response During Dry Machining of Al 6082-T6 using Fem. *Article in International Journal of Engineering and Technical Research*, 9(6).

Agmell, M., Ahadi, A., & Ståhl, J. (2013). The link between plasticity parameters and process parameters in ortogonal cutting. *Procedia CIRP*, 8, 224-229.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.093>

Akay, E. Ç. (2018). Ekonometride yeni bir ufuk: Büyük veri ve makine öğrenmesi. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 7(2), 41-53.

Akbar, F., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2008). An evaluation of heat partition in the high-speed turning of AISI/SAE 4140 steel with uncoated and tin-coated tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(7), 759-771.  
<https://doi.org/10.1243/09544054jem1072>

Akram, S., Jaffery, S. H., Khan, M., Fahad, M., Mubashar, A., & Ali, L. (2018). Numerical and experimental investigation of Johnson–cook material models for aluminum (Al 6061-T6) alloy using orthogonal machining approach. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(9), 168781401879779.  
<https://doi.org/10.1177/1687814018797794>

Alajmi, M. S., & Almeshal, A. M. (2021). Modeling of cutting force in the turning of AISI 4340 using gaussian process regression algorithm. *Applied Sciences*, 11(9), 4055.  
<https://doi.org/10.3390/app11094055>

Altintas, Y., & Ber, A. A. (2001). Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Appl. Mech. Rev.*, 54(5), B84-B84.

Altıparmak, S. C. (2018). Analysis of Thermal Expansion and Micro-Delamination Phenomenon of Cutting Tool Thin Surface Coatings in High-Speed Dry Machining. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 189-211.

Atkins, A. (2003). Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: Quantitative explanations for some longstanding problems. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(2), 373-396.  
[https://doi.org/10.1016/s0020-7403\(03\)00040-7](https://doi.org/10.1016/s0020-7403(03)00040-7)

Boy, M. (2004). *Kesme parametrelerine bağlı olarak talaş arka yüzey sıcaklığının deneysel olarak incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi].  
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=I0GY3ivUesaWRIGcv6aC1A&no=LSV8blthLJrWUJik1697Qg>

Buchely, M. F., Wang, X., Van Aken, D. C., O'Malley, R. J., Lekakh, S., & Chandrashekhara, K. (2019). The use of genetic algorithms to calibrate Johnson-cook strength and failure parameters of AISI/SAE 1018 steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 141(2).  
<https://doi.org/10.1115/1.4042382>

Burges, C. J. (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data mining and knowledge discovery*, 2(2), 121-167.

Carroll, J. T., & Strenkowski, J. S. (1988). Finite element models of ortogonal cutting with application to single point diamond turning. *International Journal of Mechanical Sciences*, 30(12), 899-920.  
[https://doi.org/10.1016/0020-7403\(88\)90073-2](https://doi.org/10.1016/0020-7403(88)90073-2)

Chen, Z. G., & Black, J. T. (1994). FEM modeling in metal cutting. *Manufacturing Review*, 7(2), 120-133.

Chen, J., Li, G., Xiao, B., Wen, Z., Lv, M., Chen, C., Jiang, Y., Wang, X., & Wu, S. (2015). Assessing the transferability of support vector machine model for estimation of global solar radiation from air temperature. *Energy Conversion and Management*, 89, 318-329.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.004>

Cocquilhat, M. (1851). Experiences sur la Resistance Utile Produites dans le Forage. *Annales des Travaux Publics en Belgique*, 10, 199-215.

Drucker, H., Burges, C. J., Kaufman, L., Smola, A., & Vapnik, V. (1996). Support vector regression machines. *Advances in neural information processing systems*, 9.

- Duan, C., Cai, Y., Li, Y., & Wang, M. (2009). Finite element simulation of cutting temperature Field during high speed machining hardened steel based on ABAQUS. 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. <https://doi.org/10.1109/icit.2009.549>
- Ernst, H., & Merchant, M. E. (1941). Chip Formation, Friction and Finish, Surface Treatment of Metals. *Transactions of American Society for Metals*, 29, 299-378.
- Ernst H., Merchant ME. (1941). Chip formation, friction and high quality machined surfaces, Surface treatment of metals. *Transactions of American Society for Metals*, 29, 299-378.
- Fahad, M. (2012). *A heat partition investigation of multilayer coated carbide tools for high speed machining through experimental studies and finite element modelling* [Doctoral dissertation, The University of Manchester]. <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:159006&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>
- Fahad, M., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2011). An investigation of multilayer coated (TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-tin) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique. *Journal of Engineering Manufacture*, 225(10), 1835-1850. <https://doi.org/10.1177/0954405411404504>
- Filice, L., Micari, F., Rizzuti, S., & Umbrello, D. (2007). A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3-4), 709-714. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.007>
- Gordon, M. (1967). The applicability of the binomial law to the process of friction in the cutting of metals. *Wear*, 10(4), 274-290. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(67\)90092-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(67)90092-0)
- Grissa, R., Zemzemi, F., & Fathallah, R. (2018). Three approaches for modeling residual stresses induced by orthogonal cutting of AISI316L. *International Journal of Mechanical Sciences*, 135, 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.029>
- Guo, Y., Li, X., Bai, G., & Ma, J. (2012). Time series prediction method based on LS-SVR with modified gaussian RBF. *Neural Information Processing*, 9-17. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34481-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34481-7_2)
- Hernández-González, L. W., Curra-Sosa, D. A., Pérez-Rodríguez, R., & Zambrano-Robledo, P. D. (2021). Modeling Cutting Forces in High-Speed Turning using Artificial Neural Networks. *Tecnológicas*, 24(51), 43-61 .

- Hillerborg, A. (1978). A model for fracture analysis. *Division of Building Materials*, 3005(1), 1-8.
- Hoppe, S. (2004). *Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting*. [Doctoral dissertation, Aachen, Techn. Hochsch].  
<https://core.ac.uk/download/pdf/36429213.pdf>
- Iwata, K., Osakada, K., & Terasaka, Y. (1984). Process modeling of orthogonal cutting by the rigid-plastic finite element method. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(2), 132-138.  
<https://doi.org/10.1115/1.3225687>
- Kiliçaslan, C. (2009). *Modelling and simulation of metal cutting by finite element method* [Master's thesis, İzmir Institute of Technology]. IYTE GCRIS Database.  
<http://hdl.handle.net/11147/4026>
- KLAMECKI, B. E. (1973). *Incipient Chip Formation In Metal Cutting--a Three-dimension Finite-element Analysis* [Doctoral dissertation, University of Illinois]. Available from ProQuest Dissertations & Theses Global.  
<https://www.proquest.com/dissertations-theses/incipient-chip-formation-metal-cutting-three/docview/302651127/se-2>
- Knittel, D., Makich, H., & Nouari, M. (2019). Milling diagnosis using artificial intelligence approaches. *Mechanics & Industry*, 20(8), 809.  
<https://doi.org/10.1051/meca/2020053>
- Kolsky, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 62(11), 676-700.  
<https://doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>
- Kudo, H. (1965). Some new slip-line solutions for two-dimensional steady-state machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 7(1), 43-55.  
[https://doi.org/10.1016/0020-7403\(65\)90084-6](https://doi.org/10.1016/0020-7403(65)90084-6)
- Lee, E. H., & Shaffer, B. W. (1951). The theory of plasticity applied to a problem of machining. *Journal of Applied Mechanics*, 18(4), 405-413.  
<https://doi.org/10.1115/1.4010357>
- Lee, J., & Kwak, J. B. (2022). Measurement of shear strengths of CU films using precise chip forming. *Materials*, 15(3), 948.  
<https://doi.org/10.3390/ma15030948>
- LIN, Z., & LIN, S. (1992). A coupled finite element model of thermo-elastic-plastic large deformation for orthogonal cutting. *Journal of engineering materials and technology*, 114(2), 218-226.

Merchant, M. E. (1945). Mechanics of the metal cutting process. II. Plasticity conditions in ortogonal cutting. *Journal of Applied Physics*, 16(6), 318-324. <https://doi.org/10.1063/1.1707596>

Miller, L. (2020). *A Thermal-Mechanical Finite Element Analysis of Ortogonal Cutting for Normalized Steels*. [ Master's thesis, University of Connecticut]. <https://core.ac.uk/download/pdf/327018341.pdf>.

Molinari, A., Cheriguene, R., & Miguelez, H. (2011). Numerical and analytical modeling of ortogonal cutting: The link between local variables and global contact characteristics. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(3), 183-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.12.007>

Moriwaki, T., Sugimura, N., & Luan, S. (1993). Combined stress, material flow and heat analysis of ortogonal Micromachining of copper. *CIRP Annals*, 42(1), 75-78. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62395-6](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62395-6)

Nasr, M. N., & Ammar, M. M. (2017). An evaluation of different damage models when simulating the cutting process using FEM. *Procedia CIRP*, 58, 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.202>

Okushima, K., & Hitomi, K. (1961). An analysis of the mechanism of ortogonal cutting and its application to discontinuous chip formation. *Journal of Engineering for Industry*, 83(4), 545-555. <https://doi.org/10.1115/1.3664594>

Oxley, P. L. (1989). *The mechanics of machining: An analytical approach to assessing Machinability*. Ellis Horwood.

Oxley, P. L. B., & Welsh, M. J. M. (1964). Calculating the shear angle in ortogonal metal cutting from fundamental stress-strain-strain rate properties of the work material. [Conference Presentation] 4th International Machine Tool Design and Research Conference.

Özel, T. (2006). The influence of friction models on finite element simulations of machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(5), 518-530. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.001>

Özlü, B. (2021). Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleiþner cold work tool steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1241-1251.

Piispanen, V. (1937). Lastunmuodostumisen teoriaa. *Teknillinen aikakauslehti*, 27(9), 315-322.

- Peng, B., Bergs, T., Schraknepper, D., Klocke, F., & Döbbeler, B. (2019). A hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear. *Procedia CIRP*, 82, 302-307.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.031>
- Raczy, A., Altenhof, W. J., & Alpas, A. T. (2004). An Eulerian finite element model of the metal cutting process. In *Proceedings of the 8th International LS-DYNA Users Conference*, 11, 9-26.
- Rex, B. (2013). *Finite element simulation of two dimensional ortogonal cutting process and comparison with experiments* [Masters's thesis, RWTH Aachen University].  
<https://www.ifam.rwth-aachen.de/cms/IFAM/Studium/Studien-und-Abschlussarbeiten/~rtvdb/2013/lidx/1/>
- Shah, S. (2019). *Physics Based Process Modeling of Serrated Chip Formation in Precision Machining of Ductile Alloys* [Doctoral dissertation, Rutgers University].  
<https://doi.org/doi:10.7282/t3-gexh-qg87>
- Shaw, M. C. (1984). *Metal cutting principles*. Clarendon Press, Oxford.
- Shaw, M. C., & Cookson, J. O. (2005). *Metal cutting principles* (Vol. 2, p. 98). New York: Oxford university press.
- Shirakashi, T., & Usui, E. (1974). Simulation analysis of ortogonal metal cutting mechanism. In *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*, 535-540
- Sivaraman, V., Sankaran, S., & Vijayaraghavan, L. (2012). The effect of cutting parameters on cutting force during turning multiphase Microalloyed steel. *Procedia CIRP*, 4, 157-160.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.10.028>
- Smith, M. (2009). ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.14.  
<http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm> adresinden 2 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- Soliman, H. A., Shash, A. Y., El-Hossainy, T. M., & Abd-Rabou, M. (2020). Cutting forces and crater wear prediction in ortogonal cutting using two approaches of finite element modeling. *Engineering Reports*, 2(10).  
<https://doi.org/10.1002/eng2.12240>
- Soliman, H., Shash, A., El Hossainy, T., & Abd-Rabou, M. (2020). Investigation of process parameters in ortogonal cutting using finite element approaches. *Heliyon*, 6(11), e05498.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05498>
- Strenkowski, J. S., & Carroll, J. T. (1985). A finite element model of ortogonal metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, 107(4), 349-354. <https://doi.org/10.1115/1.3186008>

- Takeuchi, Y., Sakamoto, M., & Sata, T. (1982). Improvement in the working accuracy of an NC lathe by compensating for thermal expansion. *Precision Engineering*, 4(1), 19-24. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(82\)90109-x](https://doi.org/10.1016/0141-6359(82)90109-x)
- Tay, A. O., Stevenson, M. G., & De Vahl Davis, G. (1974). Using the finite element method to determine temperature distributions in orthogonal machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 188(1), 627-638. [https://doi.org/10.1243/pime\\_proc\\_1974\\_188\\_074\\_02](https://doi.org/10.1243/pime_proc_1974_188_074_02)
- Thean, W. K. (1998). *Finite element analysis of chip formation in grooved tool metal cutting*. [Master's Thesis, Iowa State University]. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/70460>
- Thekdi, P. N. (2019). *Finite Element Studies of Orthogonal Machining of Aisi 1045 Steel*. [Doctoral dissertation, The University of North Carolina]. Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2301477840). <https://www.proquest.com/dissertations-theses/finite-element-studies-ortogonal-machining-aisi/docview/2301477840/se-2>
- Trent, E. M. (1988). Metal cutting and the tribology of seizure: I seizure in metal cutting. *Wear*, 128(1), 29-45.
- Tresca, H. (1873). Mémoires sur le Rabotage des Metaux. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*, 15(1873), 585–685.
- Uhlmann, E., Henze, S., & Brömmelhoff, K. (2015). Influence of the built-up edge on the stress state in the chip formation zone during orthogonal cutting of AISI1045. *Procedia CIRP*, 31, 310-315. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.101>
- Umer, U., Butt, S. I., Askari, S. J., Danish, S. N., & Lijing, X. (2008). Comparative analyses for different modeling methods in high speed turning operations for hardened steel. *Strojniški vestnik*, 54(12).
- Usui, E., Maekawa, K. and Shirakashi, T. (1981). Simulation analysis of built-up edge formation in machining of low carbon steel. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 15, 237-242.
- Usui, E., & Shirakashi, T. (1982). Mechanics of machining—from descriptive to predictive theory, on the art of cutting metals-75 years later. *ASME PED* 7(1), 13-55.
- Wedberg, D. (2013). *Modelling of high strain rate plasticity and metal cutting* [Doctoral dissertation, Lules University of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999147/FULLTEXT02>

- Wright, P. K., McCormick, S. P., & Miller, T. R. (1980). Effect of rake face design on cutting tool temperature distributions. *Journal of Engineering for Industry*, 102(2), 123-128. <https://doi.org/10.1115/1.3183843>
- Xie, L., Schmidt, J., Schmidt, C., & Biesinger, F. (2005). 2D FEM estimate of tool wear in turning operation. *Wear*, 258(10), 1479-1490. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.004>
- Vijay, S. S., & Borkar, B. R. (2016). Estimation of Tool Wear Rate in Orthogonal Cutting Using Experimental and Statistical Approach. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET*, 2(3), 673-679.
- Yang, C., Jiang, H., & Liu, B. (2020). Optimization design of cutting parameters based on the support vector machine and particle swarm algorithm. *OALib*, 7(9), 1-8. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106788>
- Zorev, N. N. (1963). Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. *International research in production engineering*, 49, 143-152.
- Zvorykin, K. A. (1896). On the force and energy needed to separate the chip from the workpiece. *Tekhnicheskii Sbornik i Vestnic Promyslinosty*, 123(57-96), 117.