

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**SONLU ELEMENLAR ANALİZİ İLE HADDELEME
PARAMETRELERİNİN ENİYİLENMESİ**

Cemal ESEN

**Danışman
Doç. Dr. Kadir GÖK**



MANİSA-2019

**Cenal
ESEN**

**SONLU ELEMANTLAR ANALİZİ İLE HADDELEME
PARAMETRELERİNİN ENİYİLENMESİ**

2019

TEZ ONAYI

Cemal ESEN tarafından hazırlanan "**SONLU ELEMENLAR ANALİZİ İLE HADDELEME PARAMETRELERİNİN ENİYİLENMESİ**" adlı tez çalışması 30/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa Aydın
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

.....

Danışman

Doç. Dr. Kadir GÖK
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Arif GÖK
Amasya Üniversitesi

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Cemal ESEN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. HADDELEME	4
2.1. Soğuk Haddeleme	9
2.2. Sıcak Haddeleme.....	11
3. HADDELEMENİN MEKANİĞİ.....	14
3.1. Geri Çekme – İleri İtme Kuvveti.....	32
3.2. Merdanelerin Yassılaşması	33
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	36
4.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi	36
4.2. Sonlu Elemanlar Metodu.....	38
4.2.1.Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması	42
4.2.2.Sonlu Elemanlar Yönteminde Eleman Tipleri	44
4.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanım Alanları.....	47
4.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	50
4.5. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Mukavemet Hipotezleri	51
4.5.1.Maksimum Kayma Gerilmesi Teorisi (Tresca).....	52
4.5.2.Maksimum Distorsiyon Enerjisi Teorisi (Von Mises)	53
4.5.3.Maksimum Asal Gerilme Teorisi.....	54
4.5.4.Coulomb Mohr Kırılma Kriteri.....	55
4.6. Sonlu Elemanlar Paket Programları	56
5. PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞİMİ VE KRİSTAL YAPI.....	57
5.1. Plastik Şekil Değişimi	57
5.2. Metallerin Kristal Yapısı	58
5.2.1.Hacim Merkezli Kübik Yapı (HMK).....	60
5.2.2.Yüzey Merkezli Kübik Yapı (YMK)	62
5.2.3.Sıkı Düzen Hegzagonal Yapı (SDH)	63
5.3. Plastik Şekil Vermenin Kristal Yapıdaki Mekanizmaları	64

6. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	67
6.1. Malzemeler.....	68
6.1.1.AI2024.....	68
6.1.1.1.AI2024 Alaşımının Kristal Yapısı.....	71
6.1.2.MgAZ31	72
6.1.2.1.MgAZ31 Alaşımının Kristal Yapısı.....	74
6.1.3.Ti-6Al-4V	75
6.1.3.1.Ti-6Al-4V Alaşımının Kristal Yapısı	78
6.2. Metot	80
6.2.1.Haddeleme Sistemlerinin Modellenmesi	80
6.2.2.Sonlu Elemanlar Sisteminin Modellenmesi	85
7. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI	91
7.1. Sürtünme Katsayılarına Göre Sayısal Analiz Sonuçları	92
7.1.1.Sürtünme Katsayısına Göre Gerilme Dağılımları	98
7.2. Malzemelerin Türüne Göre Sayısal Analiz Sonuçları.....	104
7.2.1.Malzeme Türüne Göre Gerilme Dağılımları	106
7.3. Merdane Çaplarına Göre Sayısal Analiz Sonuçları.....	108
7.3.1.Merdane Çaplarına Göre Oluşan Gerilme Dağılımları	112
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	119
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	124

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

V_m	Merdane Hızı
V	İş Parçasının Hızı
R	Merdane Çapı
L	Temas Yayı Uzunluğu
b	İş Parçasının Genişliği
Δh	Kalınlık Değişimi
e_h	İş Parçasının Birim Şekil Değişimi
G.B	Giriş Bölgesi
N	Nört Düzlem
Ç.B	Çıkış Bölgesi
F_s	Sürtünme Katsayısı
P	Haddeleme Kuvveti
M	Moment
ω	Açısal Hız
kW	Kilowatt
BG	Beygir Gücü
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
HMK	Hacim Merkezli Kübik
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
SDH	Sıkı Düzen Hegzagonal
ADF	Atomsal Doluluk Faktörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Haddeleme işleminin şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. Blum, kütük ve slabın üretim aşamaları [3].....	5
Şekil 2.3. Slab, kütük ve blum dan haddeleme ile üretilen ürünler [3].....	6
Şekil 2.4. Haddeleme süresince iş parçası kalınlığının değişimi	7
Şekil 2.5. Profil haddeleme işleminde işlem basamakları.....	8
Şekil 2.6. Soğuk haddeleme işleminde içyapının değişimi [2]	10
Şekil 2.8. a) Slab b) Blum c) Kütük	12
Şekil 2.7. a) E Profil b) Köşebent c) T Profil d) I Profil e) Yuvarlak f) Yassı g) Çokgen h) Kare ı) U Profil j) H Profil.....	12
Şekil 2.9. Sıcak haddeleme işleminde iç yapının değişimi [7]	13
Şekil 3.1. Haddeleme işleminde geometrik unsurlar	14
Şekil 3.2. Yassı ürünlerin haddeleme işlemi ve bağıntılar [3]	15
Şekil 3.3. Haddeleme sırasındaki kuvvetlerin açılımı [7].....	16
Şekil 3.4. Haddeleme sırasında oluşan bölgeler.....	17
Şekil 3.5. Haddeleme sırasında iş parçasının hızı	18
Şekil 3.6. Haddeleme sırasında iş parçasındaki hız değişimi.....	19
Şekil 3.7. Merdane ve iş parçasının temas uzunluğu	20
Şekil 3.8. Haddeleme sırasında oluşan kuvvetlerin bileşenleri.....	23
Şekil 3.9. Fs'nin şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.10. Haddeleme sırasında oluşan gerilmeler ve bağıntılar	27
Şekil 3.11. Haddeleme sırasında itme kuvveti ve yönü	32
Şekil 3.12. Merdane yassılaşması ve bağıntılar [11].....	33
Şekil 4.1. Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yöntemi ile gösterimi	36
Şekil 4.2. Eğrilerin küçük çizgilere bölünmesi [18]	39
Şekil 4.3. Daireyi elemanlara bölmek [18]	40
Şekil 4.4. Nümerik çözümleme mantığının şematik gösterimi [19]	41
Şekil 4.5. Sonlu elemanlar yönteminde alt montaj mantığı [19]	42
Şekil 4.6. Sonlu elemanlar işlem basamakları [19].....	43
Şekil 4.7. Problemin küçük parçalara bölünmesi ve ağ yapısı [19]	44
Şekil 4.8. Eleman ve düğüm noktası [19]	45
Şekil 4.9. Eleman tipleri, a) 1 boyutlu çizgisel eleman, b) 2 boyutlu düzlem eleman, c) 3 boyutlu katı eleman [19]	45
Şekil 4.10. Sonlu elemanlar yönteminin bazı kullanım alanları [19].....	49
Şekil 4.11. Tresca teorisinin şematik gösterimi [18].....	52
Şekil 4.12. Von Mises teorisinin şematik gösterimi [7].....	53
Şekil 4.13. Maksimum asal gerilmelerin şematik gösterimi [7]	54
Şekil 4.14. Coulomb Mohr kırılma kriterinin şematik gösterimi [18]	55
Şekil 5.1 Üç temel gerilme şekli [3]	57
Şekil 5.2. Birim hücrenin şematik gösterimi.....	59
Şekil 5.3. Kristal yapının şematik gösterimi	59
Şekil 5.4. Metallerde en çok rastlanan birim hücre modelleri a) Hacim merkezli kübik b) yüzey merkezli kübik c) Sıkı düzen hegzagonal	59
Şekil 5.5. HMK yapısı	60
Şekil 5.6. Kübik birim hücrede bazı kayma düzlemleri.....	61
Şekil 5.7. YMK Yapı	62
Şekil 5.8. SDH Yapı.....	63

Şekil 5.9. Kayma mekanizması şematik gösterimi	64
Şekil 5.10. İkizlenme mekanizması şematik gösterimi.....	65
Şekil 6.1. Al2024 alaşımının Mikroyapı Görünümü [21].....	70
Şekil 6.2. Al2024 Alaşımının SEM Görünümü [21]	70
Şekil 6.3. YMK kristal yapısı	71
Şekil 6.4. MgAZ31 alaşımının mikroyapı görünümü [23]	74
Şekil 6.5. MgAZ31 alaşımının SEM görünümü [23].....	74
Şekil 6.6. SDH kristal yapısı.....	75
Şekil 6.7. Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı görünümü [24]	77
Şekil 6.8. Ti-6Al-4V alaşımının SEM görünümü [24]	78
Şekil 6.9. SDH kristal yapısı.....	78
Şekil 6.10. Haddeleme sisteminin elemanları	80
Şekil 6.11. Solidworks programında 3 boyutlu tasarım süreci	81
Şekil 6.12. Üç farklı çaptaki merdanelerin 3D modelleri	82
Şekil 6.13. İş parçasının 3D modeli	82
Şekil 6.14. İtici parçanın 3D modeli	83
Şekil 6.15. Haddeleme sistemi elemanlarının montaj sayfasına getirilmesi ve merdanenin kopyalanması.....	84
Şekil 6.16. 610mm çapındaki haddeleme sisteminin montajı.....	84
Şekil 6.17. Simufact Forming programının kullanıcı ara yüzü ve modülleri	86
Şekil 6.18. Kullanılan Rolling modülünün parametreleri	86
Şekil 6.19. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan mesh parametreleri.....	88
Şekil 6.20. Haddeleme sisteminin sonlu elemanlar modeli	90
Şekil 7.1. Al2024 için farklı sürtünme katsayılarında Z Kuvveti – Zaman grafiği ...	92
Şekil 7.2. Al2024 için 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği.....	93
Şekil 7.3. 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği detayı.....	93
Şekil 7.4. MgAZ31 için farklı sürtünme katsayılarında Z Kuvveti – Zaman grafiği. 94	
Şekil 7.5. MgAZ31 için 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği.....	95
Şekil 7.6. 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği detayı.....	95
Şekil 7.7. Ti-6Al-4V için sürtünme katsayısının Z Kuvveti – Zaman grafiği	96
Şekil 7.8. Ti-6Al-4V için 0.2 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği.....	97
Şekil 7.9. 0.2 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği detayı.....	97
Şekil 7.10. Al2024, μ 0.2 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı	98
Şekil 7.11. Al2024, μ 0.3 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı	99
Şekil 7.12. Al2024, μ 0.4 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı	99
Şekil 7.13. MgAZ31, μ 0.2 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı....	100
Şekil 7.14. MgAZ31, μ 0.3 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı....	101
Şekil 7.15. MgAZ31, μ 0.4 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı....	101
Şekil 7.16. Ti-6Al-4V, μ 0.2 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı .	102
Şekil 7.17. Ti-6Al-4V, μ 0.3 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı .	103
Şekil 7.18. Ti-6Al-4V, μ 0.4 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı .	103
Şekil 7.19. Malzeme türlerine göre Z Kuvveti – Zaman grafiği.....	105
Şekil 7.20. A2024, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı .	106
Şekil 7.21. MgAZ31, μ 0.3 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı....	107
Şekil 7.22. Ti-6Al-4V, μ 0.3 için parça üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı .	107
Şekil 7.23. Al2024 malzemesi için çap değişiminin Z Kuvvetine etkisi	109
Şekil 7.24. MgAZ31 malzemesi için çap değişiminin Z Kuvvetine etkisi	109
Şekil 7.25 Ti-6Al-4V malzemesi için çap değişiminin Z Kuvvetine etkisi	110
Şekil 7.26. Z kuvvetinin geometrik bağıntısı ve oluşan kuvvetler.....	110
Şekil 7.27. Merdane çapının artışı ve açısı değeri	111

Şekil 7.28. 710mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	113
Şekil 7.29. 610mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	113
Şekil 7.30. 810mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	114
Şekil 7.31. 610mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	115
Şekil 7.32. 710mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	115
Şekil 7.33. 810mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	116
Şekil 7.34. 610mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	117
Şekil 7.35. 710mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	117
Şekil 7.36. 810mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı	118



TABLO DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Fiziksel parçalar ve bunların meshlenmesinde kullanılan elementler	46
Tablo 5.1. HMK yapı için kayma doğrultusu, düzlemi ve sistemi	61
Tablo 5.2. YMK yapı için kayma doğrultusu, düzlemi ve sistemi	62
Tablo 5.3. SDH yapı için kayma doğrultusu, düzlemi ve sistemi.....	63
Tablo 5.4. Kristal yapılardaki kayma sistemleri [21].....	66
Tablo 5.5. Bazı metallerin kristal yapıları ve kritik kayma gerilmeleri [21]	66
Tablo 6.1. Çalışmada incelenen malzemelerin kristal yapıları	67
Tablo 6.2. Çalışmada incelenen merdane çapları.....	67
Tablo 6.3. Çalışmada incelenen merdane çapları.....	68
Tablo 6.4 Al2024 alaşımının kimyasal bileşenleri.....	69
Tablo 6.5. Al2024'ün kristal yapı özellikleri	71
Tablo 6.6. Mg, Al ve Fe'nin yoğunlukları	72
Tablo 6.7. MgAZ31 alaşımının kimyasal yapısı	73
Tablo 6.8. MgAZ31'in kristal yapı özellikleri	75
Tablo 6.9. Titanyumun ve diğer elementlerin yoğunlukları	76
Tablo 6.10. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal yapısı.....	77
Tablo 6.11. Ti-6Al-4V kristal yapı özellikleri	79
Tablo 6.12. Al, Mg ve Ti kritik kayma gerilmeleri [21]	79
Tablo 6.13. Sonlu elemanlar analizleri ve parametreleri	89
Tablo 7.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen haddeleme parametreleri	91
Tablo 7.2. Analizlerde kullanılan malzemeler ve kristal yapıları	104
Tablo 7.3. İncelenen merdane çapları	108

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Kadir Gök'e, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Cemal ESEN
Manisa, 2019



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE HADDELEME PARAMETRELERİNİN ENİYİLENMESİ

Cemal ESEN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kadir GÖK

Haddeleme, kendi eksenleri etrafında birbirine zıt yönde dönen silindirler arasından iş parçasının geçirilerek yeniden şekillendirilmesi veya boyutlandırılmasıdır. Haddeleme kütleli plastik şekil verme yöntemlerinden birisidir ve dünya üzerinde çelik üretiminin büyük bir kısmı haddeleme ile gerçekleştirilmektedir. Haddeleme işlemi süresince, işlem ve son ürün kalitesini etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerin denenmesi için prototip imalat yapılması çok ciddi yatırımlar gerektirmektedir. Bundan dolayı, üretim aşmasına geçmeden önce, parametre sonuçlarının ön görülmesi maliyet açısından ciddi önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, haddelemeyi etkileyen bazı parametreler sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip analiz edilmiş ve optimum parametrelerin bulunması amaçlanmıştır. Bu parametreler, iş parçasının malzeme türü, haddeleme sırasında büyük önem taşıyan sürtünme katsayısı ve merdane çapıdır. Her bir durum göz önüne alınarak, toplam doksan adet sonlu eleman modeli kurulup analiz edilmiştir. Üç farklı malzeme türü, her bir model için on farklı sürtünme katsayısı ve üç farklı merdane çapı incelenip bu parametrelerin haddeleme sürecini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: haddeleme, sonlu elemanlar analizi, kristal yapı, sürtünme katsayısı, merdane çapı

2019, 124 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

OPTIMIZATION OF ROLLING PARAMETERS BY FINITE ELEMENT ANALYSIS

Cemal ESEN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir GÖK

Rolling is the shaping or dimensioning of the workpiece between the rollers rotating opposite each other around their axes. Rolling is one of the methods of forming mass plastic and most of the steel production in the world is carried out by rolling. During the rolling process, there are many parameters that affect the process and end product quality. To test these parameters, making prototype manufacturing requires very serious investments. Therefore, it is important that the parameter results be previewed before the production exceeds the cost.

In this thesis study, some parameters affecting rolling were modeled and analysed using finite element method and the aim was to find optimum parameters. These parameters are material types of workpiece, friction coefficient and roller diameter. Considering each case, a total of ninety finite element model was established and analyzed. Three different material types, ten different friction coefficients for each model and three different roller diameters were investigated and how these parameters affect rolling process.

Keywords: rolling, finite element analysis, crystal structure, friction coefficient, roller diameter

2019, 124 pages

1. GİRİŞ

Haddeleme, iş parçasının kendi eksenleri etrafında birbirine zıt yönde dönen en az iki silindir arasından geçirilerek basma kuvvetinin etkisi ile yeniden boyutlandırılma veya şekillendirme işlemi olarak tanımlanabilir. Haddeleme işlemi, metallere plastik şekil verme yöntemlerinden birisidir ve günümüzde de plastik deformasyon ile üretilen ürünlerin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Plastik şekil verme işlemi, üretilen ürünlerin kütsel veya kimyasal bir değişikliğe yol açmadan şekillendirilmesi veya yoğunlaştırarak boyutunun değiştirilmesi olarak tanımlanabilir.

Haddeleme sırasında merdaneler, birbirine aynı hızla ve zıt yönde dönerler. İş parçası merdaneler arasından geçerken istenilen geometride şekillendirilir. Merdaneler arasındaki mesafe, iş parçasının giriş kalınlığından daha küçük olduğu için haddelenen iş parçasının kalınlığında bir miktar azalma, iş parçasının boyunda ise bir miktar uzama meydana gelir. Haddeleme işlemi temel olarak soğuk haddeleme ve sıcak haddeleme olmak üzere iki temel başlık altında toplanabilir. Haddeleme işlemi, iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleşiyor ise sıcak haddeleme, iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleşiyor ise soğuk haddeleme olarak adlandırılır. Sıcak haddeleme işleminde genellikle büyük deformasyonların olduğu şekillendirmeler yapılmaktadır. Temel amaç iş parçasını şekillendirmektir. Soğuk haddeleme de ise amaç, iş parçasını şekillendirmenin yanı sıra, iş parçasının işlem sırasında pekleşmesiyle yoğunlaştırarak mukavemet kazandırmak ve ürünün son şeklini vermektir. Soğuk haddeleme ile üretilen ürünlerin yüzey kaliteleri ve boyutsal tolerans değerleri daha yüksektir.

Haddeleme işlemi ile üretilen ürünlerden, yarı mamul olarak yassı (slab), kalın (bloom) ve ince (billet) kütükler, çeşitli profiller (kare, yuvarlak, köşebent, ray, I, U...gibi), çeşitli saclar (çelik, alüminyum veya metal alaşımları), çelik borular (dikişli ve dikişsiz) en önemli hadde ürünleridir. Ayrıca haddeleme işlemi ile üretilen bazı özel imalatlar da (dönel parçalar, vidalar, dişliler, rulmanlar, vagon tekerlekleri, bandajları,... v.b.) vardır. Bu ürünlerin haddelenmesinde farklı haddeleme sistemleri

kullanılmaktadır ve şekil olarak yassı ve profil haddeleme olarak ikiye ayrılır. Yassı haddeleme de iş parçasının kalınlığı düşürülerek şekillendirilirken, profil haddeleme de iş parçası köşebent, I profil gibi geometrik şekiller de üretilebilmektedir. Profil haddeleme tek işlemde gerçekleşmez, istenen geometrik şekle göre çeşitli haddeleme basamaklarından geçerek son ürüne ulaşılır.

Haddeleme işlemi sonrası son ürünün, istenilen kalitede üretilebilmesi için haddeleme parametrelerinin en iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Haddelenecek iş parçasına ve verilmek istenen geometrik şekle bağlı olarak sürtünme katsayısı, iş parçasının yapısı, merdanelerin çapları, haddeleme hızı, haddeleme sıcaklığı, gibi parametreler, haddeleme sırasında ürün kalitesini belirleyen en önemli faktörler arasındadır. Tüm bu parametreler genellikle daha önceki tecrübelerle göre tasarlanmaktadır. Fakat haddeleme sistemleri ciddi maliyet gerektiren sistemler olduğu için haddeleme sistemlerinin tasarımında yapılacak en küçük hata ciddi maliyet kaybına yol açmaktadır. Bu parametrelerin haddeleme sistemini nasıl etkilediğinin önceden bilinmesi veya tahmin edilebilmesi ciddi önem taşımaktadır, bu nedenle son yıllarda yaygınlaşan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile haddeleme sistemleri analiz edilerek bu sorunlar büyük oranda çözülmüştür.

SEY, karmaşık sınır şartlarına ve koşullara sahip mühendislik problemlerinin, küçük parçalar halinde bölünüp çözümlenerek, tüm çözümlerin toplanmasıyla genel çözüme ulaşan mühendislik çözüm yöntemidir. Bu yöntemde problemler bilinen daha basit problemlere ayrılarak çözümü matematiksel formüllere dönüştürülür ve bu basit problemlerin çözümü toplanarak tüm problemin çözümüne ulaşılır.

Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel formüllere dayandığından karmaşık problemlerde elle çözüm tekniği yeterli gelmemekteydi ve çok zaman almaktaydı. Bu yüzden bilgisayarlar bu çözümlerde kullanılmaktaydı. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte sonlu elemanlar yöntemi giderek yaygınlaşmıştır. Yöntem sayesinde problemler modellenip, istenen sınır şartları tanımlandığında bilgisayar ortamında problemlerin gerçek imalatı yapılmadan sistem hakkında bilgi sahibi

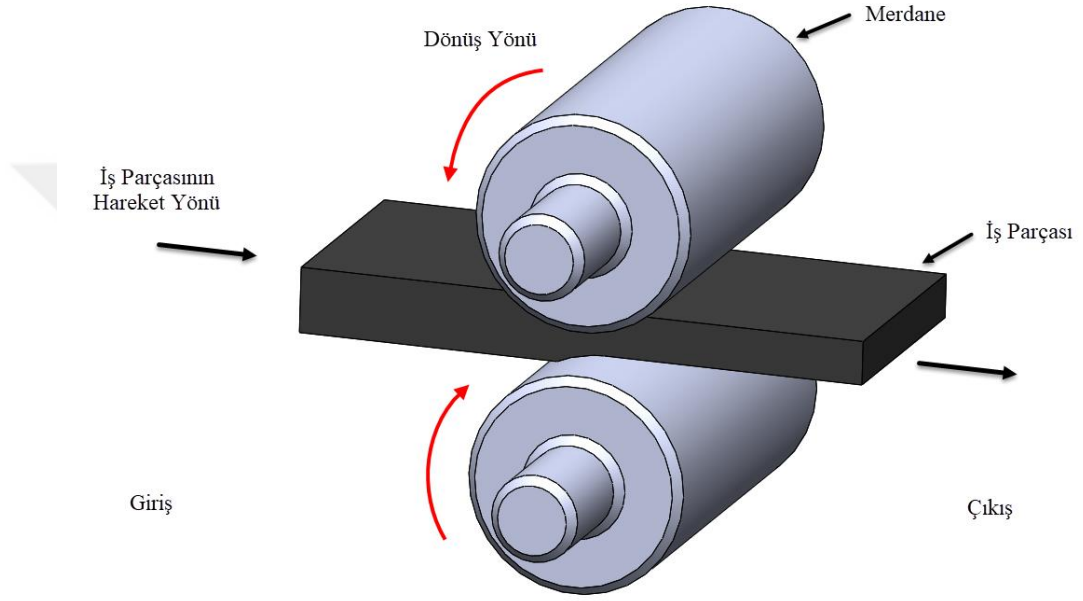
olunabilmektedir. Bu da haddeleme gibi ciddi yatırımlar gerektiren sistemler için ciddi avantaj sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar metodu gerçek problemleri küçük parçalara bölerek çözüme ulaştığı için bulunan sonuç kesin sonuç olmamakla birlikte yaklaşık bir sonuç vermektedir. Fakat problemin küçük parçalara bölünürken uygulanan adımların dikkatli uygulanması halinde gerçeğe çok yakın sonuçlara ulaşılmaktadır.

Bu çalışmada haddeleme sistemleri ve haddeleme mekaniği hakkında detaylı bilgi verilerek, sonlu elemanlar yöntemi ile haddelemede sürtünme katsayısı, malzeme türü ve sistemdeki merdane çapı parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesi amacıyla, sonlu elemanlar modelleri kurulup analiz edilerek optimum parametrelerin bulunması amaçlanmıştır.

2. HADDELEME

Kütlesel şekil verme yöntemlerinden biri olan haddeleme, iş parçasını birbirine zıt yönde dönen ve merdane olarak adlandırılan iki silindir arasından geçirilerek yeniden boyutlandırılması veya şekillendirilmesi olarak tanımlanan plastik (kalıcı) şekil verme işlemidir. Şekil 2.1’ de haddeleme işleminin şematik gösterimi verilmiştir.

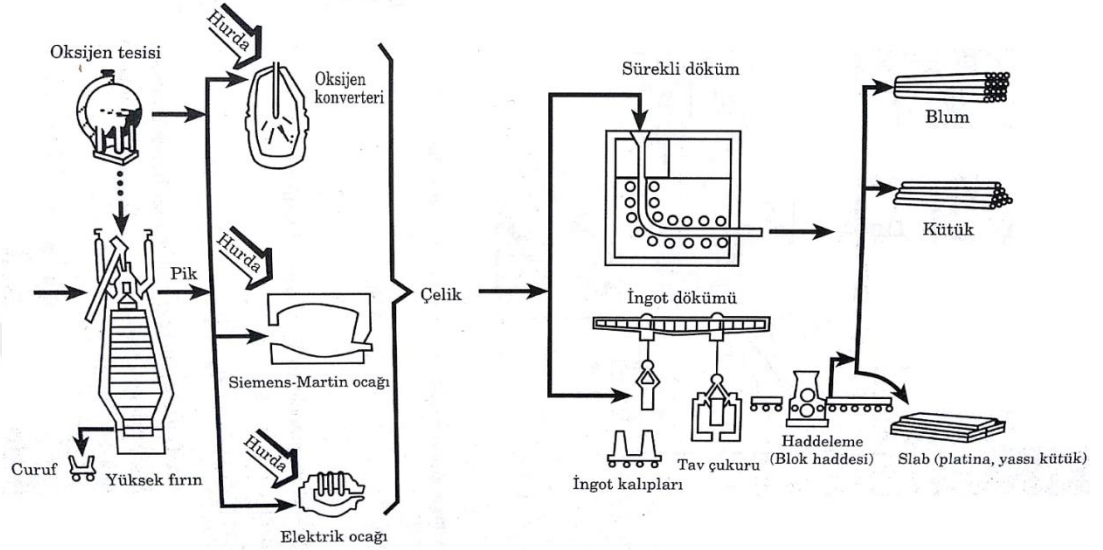


Şekil 2.1. Haddeleme işleminin şematik gösterimi

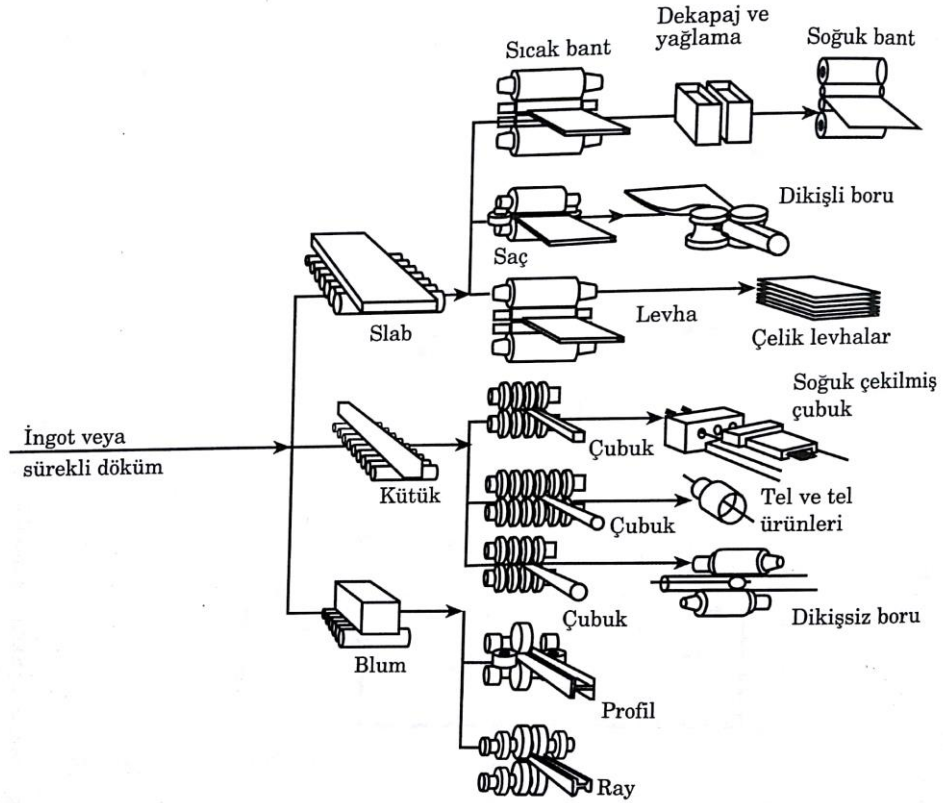
Haddeleme ile şekillendirme yöntemi, üretim hızı ve sürekliliği ile işlem sürecinin ve son ürünün kontrolünün kolay oluşu nedenleriyle en çok kullanılan plastik şekil verme yöntemlerinden birisidir. Plastik deformasyon ile şekillendirilen tüm malzemelerin, yaklaşık % 95’i haddeleme ile şekillendirilmektedir [1].

Çelik üretiminin neredeyse tamamına yaklaşan bir kısmı hadde ürünleri olarak üretilmektedir. Sıvı metalin dökme işlemi ile kalıplara doldurulup katılaşmaya bırakılmasıyla ingotlar, ingotların haddelenmesi ile yarı mamul olarak kalın, yassı ve ince kütükler (slab, blum ve kütükler) elde edilir (Şekil 2.2). Daha sonra slab, blum ve kütüklerin haddelenmesi ile çeşitli kesitlerde çelik profiller (kare, yuvarlak,

köşebent, ray, I, U), çeşitli sac lar (çelik, alüminyum ve metal alaşımları), çelik borular (dikişli ve dikişsiz) haddeleme işlemiyle üretilen başlıca ürünleridir (Şekil 2.3). Ayrıca haddeleme işlemi ile özel kesitli son ürünlerde (dönel parçalar, vidalar, dişliler, rulmanlar, vagon tekerlekleri, bandajları, sac profilleri) üretilebilmektedir [2-3].



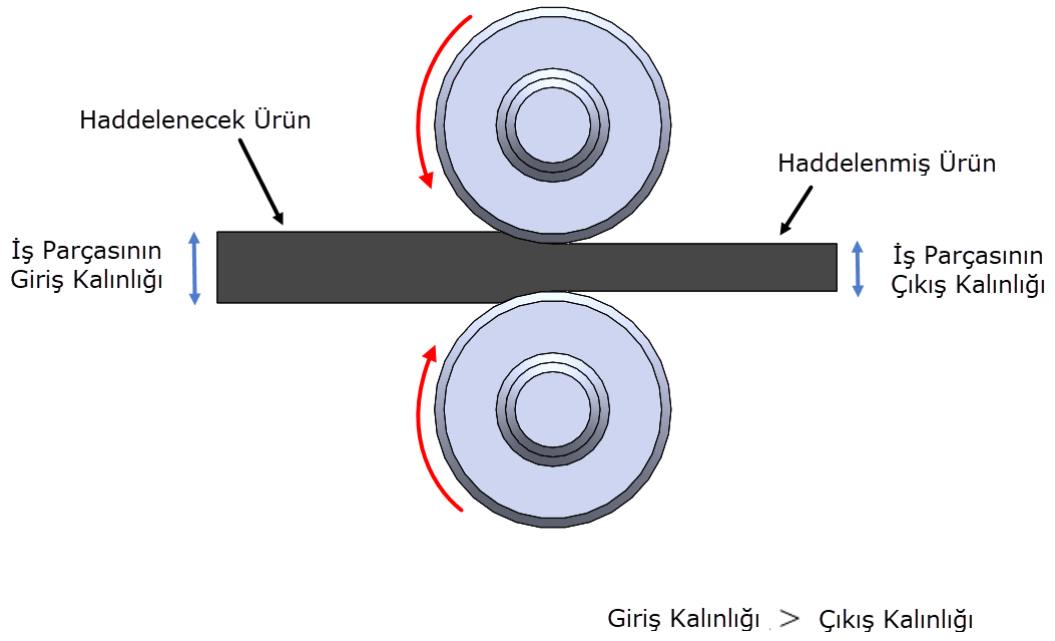
Şekil 2.2. Blum, kütük ve slabın üretim aşamaları [3]



Şekil 2.3. Slab, kütük ve blum dan haddeleme ile üretilen ürünler [3]

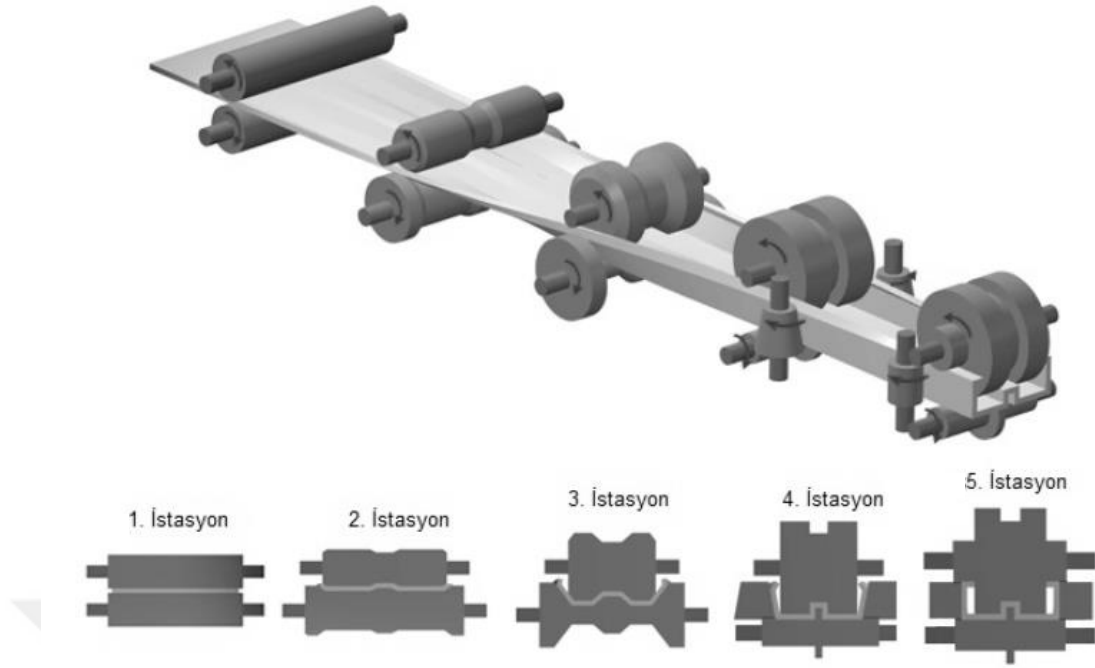
Son ürün olarak istenen ürüne göre merdanelerin yüzeyleri düz veya profilli olabilir. Slab, blum ve kütük gibi yassı ürünlerin haddelenmesinde silindirik yüzeyli düz merdaneler kullanılır. Farklı kesitlerdeki ürünleri elde etmek için ise üzerinde çeşitli oyuklar bulunan merdaneler kullanılmaktadır. Üzerinde farklı geometriler bulunan merdanelere aynı zamanda kalibreli merdaneler de denir. Kalibreli merdanelerde iş parçasının kalınlığını neredeyse değiştirmeden iş parçasına istenilen şeklin verilmesi de mümkün olabilir [6].

Haddeleme işlemi sırasında, aynı hızda ve birbirine zıt yönde dönen merdaneler arasındaki boşluktan, iş parçasının her bir geçişine ‘paso’ denir. Her bir paso da Şekil 2.4’te gösterildiği gibi iş parçasının giriş kalınlığı çıkış kalınlığından fazla olduğundan, iş parçasının kesitinde, merdaneler arasındaki boşluk kadar bir azalma meydana gelir.



Şekil 2.4. Haddeleme süresince iş parçası kalınlığının değişimi

Profil kesitlerinin haddelenmesi tek bir pasoda yapılamaz. Bu nedenle istenen geometrik şekle uygun olarak iş parçasında gerçekleşen deformasyonların belirli bölgelere yığılmadığı ve tüm kesite mümkün olduğunca eşit miktarda dağıtılması için uygun paso tasarımı yapılır. Tasarlanan farklı kesitteki merdaneler arka arkaya dizilerek iş parçasının son şekli verilene kadar haddeleme işlemi devam eder. Şekil 2.5'te özel kesitli bir profil haddeleme sırasında kullanılan merdane kesitleri ve haddeleme sistemi örneği verilmiştir [4].



Şekil 2.5. Profil haddeleme işleminde işlem basamakları

Haddeleme işleminde iş parçasının plastik deformasyonu, merdanelerin iş parçasını sıkıştırmasıyla oluşan radyal basma kuvvetleri ile iş parçası ve merdaneler arasındaki temas yüzeylerindeki sürtünmeden kaynaklanan yüzey kayma gerilmeleri sayesinde gerçekleşir. Merdaneler ve iş parçasının temas yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti aynı zamanda iş parçasının merdaneler tarafından çıkış yönüne doğru çekilmesini sağlanarak geometrik şekil değişikliğini meydana getirir. Bu işlem sırasında oluşan kuvvetlerin etkisiyle haddelenen iş parçasının kesitinde incelmeye meydana gelirken, genişliğinde ve uzunluğunda bir miktar artış görülür. Gerçekleşen bu duruma ‘yayılma’ adı verilmektedir. Yayılma oranı, haddelenen iş parçasının türüne, boyutlarına, uygulanan radyal basma kuvvetine göre ve merdane çaplarına göre değişim gösterir [4-5].

Haddeleme işlemi sırasında iş parçası üzerinde gerçekleşmesi istenen iki temel amaç vardır. Bunlardan birincisi malzemeyi daha yoğun hale getirmek, diğer bir ifade ile malzemeyi sıkıştırmak. Bu sayede malzemenin içyapısındaki hataların bir kısmı giderilebilir. Haddeleme işlemi sırasında gerçekleşmesi istenen diğer amaç ise

malzemeyi istenilen boyutlar doğrultusunda daha küçük kesitlere düşürmek veya malzemeyi istenilen geometrik şekle getirmektir [5].

Haddeleme işlemi sırasında aynı zamanda, radyal kuvvetlerin etkisiyle malzemenin yapısında oluşan basma kuvvetleri ile malzeme ezilir. Bu ezilmeyle birlikte malzeme yapısında ve malzeme özelliklerinde iyileştirmeler yapmak mümkündür. Haddeleme işleminin önemli avantajlarından biriside, iş parçasında önemli ölçülerde plastik deformasyon oluşurken, plastik deformasyon sadece belirli bir alanda gerçekleşir. Bu mekanik avantaj sayesinde, yüksek kütleli ham maddeler ve şekil değiştirme dayanımı yüksek olan malzemeleri şekillendirmek mümkün hale gelmektedir [2].

Haddeleme şekil olarak ‘yassı’ ve ‘profil’ haddeleme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Haddeleme süresince işlem sıcaklığına göre ise ‘Sıcak Haddeleme’ ve ‘Soğuk Haddeleme’ olarak ikiye ayrılır.

2.1.Soğuk Haddeleme

Haddeleme işlemi, iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleşiyor ise soğuk haddeleme olarak sınıflandırılır. Sac, folyo, ince çubuk ve tel gibi küçük kesitli ürünlerin üretilmesinde daha çok kullanılır. Soğuk haddeleme, genellikle sıcak haddeleme ile üretilen ürünlerin malzeme kalınlığının, geometrik kesitlerinin, mekanik ve teknik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanır [5-7].

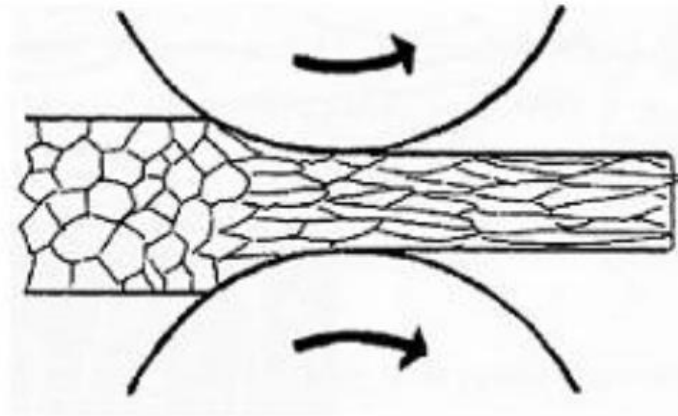
Soğuk haddeleme işleminde, sıcak haddelemeye göre daha küçük boyutlu ürünler haddelenir. Soğuk haddelemede iş parçasının kalınlığı her bir pasoda sıcak haddelemeye göre daha az azalır (ezilir) [8].

Soğuk haddeleme, yüzey kalitesi mükemmel, hatasız boyut toleransları, istenen fiziksel özellikler ve yüksek mekanik özellikleri sağlamakla beraber, haddeleme işleminde metaller yüksek seviyelerde enerji absorbe ederler ve bu enerjinin önemli

bir bölümü plastik deformasyon için kullanılırken diğer bir kısmı ısı enerjisine dönüştürürler. Bu nedenle haddeleme için gerekli olan haddeleme kuvvetleri ve haddeleme gücü sıcak haddelemeye göre çok daha fazladır [7].

Metallerin soğuk haddelenmesi, önemi giderek artan ve halen üzerinde ciddi araştırmalar yapılan bir metallere plastik şekil verme yöntemidir. Bunun nedeni ise soğuk haddeleme sırasında gerçekleşen pekleşme sayesinde haddeleme ile üretilen ürünlerin dayanımları istenilen düzeylere çıkarılabilmektedir. Soğuk haddelemede pekleşmeden (gerinim sertleşmesi) dolayı iş parçasının mukavemeti %20'ye kadar arttırılabilir [8].

Soğuk haddeleme, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleştiğinden, sıcak haddelemeye göre malzeme yapısı daha küçük taneli yapılardan oluşur (Şekil 2.6). Fakat bunun yanında metalin sünekliği azalır. Üretilen ürünlere daha sonra tavlama işlemi yapılarak ürünün sünekliği yeniden arttırılabilir[7].



Şekil 2.6. Soğuk haddeleme işleminde içyapının değişimi [2]

Soğuk haddeleme sonucu iş parçasında, kristal yapısı değiştiğinden bir takım mekanik özellikleri de değişir. İş parçasının çekme ve akma gerilmesinin yanı sıra sertliği de artarken, süneklik, elektrik iletkenliği ve korozyon direnci azalır [9].

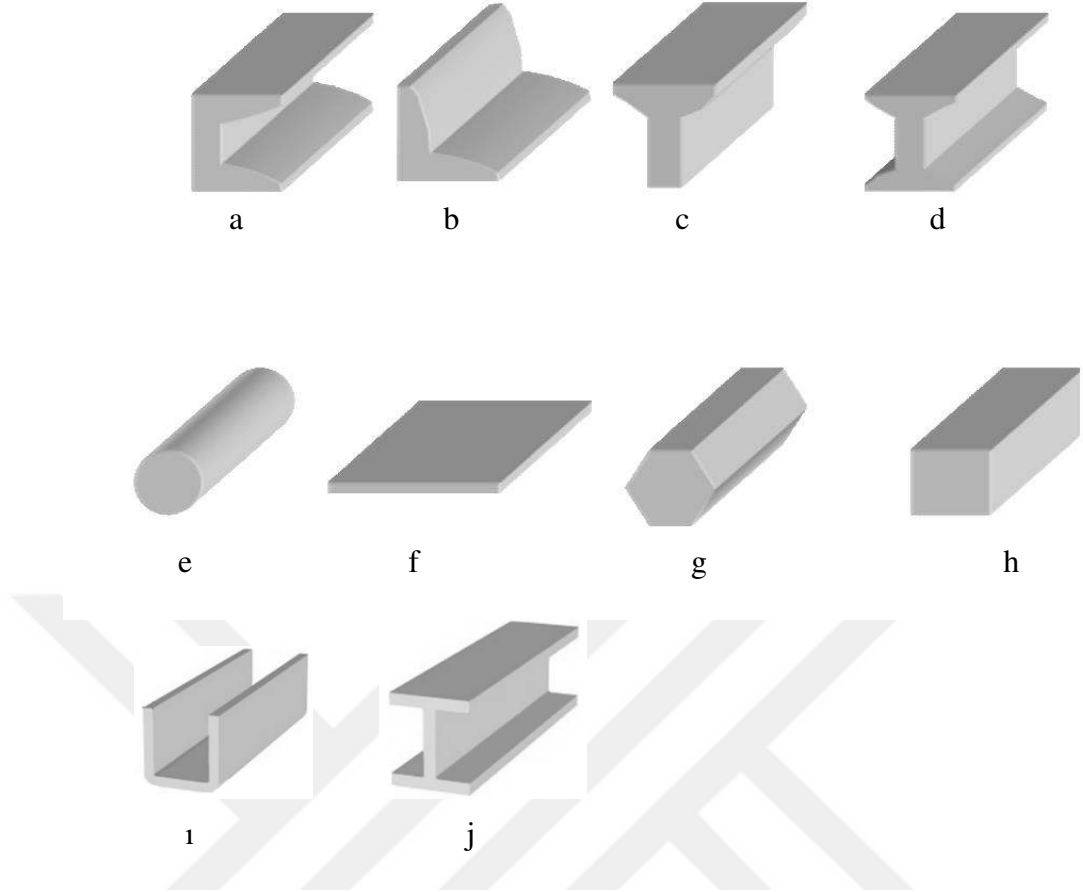
Genel olarak soğuk haddelemenin birçok avantajı olmakla beraber en önemlileri aşağıdaki gibidir.

- 1) Soğutma işlemleri ve oksidasyon olmadığından, daha dar toleranslar ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilir.
- 2) Sıcak haddelemeye göre daha ince cidarlı ürünler haddelenerek üretilebilir.
- 3) İş parçası malzemesi, istenen ürünün özellikleri ve kalitesi her adımda kontrol edilebilir.
- 4) Soğuk haddeleme sırasında istenen ürünün özelliğine göre yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir veya süneklik daha önemliyse tane boyutu kontrol edilebilir.
- 5) Yağlama işlemi soğuk haddeleme süresince genelde kolaylıkla yapılabilir.
- 6) Malzemede gerçekleşen pekleşmeyle birlikte son üründe mukavemet artışı sağlanır [8].

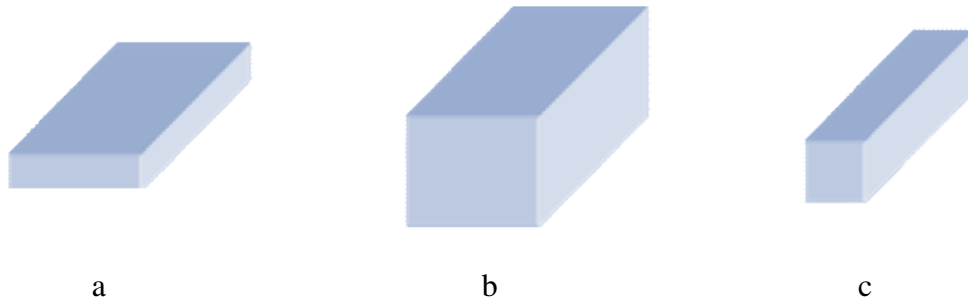
2.2.Sıcak Haddeleme

Haddeleme işlemi, iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yaklaşık 1050⁰C ile 1300⁰C arasındaki sıcaklıklar da gerçekleşiyor ise sıcak haddeleme olarak sınıflandırılır. Genellikle sıcak haddeleme işleminde, en düşük haddeleme işlemi ile birlikte metallerin büyük oranlar da şekillendirilmesi hedeflenir. Bir başka deyişle sıcak haddelemede malzeme özelliklerinin yanı sıra iş parçasının şeklini ve geometrisini değiştirmek daha büyük önem taşır.

Sıcak haddeleme işlemiyle genellikle Şekil 2.7’de gösterildiği gibi kare, yuvarlak, yassı, çokgen, kesit, şerit, halka, köşebent, T, I, U, H profil, ray gibi ürünler üretilir. Sıcak haddeleme de giriş malzemesi (iş parçası) olarak slab, blum, beam blank ve kütük olarak adlandırılan yarı mamul ürünler kullanılır (Şekil 2.8) [8].



Şekil 2.7. a) E Profil b) Köşebent c) T Profil d) I Profil e) Yuvarlak f) Yassı g) Çokgen h) Kare ı) U Profil j) H Profil



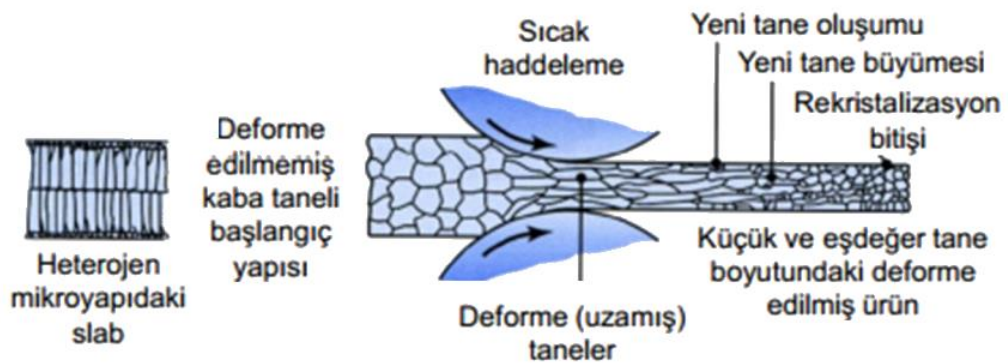
Şekil 2.8. a) Slab b) Blum c) Kütük

Dökümü yoluyla üretilmiş slab, blum ve kütük gibi malzemelerin büyük deformasyon oranlarında basma kuvveti ile iş parçası üzerine “ezme” işlemi uygulanır. Malzemenin kesiti, içyapısı ve boyutsal özellikleri bu sayede kontrollü bir şekilde istenilen forma getirilebilir [10].

Sıcak haddeleme işlemi, yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde yapıldığı için, bu sırada döküm yoluyla elde edilmiş slab, blum, kütük gibi malzemelerin, tane boyutları küçülür ve mekanik özellikleri iyileşir. Haddeleme sonrası üretilen ürünün mekanik özellikleri bu işlem süresince değişen birçok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin bazıları şu şekildedir [10].

- İş Parçasının Kimyasal Yapısı,
- İş Parçasının Deformasyon Isısı,
- Kesitteki Değişim (Deformasyon) oranı,
- Ezme Miktarı,
- Haddeleme İşlemi Sonrası Soğutma İşlemi

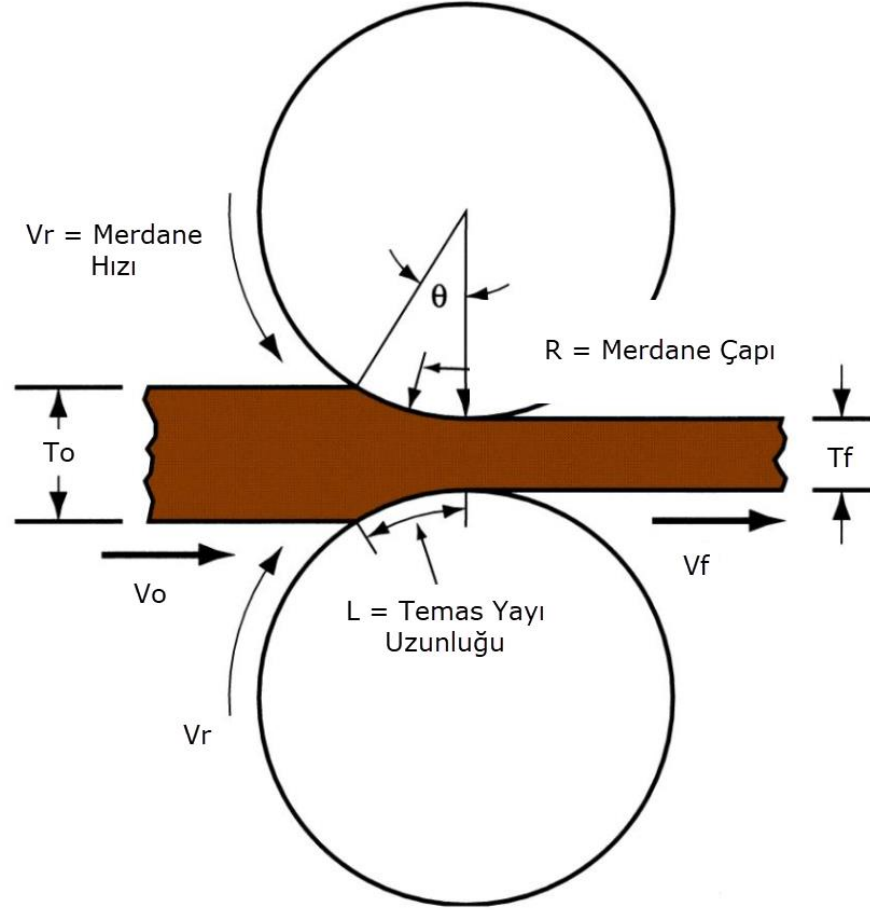
Çelik malzemelerde, tane boyu küçüldükçe malzemenin dayanımı artmaktadır. Sıcak haddeleme işlemi sırasında da iş parçasının tane boyutu küçülme göstermektedir ve bunun gerçekleşmesini sağlayan durum parçada yeniden kristalleşme olayının olmasıdır. Sıcak haddeleme işleminden sonra bir çelik malzemede ortalama tane boyutu 20 μm ' dur. Şekil 2.9' de görüldüğü gibi, sıcak haddelemeden sonra soğuma süreci gerçekleştiği zaman ortalama tane boyutu 5 μm ile 10 μm arasına kadar düşebilir [7].



Şekil 2.9. Sıcak haddeleme işleminde iç yapının değişimi [7]

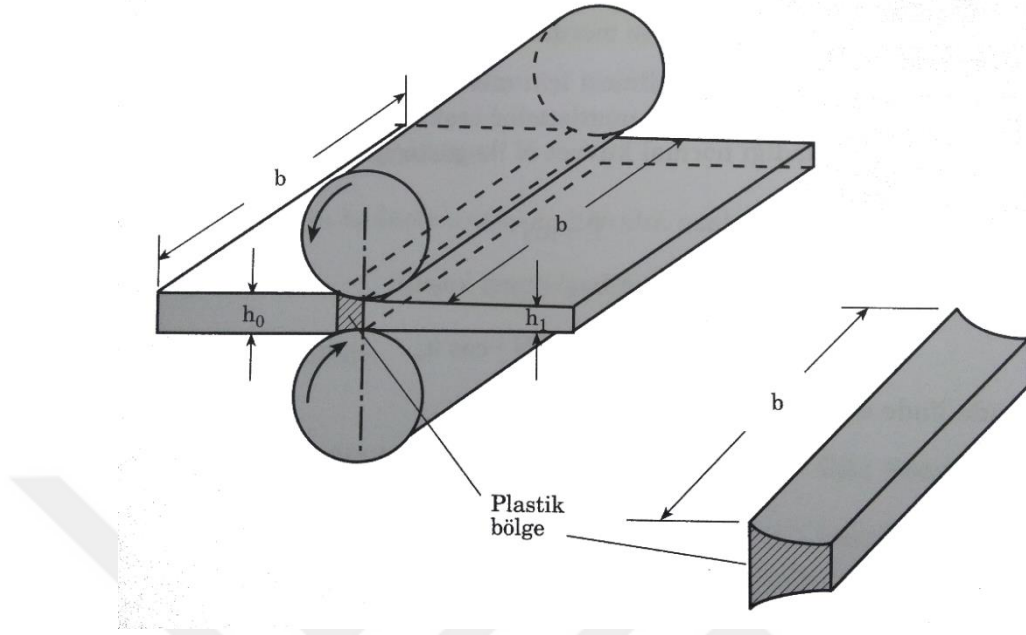
3. HADDELEMENİN MEKANİĞİ

Haddeleme sırasında oluşan kuvvetler ve bu kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılan bağıntılar Şekil 3.1’de gösterilmiştir ve aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.1. Haddeleme işleminde geometrik unsurlar

Şekil 3.2’de yassı ürünlerin (Sac, bant v.b) haddeleme işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yassı ürünlerin haddeleme işlemi ve bağıntılar [3]

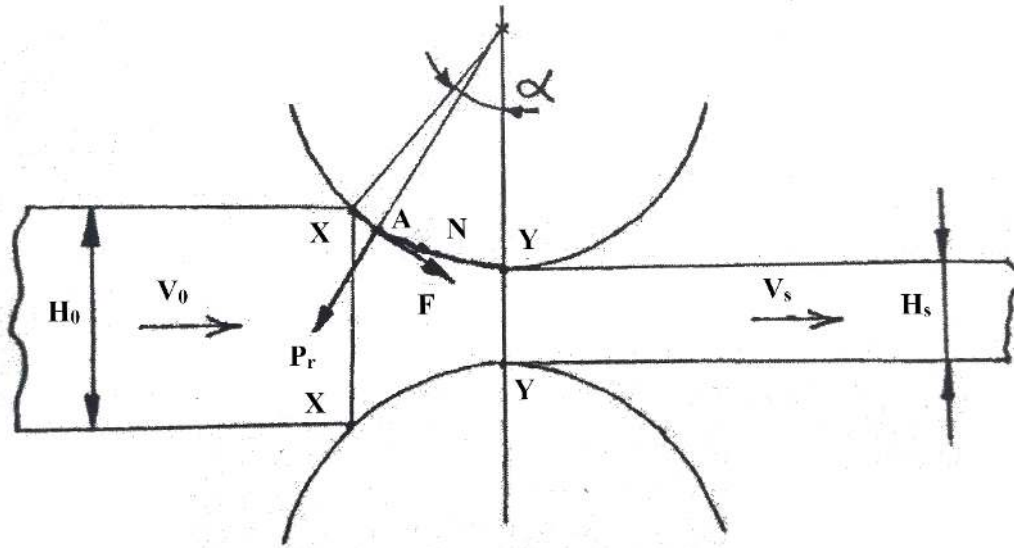
Malzemenin haddeleme işlemi öncesindeki kalınlığı h_0 ve haddelendikten sonraki kalınlığı h_1 ile gösterilirse; R merdane yarıçapı olmak üzere;

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 2R (1 - \cos\theta_m) \quad (3.1)$$

İş parçasının kalınlığı doğrultusundaki birim şekil değişimi;

$$e_h = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3.2)$$

İş parçasının kalınlığı doğrultusunda oluşan ezilmeye birlikte parçanın kalınlığında bir daralma meydana gelir. Daralmayla birlikte malzeme bir miktar uzar ve ihmal edilebilecek düzeyde genişler.

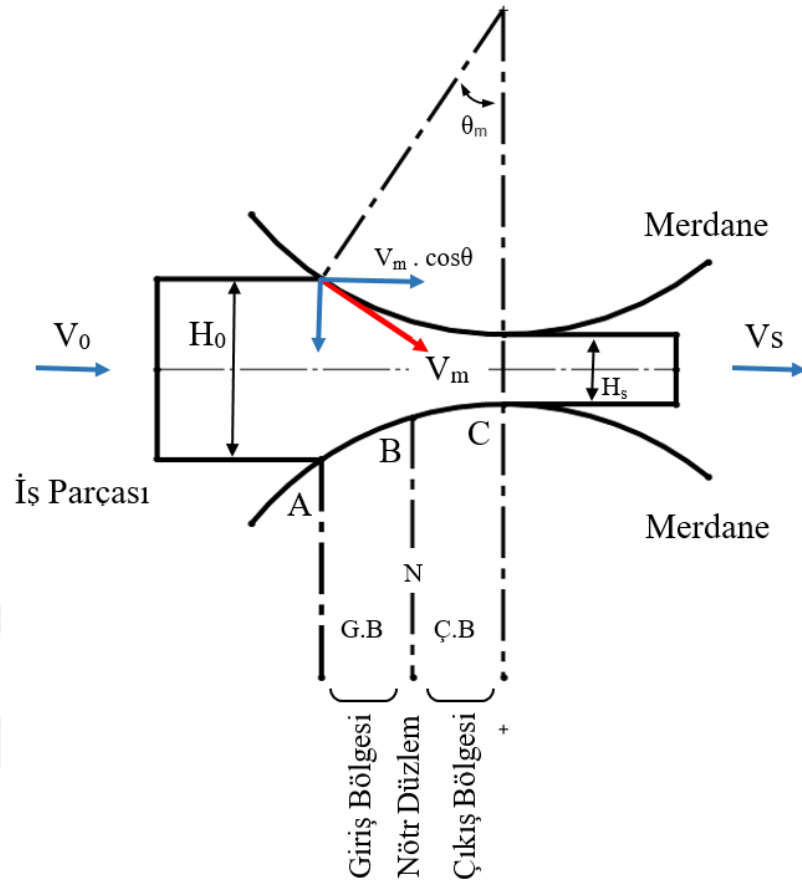


Şekil 3.3. Haddelenme sırasındaki kuvvetlerin açılımı [7]

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi iş parçası, H_0 kalınlığında merdaneler arasına girer ve merdanelerden geçtikten sonra kalınlığında bir azalma oluşarak H_s kalınlığına ulaşır. İş parçası Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, giriş düzlemi olan XX düzleminden V_0 hızı ile merdaneler arasına girer ve YY haddelenme düzleminden haddelenerek geçer. İşlem sırasında birim zamandaki toplam malzeme miktarı sabit olduğundan;

$$b \cdot h_0 \cdot v_0 = b \cdot h_s \cdot v_s = b \cdot h \cdot v \quad (3.3)$$

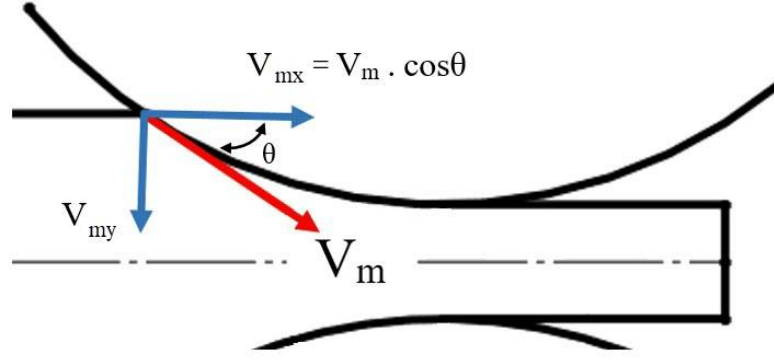
ifadesi yazılabilir. Denklem 3.3'ten anlaşılabacağı üzere V_s , V_0 'dan büyük bir değerde olmalıdır. İş parçasının hızı, iş parçası merdaneler arasına girmesiyle birlikte haddelenme işlemi boyunca kesit kalınlığı azaldıkça artmaktadır.



Şekil 3.4. Haddeleme sırasında oluşan bölgeler

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, malzemenin kesiti h ve haddeleme doğrultusundaki hızı V ise;

$$V = \frac{V_0 \cdot h_0}{h} \quad (3.4)$$



Şekil 3.5. Haddeleme sırasında iş parçasının hızı

Şekil 3.5'teki merdanenin çevresel hızı V_m nin haddeleme doğrultusundaki bileşeni V_{mx} nin denklemi;

$$V_{mx} = V_m \cdot \cos\theta \quad (3.5)$$

Merdaneler arasında $V = V_{mx}$ olan düzleme nötr düzlem denir. Nötr düzlem Şekil 3.4'te B noktası ile gösterilmiştir. Merdanenin teğetsel hızı V_{mx} tüm temas yayı boyunca aynı olduğundan, V hızı ile V_{mx} hızı tek bir noktada aynı olur ve bu noktalar tarafsız (nötr) düzlem olarak adlandırılır. Bu düzlem aynı zamanda kayma olmayan düzlemdir.

Nötr düzlem için;

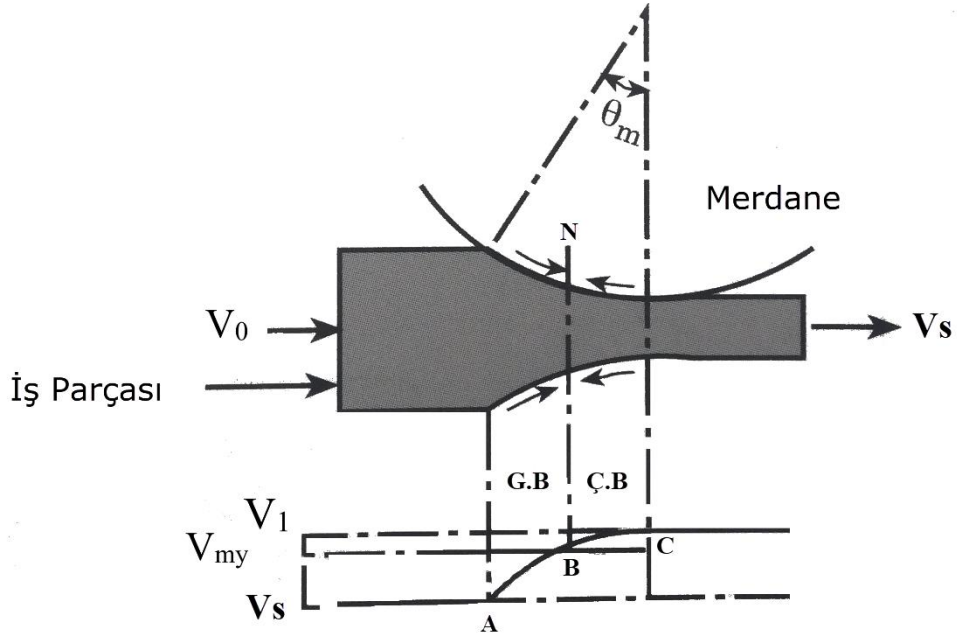
$$V - V_m \cdot \cos\theta = 0 \quad (3.6)$$

Şekil 3.4'te A ile B noktası arasındaki bölge giriş bölgesi olarak adlandırılır ve bu bölgede;

$$V - V_m \cdot \cos\theta < 0 \quad (3.7)$$

Şekil 3.4'te B ile C noktası arasındaki bölge çıkış bölgesi olarak adlandırılır ve bu bölgede;

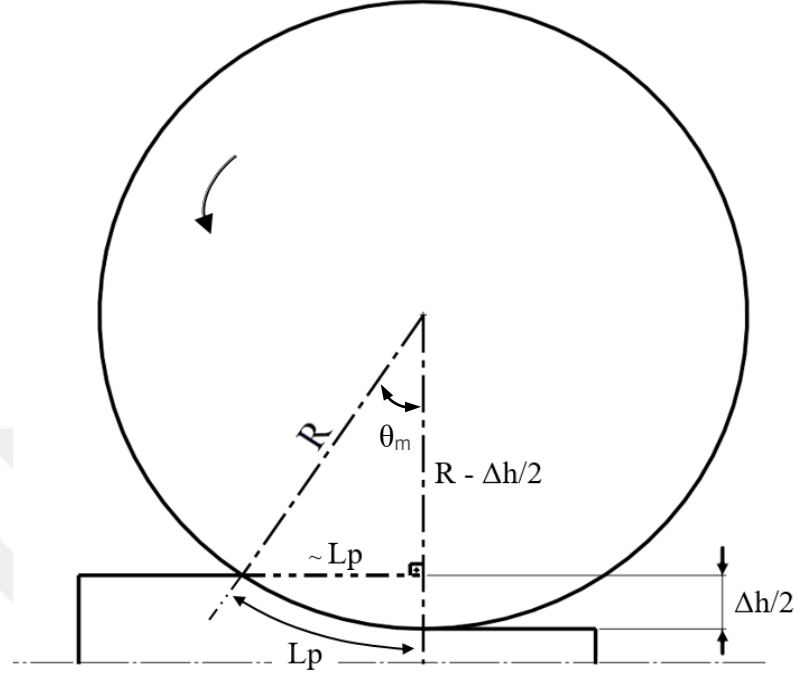
$$V - V_m \cdot \cos\theta > 0 \quad (3.8)$$



Şekil 3.6. Haddeme sırasında iş parçasındaki hız değişimi

Şekil 3.6'da iş parçası hızının, merdaneler arasından geçerken göstermiş olduğu değişiklik gösterilmiştir. İş parçası merdaneler arasından geçerken kesitinin azalmasıyla birlikte, hızı da artmaktadır ($V_s > V_0$). Şekil 3.6'dan da anlaşılabileceği gibi, haddeme sırasında oluşan kuvvetler giriş bölgesinde, iş parçasının hızı merdanelerin hızından yavaş olduğu için, oluşan sürtünme kuvvetiyle iş parçasını merdaneler arasına çekmeye, çıkış bölgesinde ise iş parçası daha hızlı olduğundan, oluşan sürtünme kuvveti, iş parçasını merdaneler arasında tutmaya çalışır.

İş parçası ile merdane arasındaki temas yayı L_p geometrik olarak Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Temas yayı L_p nin uzunluğu yerine L_p nin iz düşümü alınarak hesaplamalar yapılabilir.



Şekil 3.7. Merdane ve iş parçasının temas uzunluğu

Haddeleme kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan L_p ’nin hesaplanması aşağıdaki gibidir [3].

$$L_p = [R^2 - (R - \frac{\Delta h}{2})^2]^{1/2} \quad (3.9)$$

$$L_p = [R^2 - R^2 + \frac{2.\Delta h}{2.R} + \frac{\Delta h^2}{4}]^{1/2} \quad (3.10)$$

Bu işlemde $\frac{\Delta h^2}{4}$ ifadesi çok küçük bir değer olduğundan ihmal edilebilir.

Böylece L_p ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$L_p = \sqrt{R.\Delta h} \quad (3.11)$$

Hesaplamalarda kullanılmak üzere temas alanı ise, iş parçasının genişliği b olmak üzere,

$$\text{Temas Alanı} = L_p \cdot b \quad (3.12)$$

Yukarıda verilen temas yayının hesaplanmasına göre iş parçasının maksimum kesit değişimi de hesaplanabilir. Şekil 3.7'den $\tan \theta_m$ ifadesi yazılırsa;

$$\tan \theta = \frac{L_p}{R - \frac{\Delta h}{2}} \quad (3.13)$$

Pisagor bağıntısı yazılırsa;

$$L_p^2 + \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = R^2$$

$$L_p^2 + R^2 - 2R \frac{\Delta h}{2} + \frac{\Delta h^2}{4} = R^2$$

İhmal Edilebilir

$$L_p^2 = R \cdot \Delta h$$

$$L_p = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (3.14)$$

Denklem 3.14'ü denklem 3.13'te yerine yerleştirirsek;

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{R \cdot \Delta h}}{R - \frac{\Delta h}{2}} \quad (3.15)$$

İhmal Edilebilir

$$\tan\theta = \sqrt{\frac{R \cdot \Delta h}{R^2}} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (3.16)$$

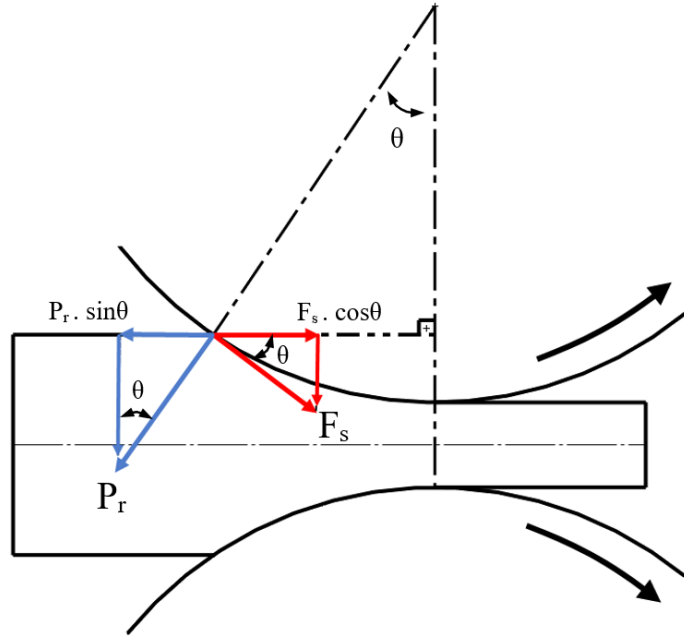
Δh 'ı bir tarafta bırakmak için her iki tarafın karesi alınırsa;

$$\tan^2\theta = \frac{\Delta h}{R}$$

$$\Delta h = R \cdot \tan^2\theta = (\tan\theta = \mu)$$

$$\Delta h_{\max} = R \cdot \mu^2 \quad (3.17)$$

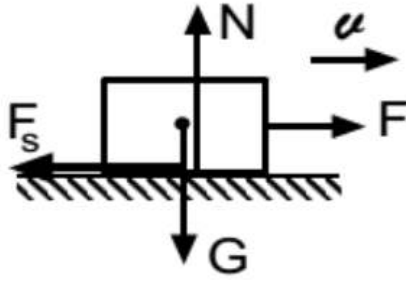
Haddeleme işlemi süresince, merdane ile iş parçasının temas ettiği yay yüzeyi üzerinde bulunan herhangi bir X noktasında iş parçasına birbirinden farklı iki temel kuvvet etki eder. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi bu kuvvetlerin ilki, P_r radyal kuvveti ve diğer kuvvet ise F_s teğetsel sürtüne kuvvetidir. Bu ifade deki P_r (radyal kuvvet), haddeleme kuvveti veya merdanenin iş parçasına basma kuvveti (Roll Force) veya iş parçasının merdaneleri ayırma kuvveti olarak tanımlanabilir. F_s teğetsel sürtünme kuvveti ise merdanenin kendi ekseninde dönerken sahip olduğu çevresel hızdan kaynaklanan, iş parçası ile temas noktasında, temas yayı boyunca oluşan sürtünme kuvveti olarak tanımlayabiliriz [3].



Şekil 3.8. Haddeleme sırasında oluşan kuvvetlerin bileşenleri

Merdanelerin iş parçasına temas ettiği ilk noktadan itibaren tarafsız eksene kadar olan kısımda, iş parçasının hızı merdane hızından yavaş olduğu için, merdane ve iş parçası arasında oluşan sürtünme kuvveti, iş parçasını merdaneler arasına çekmektedir. Bu durumda iş parçasını merdaneler arasına doğru çeken kuvvet temas yayı boyunca oluşan F_s sürtünme kuvvetidir. Çıkış noktasında ise iş parçasının hızı daha fazla olduğundan bu bölgede oluşan F_s kuvvetinin yönü terstir. Bu bölgeden itibaren F_s kuvveti iş parçasını merdaneler arasına da sürüklemek yerine, iş parçasını merdaneler arasında tutar [3].

Oluşan F_s kuvvetinin, haddeleme işleminin gerçekleşmesi için çok büyük öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3.6'da gösterilen giriş bölgesinden itibaren iş parçasının merdaneler arasına çekilebilmesi için F_s 'nin değeri oldukça önemlidir. F_s kuvveti şematik olarak Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. F_s 'nin şematik gösterimi

Burada;

$$F_s = N \cdot \mu \text{ 'dür.} \quad (3.18)$$

Haddeleme sırasında oluşan F_s 'nin yönü ve doğrultusu Şekil 3.8'de verilmiştir. Denklem 3.18'de N yerine haddeleme işleminde oluşan radyal kuvvet yazılabilir. Böylece haddeleme sırasında oluşan sürtünme kuvveti F_s ;

$$F_s = P_r \cdot \mu \text{ 'dür} \quad (3.19)$$

Haddeleme işlemi boyunca F_s 'nin değeri sürekli olarak değişmektedir ve F_s 'nin temel olarak üç durumu vardır. Bunlar;

$$1) \quad F_s \cdot \cos\theta > P_r \cdot \sin\theta \text{ ise}$$

Bu durumda;

$$P_r \cdot \mu \cdot \cos\theta > P_r \cdot \sin\theta$$

$$\mu > \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

$$\mu > \tan\theta \text{ olur.} \quad (3.20)$$

$$2) F_s \cdot \cos\theta = P_r \cdot \sin\theta \text{ ise}$$

$$P_r \cdot \mu \cdot \cos\theta = P_r \cdot \sin\theta$$

$$\mu = \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

$$\mu = \tan\theta \text{ olur.} \quad (3.21)$$

$$3) F_s \cdot \cos\theta < P_r \cdot \sin\theta \text{ ise}$$

$$P_r \cdot \mu \cdot \cos\theta < P_r \cdot \sin\theta$$

$$\mu < \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

$$\mu < \tan\theta \text{ olur.} \quad (3.22)$$

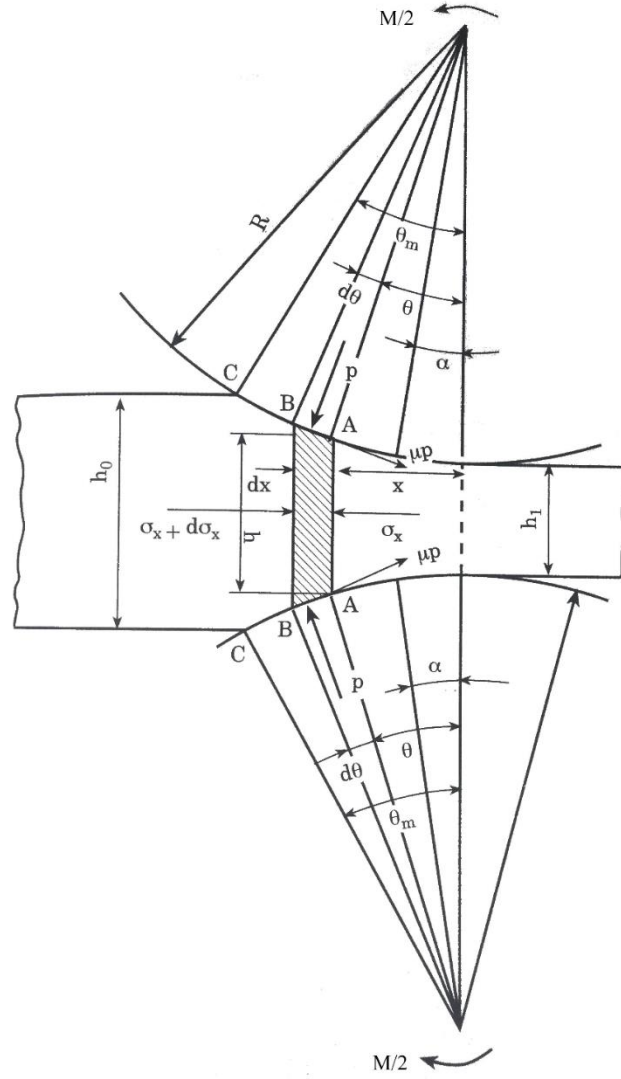
İş parçasının, merdaneler arasındaki paso boşluğuna doğru çekilebilmesi için (kapılabilmesi için) yeterli sürtünme kuvvetinin oluşması gerekmektedir. Şekil 3.6'dan giriş bölgesi ile merdanelerin merkezinden geçen düzlem arasındaki θ açısı, temas açısı, ısırma açısı veya kavrama açısı olarak adlandırılır. Haddeleme sırasında oluşan F_s nin durumları incelendiğinde, iş parçasının merdaneler arasına çekilebilmesi için en az 1. Durumun sağlanması gerekmektedir. Başka bir deyişle, haddeleme işleminin başlayabilmesi için, θ kapma açısının tanjant değerinin, μ sürtünme katsayısı değerinden küçük olması gerekmektedir. Buradan;

$$\tan \theta < \mu \quad (3.23)$$

ifadesi elde edilir. Eğer $\mu > \tan \theta$ şartı sağlanırsa haddeleme işleminin başlaması için gerekli şart sağlanmış olur. $\mu = \tan \theta$ veya $\mu < \tan \theta$ ise, iş parçası merdaneler arasına çekilemez, $\mu < \tan \theta$ olması durumunda iş parçası merdaneler tarafından geriye doğru itilir. Haddeleme işleminin sürtünme kuvvetinin yetersizliğinden dolayı başlamaması durumunda çözüm olarak, haddeleme kalınlığı (Δh) azaltılabilir veya merdane çapları arttırılarak $\tan \theta$ değeri küçültülebilir [3].

Haddeleme işlemini etkileyen diğer önemli etken ise, iş parçasının ezilmesini ve plastik deformasyon ile şekillendirilmesini sağlayan tek kuvvet, merdanelerin iş parçası üzerine uyguladığı radyal basınç kuvvetidir. Bu kuvvet ayrıca, iş parçasının dayanım değerlerine göre merdaneleri birbirinden uzaklaştırmaya çalışan kuvvettir ve merdaneleri birbirinden ayırma kuvveti olarak ta tanımlanır [11].

Şekil 3.10'da haddeleme işlemi sırasında, iş parçasının deformasyonu sırasında oluşan gerilmeler ve matematiksel bağıntılar gösterilmiştir. Haddeleme işlemine etki eden diğer kuvvet olan P_r haddeleme kuvvetinin kontrol altında tutulması için bu kuvvetin tasarım aşamasında hesaplanması önemlidir ve aşağıda hesaplanması verilmiştir.



Şekil 3.10. Haddелеme sırasında oluşan gerilmeler ve bağıntılar

Şekil 3.10'dan giriş bölgesindeki P_r değeri;

$$P_r = \frac{h_0}{h_1} \cdot \sigma_m \cdot e^{\mu (\beta_0 - \beta)} \quad (3.24)$$

Şekil 3.10'dan çıkış bölgesindeki P_r değeri;

$$P_r = \frac{h}{h_0} \cdot \sigma_m \cdot e^{\mu \cdot \beta} \quad (3.25)$$

Bu denklemlerde;

$$\sigma_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{ak}$$

$$\sigma_m = 1,15 \cdot \sigma_{ak}$$

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 2 \sqrt{\frac{R}{h_1}} \cdot \arctan \left[\theta_m \cdot \sqrt{\frac{R}{h_1}} \right] \\ \beta &= 2 \sqrt{\frac{R}{h_1}} \cdot \arctan \left[\theta \cdot \sqrt{\frac{R}{h_1}} \right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

ifadeleri ile bulunur.

Bu denklemlerde geçen σ_m , iş parçasının merdaneler arasına girişinden çıkışına kadar olan bölgedeki ortalama akma sınırı olarak ifade edilir ve σ_m ;

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{giriş} + \sigma_{çıkış}}{2} \quad (3.27)$$

ifadesi ile bulunur. Ayrıca soğuk haddelemede sırasında gerçekleşen pekleşmenin etkisi için ortalama akma sınırı (σ_m) değeri, $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ bağıntısından yararlanılarak;

$$\sigma_m \cong \frac{K \varepsilon^{n+1}}{\varepsilon^{n+1}} \quad (3.28)$$

ifadesi ile bulunur.

Şekil 3.10'da tarafsız düzlem (nört düzlem) açısı α ile gösterilirse, bu düzlem için giriş bölgesinde ve çıkış bölgesinde oluşan gerilmeler birbirine eşit olmalıdır;

$$\frac{h}{h_0} \cdot \sigma_m \cdot e^{\mu(\beta_0 - \beta)} = \frac{h}{h_0} \cdot \sigma_m \cdot e^{\mu\beta} \quad (3.29)$$

Bu ifadeden B_α değeri;

$$B_\alpha = \frac{B_0}{2} - \frac{1}{2\mu} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (3.30)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Tarafsız düzlem açısını bulabilmek için, B_α değeri denklem 3.29'da yerine yazılarak, α açısı;

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \tan \left[\frac{B_\alpha}{2} \sqrt{\frac{h_1}{R}} \right] \quad (3.31)$$

ifadesi ile bulunur.

Bu ifadeler ile Şekil 3.10'da gösterildiği gibi haddeleme işlemi sırasında, iş parçasının belirli bir kesitinde oluşan haddeleme kuvveti, dilimleme yöntemi kullanılarak bulunabilir. İş parçası kalınlığı h ve iş parçasının belirli bir kesitinin uzunluğu d_x ile ifade edilirse haddeleme kuvveti P_r ;

$$P_r = \int_0^\alpha p R d\theta + \int_\alpha^{\theta_m} p R d\theta \quad (3.32)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Haddeleme işlemi sırasında oluşan sürtünme kuvvetinin küçük değerleri için, iş parçasının genişliği b , iş parçası ve merdanenin temas yayı uzunluğu L , iş parçasının giriş – çıkış bölgeleri arasındaki ortalama akma değeri σ_m ile ifade edilirse, haddeleme kuvveti yaklaşık olarak;

$$P_r \cong L_p \cdot b \cdot \sigma_m \quad (3.33)$$

ifadesi ile bulunabilir.

Merdanelerde oluşan moment ise M ile gösterilir. Merdanelerden birine etkiyen moment ise $M/2$ ile ifade edilir ve $M/2$;

$$\frac{M}{2} = \int_{\alpha}^{\theta_m} \mu p R^2 d\theta - \int_0^{\alpha} \mu p R^2 d\theta \quad (3.34)$$

ile hesaplanır. Bu ifadedeki $-$ işareti sürtünme kuvvetinin tarafsız ekseninde yön değiştirmesinden kaynaklanır.

Haddeleme kuvveti, her bir merdaneye iş parçası ile merdanenin temas ettiği yayın tam ortasından etki ettiği varsayılarak, oluşan moment yaklaşık olarak;

$$\frac{M}{2} \cong P_r \cdot \frac{L}{2} \quad (3.35)$$

ifadesi ile bulunabilir. Burada $L/2$ moment kolu olarak kabul edilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu, sıcak haddeleme sırasında, moment kolu olarak $L/2$ değerinin,

soğuk haddeleme sırasında ise moment kolu olarak 0,4 L değerinin gerçeğe daha yakın sonuçlar olduğunu göstermektedir.

Haddeleme işlemi için, merdanelere uygulanması gereken güç N ise;

$$N = \frac{M}{2} \cdot \omega \quad (3.36)$$

ile ifade edilir. Burada ω ifadesi merdanenin açısal hızını göstermektedir ve;

$$\omega = 2 \cdot n \cdot \pi \quad (3.37)$$

ifadesi ile hesaplanır. n merdanenin hızını (dev/dk) göstermektedir ve ;

$$n = \frac{V \cdot 60}{\pi \cdot R} \quad (3.38)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada V merdanenin çizgisel hızıdır.

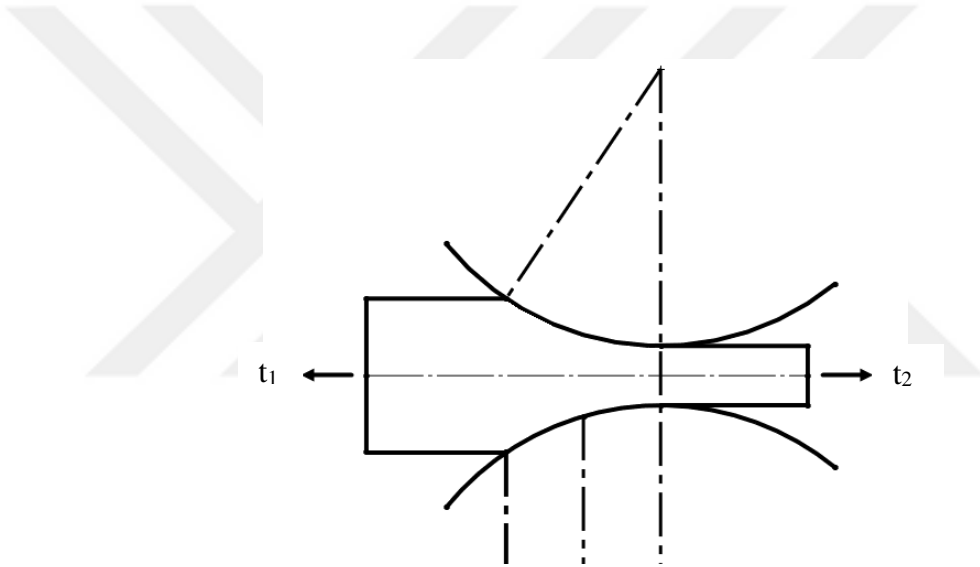
Haddeleme sistemi için toplam güç her iki merdane için gerekli olan toplam güç ise toplam güç;

$$\begin{aligned} N_{\text{toplam}} &= M \cdot \omega \\ N \text{ (kW)} &= \frac{2\pi P_r L n}{60000} \\ N \text{ (BG)} &= \frac{2\pi P_r L n}{44650} \end{aligned} \quad (3.39)$$

ile ifade edilir. Burada haddeleme kuvveti P_r Newton olarak, iş parçası ve merdanenin temas yayı olan L ise metre olarak hesaplanmalıdır.

3.1. Geri Çekme – İleri İtme Kuvveti

Haddeleme işlemi sırasında oluşan haddeleme kuvveti yüksek değerlerde olduğu zaman haddeleme sistemi ve merdaneler oluşan kuvvetten zarar görür. Bu nedenle haddeleme kuvvetinin en az değerde olması istenir. Haddeleme kuvvetini azaltmak için, merdane çapı, oluşan sürtünme kuvveti veya paso miktarı azaltılabilir ya da işlem sıcaklığı arttırılabilir. Aynı zamanda gerekli durumlarda Şekil 3.11'deki gibi iş parçasına çekme (t_1) veya itme (t_2) kuvveti de uygulanabilir.



Şekil 3.11. Haddeleme sırasında itme kuvveti ve yönü

İş parçasına ilave kuvvet uygulandığında haddeleme kuvveti P ;

Giriş bölgesinde;

$$P_r = \frac{h}{h_0} \cdot (\sigma_m - t_1) \cdot e^{\mu(\beta_0 - \beta)} \quad (3.40)$$

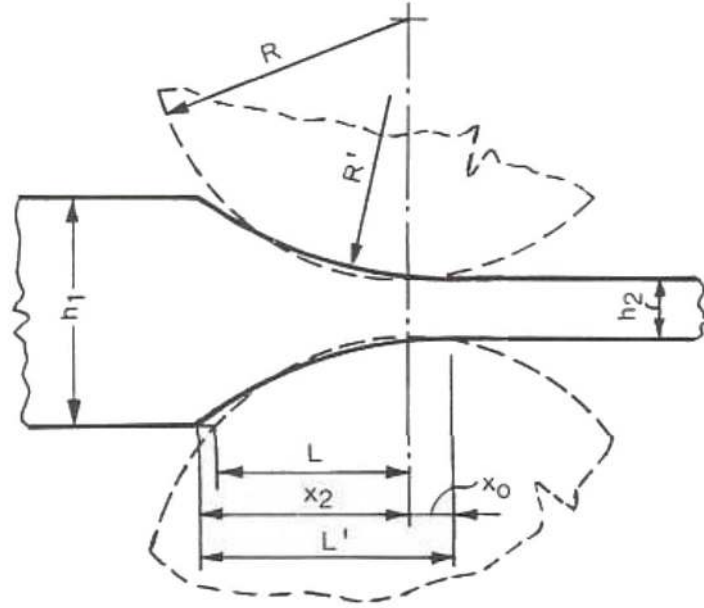
Çıkış bölgesinde;

$$P_r = \frac{h}{h_0} \cdot (\sigma_m - t_2) \cdot e^{\mu\beta} \quad (3.41)$$

ifadeleri ile hesaplanır.

3.2.Merdanelerin Yassılaşması

Haddeleme sırasında iş parçası plastik deformasyon ile şekillendirilirken oluşan yüksek haddeleme kuvvetleri, merdaneler de elastik özellik gösterdiğinden az bir miktarda da olsa merdanelerinde elastik deformasyona uğramasına neden olur. şekil 3.12’de merdanelerin yassılaşması şematik olarak gösterilmiştir. şekilden de anlaşılabileceği gibi merdanelerin yassılaşması, iş parçası ile merdanenin temas yüzeyini arttırır ve iş parçasının giriş - çıkış düzlemlerinin yer değiştirmesine neden olur.



şekil 3.12. Merdane yassılaşması ve bağıntılar [11]

Yassılaşmış merdanenin değişen yarıçapı R^l ile gösterilir ve bu ifadenin bir daire yayı olduğu kabul edilirse R ile R^l arasında;

$$\frac{R^l}{R} = 1 + \frac{CP}{b(h_0 - h_1)} \quad (3.42)$$

bağıntısı vardır. Bu ifadede;

P_r = Haddeme kuvveti (kN)

b = İş parçasının genişliği (mm)

$C = 2,3 \cdot 10^{-2}$ (mm²/kN), çelikten üretilen merdaneler için,

$C = 4,57 \cdot 10^{-2}$ (mm²/kN), dökme demirden üretilen merdaneler için,

Özellikle soğuk haddeme işlemi sırasında oluşan yüksek haddeme kuvvetlerinin etkisi ile merdanelerin yassılaşması, tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bir noktadır ve haddeme kuvvetinin hesaplanmasında denklemlerde R yerine yassılaşmanın göz önüne alındığı R^l ifadesi kullanılmalıdır.

Şekil 3.12’de gösterildiği gibi merdanelerin yassılaşması sırasında temas ara yüzeyindeki kuvvet dağılımının eliptik olduğu kabul edilirse temas yayı uzunluğunun artmasıyla birlikte yeni yay uzunluğu;

$$L^l = x_0 + x_2 \quad (3.43)$$

ifadesi ile tanımlanır. Bu ifadedeki x_0 ve x_2 ;

$$x_0 = \frac{8R(1-v_r^2)}{\pi E_r} P_r$$

$$x_2 = \sqrt{L^2 + x_0^2} \quad (3.44)$$

ile hesaplanabilir. Bu ifadedeki E_r , merdane malzemesinin young modülü ve V_r merdane malzemesinin poisson oranıdır. Bu bağıntılardan yassılaştırmış merdanenin yarıçapı R^l ;

$$R^l = R \left[1 + \frac{16P_r (1-v_r^2)}{\pi E_r b \Delta h} \right] \quad (3.45)$$

ile hesaplanabilir. Bu durumda merdanenin yassılaştırmasının da hesaplandığı P haddeleme kuvveti;

$$P = P_r . b . \sqrt{R^l \Delta h} \quad (3.46)$$

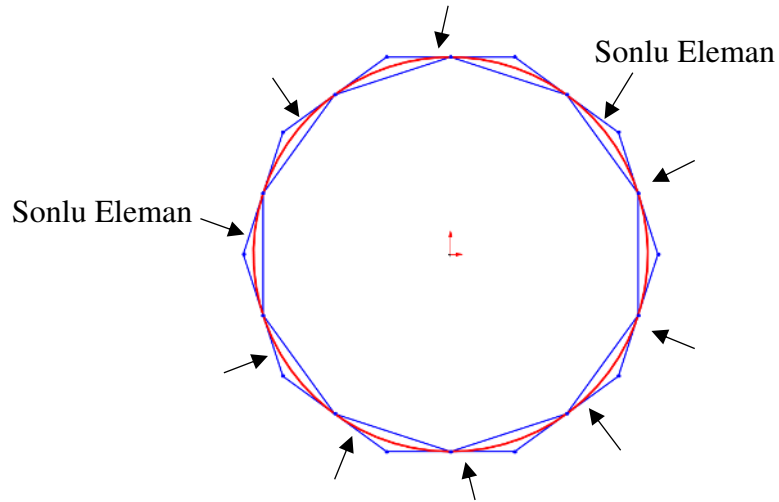
ifadesi ile hesaplanabilir.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık sınır şartlarına ve koşullara sahip mühendislik problemlerinin küçük parçalar halinde matematiksel olarak modellenip daha sonra bu parçaların kendi içinde ayrı ayrı çözümlenip, tüm çözümlerin toplanmasıyla genel çözüme ulaşan mühendislik çözüm yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi ilk defa ortaya atıldıktan sonra mühendislik problemlerinin çözümünde pratik bir yol olduğu anlaşılmış ve bu alanda yapılan çalışmalarda gelişim süreci hızlanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin gelişmesinde matematikçiler ve aynı zamanda farklı alanlardaki mühendislerde rol almasıyla hızla gelişen bir yöntem haline gelmiştir ve günümüzde de farklı mühendislik alanlarında ve temel bilimlerde aktif olarak kullanılmaktadır ve geliştirilmeye devam etmekte olan bir yöntemdir.

4.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Sonlu elemanlar yönteminin ilk tarihsel gelişimi, ilk matematikçilerin Şekil 4.1’de gösterildiği gibi dairenin çevresini çokgen şeklinde düşünerek hesaplamasıyla ortaya çıkmıştır. Bu modele göre çokgenin her bir kenarı ayrı birer sonlu elemandır.



Şekil 4.1. Dairenin çevresinin sonlu elemanlar yöntemi ile gösterimi

Bu modelde ve sonlu elemanların temelindeki amaç, kompleks geometride olan problemlerin çözümünde, bilinen daha basit geometrik yapıda ve daha basit çözümü olan parçalara ayrılarak, parçadan bütüne giderek genel çözüme ulaşmayı hedefler. Bu yöntem ilk olarak yapı analizlerinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk modellerin çözümünde yarı analitik bir yöntem kullanılmıştır. Günümüzdeki haliyle bilinen ve kullanılan sonlu elemanlar metodu ise ilk defa 1956 yılında Turner, Martin, Clough ve Topp tarafından yapılan çalışmada yer almıştır. Bu çalışmada bir uçağın analizinde, perçin bağlantılı profillerin ve iç gerilmeleri olan üçgensel tabaka şeklindeki sonlu elemanların rijitlik matrisi oluşturularak sonlu elemanlar metodu endüstriyel anlamda kullanılmaya başlanmıştır [13].

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan matematiksel modellerin hızlıca çözümlenip sonuca ulaşmasında bilgisayarlar kullanılmaktadır. İlk zamanlar, karmaşık problemlerin çözümü çok uzun süreler almaktaydı, 1960'lı yıllardan itibaren bilgisayar teknolojisindeki gelişmeyle beraber sonlu elemanlar metodunun kullanılması da büyük oranda yaygınlaştırmış ve kullanılmaya başlanmıştır. İlk başlarda yapı analizinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve matematiksel modellerin farklı alanlarda da uygulanmasıyla birlikte gerilme analizi, akış analizi gibi farklı bilimsel alanlarda da kullanılmaya ve geliştirilmeye başlanmıştır [14].

Sonlu elemanlar metodundaki gelişmeler ile birlikte bu yöntemin uygulamalı bilimler, mühendislik alanları, sağlık bilimleri, medikal uygulamalar gibi farklı alanlardaki kullanımı hızla artmıştır. Tüm bu alanlardaki problemlerin çözümüne cevap verebilen sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmış ve 1980'li yıllardan itibaren mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır [13,14].

Sonlu elemanlar yönteminin gelişmesinde ve yaygın olarak kullanılmasında, problemin matematiksel olarak modellenmesinden dolayı farklı sınır şartlarında veya farklı durumlarda analizlerin yapılması için sadece giriş parametrelerini değiştirerek

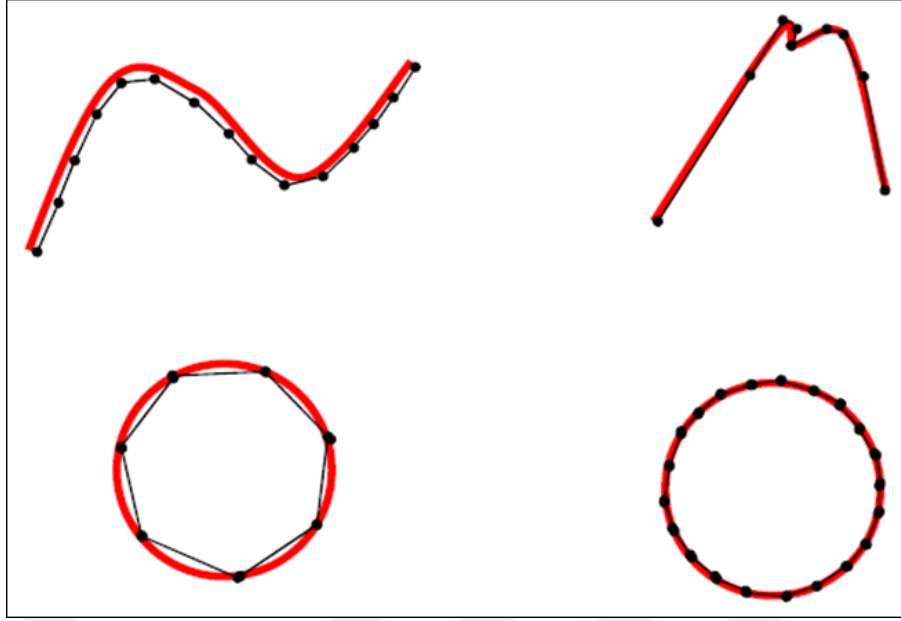
analizlerin tekrar tekrar yapılabilir olmasıdır. Bu sayede optimum veriler kısa sürede bulunabilir. Bilgisayarların gelişimi bu noktada matematiksel işlemleri kısa sürede yapılmasına olanak sağladığı için yöntemin yaygınlaşmasında önemli rol oynamıştır [15,16].

4.2. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu temel olarak, karmaşık problemleri daha küçük parçalara böler ve bu küçük parçaları kendi içinde çözümleyerek problemin genel çözümüne ulaşmayı hedefler.

Sonlu elemanlar yönteminde gerçek problemin yerine daha basit parçalara ayrılmış farklı bir problem tanımlanmasından dolayı bulunan sonuç gerçek problemin bire bir doğru sonucu olmayıp, yaklaşık bir sonuca ulaşılmaktadır. Fakat problemin küçük parçalara bölünürken (basitleştirilirken), doğru işlemlerin uygulanması (doğru elemanların, doğru boyutlarda kullanılması) ve doğru matematiksel modellerin kurulması ile kesin sonuca çok yakın sonuçların, hatta kesin sonuçların elde edilebilmesi mümkün olmaktadır.

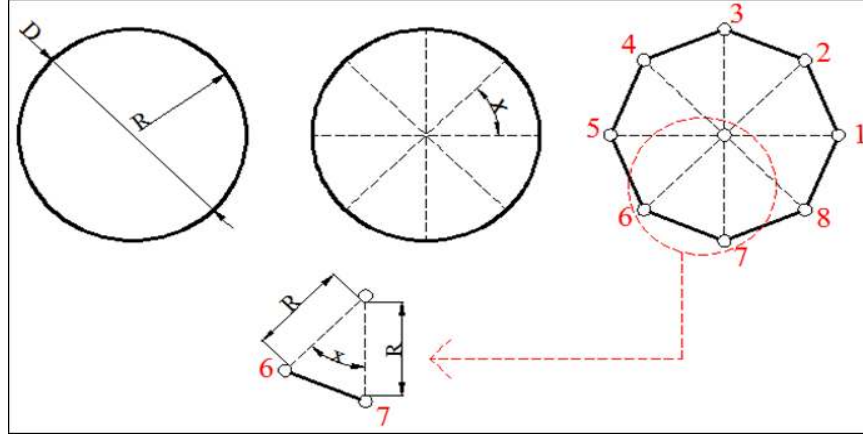
Bu metodu günlük yaşantımızda da birçok farklı alanda kullanırız. Örneğin Şekil 4.2’de gösterilen bir dairenin çevresini veya basit bir eğrinin boyunu bu metot ile hesaplayalım.



Şekil 4.2. Eğrilerin küçük çizgilere bölünmesi [18]

İlk olarak Şekil 4.2'deki eğri üzerinde, boyu önceden bilinen veya hesaplanabilen düz doğru parçaları çizelim ve boylarını bildiğimiz doğru parçalarının boylarının toplamını bulalım. Böylece, bu metot ile belli bir doğruluk oranında eğrinin boyunu yaklaşık olarak hesaplamış oluruz. Kullanacağımız doğru parçalarının boyu ne kadar küçük olursa elde edilen sonuç o kadar doğru sonuca yaklaşmış olur. Ayrıca dar köşelerde, doğru parçası boyunun küçültülmesi sonucu daha hassas bir sonuç elde edilmiş olur [18].

Şekil 4.3'teki dairenin alanını sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplayalım ve bulduğumuz sonuçları, analitik sonuçlarla karşılaştıralım. Öncelikle problemi daha basit parçalara bölmek için daireyi Şekil 4.3'de gösterildiği gibi eş üçgenlere bölelim.



Şekil 4.3. Daireyi elemanlara bölmek [18]

Parçalara ayırdığımız problemin küçük parçaları olan üçgenin, alanı Denklem 4.1’deki gibi ifade edilir.

$$A_i = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin x \quad (4.1)$$

Tek bir parçanın (üçgenin) alanından tüm dairenin alanı Denklem 4.1’deki gibi bulunur. Denklem 4.2’deki N toplam üçgen sayısını, A_i bir üçgenin alanı, A_T ise dairenin toplam alanını belirtmektedir.

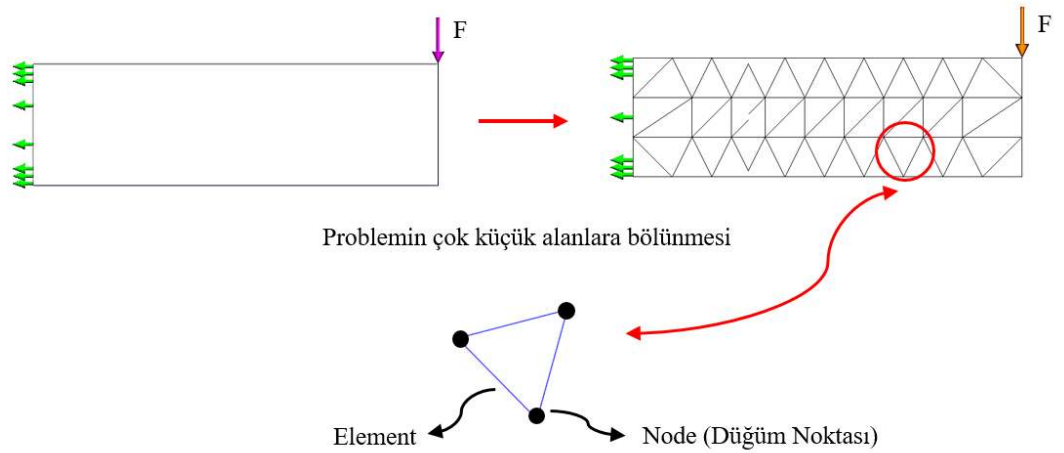
$$A_T = \sum_{i=1}^N A_i = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin(2\pi/N) \times N \quad (4.2)$$

Tüm dairenin alanı, analitik formülasyon ile Denklem 4.3’teki gibi ifade edilebilir.

$$A_T = \pi \times R^2 \quad (4.3)$$

Dairenin alanını önce 8 küçük parçaya, sonra 48 küçük parçaya ayırarak hesaplama yapalım ve elde edilen numerik hesap sonucunu, analitik hesap ile elde edilen sonuç ile karşılaştıralım. Yukarıda verilen denklemlere göre hesaplama yapıldığında, 8 parçaya bölünen daire alanının nümerik hesabı ile analitik hesabı arasında %10.8'lik bir fark bulunmuştur. Mühendislik hesaplarında %10'a kadar yapılan hesaplama hataları göz ardı edilebilir. Eleman sayısının 8'den 48'e çıkarılmasıyla hesaplamalar arası fark %0.63 değerine düşmüş ve analitik sonuca çok yakın bir sonuç elde edilmiş olur [17-18].

Yukarıdaki örneklerden de anlaşılabileceği gibi fiziksel problemlerin birçoğu çok karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle yapılan teorik çözümler yetersiz kalmaktadır. Bu teorik hesaplamalar yerine nümerik çözümlerin oluşturulması ihtiyaç haline gelmiştir. Nümerik çözümlerde genel yaklaşım olarak, fiziksel problemleri çok küçük sonsuz sayıda parçalara ayırma yolu benimsenmektedir. Şekil 4.4'te nümerik çözümleme mantığı şematik olarak gösterilmiştir [19].

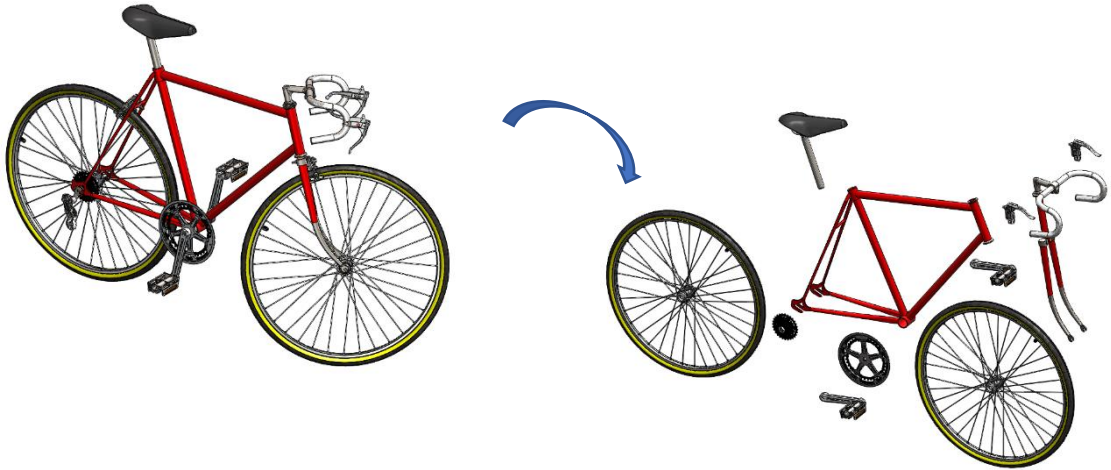


Şekil 4.4. Nümerik çözümleme mantığının şematik gösterimi [19]

Fiziksel problem sonsuz sayıdaki küçük alanlara bölünür ve alanlara bölünürken farklı geometrilere en uygun elementler kullanılır. Şekil 4.4’ te gösterildiği gibi bu elementlerin birleşme noktalarına düğüm noktaları denir ve bu sonsuz sayıdaki her bir düğüm noktası için matematiksel fonksiyonlar tasarlanarak, integral formülasyonları çıkarılır. Problemin çözümüne ulaşmak için her bir düğüm noktasındaki, formülasyonların birleşimi toplanarak bütüne ulaşılır [19].

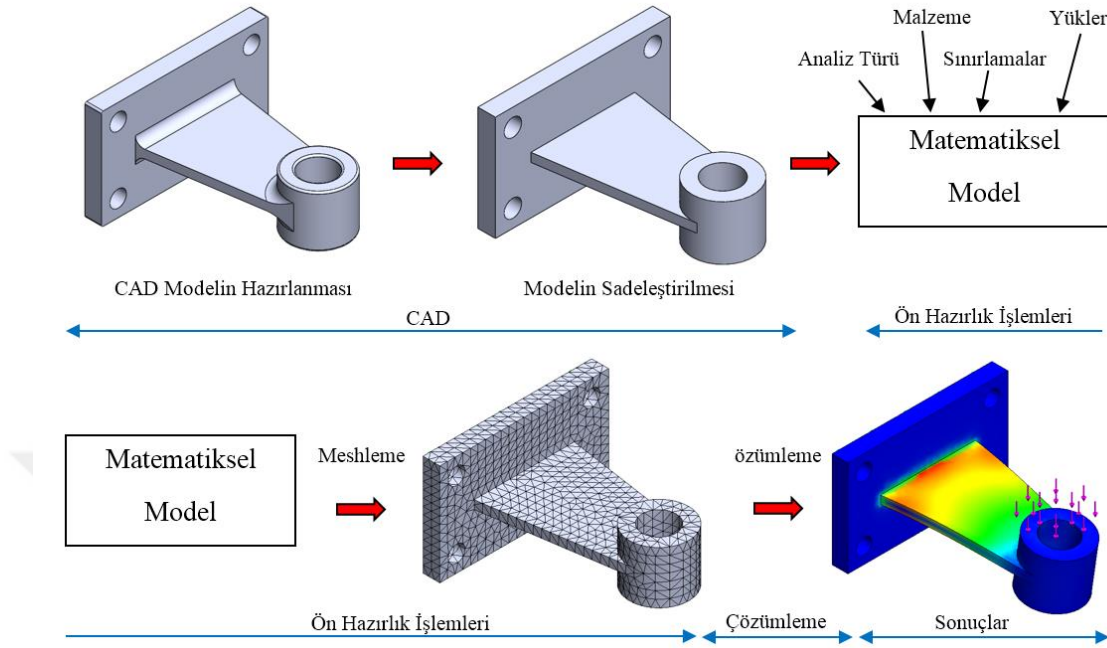
4.2.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması

Sonlu elemanlar analizlerinde işlem basamaklarının algılaması, problemin doğru olarak tanımlanması ve sonucunun doğruluğu açısından çok önemlidir. Örneğin Şekil 4.5’te görülen montaj sisteminde, tüm parçaların detayları ile analizini yapmak mantıklı değildir. Ayrıca böyle bir analizi yapabilmek için çok iyi konfigürasyona sahip bilgisayarlar gereklidir. Analiz yapılırken öncelikle hangi parçanın analizi yapılacağına karar verilmelidir ve o parça kendi içinde detaylı olarak incelenmeli ve analiz edilmelidir [19].



Şekil 4.5. Sonlu elemanlar yönteminde alt montaj mantığı [19]

Sonlu elemanlar yönteminde uygulanan işlem basamakları Şekil 4.6’da şematik olarak gösterilmiştir.



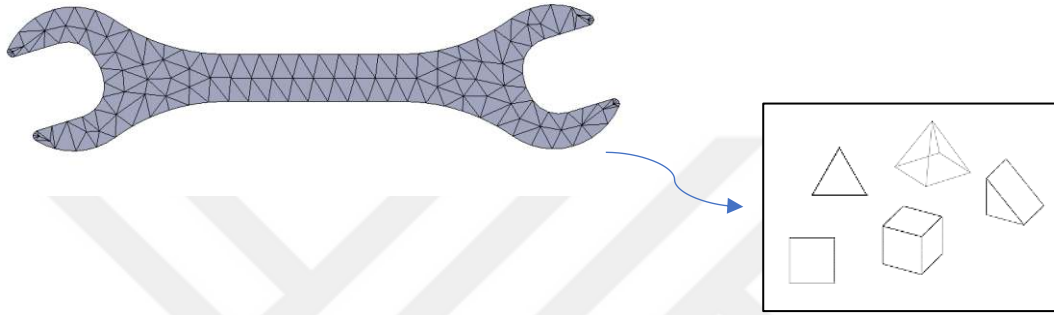
Şekil 4.6. Sonlu elemanlar işlem basamakları [19]

Sonlu elemanlar yönteminde uygulanan işlem basamakları;

- 1) Fiziksel problem tam olarak belirlenir ve gerekli tüm tanımlamalar yapılır. Yapılacak analiz türü belirlenir.
- 2) Problemin 2 veya 3 boyutlu modeli oluşturulur.
- 3) Oluşturulan problem modeli analize uygun halde sadeleştirilir ve küçük parçalara ayrılır.
- 4) Problemdeki malzeme özellikleri tanımlanır ve sınır şartları belirlenir.
- 5) Probleme özgü matematiksel modellemeler oluşturulur.
- 6) Problemin çözümünde istenen veriler belirlenir.
- 7) Problemin matematiksel modelleri çözülür.
- 8) Sonuçlar incelenir, elde edilen bilgiler doğrultusunda analizde veya tasarımda geliştirmeler yapılarak optimum sonuçlar bulunur.

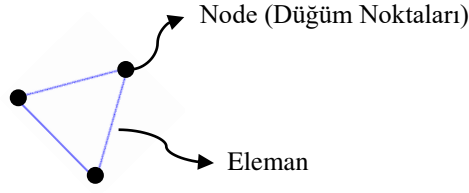
4.2.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Eleman Tipleri

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi sonlu elemanlar yönteminde amaç problemi daha küçük parçalara ayırarak genel çözüme ulaşmaktır. Problemin küçük parçalara bölünmesi ağ örme işlemi veya meshleme denmektedir. Problemin doğru çözümlenebilmesi için problem ağ yapısı oluşturulurken en doğru yöntem seçilmelidir. Sonlu elemanlar metodunda parçaların küçük parçalara bölünmesinde elemanlar kullanılmaktadır.



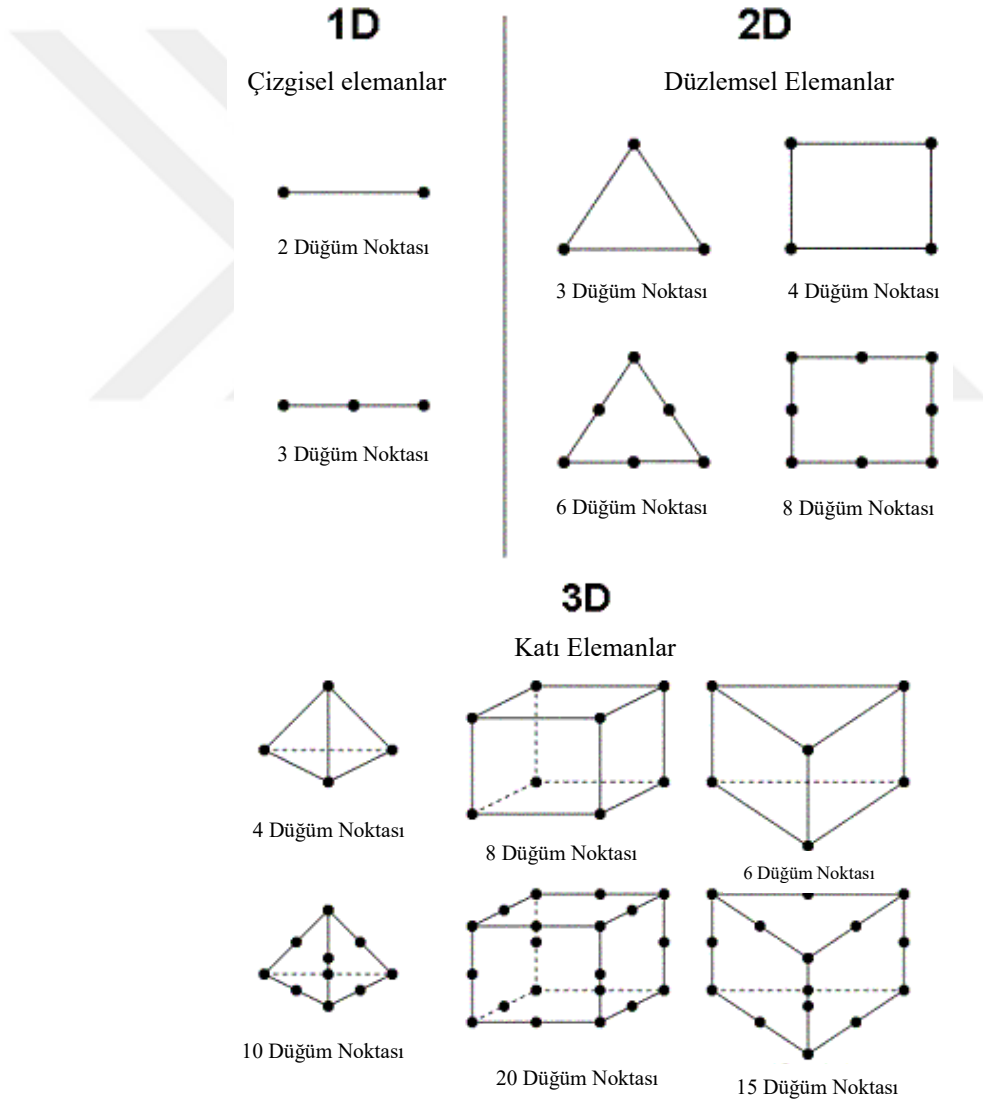
Şekil 4.7. Problemin küçük parçalara bölünmesi ve ağ yapısı [19]

Şekil 4.7’de ağ yapısı oluşturulmuş bir model verilmiştir. Eleman tipleri geometrinin şekline ve problemin türüne göre değişiklik gösterebilir. Eleman belli bir fiziksel alanı ya da hacmi kapsar ve birleşim yerlerine düğüm (node) noktası olarak tanımlanır (Şekil 4.8). Hesaplamalar genellikle birleşim yeri olan düğümler üzerinde gerçekleştirilirken, bu düğümler üzerinde matematiksel denklemler oluşturulur. Problemin büyüklüğüne veya karmaşıklığına göre çok sayıda denklem elde edilebilir. Denklemlerin çözümü ancak bilgisayar yardımı ile bulunabilir. Çözüm sonucunda bulunan değerler düğümler üzerinde bulunan değerlerdir. Bu nedenle problemin doğru sonuçlanması için iyi eleman yapısı ve ona bağlı olarak düğüm noktaları çok önemlidir [18-19].



Şekil 4.8. Eleman ve düğüm noktası [19]

Problemlerin modeline göre kullanılan eleman tipleri farklılık göstermektedir. Şekil 4.9’da farklı eleman tipleri verilmiştir.

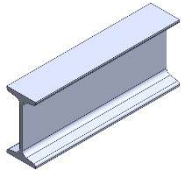
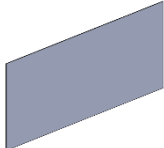
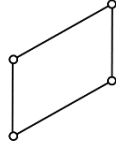


Şekil 4.9. Eleman tipleri, a) 1 boyutlu çizgisel eleman, b) 2 boyutlu düzlem eleman, c) 3 boyutlu katı eleman [19]

Tek boyutlu çizgisel elemanlar, tek boyutlu tel-kafes sistemlerinde kullanılmaktadır. İki boyutlu düzlem elemanlar ise yüzeylerin iki boyutlu stres analizinde kullanılmaktadır. Üç boyutlu elemanlar, daha çok katı ve yüzey modellenmiş parçaların ağ yapısını oluştururken kullanılmaktadır [19].

Tablo 4.1’de mühendislikte yaygın olarak kullanılan temel yapı elementleri ve bunların sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan element türleri görülmektedir.

Tablo 4.1. Fiziksel parçalar ve bunların meshlenmesinde kullanılan elementler [19]

Temel Yapısal Elementler		
Fiziksel Yapı Elemanları	Matematiksel Model Adı	Sonlu Element Türü
	Bar (Çubuk)	
	Beam (Kiriş)	
	Tube, Pipe (Tüp Boru)	
	Shear Panel (Levha)	

4.3.Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanım Alanları

Sonlu elemanlar metodu, özellikle son otuz yılda önemli gelişmeler yaşamış ve yaygınlaşmıştır. Uygulama alanları bugün hala yapılan çalışmalar ile genişletilmektedir. Sonlu elemanlar analizi günümüzde bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle birlikte pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem, yapısal mekanik problemlerinin yanı sıra, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar gibi birçok farklı alan ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır. Yöntemin mühendislik problemlerinde daha yaygın olarak kullanılmasının en önemli nedeni mühendislik problemlerinin birbirine benzer olmasıdır [15-16].

Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanları özdeğer (eigenvalue), denge ve yayılma problemleri olarak 3 ana gruba ayrılır. Kısaca yukarıda bahsi geçen alanların kısaca tarifleri aşağıda açıklanmıştır.

a) Denge Problemleri

Denge problemleri, "sabit (kararlı) hal problemleri" olarak da bilinmektedir, çünkü zamanla sistemin durumunun değişmediği problemlerdir. Denge problemlerine, makina ve inşaat yapılarının gerilme analizleri, katı ve sıvılarda kararlı (zamanla değişmeyen) sıcaklık dağılımları, sürekli akış problemleri gibi problemler örnek olarak gösterilebilir [16].

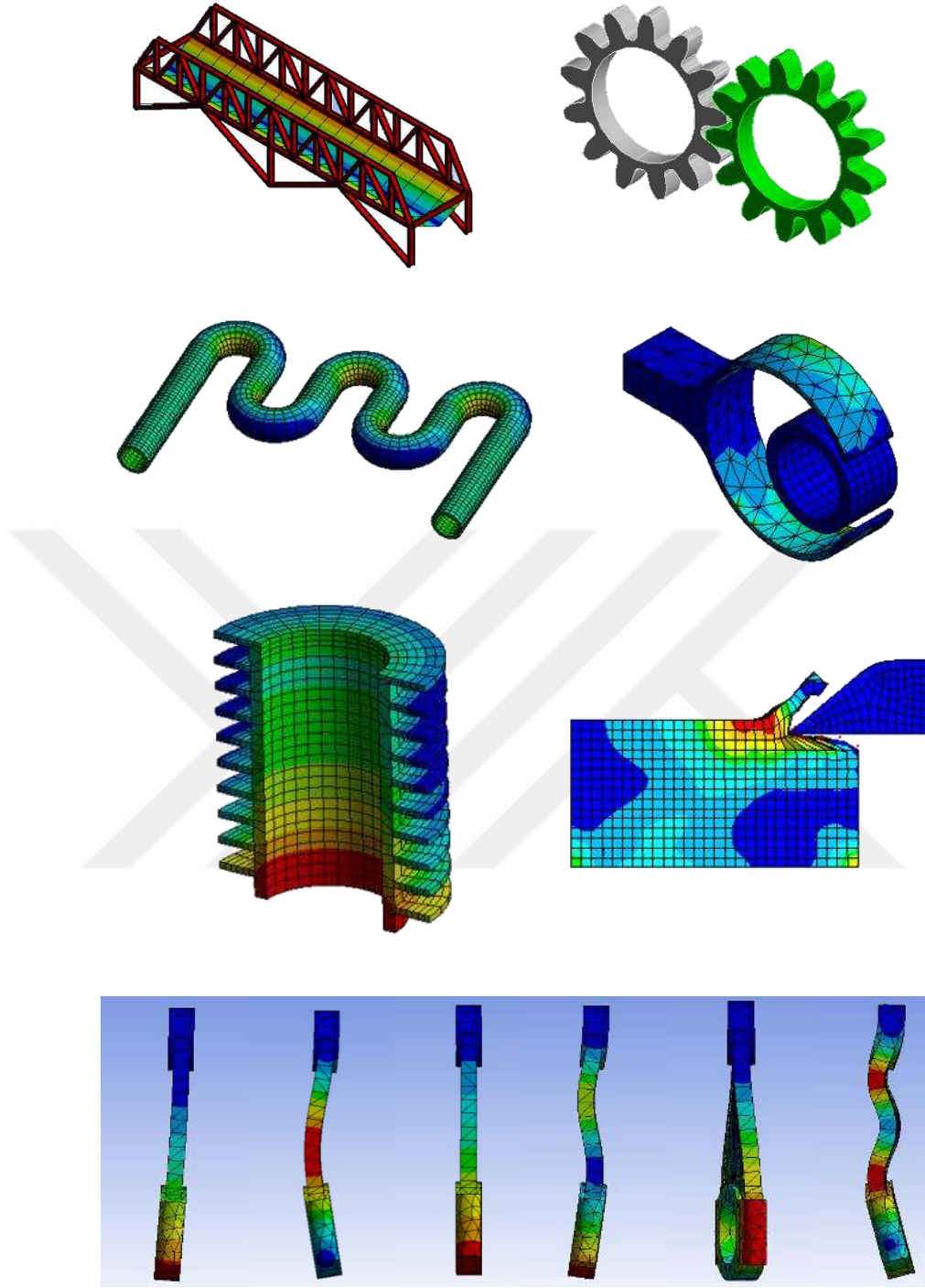
b) Özdeğer Problemleri

Özdeğer problemleri, denge problemlerinin uzantısı olan problem tipidir. Yapıların stabilitesi, öz titreşimleri, lineer viskoelastik sönümleme, burkulma, göl ve limanlarda dalgaların serbest titreşimleri, esnek ve katı kaplarda akışkanların çalkalanması gibi problemler örnek olarak gösterilebilir [14,16].

c) Yayılma Problemleri

Yayılma problemleri, sistemin durumunun zamanla değiştiği, zamana bağlı olan problemlerdir; sistemin tekrarlanan durumları başlangıç şartlarına bağlı olarak belirlenir, bunlara “başlangıç değer problemleri” de denmektedir. Bu gruba giren problemler arasında yapılar da gerilme dalgaları, yapıların darbelere karşı davranışı, viskoelastik problemler, zeminlerden suyun geçişi, katı ve sıvılarda ısı geçişi, kararlı olmayan akışlar örnek olarak gsterilebilir [14,16].

Sonlu elemanlar yöntemi, uzay ve savunma, otomotiv, inşaat, makine endüstrisinde, tüketici malları, enerji, biyomedikal ve medikal uygulamalar, yüksek teknoloji ürünlerinde, yapısal analizlerde, termal hesaplamalarda, akış uygulamalarında, elektromanyetik uygulamalarda ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. şekil 4.10’da sonlu elemanlar analizi uygulamalarına örnekler verilmiştir.



Şekil 4.10. Sonlu elemanlar yönteminin bazı kullanım alanları [19]

4.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Sonlu elemanlar yönteminin geçmişi çok eski tarihlere dayansa da bu yöntem bilgisayar çağının başlamasıyla yaygınlaşmıştır. Bilgisayarların gelişmesiyle birlikte, sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemlerin çözümünde hızlı ve pratik bir yol haline gelmiştir ve birçok avantaj sağlamıştır. Bu avantajların en önemlileri aşağıda belirtilmiştir [13,16].

- Üretilmek istenen ürünlerin üretilmeden önce, istenen servis şartlarına dayanıp dayanmayacağını veya çalışıp çalışmayacağını analiz etmek bu alanda yapılacak olan yatırımlar açısından çok önemlidir. Bu yöntem sayesinde ön görülen şartlar için çalışmalar yapılabilir.
- Prototip ürünler üretilmeden gerekli şartları sağlayıp sağlamadığı anlaşılabilir ve bu alanda ciddi maddi kazançlar sağlayabilir.
- Bu yöntem sayesinde analitik çözüm yöntemiyle çözülemeyecek veya çok zaman alacak çözümler kısa sürelerde çözümlenebilir hale gelmektedir.
- Yöntemin temeli matematiksel formüllere dayandığı için formüller farklı problem türleri için genelleştirilebilir ve küçük değişiklikler ile çok farklı problemlerin çözümünde kullanılabilir.
- Sonlu elemanlar modeli bir sistem için bir kere kurulduktan sonra, sınır şartları sonuçlara göre çok kolay bir şekilde değiştirilebilir ve tekrar tekrar denenebilir. Böylece aranan en iyi şartlar bulunabilir.
- Karmaşık geometride ki parçaların analizinde bu yöntem kolayca uygulanabilir. Küçük parçalara bölme işlemi parçanın gerekli bölgelerinde hassaslaştırılabilir ve böylece sonuçta hassaslaştırılmış olur.
- Bu yöntem farklı ve karmaşık malzeme türlerine kolayca uygulanabilir.
- Sürekli, süreksiz ve değişken yükler parçalara kolaylıkla uygulanabilir.

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları olduğu gibi bazı dezavantaj veya sınırlamaları da vardır, Bu dezavantajlar aşağıda belirtilmiştir.

- Bu yöntem sonucunda bulunan değerlerin bir yaklaşım sonucu bulunduğu unutulmamalı ve sonuçlar çok dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir, gerekli durumlarda deneyler yapılarak karşılaştırılmalıdır.
- Problemin tanımlanması, malzeme özelliklerinin girilmesi, sınır şartlarının doğru uygulanması sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu tanımlamalarda yapılacak çok küçük hatalar problemin sonucunda büyük sapmalara neden olabilir.
- Yöntemin uygulanması için iyi özelliklere sahip bilgisayarlara ihtiyaç vardır. Problemlerin çözüm süreleri çok uzun zaman alabilir.

4.5. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Mukavemet Hipotezleri

Problemlerin çözümünde, hesaplamanın yapılacağı kesit üzerine birden fazla kuvvet uygulanıyor ise bileşke kuvvetin bulunması gerekmektedir. Belirli bir kesit üzerinde uygulanan kuvvetler sonucunda oluşan gerilmeler aynı türden gerilmeler ise cebirsel olarak toplanabilir, aynı türden olmadığı takdirde bu gerilmeleri cebirsel olarak toplamam mümkün olmamaktadır. Örneğin, kesitteki gerilmeler çekme, basma ve eğilme gerilmelerinden meydana geliyor ise bu gerilmeleri cebirsel olarak toplanabilir. Hesaplamalar sonucu bulunan bileşke gerilme, malzemenin akma dayanımı (σ_a) ile karşılaştırılarak, yük altındaki kesitin hasara uğrayıp uğramayacağı belirlenir. Fakat kesitte normal gerilme, kesme ya da burulma gerilmesi aynı anda etki ediyorsa bu gerilmeleri cebirsel olarak toplayamayız. Bu durumlar da kesitteki maksimum normal gerilme (σ_{max}) ve maksimum kayma gerilmesi (τ_{max}) ayrı ayrı hesaplanır. Bu değerler malzemelere uygun mukavemet hipotezleri ile karşılaştırılarak yük altındaki davranışlar ve kesitin hasara uğrayıp uğramayacağı belirlenir. Hasar kriterleri sünek ve gevrek malzemeler için 2 bölümde incelenir. Aşağıda bu teoriler açıklanmaktadır [7].

Sünek malzemeler için:

- 1- Maksimum Kayma Gerilmesi Teorisi (Tresca)
- 2- Maksimum Distorsiyon Enerjisi Teorisi (Von Mises)

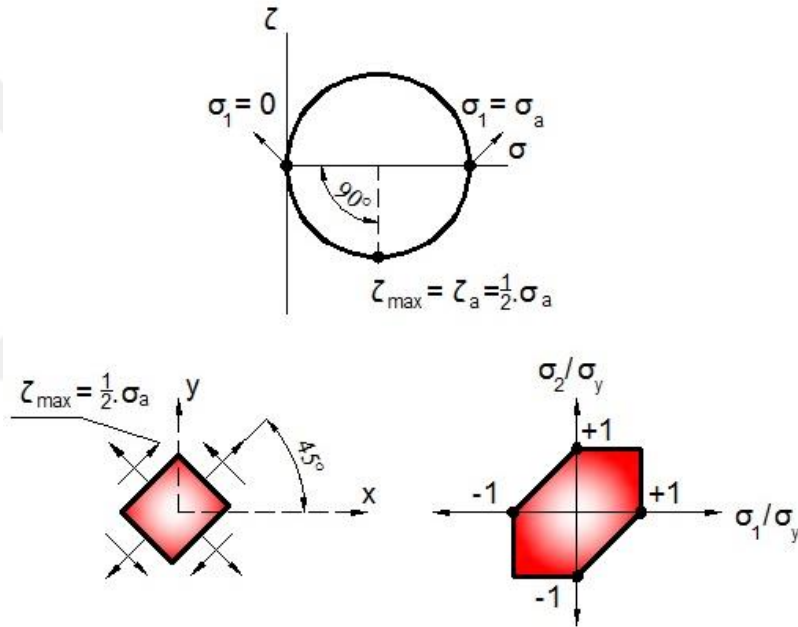
Gevrek malzemeler için:

3- Maksimum Asal Gerilme Tesorisi

4- Coulomb Mohr Kırılma Kriteri (2)

4.5.1. Maksimum Kayma Gerilmesi Teorisi (Tresca)

Bu teoriye göre kesitte oluşan maksimum kayma gerilmesi, çekme deneyindeki $\frac{1}{2}\sigma_a$ karşılık gelen kayma akma akmasına (τ_a) geldiğinde hasar meydana gelir. Tresca teorisinin şematik gösterimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir [18].



Şekil 4.11. Tresca teorisinin şematik gösterimi [18]

Maksimum kayma gerilmesi teorisinin (tresca) matematiksel bağıntısı aşağıda belirtilmiştir.

$$\tau_{max} = \tau_a = \frac{1}{2}\sigma_a \quad (4.4)$$

ya da

$$\tau_{tresca} = \tau_a = \frac{1}{2}\sigma_a \quad (4.5)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\sigma_a = \frac{1}{2}|\sigma_1 - \sigma_2| = |\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_a \quad (4.6)$$

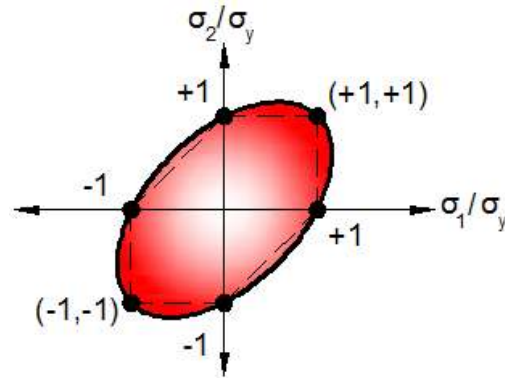
Şekil 4.11 için;

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_a} - \frac{\sigma_2}{\sigma_a} = \pm 1 \quad (4.7)$$

bağıntısı elde edilir.

4.5.2. Maksimum Distorsiyon Enerjisi Teorisi (Von Mises)

Von Mises teorisine göre bileşik gerilme altında birim hacime gelen distorsiyon enerjisi, çekme deneyindeki akma noktasına (σ_y) eşit olması halinde malzemede akma başlar. Von Mises teorisinin şematik gösterimi Şekil 4.12’de verilmiştir [18].



Şekil 4.12. Von Mises teorisinin şematik gösterimi [7]

Maksimum distorsiyon enerjisi teorisinin (Von Mises) matematiksel bağıntısı aşağıda belirtilmiştir.

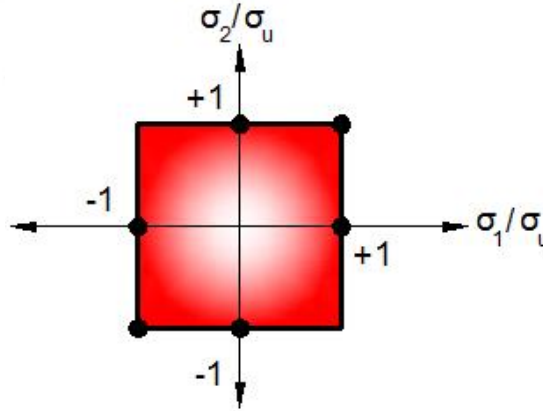
$$U_d = (U_d)_a = \sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_y^2 = (\sigma_{vm})^2 \leq \sigma_y \quad (4.8)$$

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_y^2 = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_y^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_y}\right)^2 = \pm 1 \quad (4.9)$$

bağıntısı elde edilir.

4.5.3. Maksimum Asal Gerilme Teorisi

Gevrek malzemeler plastik deformasyon göstermeden, aniden kırılma eğilimindedir. Maksimum asal gerilme teorisine göre, gevrek bir malzemenin maksimum gerilmesi σ_1 , malzemenin çekme deneyinden bulunan en büyük normal gerilmeye (σ_u) eşit olması halinde hasar başlar. Maksimum asal gerilme teorisinin şematik gösterimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir [18-19].



Şekil 4.13. Maksimum asal gerilmelerin şematik gösterimi [7]

Maksimum asal gerilme teorisinin matematiksel bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$|\sigma_1| = \sigma_u \text{ ve ya } |\sigma_2| = \sigma_u \quad (4.10)$$

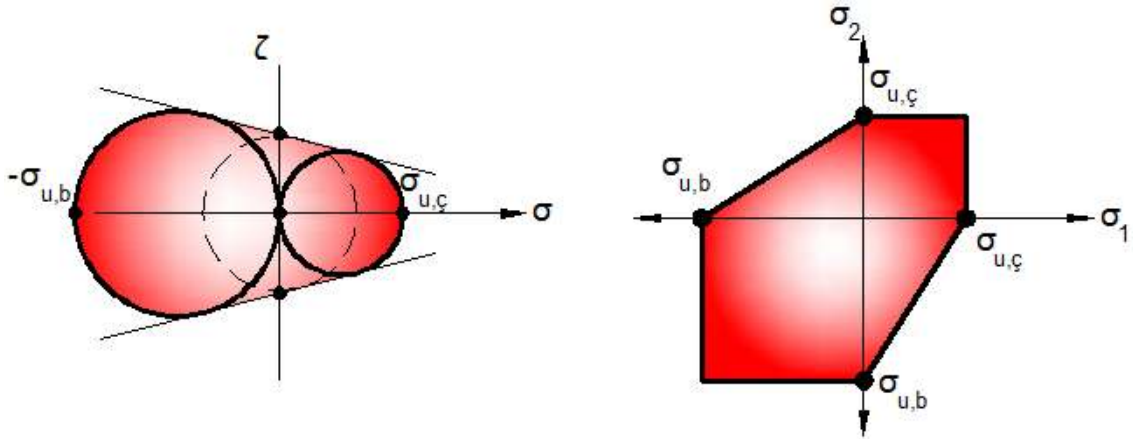
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_u} = \pm 1 \quad (4.11)$$

veya

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_u} = \pm 1 \quad (4.12)$$

4.5.4. Coulomb Mohr Kırılma Kriteri

Sertleştirilmiş takım çeliklerinin çekme ve basma gerilmeleri birbirine eşit iken, gri dökme demirlerin basma ve çekme gerilmeleri birbirilerine eşit değildir. Ve basma gerilmeleri takım çeliklerine göre daha yüksektir. Bu tür malzemelerde hem basma hem de çekme gerilmelerine göre hesaplama yapılması gerekmektedir. Coulomb mohr kırılma kriterinin şematik gösterimi Şekil 4.14’te verilmiştir [18].



Şekil 4.14. Coulomb Mohr kırılma kriterinin şematik gösterimi [18]

Coulomb Mohr kırılma kriterinin matematiksel bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{u,\zeta}} - \frac{\sigma_3}{\sigma_{u,\zeta}} \leq 1 \quad (4.13)$$

4.6. Sonlu Elemanlar Paket Programları

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi karmaşık ve çözülmesi uzun zaman alan problemlerin bilgisayarların gelişimiyle birlikte, çözülmesi hem zaman tasarrufu açısından hem de işlemin daha doğru sonuçlar vermesi açısından çok önemlidir. Özel problemlerin çözümünde, genel matematiksel formülasyonların kullanılabilir olması, sonlu elemanlar metodunun kolay kullanılabilir, güçlü ve çok amaçlı bilgisayar programları olmasını sağlamıştır. Bu alanda çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları geliştirilmiştir [13,14].

Günümüzde düşük fiyatlı mikrobilgisayarların geliştirilmesi ve yaygınlaşması ile birçok sonlu elemanlar paket programları mikrobilgisayarlar üzerinde çalışabilecek şekilde üretilmiştir ve geliştirilmeye devam etmektedir [13].

Sonlu elemanlar yöntemi için birçok paket program geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri ABAQUS, NASTRAN&PATRAN, ANSYS olarak sayılabilir. Bu programlar genel çözümlere ve özel bazı çözümlere cevap verebilmektedir, fakat özel problemlerin çözümü için geliştirilmiş farklı sonlu elemanlar paket programları da vardır. Bunlardan bazıları: AutoForm (Sac metal şekillendirme ve kalıp endüstrisi), Moldex3D (Plastik parça ve kalıp tasarımları), Cast Designer Die Casting (Metal Kalıba Döküm), Simufact Forming (Plastik Şekillendirme)

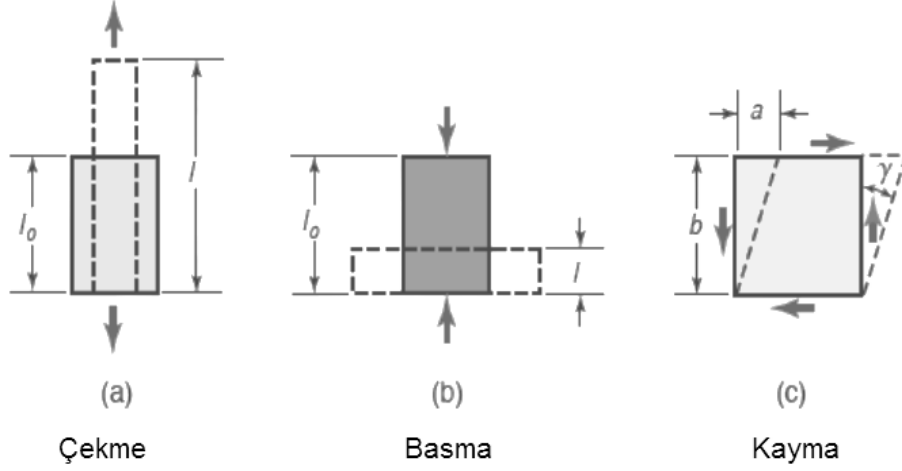
Problemlerin doğru tanımlanmasında 2 veya 3 boyutlu modelin doğruluğu da oldukça önemlidir. Sonlu elemanlar paket programlarının çoğunda modelleme yapılabilmektedir. Fakat karmaşık modellerin bu programlarda modellenmesi oldukça zordur ve zaman alır. Bu yüzden 2 veya 3 boyutlu modellerin oluşturulması amacıyla diğer tasarım programları kullanılmaktadır. Bunların bazıları: Catia, Solidworks, NX, Autocad, Inventör v.b

5. PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞİMİ VE KRİSTAL YAPI

5.1. Plastik Şekil Değişimi

Plastik şekil değişimi katı haldeki bir cismin, kütle kaybı yaşamadan ve kristal yapısında değişime uğramadan sadece geometrik şeklini değiştirmek amacıyla plastik deformasyon yöntemi ile gerçekleştirilen üretim yöntemlerinden birisidir. Plastik şekil verme yöntemi metal şekillendirme alanındaki hemen hemen tüm sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Plastik şekil verme yöntemlerinin tümünde malzeme çekme, basma veya kayma (Şekil 5.1) gibi üç temel gerilmeden biri veya bir kaçının etkisiyle plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirir.



Şekil 5.1 Üç temel gerilme şekli [3]

Malzemede plastik şekil değişiminin başlayabilmesi için malzeme üzerinde etki eden gerilmelerin toplamı malzemenin akma sınırına ulaşması gerekmektedir. Plastik şekil değişimi sırasında genellikle Şekil 5.1’de belirtilen gerilme türlerinden bir kaç aynı anda malzemeye etki etmektedir. Bu durumda malzeme üzerine etkiyen kuvvetlerin toplamının bulunması gerekmektedir ve bu işlem için basit tek gerilme denklemleri yetersiz kalmaktadır. Farklı gerilme türleri aynı anda malzeme üzerine

uygulandığında akma şartının başlayabilmesi için bazı şartları yerine getirmiş olması gerekmektedir. Bu şartlar akma kriterleri olarak tanımlanmaktadır.

Metaller için iki önemli akma kriteri belirlenmiştir. Bunlar ;

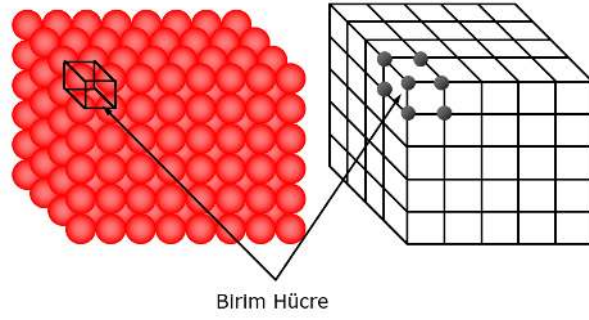
- Tresca (Maksimum kayma gerilmesi) kriteri
- Von Mises (Distorsiyon Enerjisi) kriteridir.

Plastik şekil değişiminin başlayabilmesi için bu kriterler kritik öneme sahiptir. Bu kriterlerin detaylı anlatımları ve bu kriterler için kullanılan hesaplamalar tezin sonlu elemanlar bölümünde detaylı olarak incelenmiştir. Teorik olarak bu hesaplamalar kullanılsa da plastik şekil değişimi çok kompleks bir işlem olduğu için pratikte farklı bir çok nedenden dolayı kesin hesaplamalar yapılamamaktadır. Genel olarak bu hesaplamaların hassasiyeti $\pm\%20$ olarak ön görülmektedir. Fakat bu hata oranını ortadan kaldırmak için tüm mühendislik hesaplamalarında olduğu gibi bir güvenlik katsayısı kullanılarak bu sorun giderilmektedir [3-4].

Plastik şekil değişimi malzemenin kristal yapısını değiştirmeden gerçekleşen bir üretim yöntemidir. Şekil değişimi sırasında malzemenin kristal yapısındaki dizilimlerde bir takım değişiklikler gerçekleşmektedir. Bir sonraki bölümde malzemelerin kristal yapıları incelenecektir.

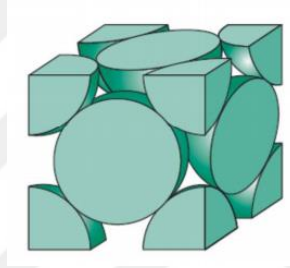
5.2. Metallerin Kristal Yapısı

Metallerin yapısını, metalleri oluşturan atomların üç boyutlu uzayda belirli bir tekrarlı yapıya (düzene) göre dizilimleri oluşturmaktadır. Metallerin karakteristik özelliklerini bu atomların dizilimleri belirlemektedir. Örneğin sıvı haldeki bir metalin katılaşması sırasında kimyasal yapısında bir değişiklik meydana gelmezken sadece atomlar arasındaki dizilimleri değişmektedir ve sıvı haldeki metal katılaşmaktadır. Atomlar arasındaki düzenli dizilim tüm malzeme boyunca tekrarlı bir yapıdadır. Bir metalin tüm karakteristik özelliklerini gösteren en küçük düzenli atom dizilimi birim hücre olarak adlandırılmaktadır. Şekil 5.2'de birim hücre şematik olarak gösterilmiştir [3].



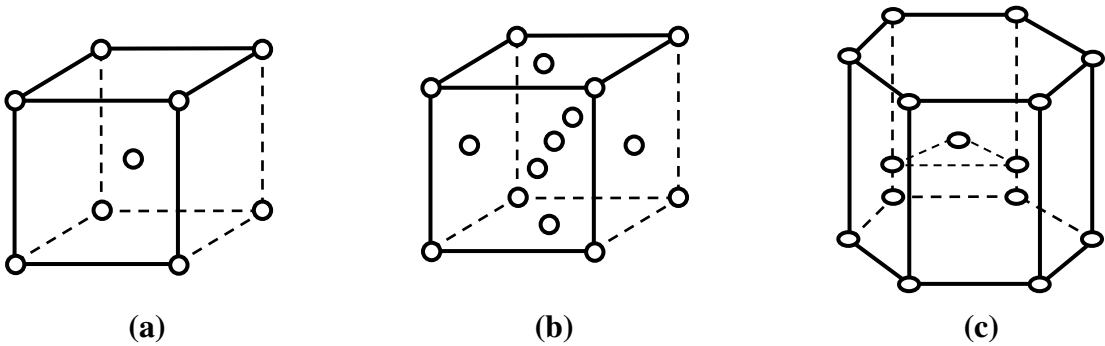
Şekil 5.2. Birim hücrenin şematik gösterimi

Kristal yapılar şematize edilirken metallerde bulunan atomlar, katı küreler şeklinde gösterilirken bu atomlar komşu atomları ile temas halinde olduğu kabul edilir. (Şekil 5.3)



Şekil 5.3. Kristal yapının şematik gösterimi

Metallerde en çok karşılaşılan üç birim hücre modeli yüzey merkezli kübik, hacim merkezli kübik ve sıkı düzen hegzagonal olarak isimlendirilir. Bu birim hücre modellerinin şematik gösterimi Şekil 5.4'te verilmiştir.

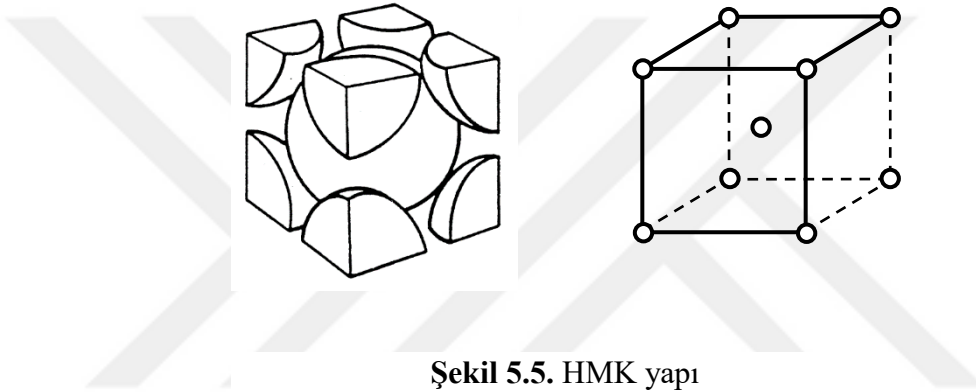


Şekil 5.4. Metallerde en çok rastlanan birim hücre modelleri a) Hacim merkezli kübik b) yüzey merkezli kübik c) Sıkı düzen hegzagonal

Metallerin plastik şekil değişimi bu kristal yapıların diziliminin değişmesiyle gerçekleşmektedir. Bu yapıları daha detaylı inceleyelim.

5.2.1. Hacim Merkezli Kübik Yapı (HMK)

Hacim merkezli kristal yapıda Şekil 5.5'teki gibi küpün her köşesinde birer atom ve merkezinde de bir atom bulunmaktadır. Köşe noktalarındaki atomlar diğer atomlar ile ortak kullanılmaktadır. Bu durumda köşelerdeki 1/8 lik atomlar ve merkezindeki atomun toplamı HMK yapının atom sayısını vermektedir ve 2 olarak bulunur.



Şekil 5.5. HMK yapı

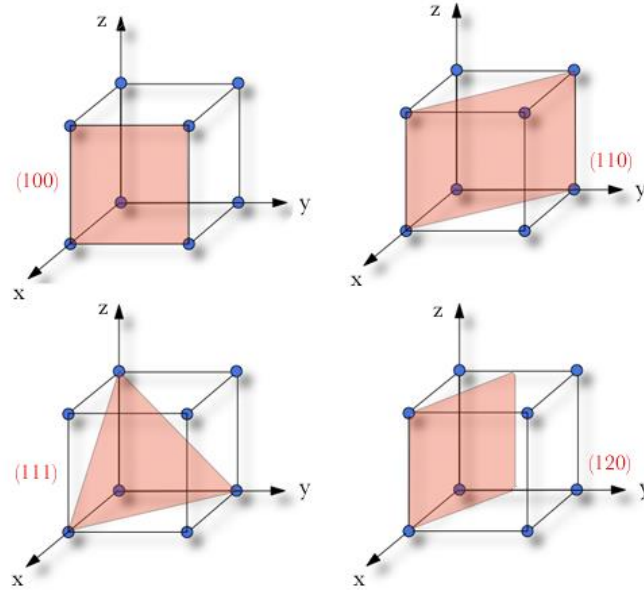
Kristal yapıda komşu atomlarla ortak olarak kullanılan atom sayısı koordinasyon sayısı olarak tanımlanır. Bu durumda HMK şeklindeki kristal yapı için koordinasyon sayısı 8'dir.

Plastik şekil verme sırasında kristal yapıdaki atomların diziliş sıklığı malzemenin şekillendirebilme yeteneğini etkilemektedir. Atomların diziliş sıklığını belirten ifade atomsal dolgu faktörüdür (ADF). Atomsal dolgu faktörünün formülü denklem 5.1'te verilmiştir.

$$(ADF) = \frac{(Atom\ Sayısı/Hücre) \times (Her\ Atomun\ Hacmi)}{Birim\ Hücre\ Hacmi} \quad (5.1)$$

Verilen formül kullanılarak HMK yapı için atomsal doluluk faktörü hesaplandığında ADF değeri 0.68 olarak bulunur.

Metaller şekil değişimi sırasında yakın temas halindeki atomlar doğrultusunda hareket ederler. Şekil değişimi sırasında birim hücredeki belirli doğrultular ve düzlemler özel öneme sahiptir. Şekil değişimi bu düzlemler üzerinde bu doğrultular yönündeki atom dizilimlerinin kayması ile gerçekleşir. Şekil 5.6’da kübik birim hücrenin doğrultuları ve bazı kayma düzlemleri verilmiştir [20].



Şekil 5.6. Kübik birim hücrede bazı kayma düzlemleri

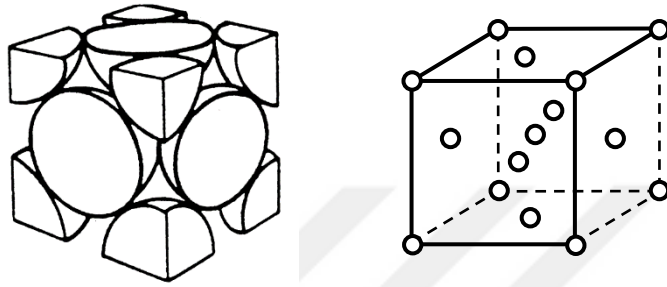
Tablo 5.1’de HMK yapı için kayma düzlemi, kayma doğrultusu ve toplam kayma sistemi sayısı verilmiştir.

Tablo 5.1. HMK yapı için kayma doğrultusu, düzlemi ve sistemi

Kristal Yapı	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
HMK	[110]	4 x 3 = 12	<111>

5.2.2. Yüzey Merkezli Kübik Yapı (YMK)

Yüzey merkezli kristal yapıda Şekil 5.7'deki gibi küpün her köşesinde birer atom ayrıca her yüzeyinde de bir atom bulunmaktadır. Köşe noktalarındaki 8 atom ve yüzey merkezlerindeki 4 atom diğer atomlar ile ortak kullanılmaktadır. Bu durumda köşelerdeki 1/8 lik atomlar ve 6 yüzeyindeki yarım atomların toplamı YMK yapının atom sayısını vermektedir ve 4 olarak bulunur.



Şekil 5.7. YMK Yapı

Bir önceki kısımda yapılan tanımlamalara göre YMK şeklindeki kristal yapı için koordinasyon sayısı 12'dir. Verilen formül kullanılarak YMK yapı için atomsal doluluk faktörü hesaplandığında ADF değeri 0.74 olarak bulunur [20].

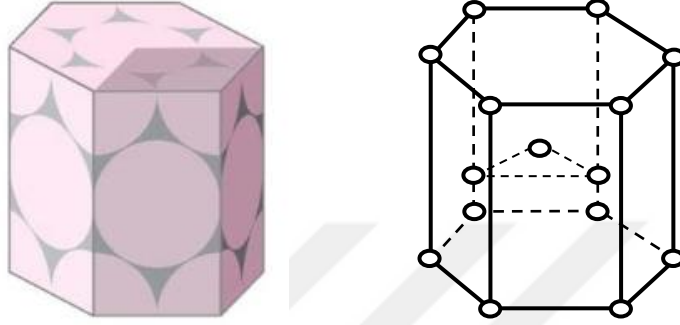
Tablo 5.2'de YMK yapı için kayma düzlemi, kayma doğrultusu ve toplam kayma sistemi sayısı verilmiştir.

Tablo 5.2. YMK yapı için kayma doğrultusu, düzlemi ve sistemi

Kristal Yapı	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
YMK	$\langle 110 \rangle$	$[111]$	$4 \times 3 = 12$

5.2.3. Sıkı Düzen Hegzagonal Yapı (SDH)

Sıkı düzen hegzagonal yapı HMK ve YMK yapılara göre daha karmaşıktır. Bu kristal yapıda kübik sistem bulunmaz. Kristal yapıda Şekil 5.8'deki gibi alt ve üst altıgen yüzeylerin 12 köşesinde 1/6 atom, alt ve üst yüzeylerin merkezinde bulunan iki atomun yarısı ve orta düzlemdeki 3 atom ile beraber toplam 6 atom bulunmaktadır.



Şekil 5.8. SDH Yapı

Bir önceki kısımda yapılan tanımlamalara göre SDH şeklindeki kristal yapı için koordinasyon sayısı YMK yapıdaki gibi 12'dir. Verilen formül kullanılarak SDH yapı için atomsal doluluk faktörü hesaplandığında yine YMK yapıdaki gibi ADF değeri 0.74 olarak bulunur [20].

Tablo 5.3'te SDH yapı için kayma düzlemi, kayma doğrultusu ve toplam kayma sistemi sayısı verilmiştir.

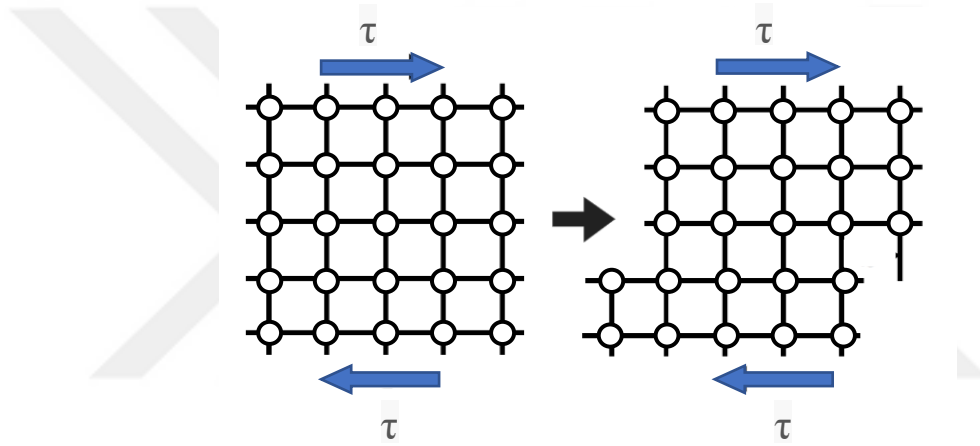
Tablo 5.3. SDH yapı için kayma doğrultusu, düzlemi ve sistemi

Kristal Yapı	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
SDH	$\langle 1120 \rangle$	$[0001]$	$1 \times 3 = 3$

5.3. Plastik Şekil Vermenin Kristal Yapıdaki Mekanizmaları

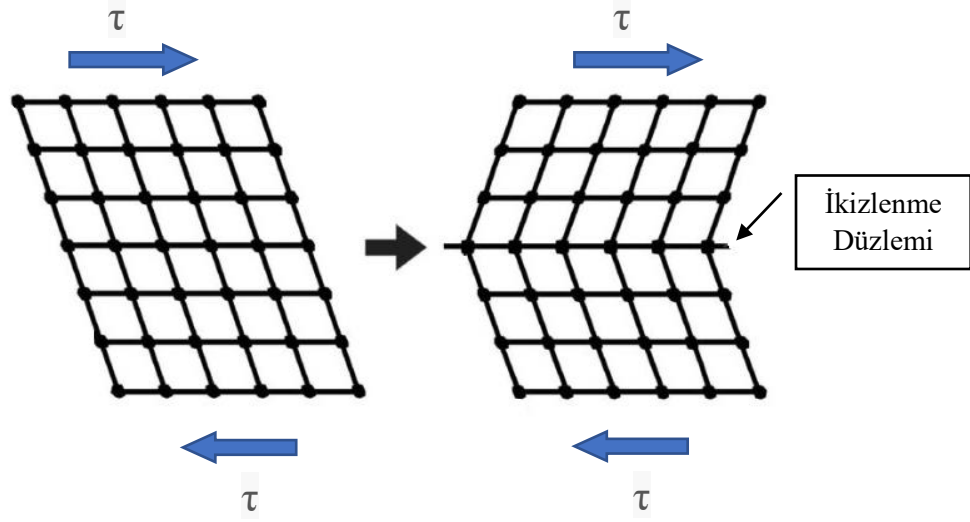
Kristal yapıda plastik şekil değişiminin oluşmasını sağlayan 2 temel mekanizma bulunmaktadır. Bunlar: Kayma ve ikizlenme mekanizmalarıdır.

Kayma mekanizmasında, birbiri ardına tekrar eden birim hücrelerin bir bölümü ana yapıdaki dizilimden, bu yapıya bitişik bir düzlemde (Kayma düzlemi) bir doğrultu (Kayma doğrultusu) boyunca birbiri üzerinde birim hücredeki atom uzaklığının tam sayı katı kadar ötelenerek kayma gerçekleşir. Şekil 5.9'da tek kristalde meydana gelen kayma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir [3-20].



Şekil 5.9. Kayma mekanizması şematik gösterimi

İkizlenme mekanizmasında ise, genellikle hacim merkezli kübik yapıda veya sıkı düzen hegzagonal yapıda meydana gelmektedir. Genellikle, şekil değiştirme hızının ani (darbeli yükleme) olarak değiştiği durumlarda, genelde soğuk şekillendirme yönteminde veya yapı değişimi sırasında pekleşmenin oluşması gibi nedenlerle kaymanın zor olduğu durumlarda gerçekleşir. İkizlenme mekanizmasında, kayma olması durumunda kristal yapıdaki birim hücrelerin bir bölümü kayma düzlemine göre ana kristal yapı dizilimine göre simetrik bir yansıma durumuna geçerek yeni bir dizilim oluşturur. İkizlenme mekanizmasının gerçekleşme olayı tek kristal yapı için Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilmiştir [3].



Şekil 5.10. İkizlenme mekanizması şematik gösterimi

İkizlenme mekanizmasında atomların hareket miktarı kayma mekanizmasına göre çok daha az miktardır. Bu nedenle ikizlenme mekanizması ile oluşan kayma tipinde büyük şekil değişimleri meydana gelmez. İkizlenme mekanizması çok kısa sürede gerçekleşen ani değişimlerken, kayma mekanizmasında bu süre daha fazladır [3].

Plastik şekil değişimi, kristal yapı diziliminin değişmesi ile meydana geldiği görülmektedir. Kristal yapıda kayma eğilimi, yapıdaki atom yoğunluğunun en fazla olduğu düzlemde artış göstermektedir. Kayma doğrultuları ve kayma düzlemleri atomik yapıdaki en yoğun (en büyük) olduğu doğrultulardadır [3-4-20]. Kayma düzlemi ve kayma doğrultusundan oluşan sistemin bütününe kayma sistemi adı verilmektedir. Metallerin, plastik şekil değişimine uğrayabilmesi için bir metalde çok sayıda kayma sistemi bulunmaktadır. Tablo 5.4'te metallerin 3 temel kristal yapının kayma sistemleri sayısı karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Kristal yapıda kaymanın başlama bilmesi için, her iki plastik şekil değişimi mekanizmasında da kayma doğrultusunda kristale etkiyen dış kuvvetin belirli bir kritik değerin üzerinde olması gerekmektedir. Tablo 5.5'te bazı metallerin oda sıcaklığındaki kritik kayma gerilmeleri verilmiştir [21].

Tablo 5.4. Kristal yapılardaki kayma sistemleri [21]

Kristal Yapı	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
HMK	$\langle 111 \rangle$	[110]	$4 \times 3 = 12$
YMK	$\langle 110 \rangle$	[111]	$4 \times 3 = 12$
SDH	$\langle 1120 \rangle$	[0001]	$1 \times 3 = 3$

Tablo 5.5. Bazı metallerin kristal yapıları ve kritik kayma gerilmeleri [21]

Metal	Kristal Yapı	Kritik Kayma Gerilmesi (N/mm ²)
Bakır	YMK	0,49
Alüminyum	YMK	0,79
Magnezyum	SDH	0,44
Titanyum	SDH	13,71
Demir	HMK	27,44
Molibden	HMK	71,70

Tablo 5.4 ve 5.5 incelendiğinde metallerin plastik şekil değiştirebilme kabiliyetinin, kristal yapı türüne göre değiştiği gözlemlenmektedir. Plastik deformasyon için gerekli olan kritik kayma gerilmelerinin değerleri incelendiğinde şekil değiştirme kabiliyeti en yüksek yapı YMK yapı daha sonra HMK yapı, en kısıtlı yapı ise SDH yapı olarak görülmektedir.

6. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada sonlu elemanlar metodunu kullanılarak, haddeleme işleminde farklı haddeleme parametreleri analiz edilmiş ve optimum haddeleme parametrelerinin bulunması ve bu parametrelerin haddeleme sürecini ve öncesinde yapılan tasarım çalışmalarını nasıl etkilediğinin araştırılmıştır. Ayrıca farklı kristal yapıdaki malzemeler kullanılarak, farklı parametrelerde yapılan analizlerin malzeme türüne göre nasıl davrandığı incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan malzemelerin kristal yapıları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Çalışmada incelenen malzemelerin kristal yapıları

Malzemeler	Al2024	MgAZ31	Ti-6Al-4V
Kristal Yapısı	YMK	SDH	SDH

Haddeleme parametreleri olarak;

- 3 farklı merdane çapı değeri incelenmiştir. Merdane ölçüleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Çalışmada incelenen merdane çapları

	Model 1	Model 2	Model 3
Merdane Çapı	610mm	710mm	810mm

- Her bir malzeme türü için 10 farklı değerde μ sürtünme katsayısı incelenmiştir. Kullanılan sürtünme katsayıları Tablo 6.3'te tabloda verilmiştir.

Tablo 6.3. Çalışmada incelenen merdane çapları

0,1	A2024
0,2	A2024
0,3	A2024
0,4	A2024
0,5	A2024
0,6	A2024
0,7	A2024
0,8	A2024
0,9	A2024
1	A2024

6.1. Malzemeler

Bu çalışmada farklı özellikler de olan 3 malzeme kullanılmıştır. Bunlar Al2024, MgAZ31 ve Ti-6Al-4V malzemeleridir.

6.1.1. Al2024

Alüminyum dünya üzerinde en çok bulunabilen elementlerin başında gelmektedir. Mühendislik malzemeleri anlamında da çelikten sonra en çok kullanılan metaldir. Alüminyumun kullanım bakımından tarihi çelik kadar eskiye dayanmasa da, keşfinden sonra ve üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle günümüzde üstün özellikleri

sayesinde diğer bilenen metal türlerinden çok daha fazla üretilmekte ve kullanılmaktadır. Alüminyumun göze çarpan en önemli özelliği yoğunluğunun, çeliğin çeliğin yoğunluğuna oranla yaklaşık 3 te biri kadar daha düşük olmasıdır. Alüminyumun diğer önemli özelliklerinden bazıları, her ortamdaki korozyon direncinin fazla olması, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması, kolay işlenebilir olması, sıcak ve soğuk şekillendirme yeteneğinin iyi olması ve doğada çok miktarda bulunması olarak sayılabilir.

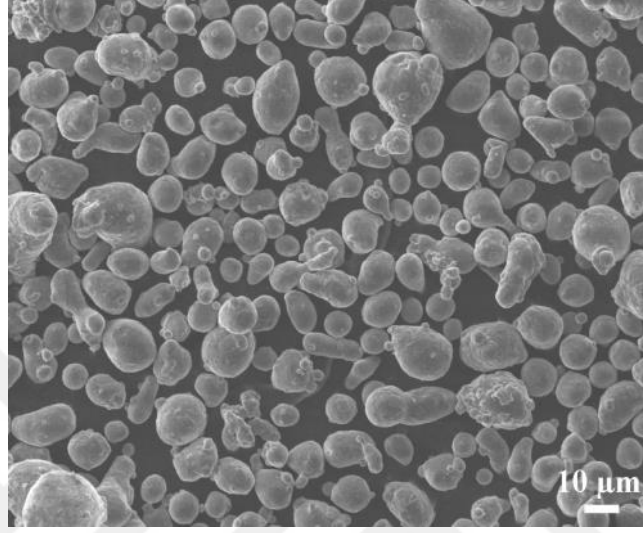
Alüminyumun tüm bu özelliklerinin iyi olması nedeniyle savunma, havacılık, otomotiv, elektronik, inşaat, gıda, enerji ve neredeyse tüm alanlarda kullanılan günümüzün en önemli mühendislik malzemelerindendir. Alüminyumun özelliklerini geliştirmek ve hangi alanda kullanılmak isterse o alandaki özelliklerinin güçlendirilmesi için genelde alaşım halinde kullanılmaktadır. En önemli özelliklerinden birisi alüminyum ve alaşımları tekrar tekrar eritilerek geri dönüştürülebilen malzemelerdir.

Bu çalışmada incelediğimiz Al2024 alaşımını Al-Cu-Mg alaşım grubu içerisinde bulunmaktadır. Al 2024 malzemesinin kimyasal bileşenlerinin yüzde ağırlık oranı tablo 6.4’ te verilmiştir.

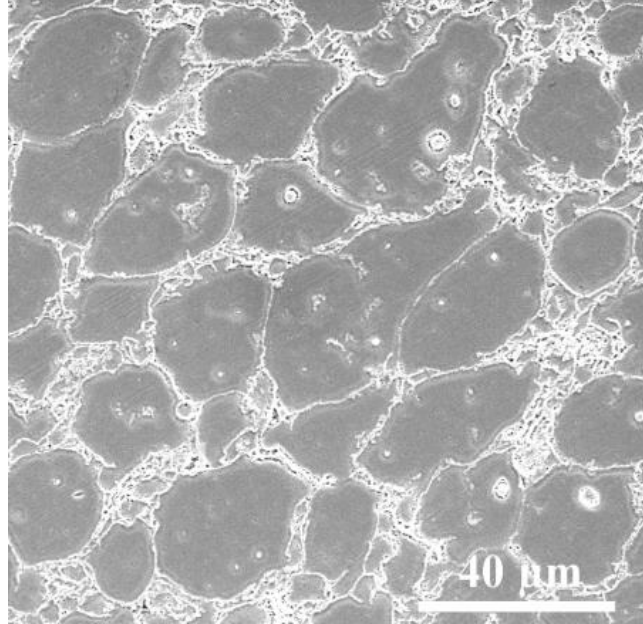
Tablo 6.4 Al2024 alaşımının kimyasal bileşenleri

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi+Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	3,8-4,9	0,1	0,3-0,9	1,2-1,8	0,25	0,15	0,15	Kalan

Al 2024 alaşımının mekanik değerleri ısıt ışlem tőrune gşe değişmektedir. Fakat genel olarak Al2024 alaşımının mekanik ۆzellikleri çekme mukavemeti 470 MPa, akma mukavemeti 325 MPa ve yüzde uzama miktarı 20 dir. şekil 6.1’de Al2024 alaşımının mikroyapı görüntüleri ve şekil 6.2’de SEM görünümü verilmiştir.



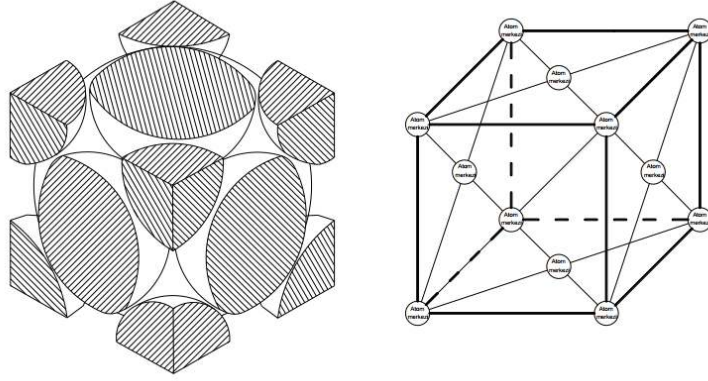
şekil 6.1. Al2024 alaşımının Mikroyapı Görünümü [21]



şekil 6.2. Al2024 Alaşımının SEM Görünümü [21]

6.1.1.1. Al₂O₃ Alaşımının Kristal Yapısı

Al₂O₃ alaşımının kristal yapısı yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdadır. Daha önceki bölümlerde YMK yapının detaylı anlatımı yapılmıştır. Şekil 6.3'te YMK yapının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.3. YMK kristal yapısı

Tablo 6.5'te Al₂O₃ alaşımının kristal yapısının özellikleri özet halinde verilmiştir.

Tablo 6.5. Al₂O₃'ün kristal yapı özellikleri

Atom Sayısı	Koordinasyon Sayısı	ADF	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
4	12	0.74	<110>	[111]	12

6.1.2. MgAZ31

Magnezyum metaller arasında en hafif elementlerden birisidir. Hafifliği sayesinde özellikle havacılık, uzay sanayi ve otomotiv sanayisinde kullanılmaktadır. Magnezyum alüminyum ve çelikten sonra dünya üzerinde en çok bulunan element olmasına rağmen, diğer metallerden daha maliyetli olduğu için kullanım oranı diğerlerine göre çok daha azdır. Fakat günümüzde hafifliğin önemli olduğu sektörlerdeki ihtiyacı karşılamak için, son yıllarda magnezyum ve magnezyum alaşımları ile ilgili ciddi çalışmalar yapılmış ve gelişen teknoloji ile birlikte üretim maliyetleri düşürülerek magnezyumun üretim ve kullanım oranı ciddi oranda artış göstermektedir.

Magnezyumun en önemli özelliği yoğunluğunun düşük yani hafif olmasıdır. Magnezyumun yoğunluğu 1.74 gr/cm'dir ve bu alüminyuma göre %33, demire göre %75 daha düşüktür. Magnezyum, alüminyum ve demirin yoğunlukları tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Mg, Al ve Fe'nin yoğunlukları

Element	Sembol	Yoğunluk (gr/cm ³)
Magnezyum	Mg	1.74
Alüminyum	Al	2.7
Demir	Fe	7.87

Magnezyum hafifliğinin yanında yüksek mukavemet/ağırlık oranı, rijitlik, iyi sönümleme, yüksek ısı iletkenliği, dökülebilme, plastik şekil verme ve kolay işlenebilme gibi üstün özelliklere sahiptir. Ancak magnezyumun aşınma direnci ve korozyon direnci düşüktür. Bu özellikleri güçlendirmek amacıyla magnezyum

alaşımları kullanılmaktadır. Saf magnezyumun dayanımı alaşımlandırıldığında öncekine göre iki veya üç kat artmaktadır. Tüm bu özellikler sayesinde magnezyum ve alaşımları, hafifliğin ve yüksek mukavemet/ağırlık oranının ihtiyaç duyduğu otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinde endüstriyel anlamda kullanılmaktadır.

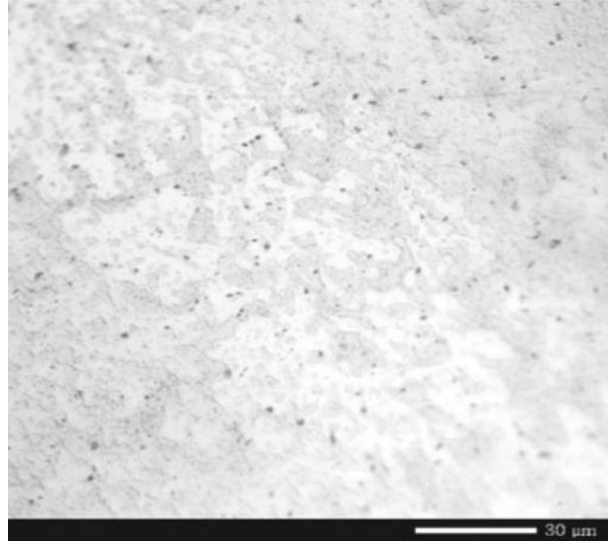
Magnezyum alaşımlarının plastik deformasyon miktarı sıkı düzen hegzagonal yapısından dolayı kısıtlıdır. Büyük oranda şekil değişimi istendiğinde yüksek veya ılık sıcaklıklarda deforme edilmektedir.

Bu çalışmada MgAZ31 alaşımının haddelenmesi incelenmiştir. MgAZ31 alaşımının kimyasal bileşenlerinin yüzde ağırlık oranları tablo 6.7’ de verilmiştir.

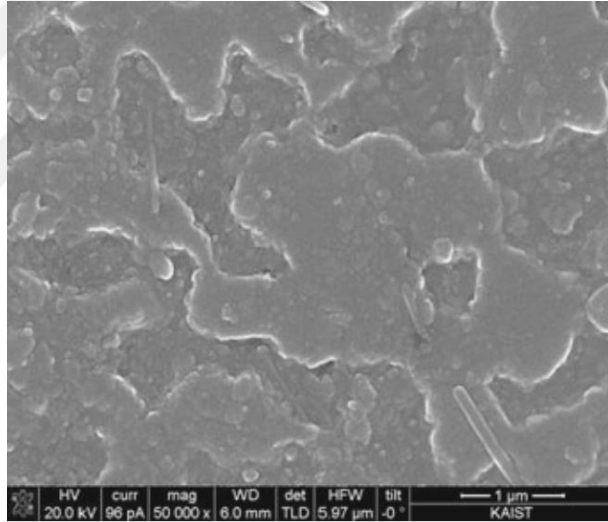
Tablo 6.7. MgAZ31 alaşımının kimyasal yapısı

Al	Zn	Fe	Cu	Si	Mn	Mg
3.069	1.133	0.019	0.001	0.131	0.486	Geri Kalan

MgAZ31 alaşımının mekanik özellikleri çekme mukavemeti 290 MPa, elastisite modülü 45GPa ve yüzde uzama miktarı 15 dir. Şekil 6.4’te MgAZ31 alaşımının mikroyapı görüntüleri ve Şekil 6.5’te ise SEM görünümleri verilmiştir.



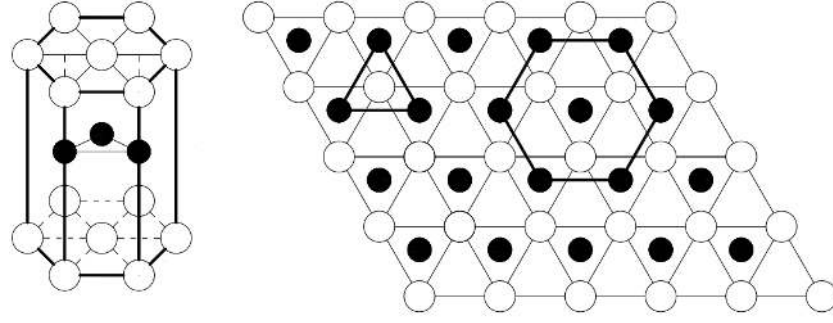
Şekil 6.4. MgAZ31 alaşımasının mikroyapı görünümü [23]



Şekil 6.5. MgAZ31 alaşımasının SEM görünümü [23]

6.1.2.1. MgAZ31 Alaşımasının Kristal Yapısı

MgAZ31 alaşımasının kristal yapısı sıkı düzen hegzagonal (SDH) yapıdadır. Daha önceki bölümlerde SDH yapının detaylı anlatımı yapılmıştır. Şekil 6.6’da SDH yapının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.6. SDH kristal yapı

Tablo 6.8’de MgAZ31 alaşımının kristal yapısının özellikleri özet halinde verilmiştir.

Tablo 6.8. MgAZ31’in kristal yapı özellikleri

Atom Sayısı	Koordinasyon Sayısı	ADF	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
6	12	0.74	$\langle 1120 \rangle$	[0001]	3

6.1.3. Ti-6Al-4V

Titanyum doğada demir, alüminyum ve magnezyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Titanyumun endüstriyel anlamda kullanımı diğer elementlere göre çok daha sonra başlamıştır. Bunun nedeni titanyumun elde edilmesi ve işlenmesinin çok zor ve maliyetli olmasıdır. Buna karşın titanyumun özellikle korozyona karşı mükemmel dayanımı ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde günümüzdeki teknolojinin gelişimi ile birlikte ihtiyaç haline gelen özelliklere sahip bir malzemedir.

Titanyum dayanıklılık, rijitlik, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yoğunluğunun demire göre düşük olması, korozyona karşı mükemmel direnci, yüksek ısılara

dayanması, gibi avantajlarıyla ön plana çıkmasını sağlarken üretim maliyetlerinin çok yüksek olması tek dezavantajı olarak görülmektedir. Üretim maliyetinin yüksek olması titanyumun havacılık, uzay, otomotiv gibi sanayilerin özel alanlarında kullanılmasına neden olmaktadır. Ayrıca titanyumun yüksek biyoyumluluk derecesine sahiptir. Son yıllardaki titanyum üretimindeki gelişmeler ile birlikte biyomedikal alanda kullanımı ciddi oranda artmıştır.

Titanyum yüksek mekanik özelliklerinin yanında, alüminyum ve demir elementlerinin arasındaki yoğunluğa sahip olması da önemli avantajlarından birisidir. Tablo 6.9’da titanyum, magnezyum, alüminyum ve demirin yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 6.9. Titanyumun ve diğer elementlerin yoğunlukları

Element	Sembol	Yoğunluk (gr/cm ³)
Titanyum	Ti	4.54
Magnezyum	Mg	1.74
Alüminyum	Al	2.7
Demir	Fe	7.87

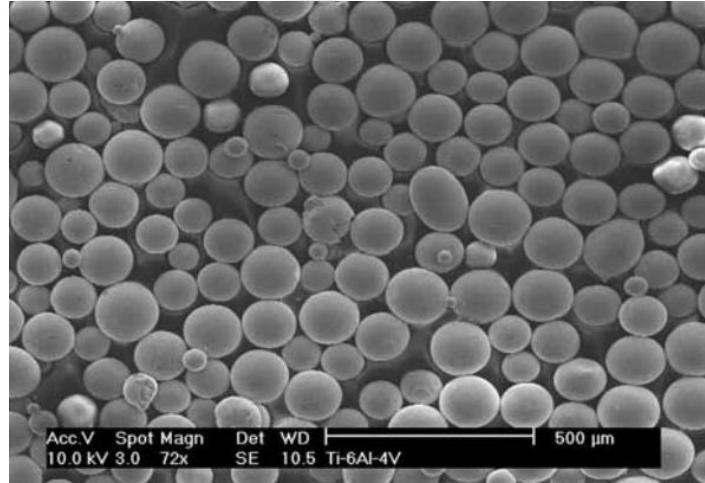
Titanyum kullanım şartlarına göre istenilen özelliklerin geliştirilebilmesi nedeniyle genellikle sanayide alaşım şeklinde kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımı, endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan titanyum alaşımlarındandır. Bu alaşım işlenebilirlik ve mekanik açıdan mükemmel özelliklere sahiptir. Ti6Al4V alaşımı, havacılık, otomotiv ve denizcilik ekipmanları gibi hafiflik ve dayanım değerinin önemli olduğu uygulamalar için en iyi performansı sunar.

Bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşımlının haddelenmesi incelenmiştir. Ti-6Al-4V alaşımlının kimyasal bileşenlerinin yüzdece ağırlık oranları Tablo 6.10’ da verilmiştir.

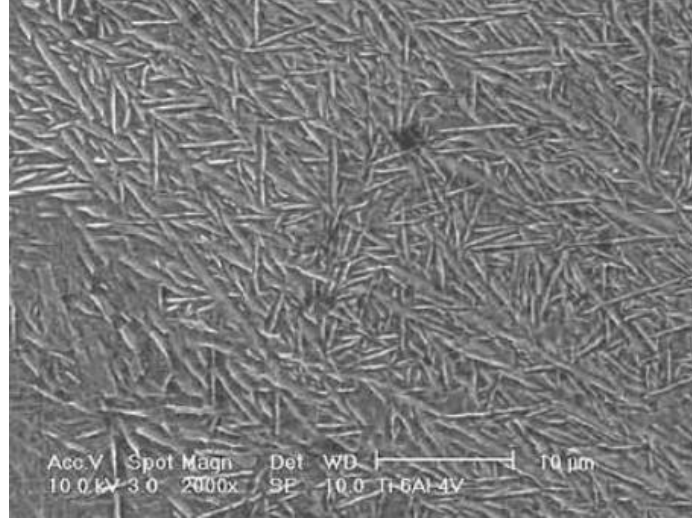
Tablo 6.10. Ti-6Al-4V alaşımlının kimyasal yapısı

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
6	4	0.03	0.1	0.15	0.01	0.003	Geri Kalan

Ti-6Al-4V alaşımlının mekanik özellikleri çekme mukavemeti 1020 MPa, akma dayanımı 950Mpa, elastisite modülü 120GPa ve yüzde uzama miktarı 14 dir. Şekil 6.7’de Ti-6Al-4V alaşımlının mikroyapı görüntüleri ve Şekil 6.8’de ise SEM görünümeleri verilmiştir.



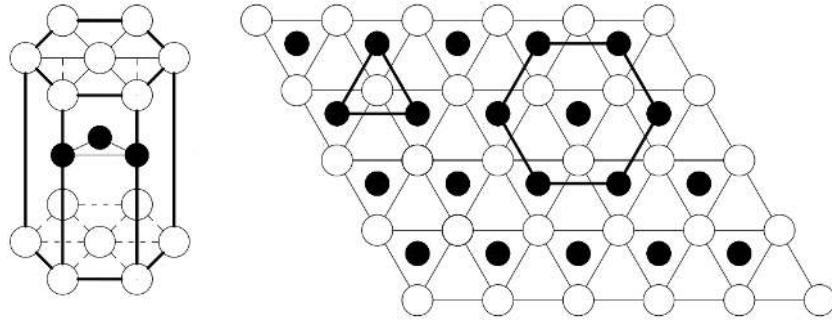
Şekil 6.7. Ti-6Al-4V alaşımlının mikroyapı görünümü [24]



Şekil 6.8. Ti-6Al-4V alaşımasının SEM görünümü [24]

6.1.3.1. Ti-6Al-4V Alaşımasının Kristal Yapısı

Ti-6Al-4V alaşımasının kristal yapısı sıkı düzen hegzagonal (SDH) yapıdır. Daha önceki bölümlerde SDH yapının detaylı anlatımı yapılmıştır. Şekil 6.9’da SDH yapının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.9. SDH kristal yapı

Tablo 6.11’de Ti-6Al-4V alaşımasının kristal yapısının özellikleri özet halinde verilmiştir.

Tablo 6.11. Ti-6Al-4V kristal yapı özellikleri

Atom Sayısı	Koordinasyon Sayısı	ADF	Kayma Doğrultusu	Kayma Düzlemi	Toplam Kayma Sistemi
6	12	0.74	[2110]	[0001]	3

Bu çalışmada incelenen Al2024 – MgAZ31 ve Ti-6Al-4V malzemeleri alaşım halindedir. Malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyeti, daha önceki bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı gibi, kristal yapılarına ve bu yapılarda kaymanın (şekil değişiminin) meydana gelebilmesi için kritik kayma kuvvetine bağlıdır. Bu alaşımların saf haldeki kritik kayma gerilmeleri Tablo 6.12’de verilmiştir.

Tablo 6.12. Al, Mg ve Ti kritik kayma gerilmeleri [21]

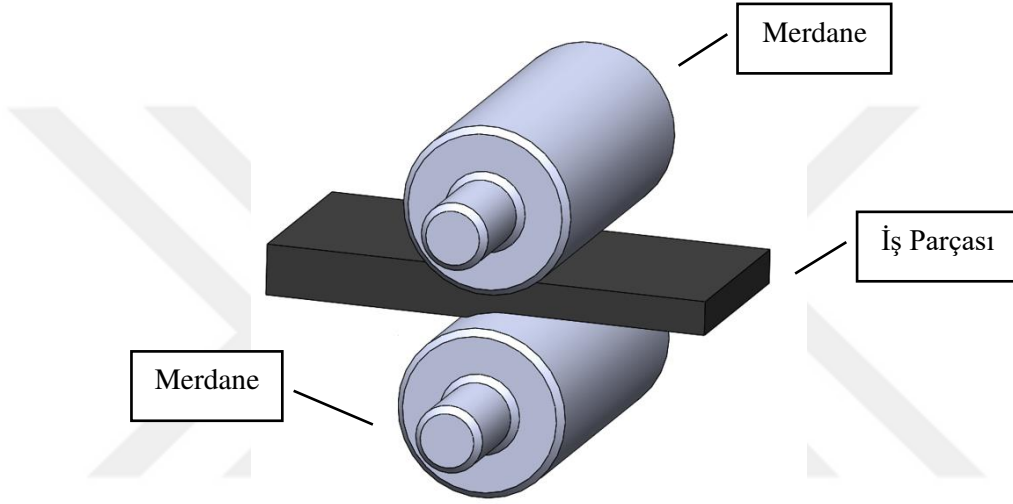
Metal	Kristal Yapı	Kritik Kayma Gerilmesi (N/mm ²)
Alüminyum	YMK	0,79
Magnezyum	SDH	0,44
Titanyum	SDH	13,71

Tablo 6.12 incelendiğinde SDH yapısına rağmen, plastik şekil değiştirme kabiliyeti, kritik kayma gerilmesi değeri en düşük olan magnezyum metalinin en iyi olduğu görülmektedir. Daha sonra alüminyum ve şekil değiştirme kabiliyeti en kısıtlı metal titanyumdur.

6.2. Metot

6.2.1. Haddeme Sistemlerinin Modellenmesi

Bu çalışmada haddeme parametrelerinin incelenmesi amacıyla 3 farklı model sistemi kurulmuştur. Haddeme sistemi Şekil 6.10'da gösterildiği gibi kabaca merdane adı verilen 2 silindirik parça ve iş parçası olarak adlandırılan plastik şekil değişiminin gerçekleştiği parçadan oluşmaktadır.



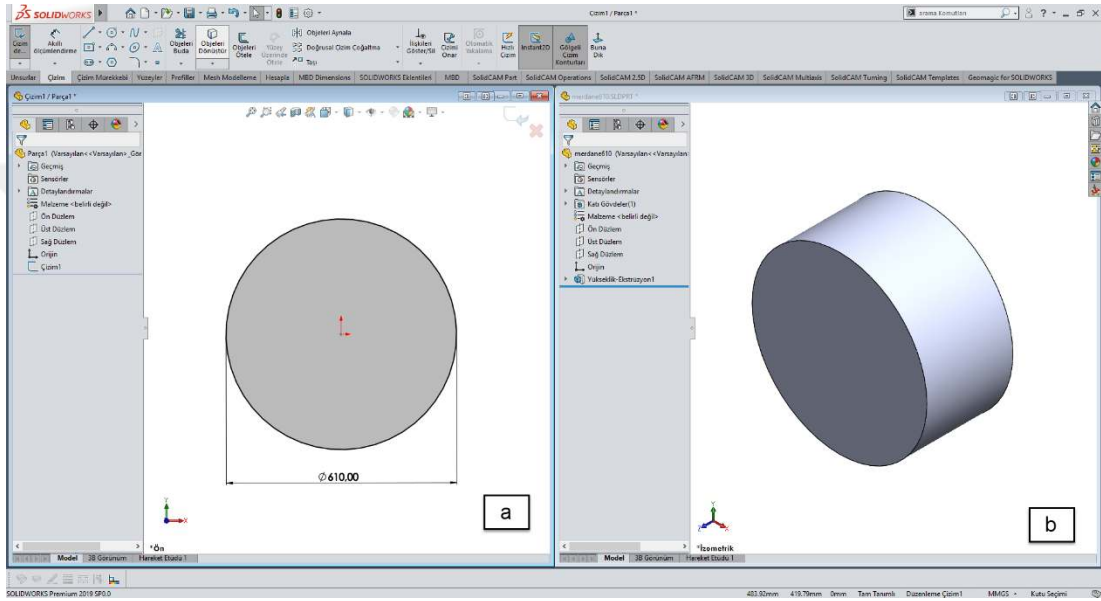
Şekil 6.10. Haddeme sisteminin elemanları

İncelenen haddeme sisteminde Şekil 6.10' da 610mm, 710mm ve 810mm olmak üzere üç farklı merdane çapı kullanılmış ve iş parçasının kalınlığı 25,4mm den 20.3mm ye düşürülmektedir. Bu işlem soğuk haddeme ile gerçekleştirilmiştir.

Haddeme sisteminin modellenmesinde tasarım programı olarak Solidworks programı kullanılmıştır. Solidworks programı 1993 yılında kurulan Dassault Systems firması tarafından geliştirilmiştir. Solidworks ürün tasarım süreçlerini hızlandıran, tasarım maliyetini azaltan ve tasarım süreçlerini önemli derecede kısaltan bir CAD-CAM-CAE yazılımıdır. Solidworks CAD programları içinde en yaygın olarak kullanılan programlardan bir tanesidir. Catia, AutoCAD, Nx Unigraphics gibi

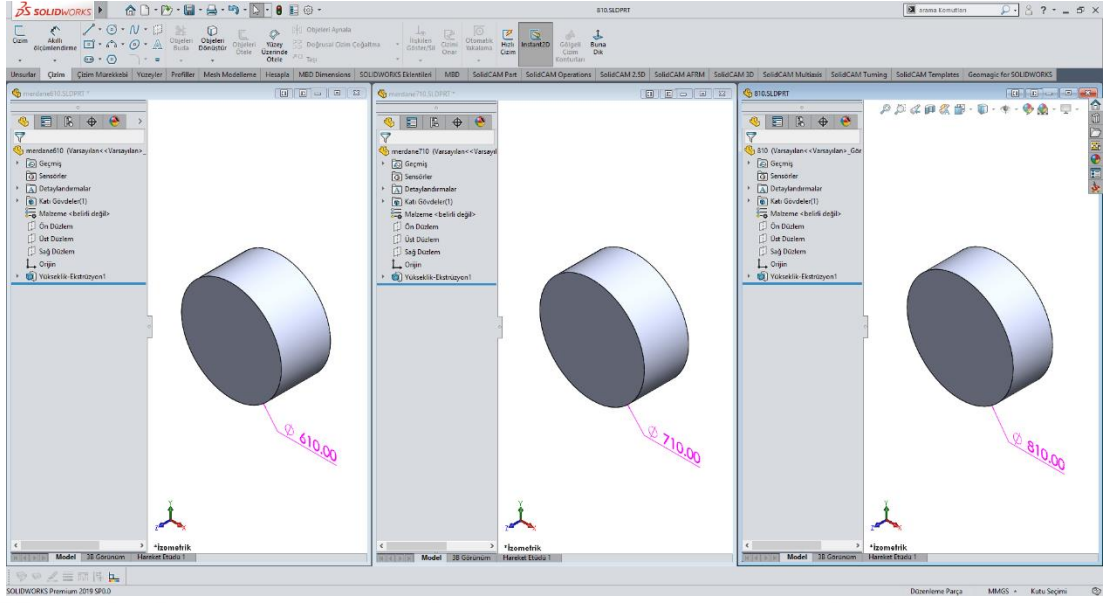
programlar da tasarım, üretim ve analiz süreçlerinde yaygın olarak kullanılan diğer programlardır.

Solidworks programında ilk olarak üç farklı çapta olan merdanelerin, 3 boyutlu tasarımları yapılmıştır. Solidworks programında 3 boyutlu tasarım aşasında öncelikle 2 boyutlu geometri çizildikten sonra bu geometriye kalınlık veya derinlik verilerek 3 boyutlu hale getirilir. Şekil 6.11’de merdane tasarımı için bu süreç gösterilmiştir.



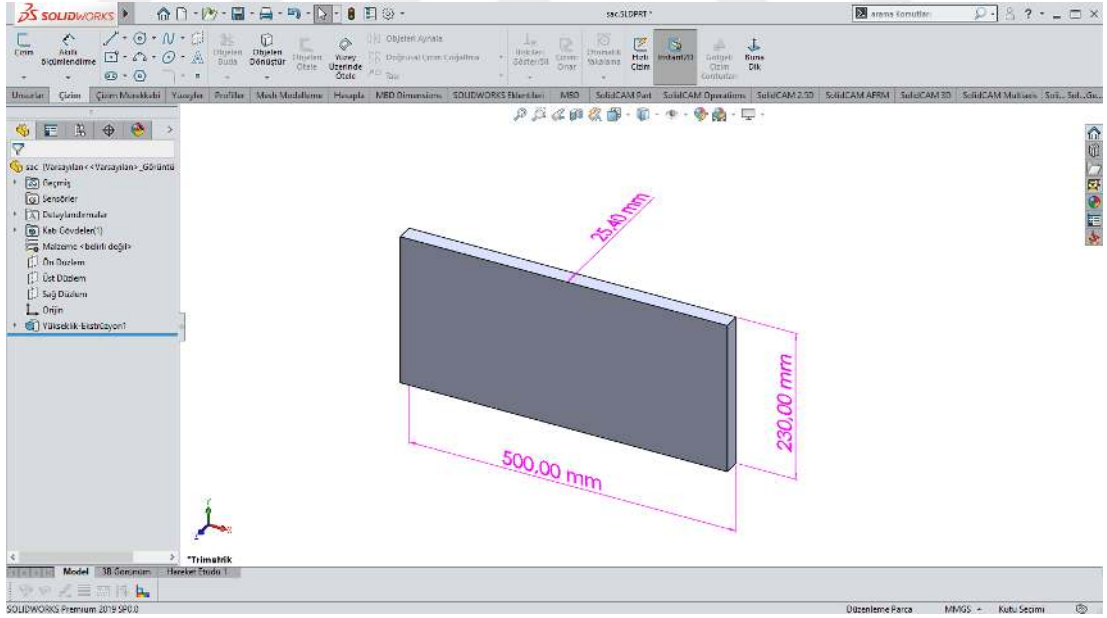
Şekil 6.11. Solidworks programında 3 boyutlu tasarım süreci a) İki boyutlu tasarım
b)Üç boyutlu tasarım

Şekil 6.11’de gösterilen tasarım süreci ile aynı şekilde 610mm, 710mm ve 810mm çaplarındaki merdaneler tasarlanmıştır (Şekil 6.12).



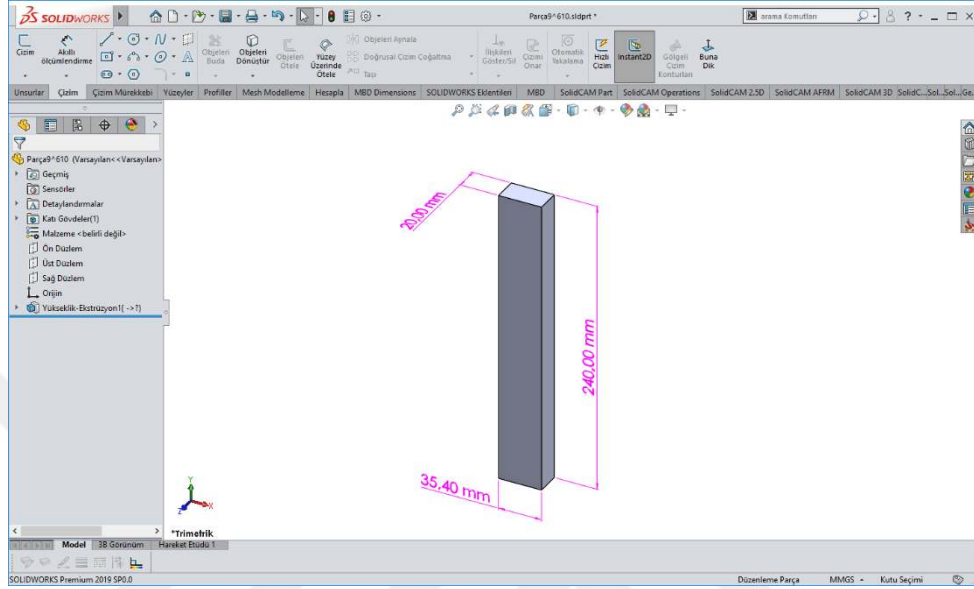
Şekil 6.12. Üç farklı çaptaki merdanelerin 3D modelleri

Daha sonra 500X230X25,4mm ebatlarındaki sac iş parçası üç boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. İş parçasının 3D modeli

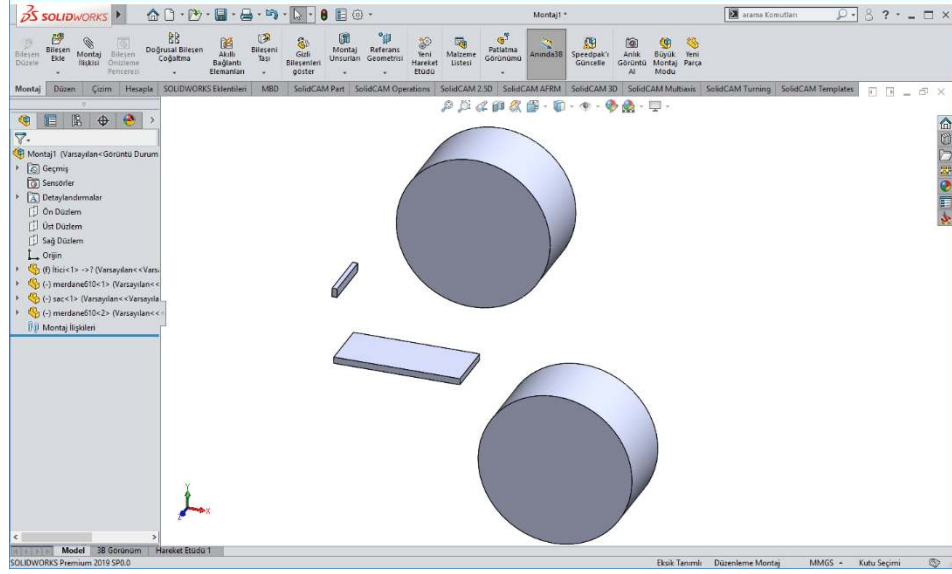
Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar programında haddeleme sisteminin başlayabilmesi için iş parçasına, itici olarak adlandırılan bir parça ile kısa süreli ani bir yükleme yapılması gerekmektedir. Bu nedenle haddeleme sistemine ek olarak itici parçanın üç boyutlu tasarımı yapılmıştır (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. İtici parçanın 3D modeli

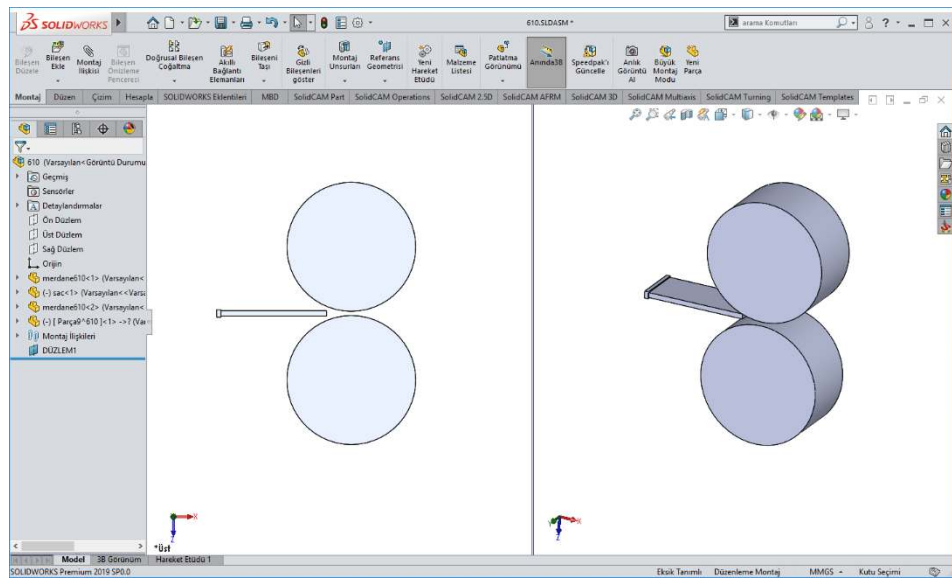
Haddeleme sisteminin elemanları, tek tek üç boyutlu olarak modellendikten sonra haddeleme sisteminin kurulması için bu parçaların montajlanması gerekmektedir. Montajlama işlemi aşağıdaki kısımda anlatıldığı gibi Solidworks programının montaj kısmında yapılarak haddeleme sistemleri kurulmuştur. Merdane çapları üç farklı değerde olduğu için üç farklı haddeleme sistemi montajlanmıştır.

Solidworks programında montaj yapabilmek için yeni bir montaj sayfası açılarak montajlanacak parçalar bu sayfaya çağrılır. 610mm çapındaki merdane modeli için montajlama işlemi gösterilmiştir. Merdane sistemi aynı çaptaki iki merdaneden oluştuğu için 610mm çapındaki merdane montaj sayfasına getirildikten sonra kopyalanır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. Haddeleme sistemi elemanlarının montaj sayfasına getirilmesi ve merdanenin kopyalanması

Haddeleme sisteminin tüm elemanları montaj sayfasına getirildikten sonra elemanlar arasındaki montaj ilişkileri tanımlanır. İlk olarak itici parça ve iş parçası birbirine montajlanarak sabitlenir. Daha sonra merdanelerin aynı hizaya gelmesi sağlanarak, iki merdane arası boşluğun haddeleme miktarı kadar olması montaj ilişkileriyle tanımlanır. Son işlem olarak iş parçasının en dış kenar çizgisi ile merdanelerin silindirik yüzeylerinin teğet olması montaj ilişkilerinin tanımlanmasıyla sağlanır.



Şekil 6.16. 610mm çapındaki haddeleme sisteminin montajı

610mm çapındaki merdane için kurulan haddeleme sistemi modeli 710mm ve 810mm çapındaki merdaneler içinde kurularak toplam 3 farklı model elde edilir.

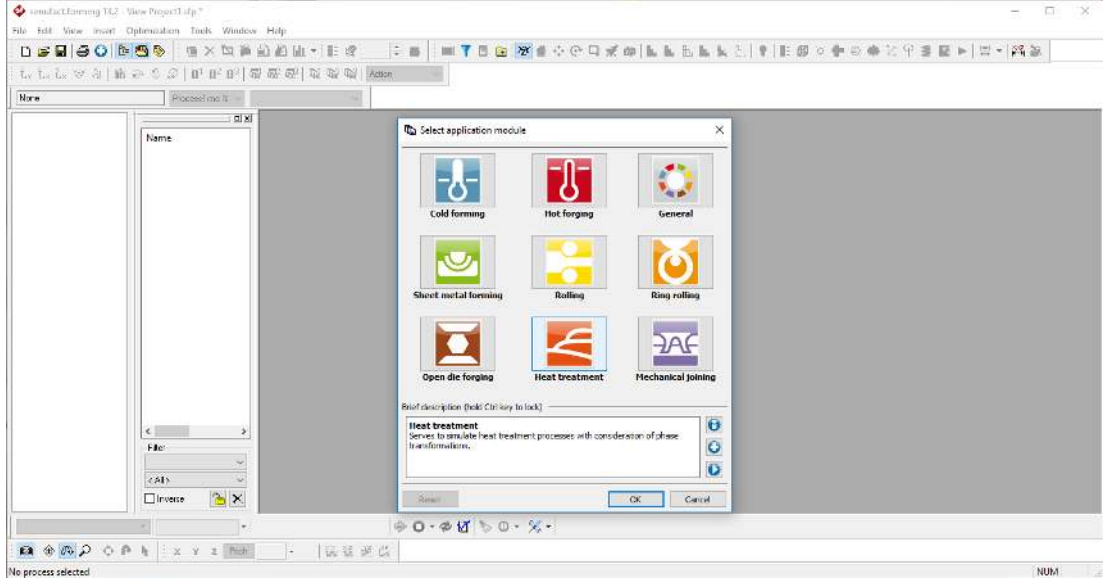
Haddeleme sistemleri 3 boyutlu olarak modellendikten sonra sonlu elemanlar programında bu modellerin kullanılması için STEP formatında olmalıdır, 3 farklı merdane çapı için 3 farklı model oluşturulup STEP formatında kaydedilmiştir.

6.2.2. Sonlu Elemanlar Sisteminin Modellenmesi

Bu çalışmada haddeleme parametrelerini incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu modellerinin nümerik çözümleri çok uzun zaman aldığından ve kompleks parçaların matematiksel modellerinin hesaplanmasında karşılaşılan problemler son yıllarda FEA yazılımlarını yaygın hale getirmiştir. Bu yazılımlarda tanımlanan FEA modeli bir yazılım aracılığı ile çözülmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan bazı sonlu elemanlar yazılımları: Ansys Workbench, Abaqus, Nastran, Sap2000, Cosmos gibi yazılımlardır.

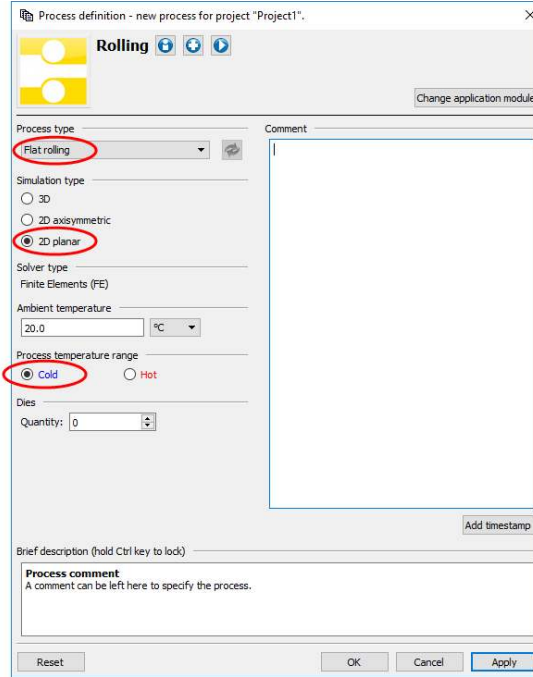
Bu çalışmada sonlu elemanlar yazılımı olarak Simufact Forming programının 13.2 versiyonu kullanılmıştır. Bu programın tercih edilme nedeni, özellikle plastik şekil değiştirme metotlarının sonlu elemanlar modelleri üzerine yoğunlaşmasıdır. Simufact Forming programı, uluslararası alanda bilimsel kabul gören, yüksek güvenilirliğe sahip dinamik bir simülasyon programı olarak kabul edilmektedir.

Bir sonraki kısım da haddeleme sisteminin sonlu elemanlar modelinin hazırlanması anlatılmıştır. Simufact Forming programının kullanıcı ara yüzü ve programdaki modüller şekil 6.17’de gösterilmiştir. Modüllerden ‘Rolling’ modülü seçilerek sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



Şekil 6.17. Simufact Forming programının kullanıcı ara yüzü ve modülleri

Bu çalışmada yapılan analizler iki boyutlu olarak yapılmış olup haddeleme yöntemi olarak soğuk şekillendirme kullanılmıştır. Simufact Forming programında tasarlanan her üç haddeleme sistemi için kullanılan Rolling modülünün parametreleri Şekil 6.18’de verilmiştir.

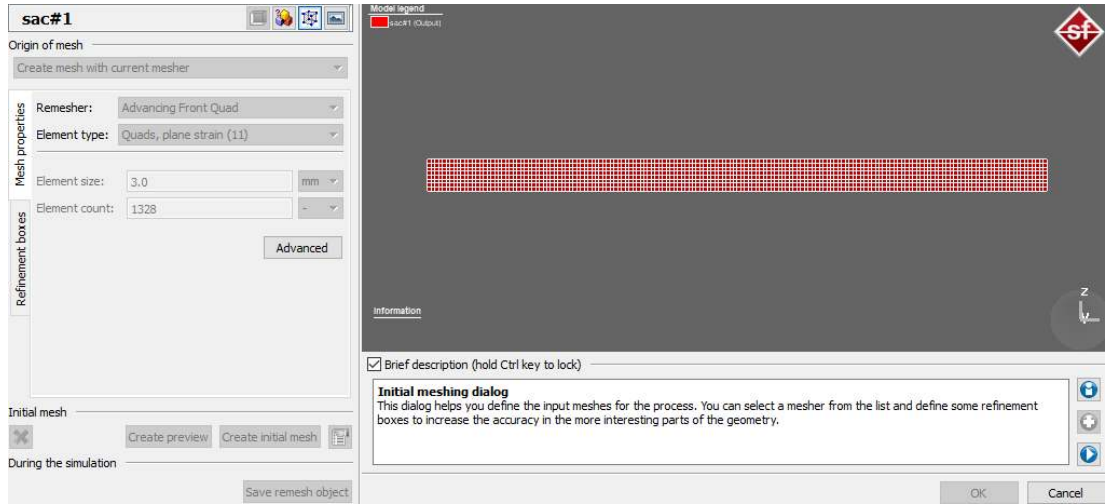


Şekil 6.18. Kullanılan Rolling modülünün parametreleri

Simufact Forming programında haddeleme sistemlerinin sonlu elemanlar analizleri yapılırken aşağıdaki adımlar izlenerek sonlu eleman modelleri kurulmuş ve analizleri yapılmıştır.

- 1) Haddeleme sisteminin 3 boyutlu modeli sonlu elemanlar sayfasına çağrılır.
- 2) Çağrılan merdane, iş parçası ve itici elemanları analiz süresini kısaltmak ve gereksiz hesaplamalardan kaçınmak için birbirine göre haddeleme işlemine başlayacak şekilde konumlandırılır.
- 3) Sistemde kullanılan malzeme tanımlamaları programın kendi kütüphanesinden veya manuel olarak tanımlanabilir.
- 4) İş parçası ve merdaneler arasında ayrıca itici parça ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının tipi ve büyüklüğü girilir ve gerekli geometrilere bu katsayı tanımlanır.
- 5) Sistemin elemanlarına sıcaklık tanımlamaları yapılır.
- 6) Merdanelerin dönüş yönlerine göre kinematik (hareket) tanımlamaları yapılır.
- 7) Tanımlanan kinematik değerler için kuvvet türleri ve yönleri tanımlanır.
- 8) Haddeleme sistemindeki iş parçasına meshleme işlemi yapılır.
- 9) Parçalar arasındaki temas tanımlamaları yapılır.
- 10) Sistemin 2D modeline derinlik verilerek analizin gerçek boyutlarda yapılması sağlanır.

Sonlu elemanlar sisteminde parçalara bölme başka bir ifade ile ağ yapısını oluşturma işlemi en önemli basamaklardan birisidir. Bu çalışmada ağ yapısı oluşturulurken eleman tipi olarak Quads, plane strain (11) kullanılmıştır. Eleman boyutu 3mm ve oluşturulan eleman sayısı 1328 dir. Kullanılan meshleme parametreleri Şekil 6.19’da da gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan mesh parametreleri

Simufact Forming programının Rolling modülün de her haddeleme sistemi için yukarıdaki adımlar uygulanarak sonlu eleman modelleri kurulup ayrı ayrı çözümleri yapılmıştır.

Daha öncede belirtildiği gibi bu çalışmanın amacı farklı haddeleme parametrelerini kullanarak yapılan sonlu elemanlar analizinde farklı durumlarda meydana gelen değişimler incelenmiştir. Haddeleme parametreleri olarak,

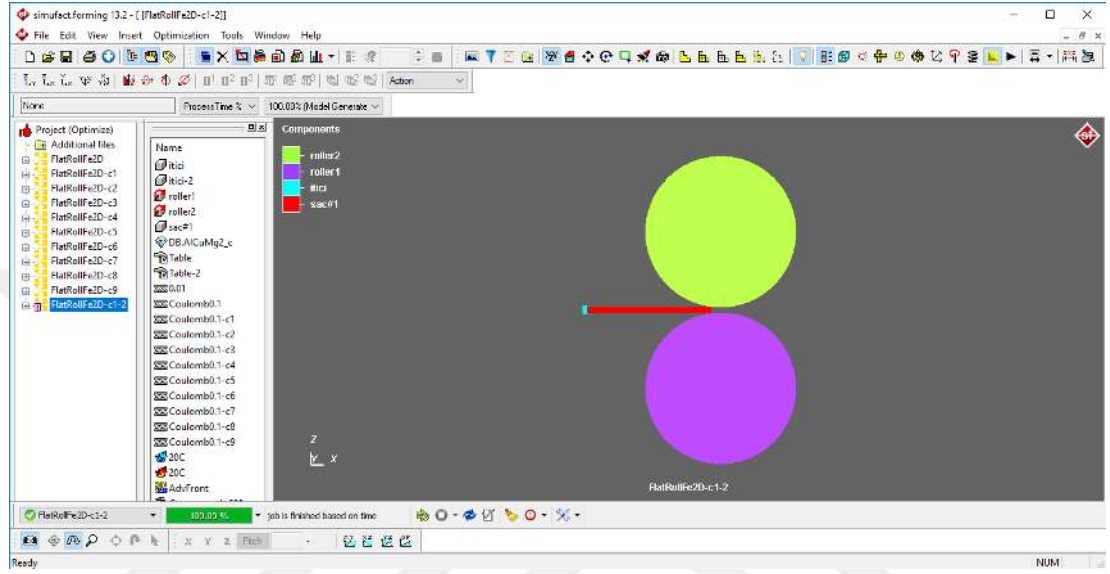
- 1) Al2024, MgAZ31 ve Ti-6Al-4V olmak üzere 3 farklı malzeme türü
- 2) 610mm, 710mm ve 810mm olmak üzere 3 farklı merdane çapı
- 3) Merdaneler ve iş parçası arasında 0.1, 0.2, 0.3,1 olmak üzere on farklı sürtünme katsayısı literatür çalışmaları referans alınarak belirlenmiştir.

Analiz çalışmalarında kullanılan parametreler ve yapılan tüm analizler tablo 6.13' te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 6.13. Sonlu elemanlar analizleri ve parametreleri

Deney No	Fs	Malzeme	Merdane Çapı	Devir	İtme Kuvveti
001	0.1	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
002	1	A2024	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
003	0.9	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
004	0.8	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
005	0.7	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
006	0.6	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
007	0.5	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.3	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
008	0.4	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.2	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
009	0.3	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.4	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.5	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.6	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.7	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.8	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.9	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	1	Ti-6Al-4V c	610 mm	30 rpm	4 N
	0.1	MgA231	610 mm	30 rpm	4 N

Tablo 6.13’de görüldüğü gibi bu çalışmada 90 farklı sonlu elemanlar modeli kurulup çözümlenmiştir. Sonlu elemanlar modeli kurulup çözümlenmiş haddeleme sisteminin görünümü Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Bu şekilde her bir malzeme, her bir merdane çapı değeri için ve her bir sürtünme katsayısı için 9 farklı model kurulup sürtünme katsayısı parametrik olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.20. Haddeleme sisteminin sonlu elemanlar modeli

7. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Yapılan çalışmada daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi haddeleme sistemi üzerinde 3 temel girdi değeri incelenmiştir. Bunlar tablo 7.1’de özetlenmiştir.

Tablo 7.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile incelenen haddeleme parametreleri

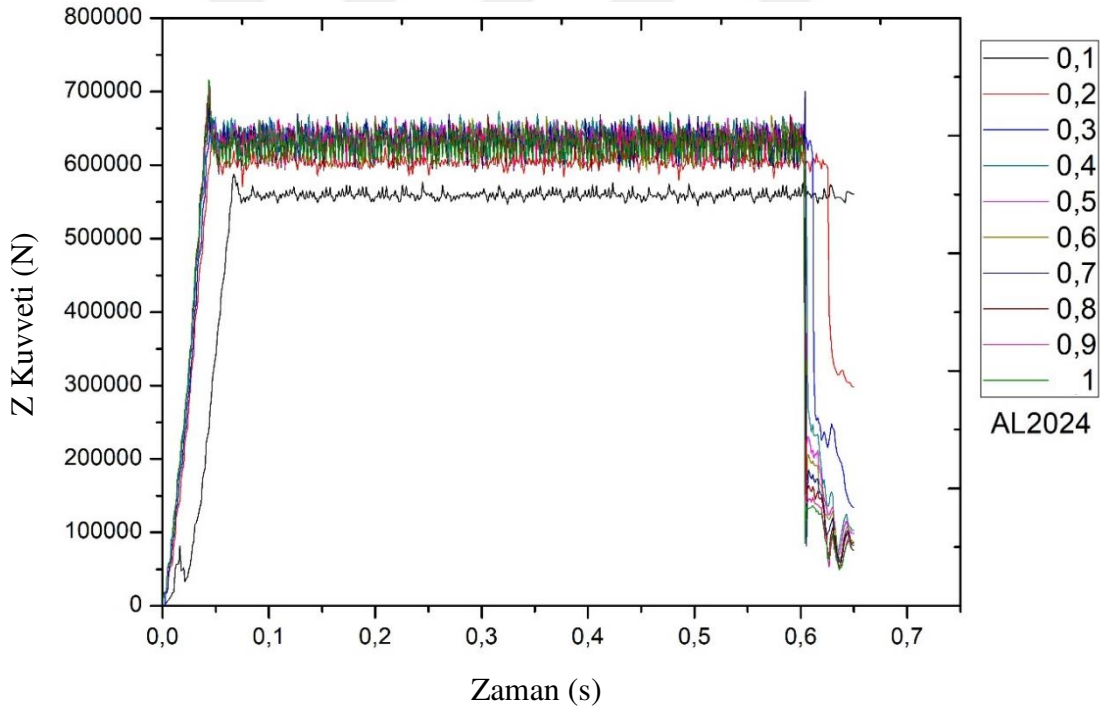
μ	Malzeme	Merdane Çapı 1	Merdane Çapı 2	Merdane Çapı 3
0,1	Al2024 (YMK)	610 mm	710mm	810mm
0,2				
0,3				
0,4				
0,5				
0,6				
0,7				
0,8				
0,9				
1				
0,1	Ti-6Al-4V (SDH)	610 mm	710mm	810mm
0,2				
0,3				
0,4				
0,5				
0,6				
0,7				
0,8				
0,9				
1				
0,1	MgAZ31 (SDH)	610 mm	710mm	810mm
0,2				
0,3				
0,4				
0,5				
0,6				
0,7				
0,8				
0,9				
1				

Sonlu elemanlar analiz sonuçları malzemelerin sürtünme katsayılarına göre, malzeme tütüne göre ve merdane çaplarına göre incelenmiştir.

7.1. Sürtünme Katsayılarına Göre Sayısal Analiz Sonuçları

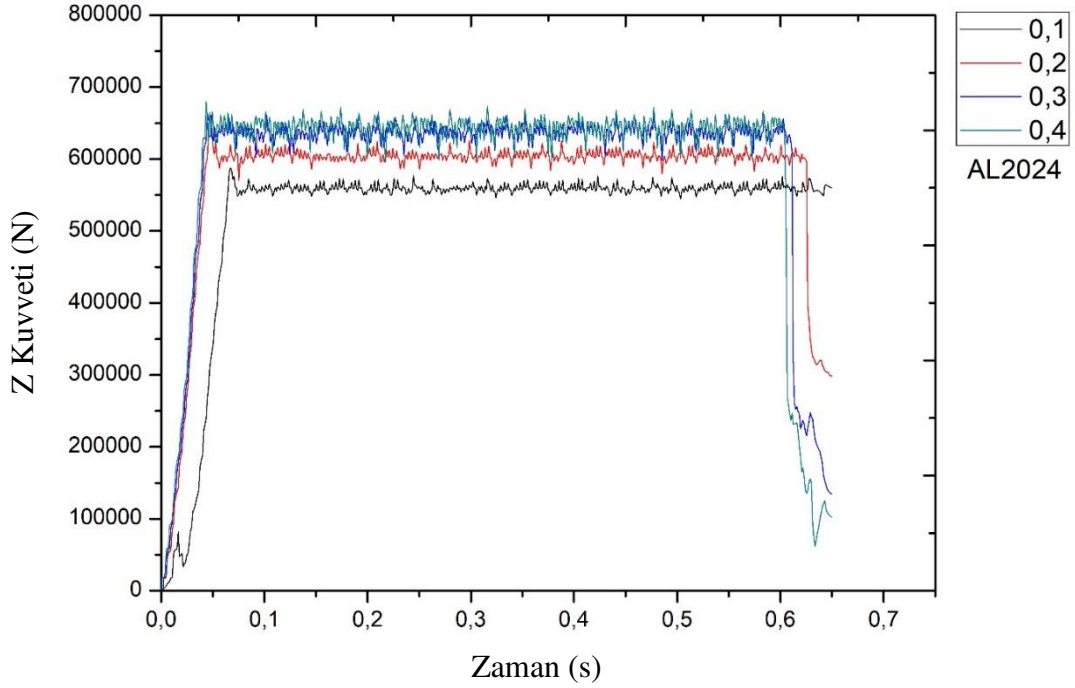
Analizlerde 0.1 den 1 değerine kadar 10 farklı μ sürtünme katsayısı incelenmiştir. Simufact programında üç farklı malzeme için haddeleme sisteminde, iş parçasına uygulanan haddeleme kuvvetinin düşey bileşenine uygulanan kuvvetler karşılaştırılmıştır. Haddeleme kuvvetinin düşey bileşeni Z Kuvveti olarak adlandırılmıştır. Bu analizler 610mm merdane çapı için yapılmıştır.

Al2024 malzemesi için farklı sürtünme katsayılarının sonlu elemanlar analizi sonucunda bulunan Z Kuvveti – Zaman grafiği Şekil 7.1’de verilmiştir.

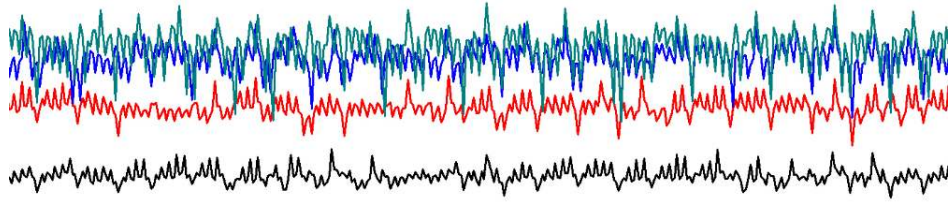


Şekil 7.1. Al2024 için farklı sürtünme katsayılarında Z Kuvveti – Zaman grafiği

Şekil 7.1 incelendiğinde özellikle sürtünme katsayısının belirli bir değerden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği görülmüştür. Bu değeri görebilmek için Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'te grafiklerin detay görünümü verilmiştir.



Şekil 7.2. Al2024 için 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği

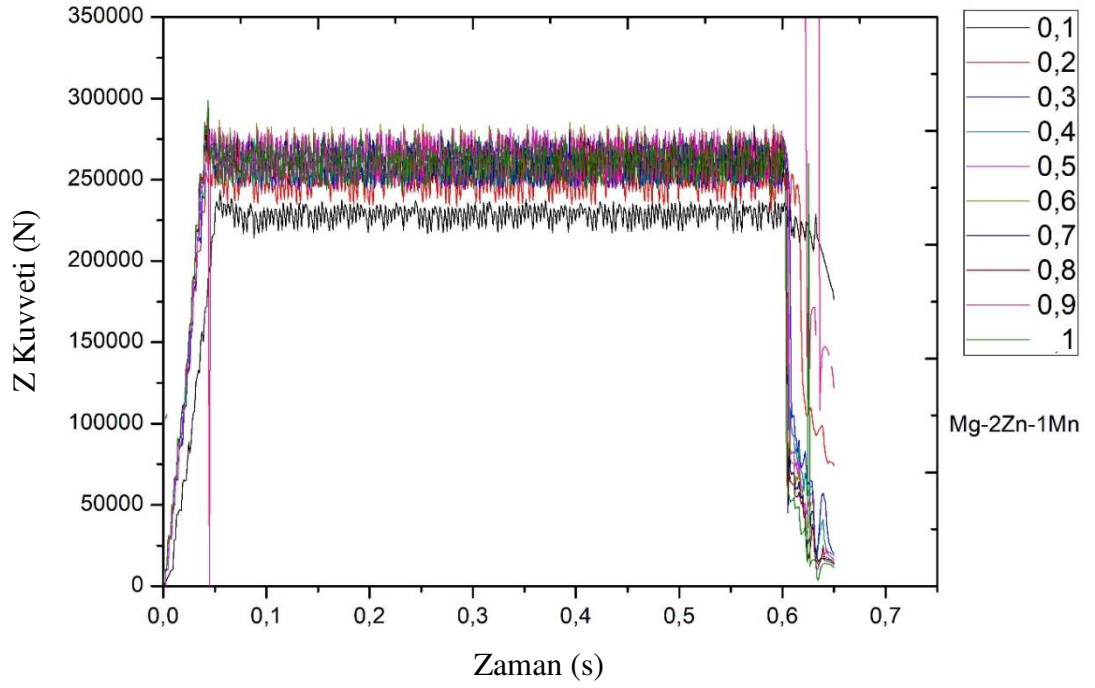


Şekil 7.3. 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği detayı

Sürtünme katsayısının yüksek olması, iş parçasının homojen bir şekilde merdaneler arasına çekilmesi ve daha fazla deformasyon kuvveti uygulanması açısından avantaj sağlamaktadır. Al2024 malzemesi için μ sürtünme katsayısına göre oluşan Z Kuvveti – Zaman grafiği incelendiğinde μ nün belli bir değerden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği açıkça görülmektedir. Sürtünme katsayısı değeri özellikle

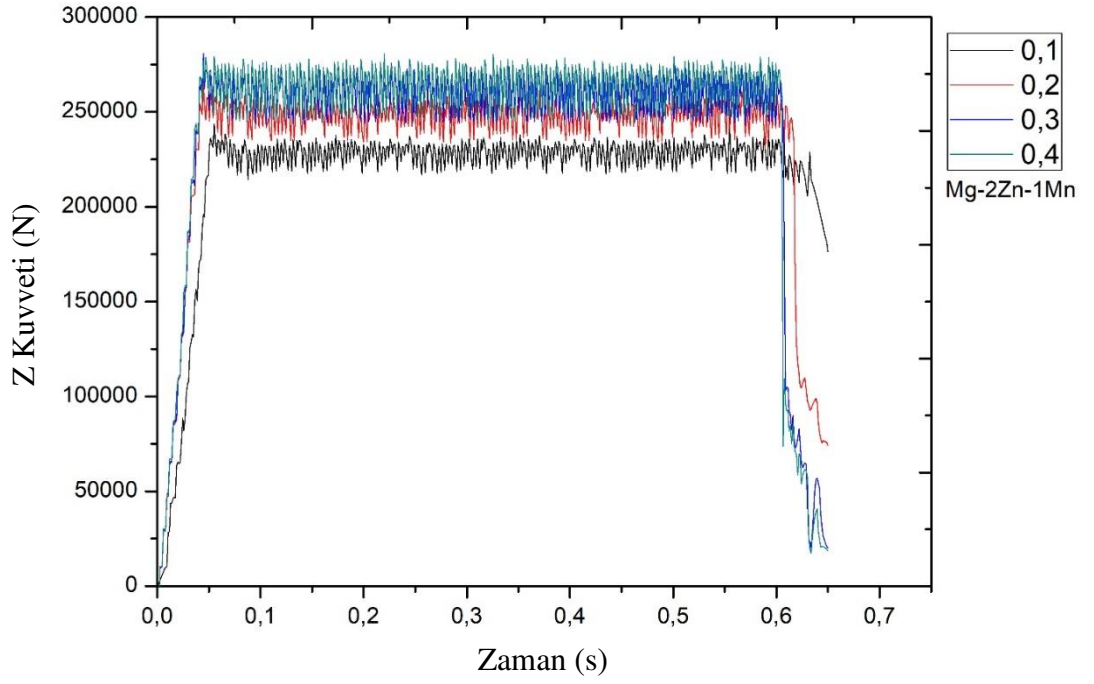
0.3 değerinden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği için μ sürtünme katsayısının 0.3 değeri için optimum değer olarak kabul edilebilir.

MgAZ31 malzemesi için farklı sürtünme katsayılarının sonlu elemanlar analizi sonucunda bulunan Z Kuvveti – Zaman grafiği şekil 7.4'te verilmiştir.

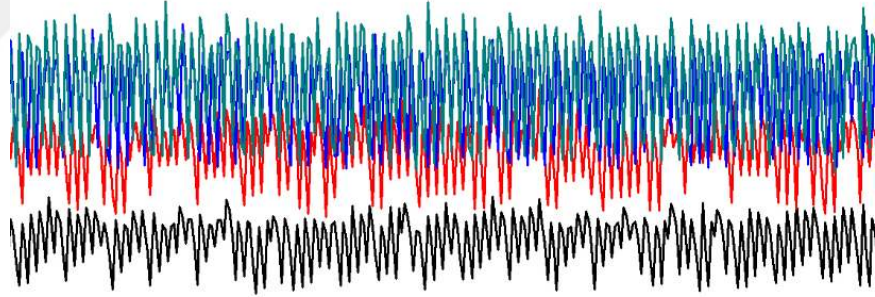


şekil 7.4. MgAZ31 için farklı sürtünme katsayılarında Z Kuvveti – Zaman grafiği

şekil 7.4 incelendiğinde Al2024 malzemesinde olduğu gibi sürtünme katsayısının belirli bir değerden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği grlmştir. Bu değeri görebilmek için şekil 7.5 ve şekil 7.6'da grafiklerin detay görünümleri verilmiştir.



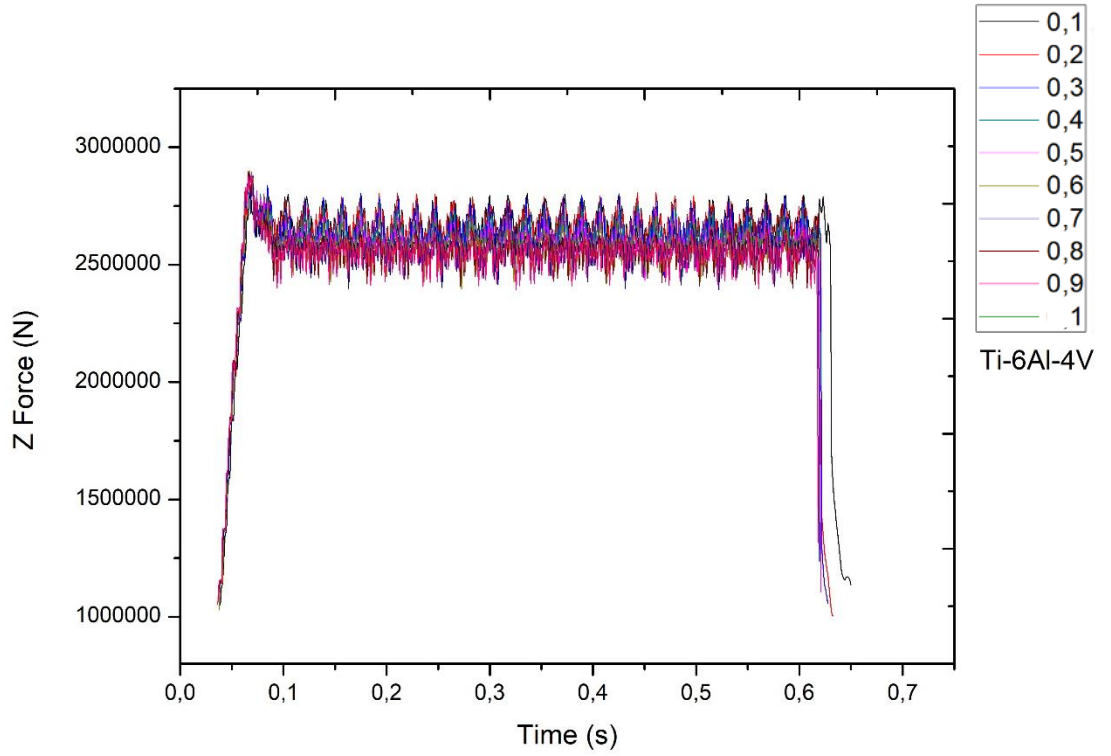
Şekil 7.5. MgAZ31 için 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği



Şekil 7.6. 0.1 – 0.4 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği detayı

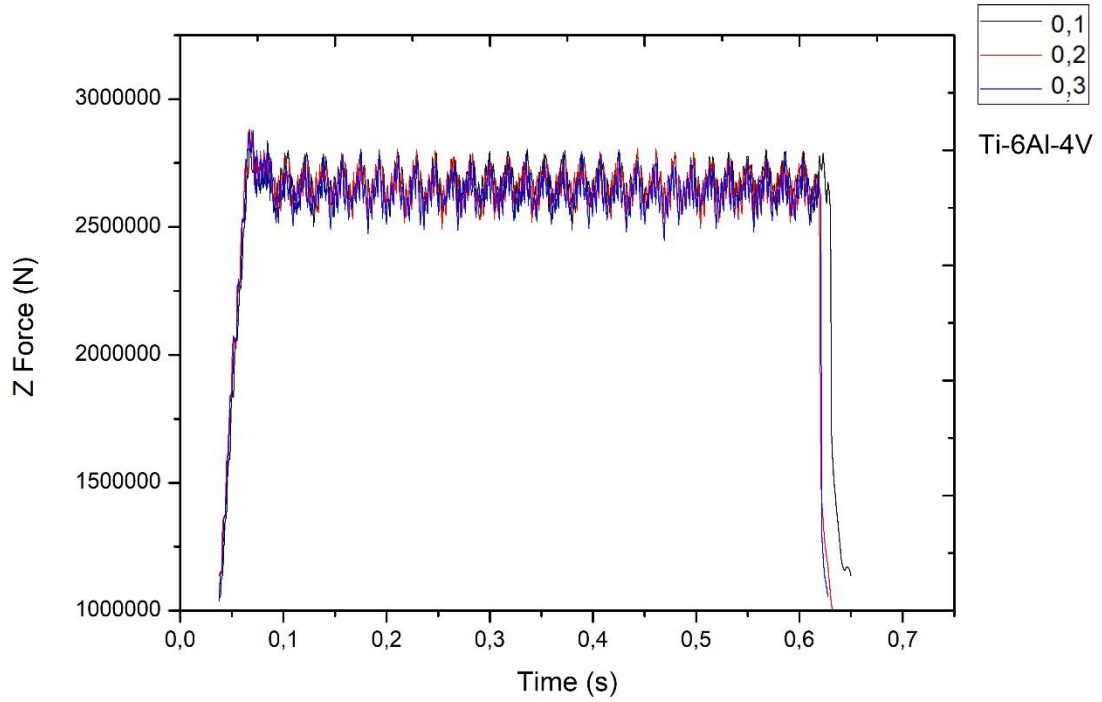
MgAZ31 malzemesi için oluşan Z Kuvveti – Zaman grafiği incelendiğinde Al2024 malzemesine benzer şekilde, μ nün belli bir değerden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği görülmektedir. Sürtünme kuvveti değeri özellikle 0.3 değerinden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği için μ sürtünme katsayısının 0.3 değeri için optimum değer olarak kabul edilebilir.

Ti-6Al-4V malzemesi için farklı sürtünme katsayılarının sonlu elemanlar analizi sonucunda bulunan Z Kuvveti – Zaman grafiği Şekil 7.7’de verilmiştir.

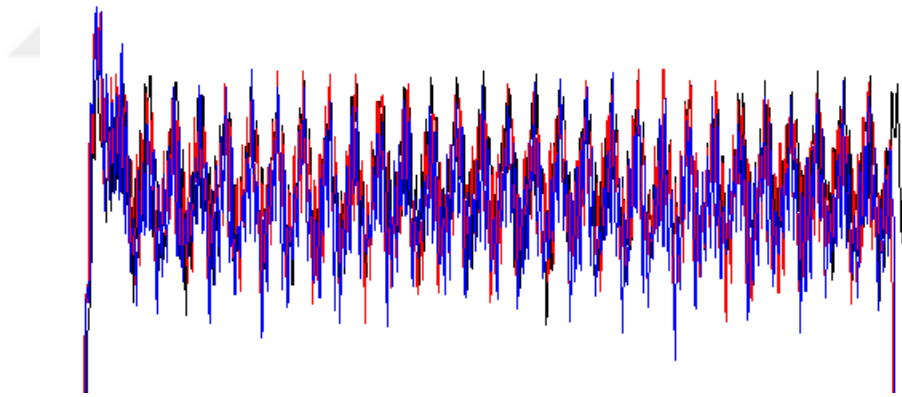


Şekil 7.7. Ti-6Al-4V için farklı sürtünme katsayılarında Z Kuvveti – Zaman grafiği

Şekil 7.7 incelendiğinde incelenen diğer malzemelerde olduğu gibi sürtünme katsayısının belirli bir değerden sonra oluşan Z Force kuvvetini etkilemediği görülmüştür. Bu değeri görebilmek için Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da grafiklerin detay görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.8. Ti-6Al-4V için 0.1 – 0.3 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği



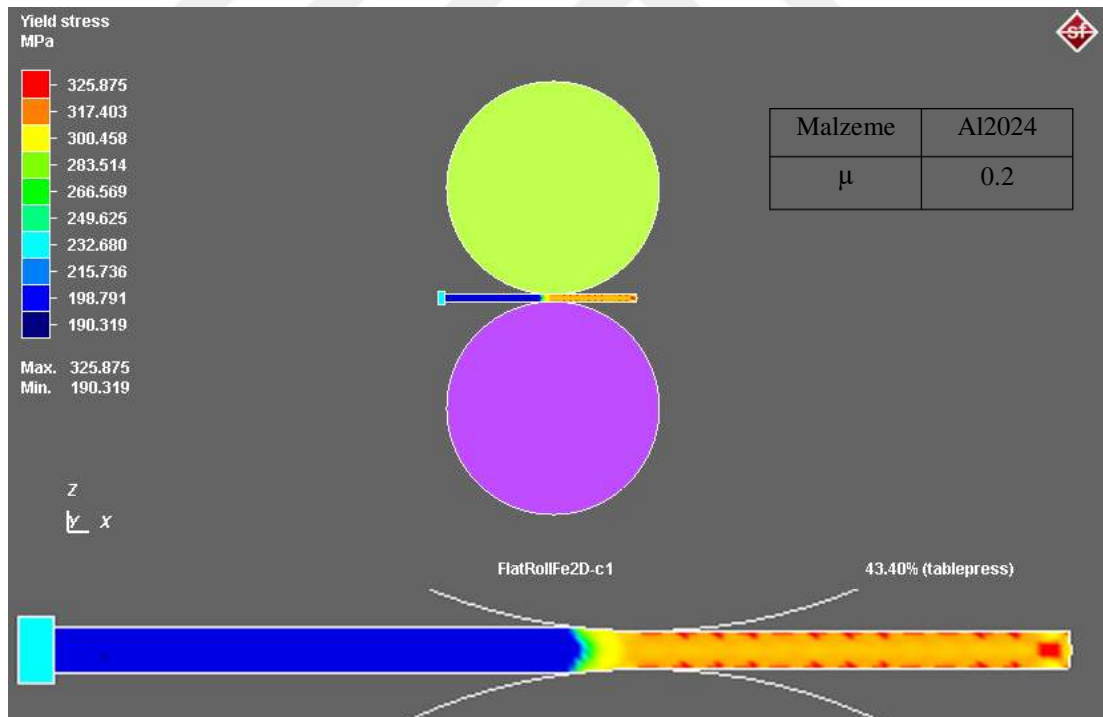
Şekil 7.9. 0.1 – 0.3 arasındaki μ nün Z Kuvveti – Zaman grafiği detayı

Analiz sonucunda oluşan grafikler incelendiğinde Ti-6Al-4V malzemesi için Z Kuvvetinin diğer malzemelere göre çok daha yüksek değerde olduğu görülmektedir. Z Kuvvetinin çok yüksek değerde olmasından dolayı farklı μ sürtünme katsayısının oluşan Z Kuvveti üzerindeki etkisi görülememektedir. Diğer malzemelere benzer şekilde optimum sürtünme katsayısı 0.3 olarak alınabilir.

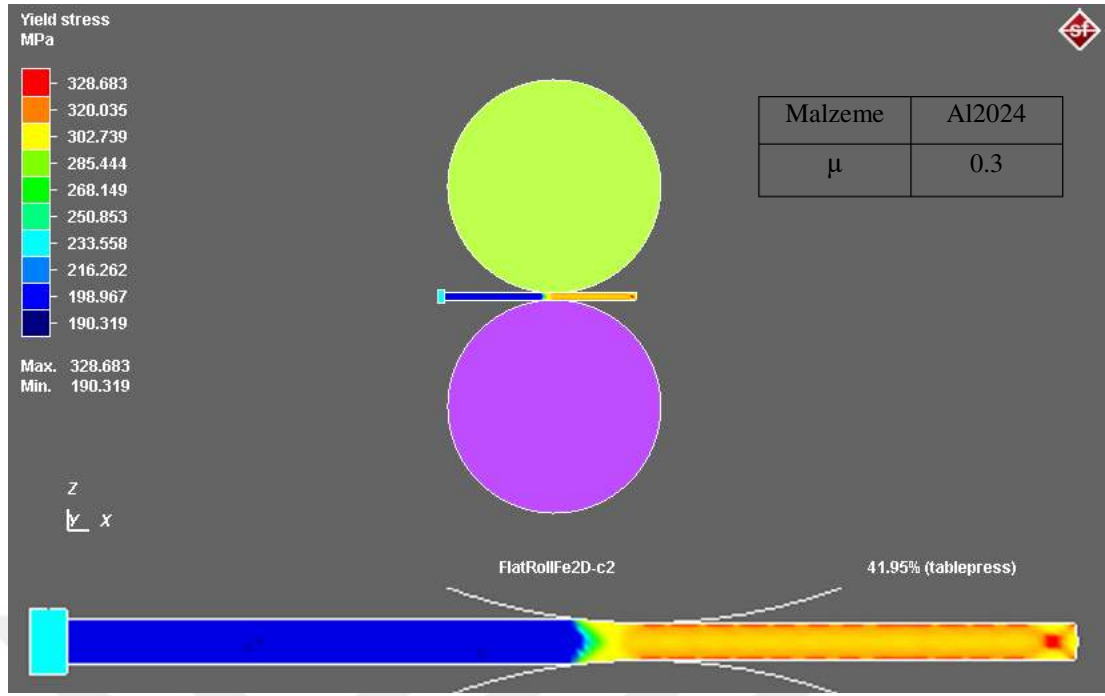
Farklı sürtünme katsayılarına göre üç farklı malzeme için yapılan tüm solu eleman modelleri incelendiğinde μ sürtünme katsayısının değeri arttıkça oluşan Z Kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Yapılan diğer benzer çalışmalar incelendiğinde sonuçların aynı doğrultuda olduğu görülmektedir. Gunasekera ve arkadaşlarının [26] yapmış olduğu çalışmada da sonuçların bu doğrultuda olduğu görülmektedir. Bu sonuca ek olarak yapılan analizlerde, μ değerinin belirli bir değerden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği görülmüştür. Grafikler incelendiğinde sürtünme katsayısının optimum değeri 0.3 olarak alınabilir.

7.1.1. Sürtünme Katsayısına Göre Gerilme Dağılımları

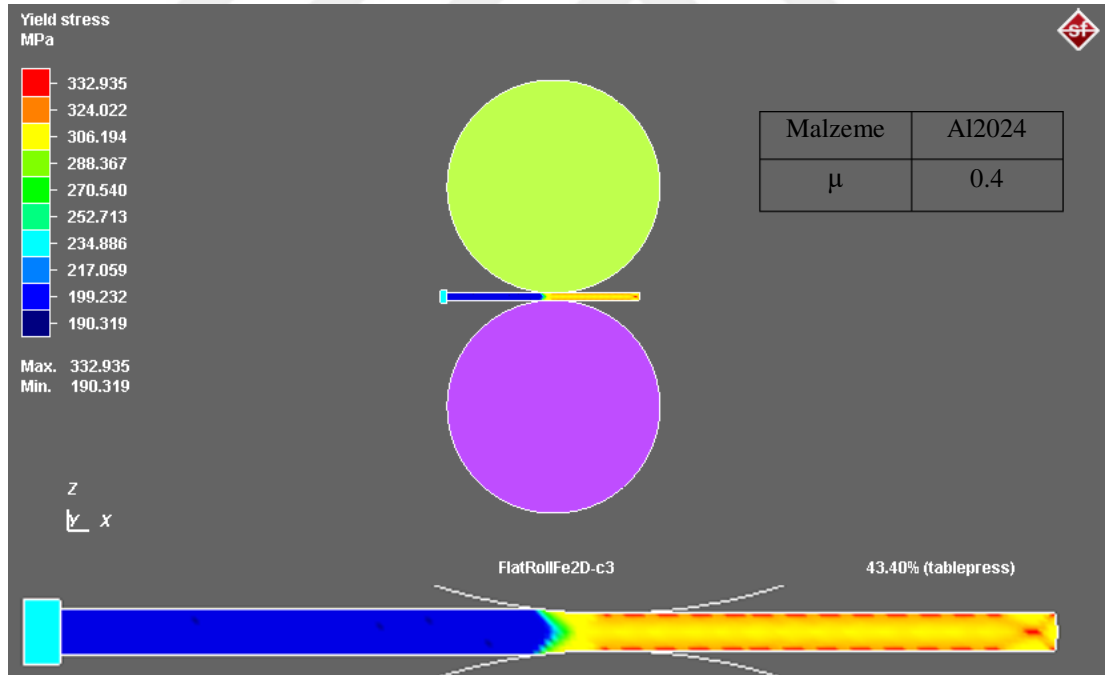
Al2024 malzemesi için merdane çapı 610mm olmak üzere μ nün 0.2 – 0.3 ve 0.4 değerleri için oluşan stres dağılımları Şekil 7.10, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.10. Al2024, μ 0.2 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



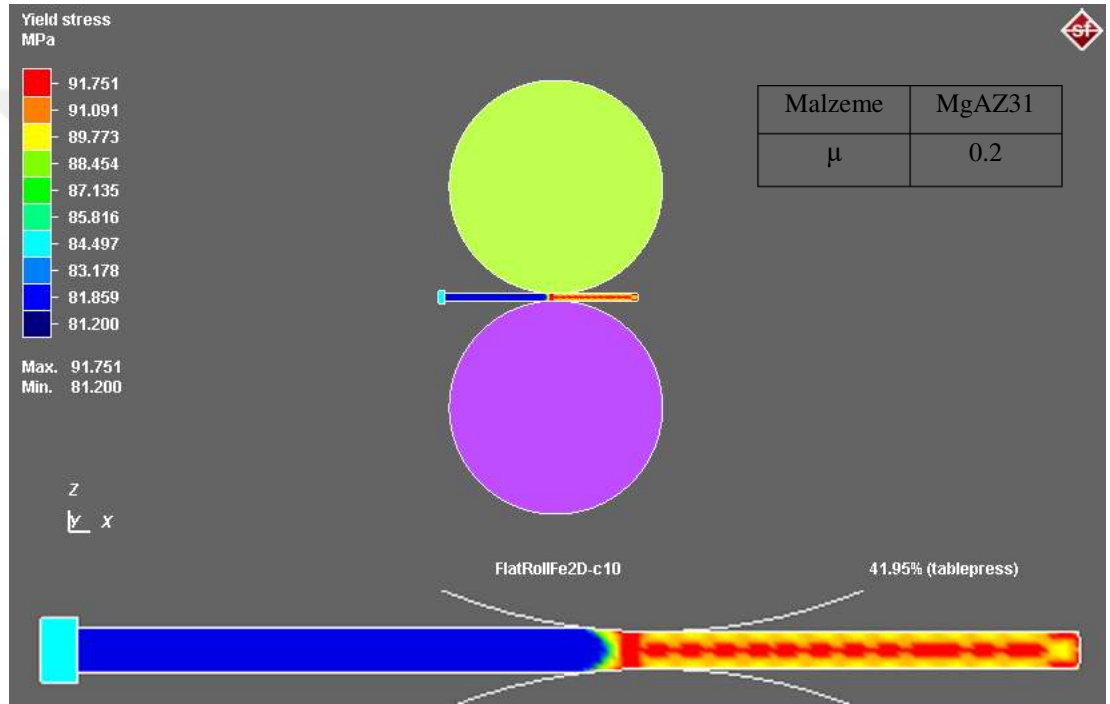
Şekil 7.11. Al2024, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



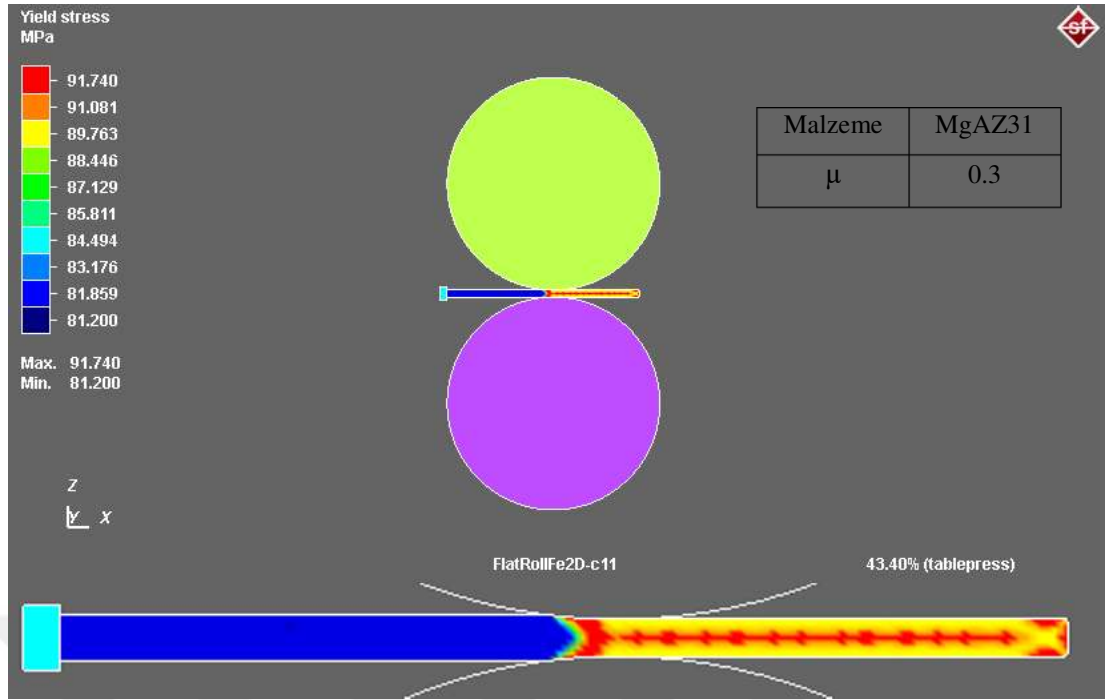
Şekil 7.12. Al2024, μ 0.4 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı

İş parçası üzerinde üzerin de oluşan gerilme dağılımları incelendiğinde artan sürtünme katsayısı değerine karşılık iş parçası üzerinde oluşan gerilme değerinin de Z Kuvvetinde olduğu gibi arttığı gözlemlenmiştir.

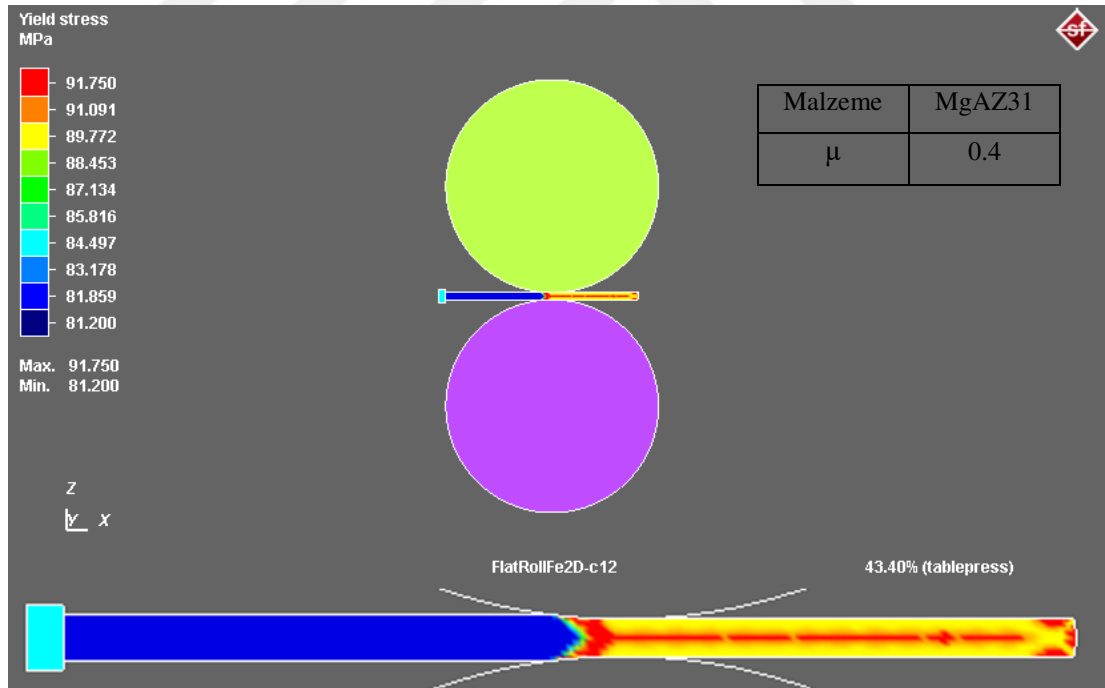
MgAZ31 malzemesi için merdane çapı 610mm olmak üzere μ nün 0.2 – 0.3 ve 0.4 değerleri için oluşan stres dağılımları Şekil 7.13, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15’te verilmiştir.



Şekil 7.13. MgAZ31, μ 0.2 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



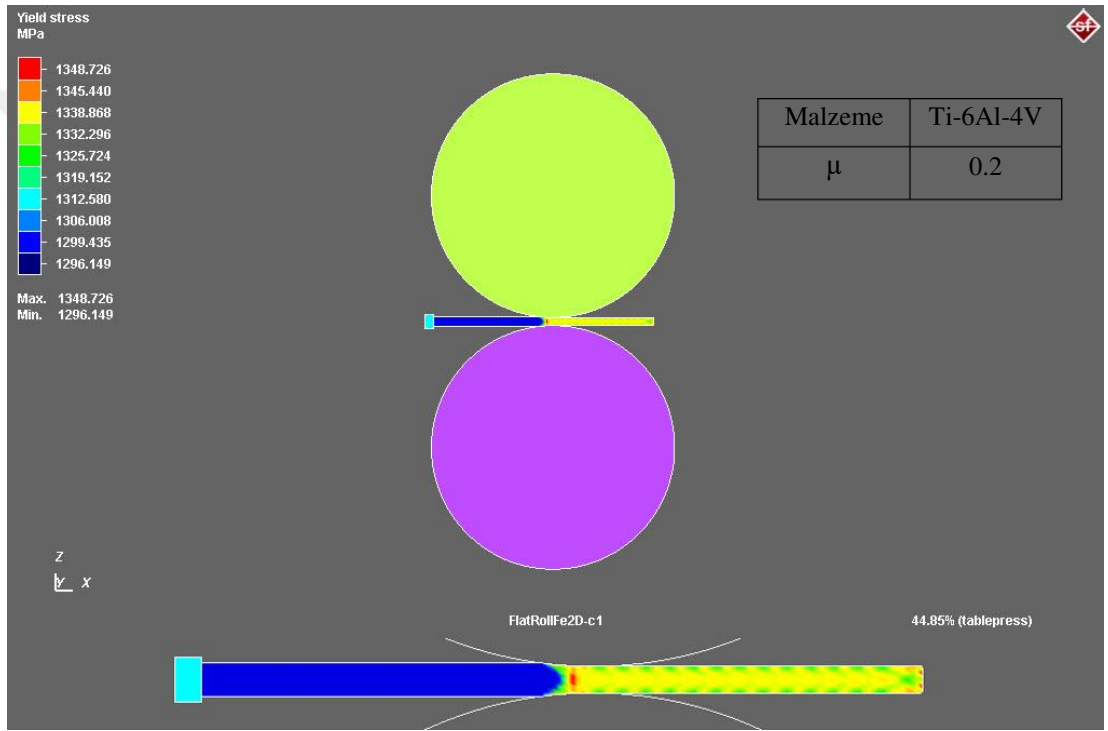
Şekil 7.14. MgAZ31, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



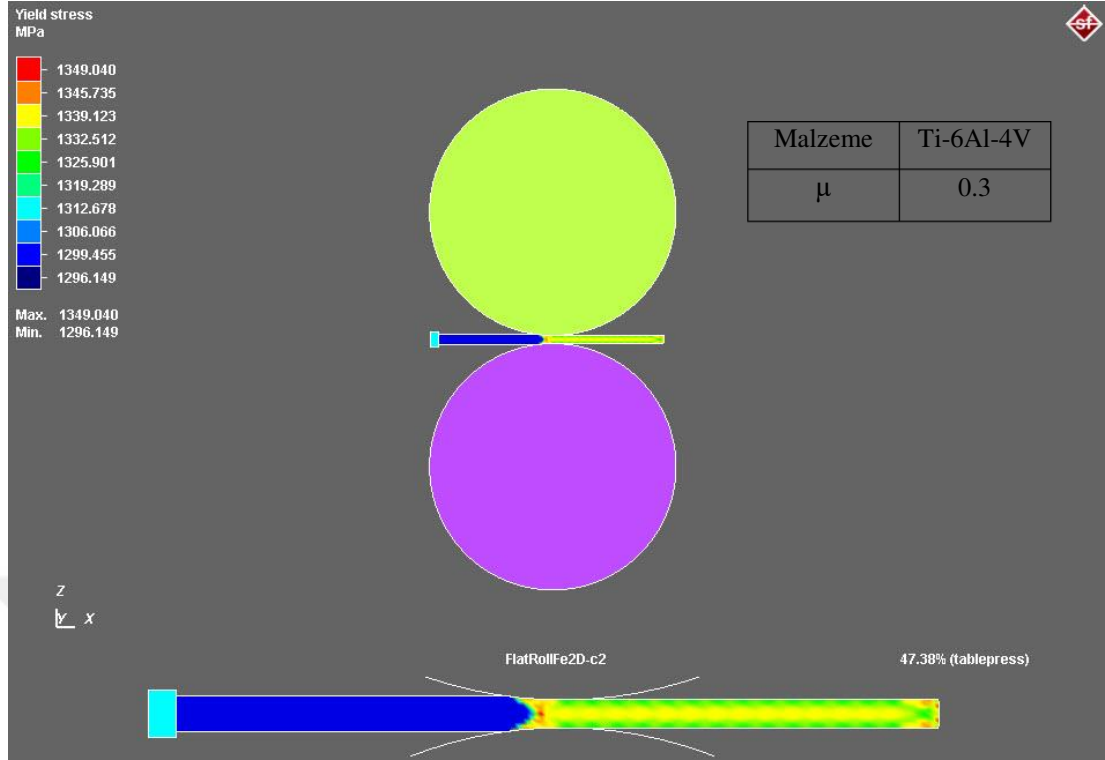
Şekil 7.15. MgAZ31, μ 0.4 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı

MgAZ31 malzemesi için iş parçası üzerinde üzerin de oluşan gerilme dağılımları incelendiğinde sürtünme katsayısının artması ile iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımında küçük değerlerde farklılıklar gözlemlenmiştir.

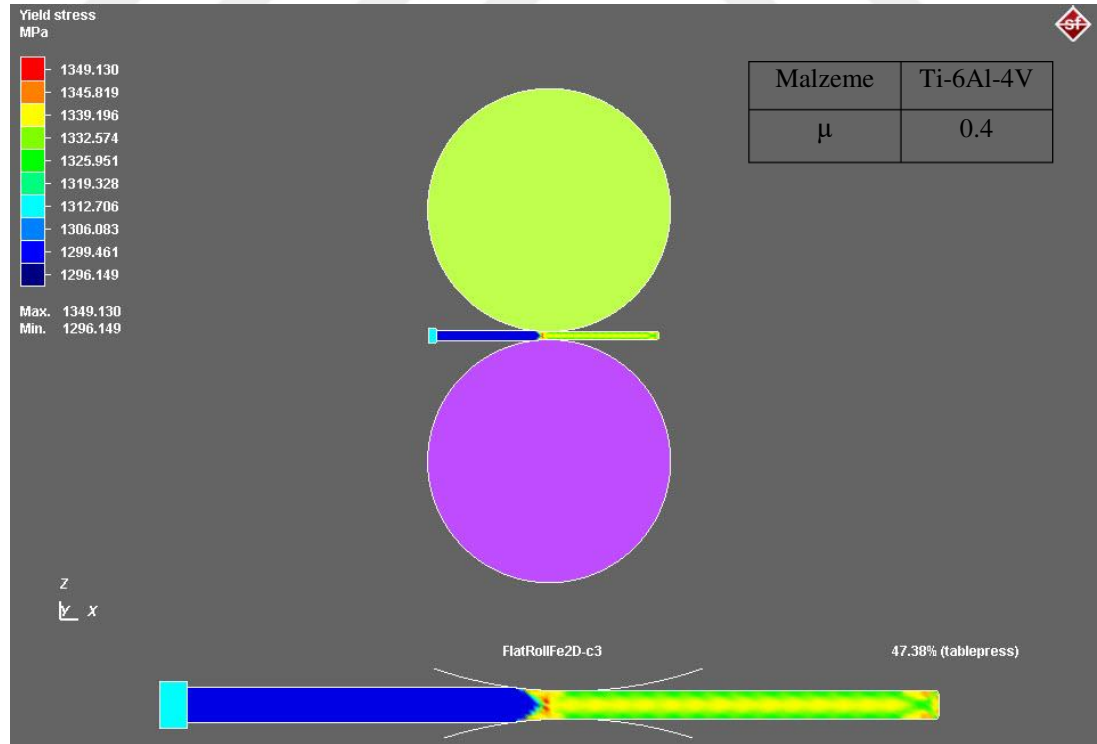
Ti-6Al-4V malzemesi için merdane çapı 610mm olmak üzere μ nün 0.2 – 0.3 ve 0.4 değerleri için oluşan stres dağılımları Şekil 7.16, Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de verilmiştir.



Şekil 7.16. Ti-6Al-4V, μ 0.2 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



Şekil 7.17. Ti-6Al-4V, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



Şekil 7.18. Ti-6Al-4V, μ 0.4 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı

Ti-6Al-4V malzemesi için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımları incelendiğinde iş parçası üzerinde çok yüksek gerilme değerlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan yüksek gerilme değerleri için sürtünme katsayısının etkisi Z Kuvveti grafiğinde olduğu gibi net olarak gözlemlenememiştir fakat parça üzerindeki gerilme dağılımlarında küçük değişimler olduğu gözlemlenmiştir.

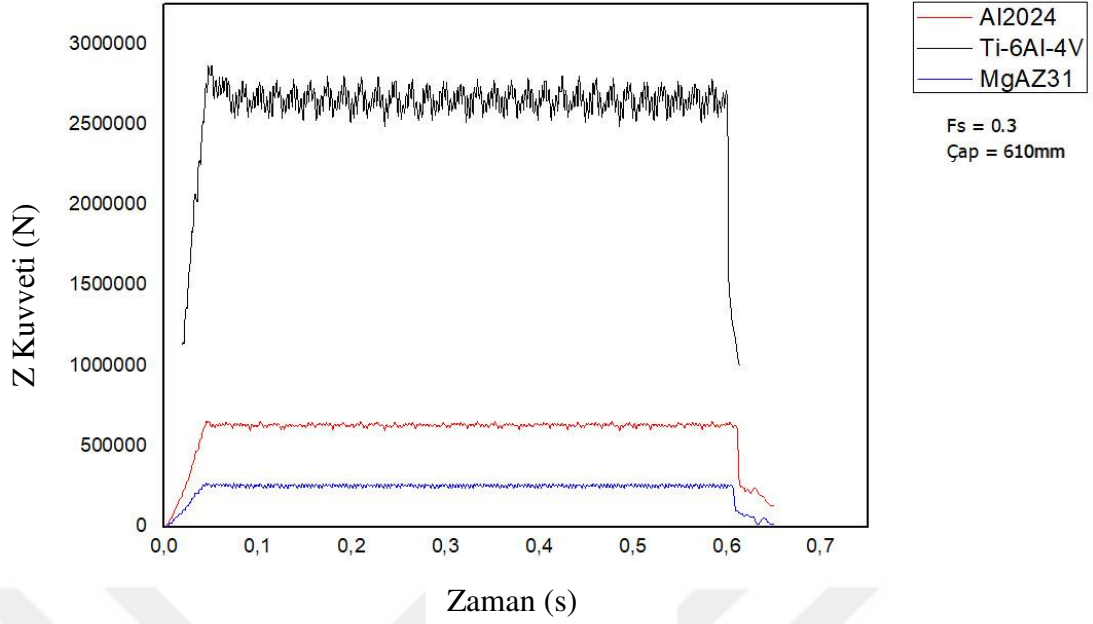
7.2. Malzemelerin Türüne Göre Sayısal Analiz Sonuçları

Analizlerde malzeme türünün haddelendirme parametrelerini nasıl etkilediğini incelemek için 3 farklı malzeme incelenmiştir. Bu malzemeler Tablo 7.2’de özetlenmiştir.

Tablo 7.2. Analizlerde kullanılan malzemeler ve kristal yapıları

Malzemeler	Al2024	MgAZ31	Ti-6Al-4V
Kristal Yapısı	YMK	SDH	SDH

Bir önceki bölümde sürtünme katsayısının bu malzemeler için 0.2 ile 0.3 arasında olduğu ön görülmüştür. Bu nedenle bu kısımda, malzeme türleri karşılaştırırken sürtünme katsayısı olarak 0.3 değeri alınmıştır. Ayrıca merdane çapı olarak 610mm değeri kullanılmıştır.



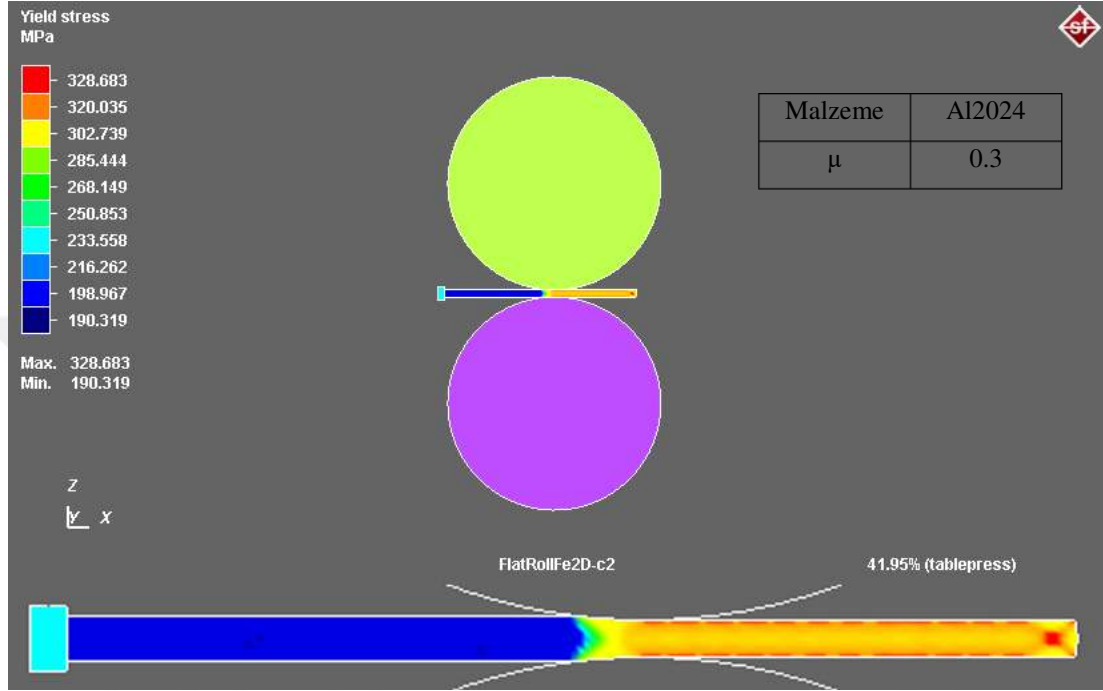
Şekil 7.19. Malzeme türlerine göre Z Kuvveti – Zaman grafiği

Şekil 7.19’da malzeme türlerine göre verilen Z Kuvveti – Zaman grafiği incelendiğinde kristal yapının iş parçası üzerinde oluşan Z Kuvvetini ciddi oranda değiştirdiği görülmektedir. Grafiklerde elde edilen Z Kuvveti aynı zamanda malzemenin plastik şekil değiştirebilme kabiliyetini göstermektedir. Yapılan aynı şartlardaki analizlere göre, farklı malzeme türlerinde Z Kuvvetinin daha az değerlerde olması, malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyetinin diğerlerine göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

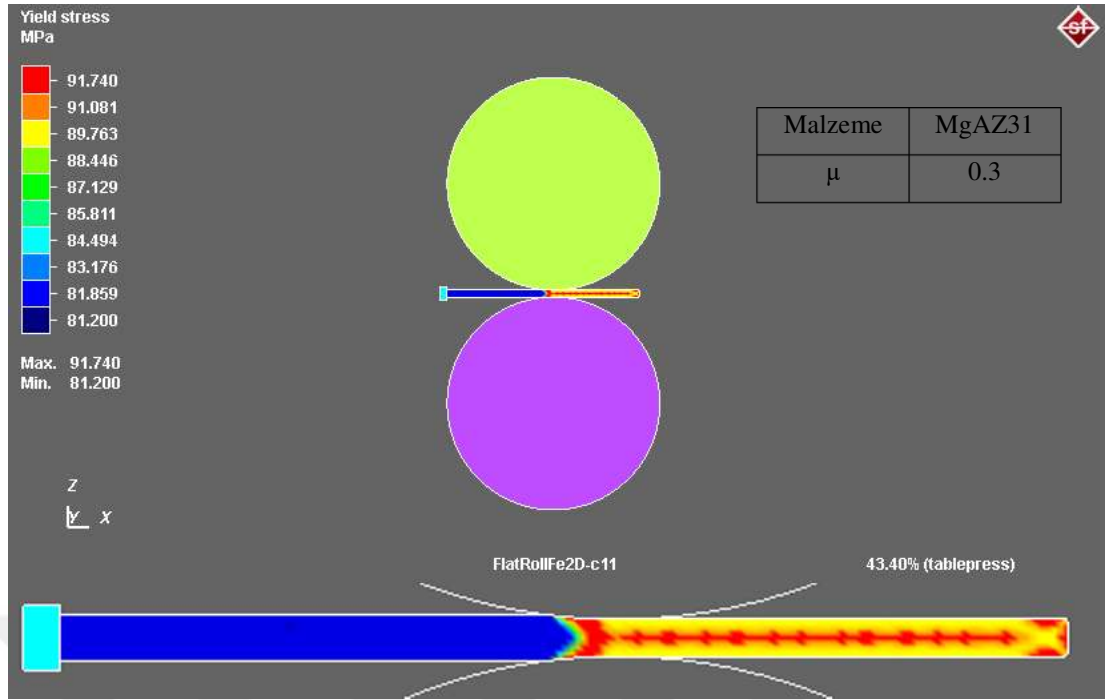
Malzeme türlerinin anlatıldığı bölümde çalışmada kullanılan metallerin saf haldeki kritik kayma gerilme değerleri, Al için 0.79 N/mm^2 , Mg için 0.44 N/mm^2 ve Ti için 13.71 N/mm^2 olarak verilmiştir. Kritik kayma gerilmesi plastik deformasyon kabiliyetini göstermektedir. Çalışmada kullanılan alaşımlar için haddeleme sırasında oluşan Z Kuvveti değerleri incelendiğinde beklenildiği gibi plastik şekil değiştirme kabiliyeti en iyi olan alaşım MgAZ31, daha sonra Al2024 ve en kısıtlı olan alaşımın Ti-6Al-4V olduğu yapılan analizler sonucunda da görülmüştür.

7.2.1. Malzeme Türüne Göre Gerilme Dağılımları

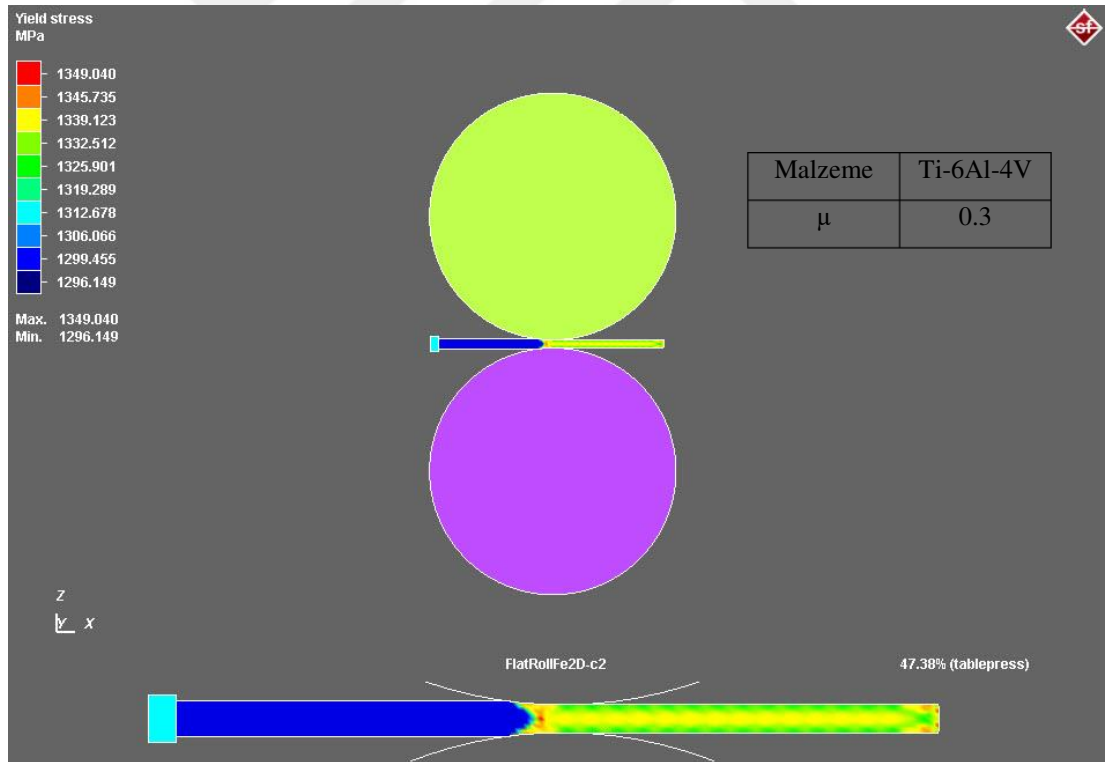
Üç farklı malzeme için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımları Şekil 7.20, Şekil 7.21 ve Şekil 7.22’de verilmiştir. Bu analizlerde μ 0.3 olarak ve merdane çapı 610 mm olarak alınmıştır.



Şekil 7.20. A2024, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



Şekil 7.21. MgAZ31, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı



Şekil 7.22. Ti-6Al-4V, μ 0.3 için iş parçası üzerinde oluşan akma gerilmesi dağılımı

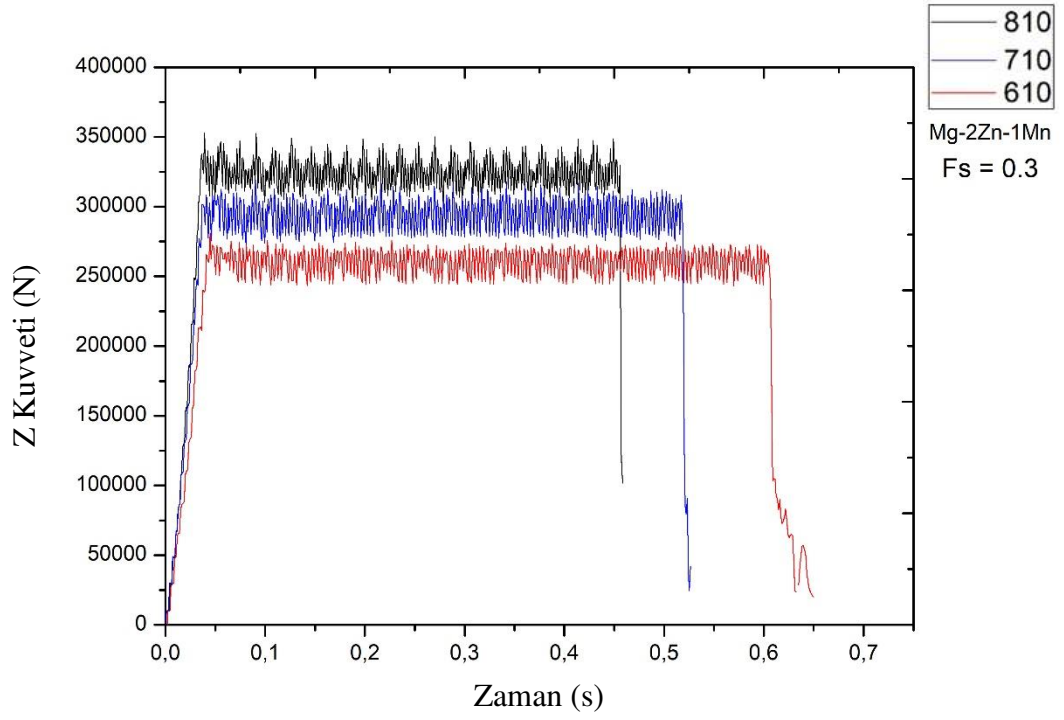
Farklı malzeme türleri için iş parçasında oluşan gerilme dağılımları incelendiğinde Z Kuvveti – Zaman grafiklerinde olduğu gibi malzeme türünün oluşan gerilme değerlerini de ciddi oranda etkilediği görülmüştür. İş parçası üzerinde en düşükten en yükseğe doğru oluşan gerilme değerleri MgAZ31 – Al2024 – Ti-6Al-4V sıralamasındadır.

7.3. Merdane Çaplarına Göre Sayısal Analiz Sonuçları

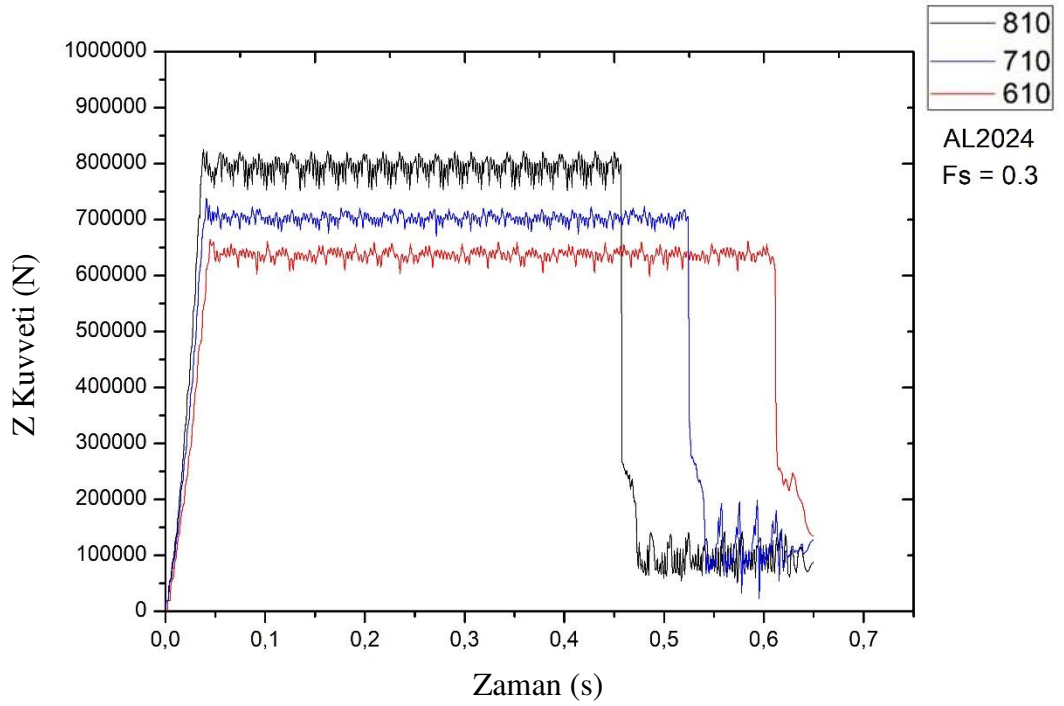
Analizlerde merdane çapının haddeleme parametrelerini nasıl etkilediğini incelemek için farklı merdane çaplarından oluşan 3 farklı haddeleme sisteminin analizleri yapılmıştır. Ayrıca tüm malzeme tipleri de kullanılmış olup sürtünme katsayısı 0.3 olarak alınmıştır. Kullanılan merdane çapları tablo 7.3’te verilmiştir.

Tablo 7.3. İncelenen merdane çapları

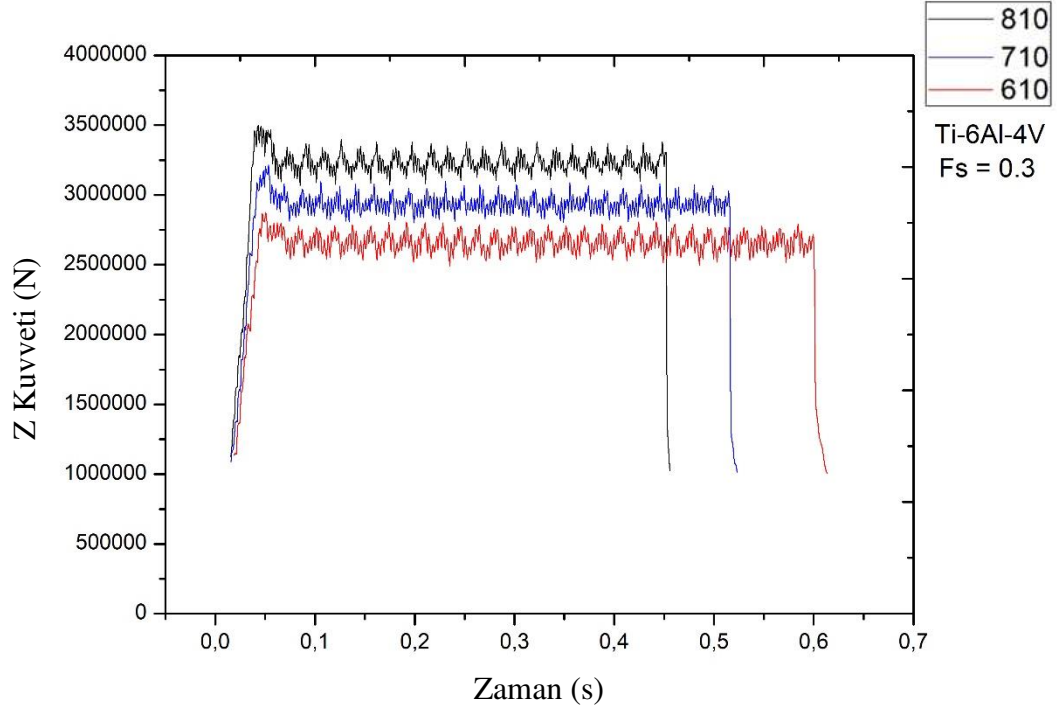
	Model 1	Model 2	Model 3
Merdane Çapı	610mm	710mm	810mm



Şekil 7.23. MgAZ31 malzemesi için çap değişiminin Z Kuvvetine etkisi

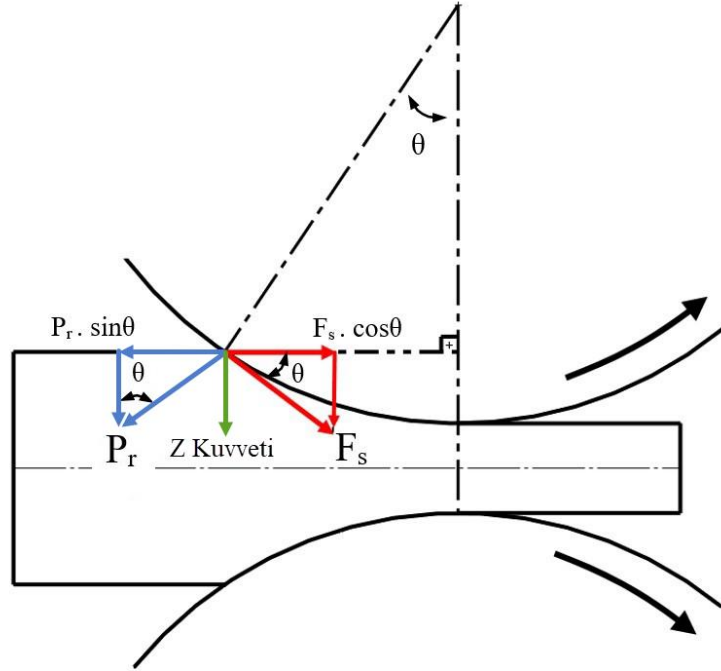


Şekil 7.24. Al2024 malzemesi için çap değişiminin Z Kuvvetine etkisi



Şekil 7.25 Ti-6Al-4V malzemesi için çap değişiminin Z Kuvvetine etkisi

Analizlerde elde edilen Z kuvvetinin, haddeleme süresince oluşan kuvvetler ile birlikte geometrik bağıntısı Şekil 7.26’da verilmiştir.

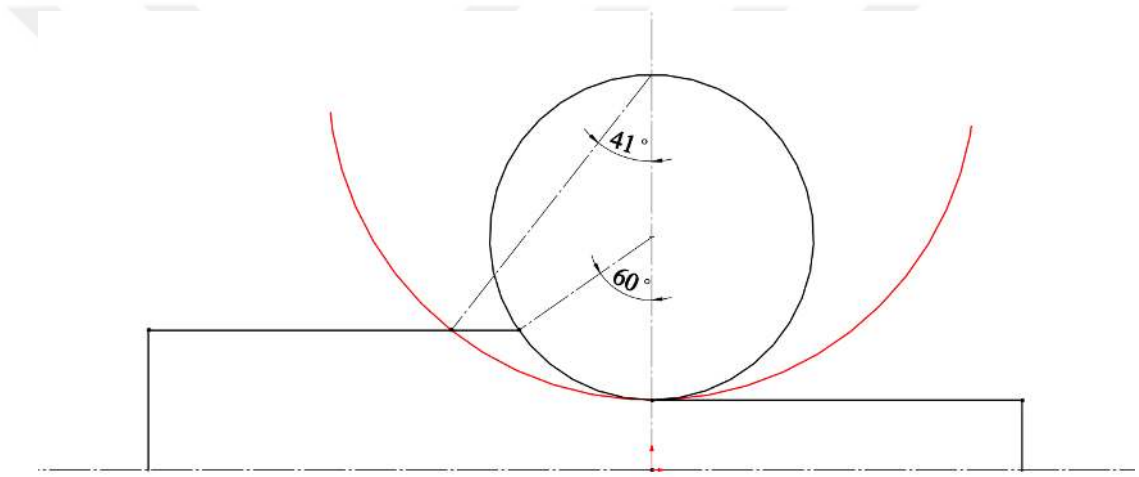


Şekil 7.26. Analiz sonuçlarında bulunan Z kuvvetinin geometrik bağıntısı ve haddeleme sırasında oluşan kuvvetler

Şekil 7.26 'da gösterilen Z kuvveti Pr haddeleme kuvveti veya Fs sürtünme kuvvetinin dikey bileşeni olarak ifade edilebilir. Z Kuvveti değeri denklem 7.1 ile elde edilebilir.

$$Z \text{ Kuvveti} = P_r \cdot \cos \theta \quad (7.1)$$

Haddeleme işleminde merdane çapının değişmesi Şekil 7.26'da gösterilen θ değerini değiştirmektedir. Bu açı değerinin merdane çapının artmasıyla nasıl değiştiği incelemek için örnek θ değerleri ile Şekil 7.27'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.27. Merdane çapının artışı ve açı değeri

Şekil 7.27'den merdane çapının artmasıyla " θ " açısının küçüldüğü görülmektedir ve verilen açı değerlerinin cos değerleri alındığında $\cos 41^\circ = 0.75$, $\cos 60^\circ = 0.5$ olarak bulunur. Bu ifadeden, " θ " açısının küçülmesi sayısal olarak $\cos \theta$ değerini arttırdığı anlaşılmaktadır. Denklem 7.1'de " $\cos \theta$ " ifadesinin artması ile oluşan Z Kuvvetini de arttırdığı görülmektedir. Başka bir ifade ile merdane çapının artması oluşan Z Kuvvetini arttırdığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Yapılan analizlerin sonuçları Şekil 7.23, Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'te verilmiştir. Sonuçlar ve teorik hesaplar incelendiğinde tüm malzeme tipleri için merdane çapının artması iş parçası üzerinde oluşan Z Force kuvvetini arttırdığı gözlenmiştir. Merdane

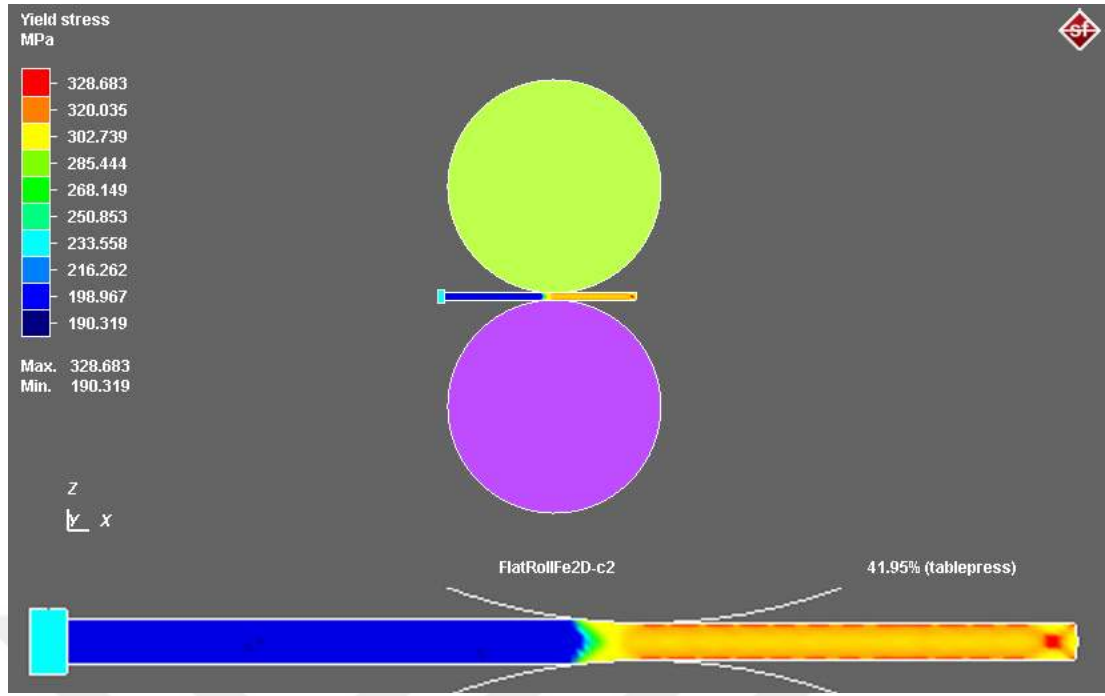
apının artması, iş parçası ve merdane arasındaki temas yüzeyini arttırır ve bu yüzeyin artması daha büyük sürtünme katsayısının oluşmasını sağlar. Bu nedenle merdane çapının artmasıyla, iş parçası üzerinde oluşan Z Force kuvvetinin artışı beklenen bir sonuçtur. Analiz sonuçlarında da bu yönde bir eğilim görülmüştür. Devarajan ve arkadaşları [25] da yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Merdane apı büyüdükçe haddeleme sisteminin maliyeti ciddi oranda artar ve sistemin üretimi, sistemin oluşan yüksek kuvvetlere dayanması için zorlaşır. Bu nedenle analiz sonuçlarından da anlaşıldığı gibi plastik deformasyonu sağlayacak mümkün olan en küçük çapta merdane kullanılarak sisteme gelen kuvvetler ve bu doğrultuda sistemin maliyeti ciddi oranda azaltılabilir.

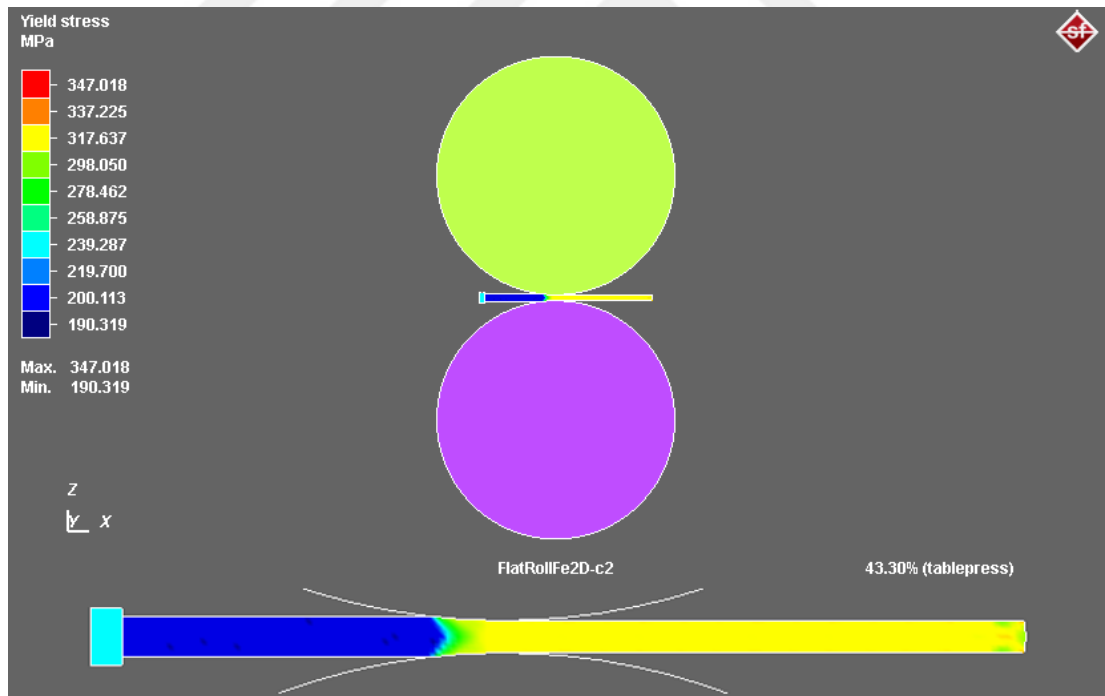
7.3.1. Merdane aplarına Göre Oluşan Gerilme Dağılımları

İş parçası üzerinde oluşan gerilme değerlerinin farklı merdane çapına göre değişimleri verilmiştir.

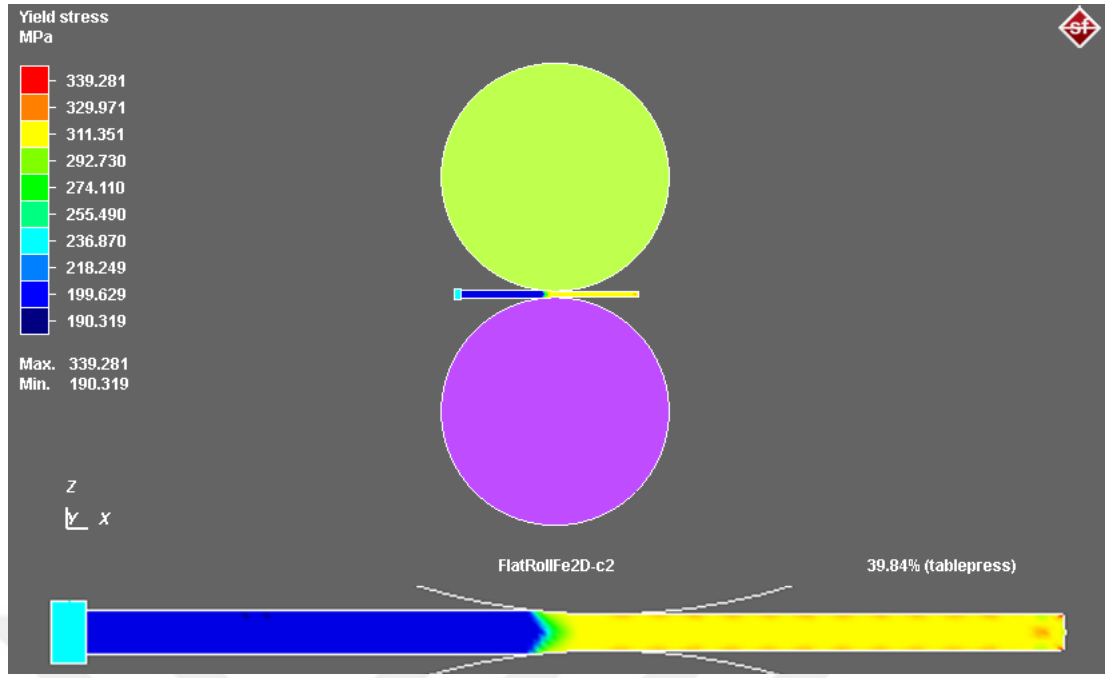
Al2024 malzemesi ve μ 0.3 değeri için 610-710 ve 810 mm merdane çapları için oluşan gerilme dağılımları şekil 7.28, şekil 7.29 ve şekil 7.30’da verilmiştir.



Şekil 7.28. 610mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı



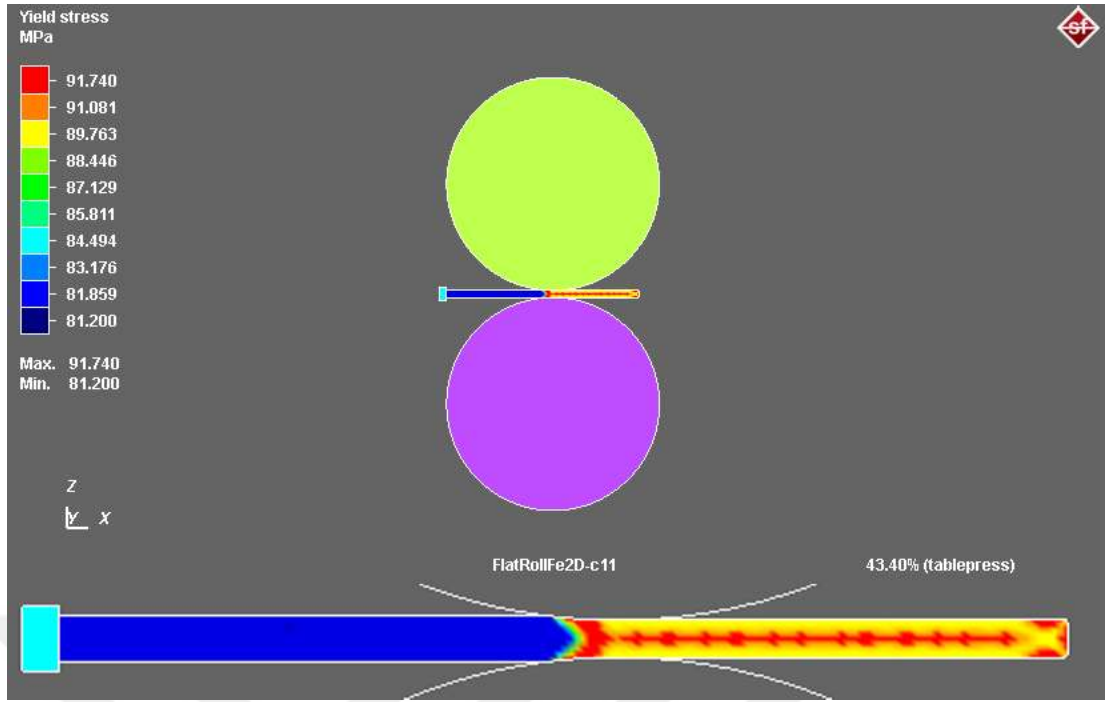
Şekil 7.29. 710mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı



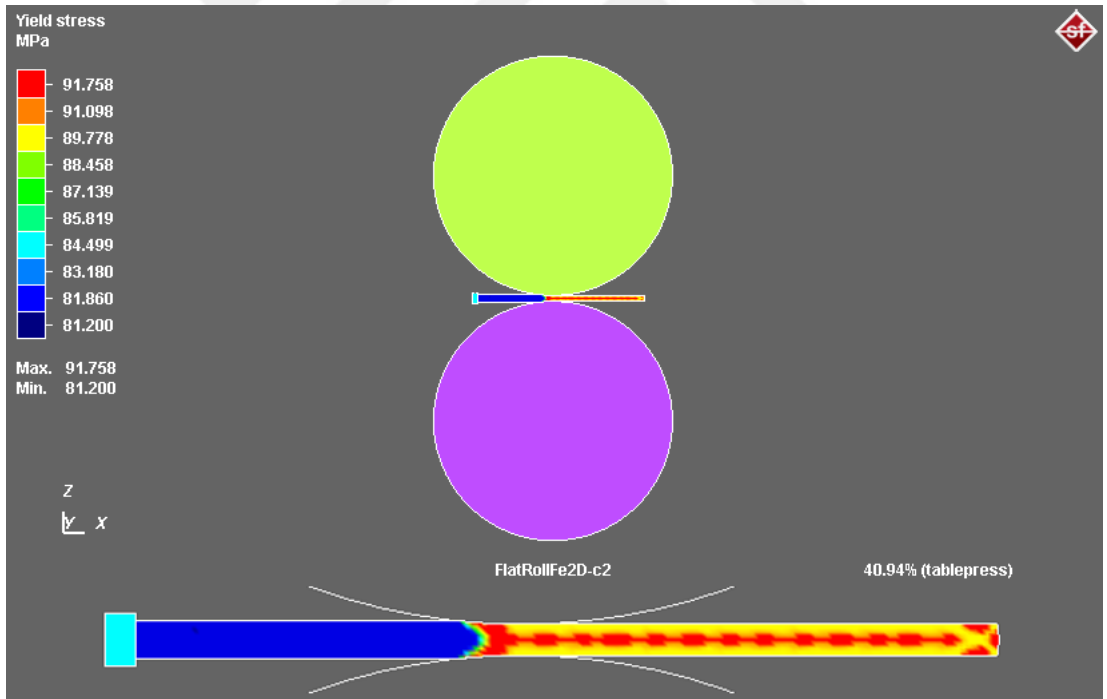
Şekil 7.30. 810mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı

Merdane çapının artmasıyla birlikte iş parçası üzerinde oluşan gerilme değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

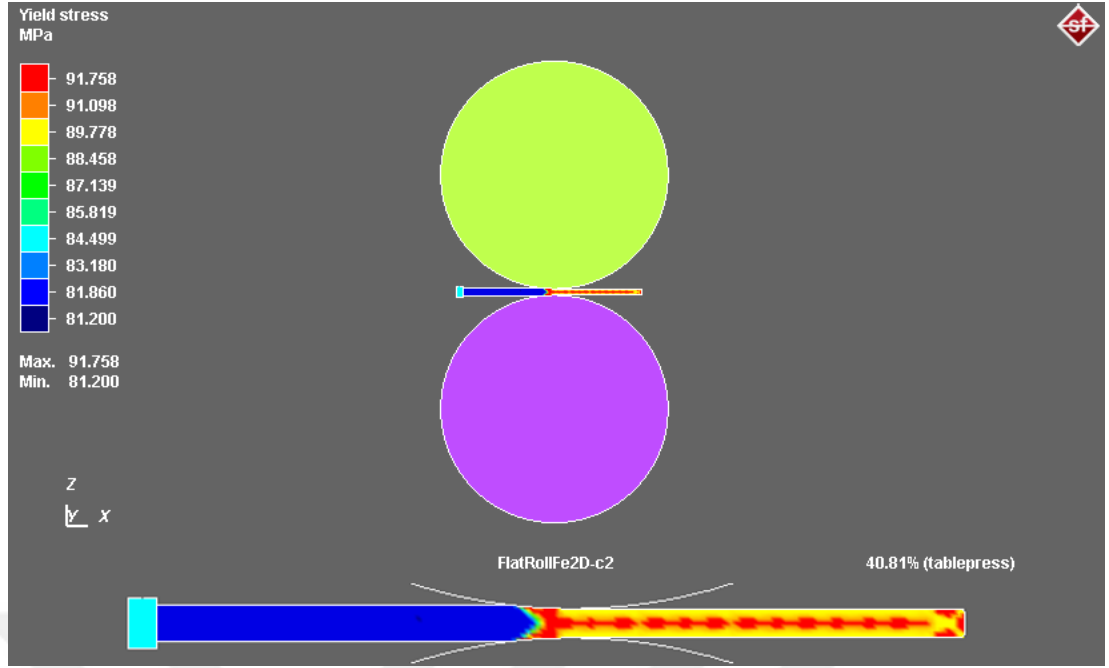
MgAZ31 malzemesi ve μ 0.3 değeri için 610-710 ve 810 mm merdane çapları için oluşan gerilme dağılımları Şekil 7.31, Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'teki gibidir.



Şekil 7.31. 610mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı



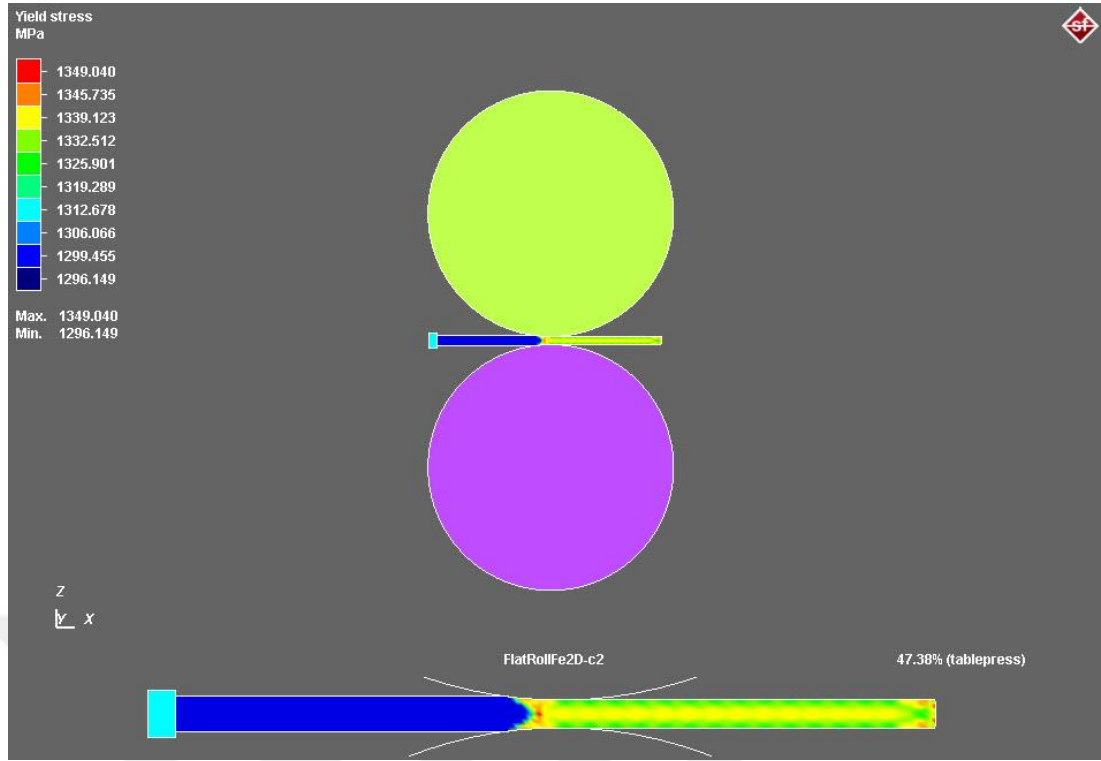
Şekil 7.32. 710mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı



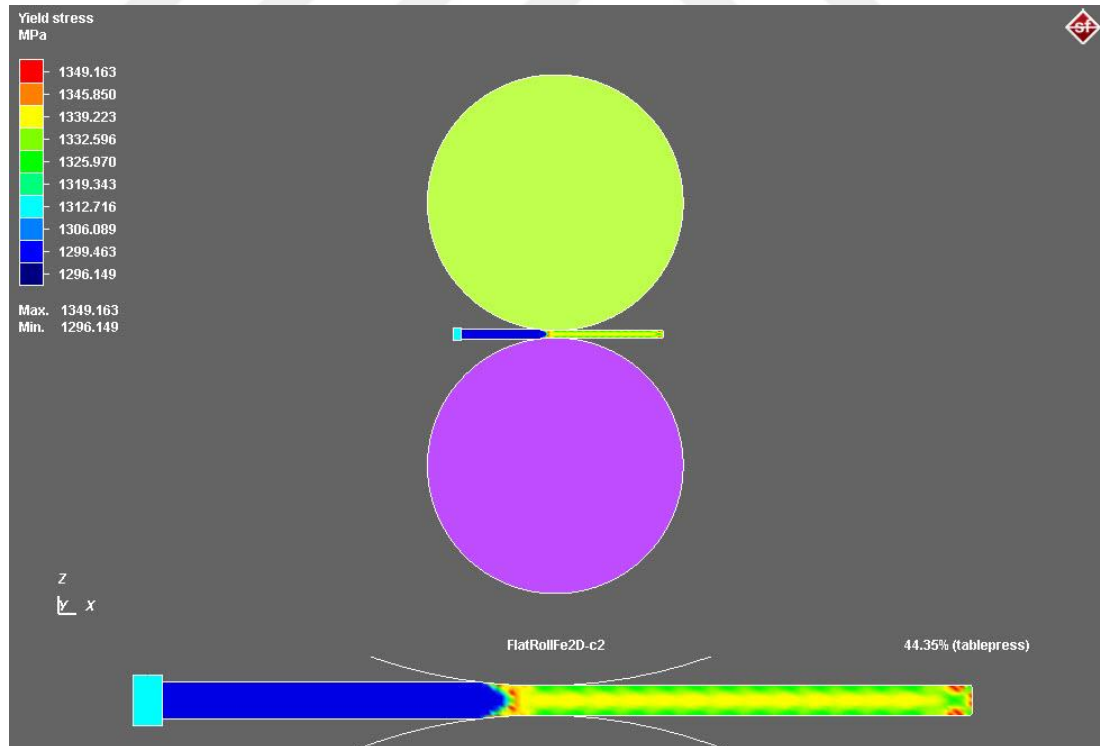
Şekil 7.33. 810mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı

MgAZ31 malzemesi için iş parçası üzerinde oluşan düşük gerilme değerleri için merdane çapının artmasıyla birlikte oluşan gerilme değerinin de küçük artışlar olduğu gözlemlenmiştir.

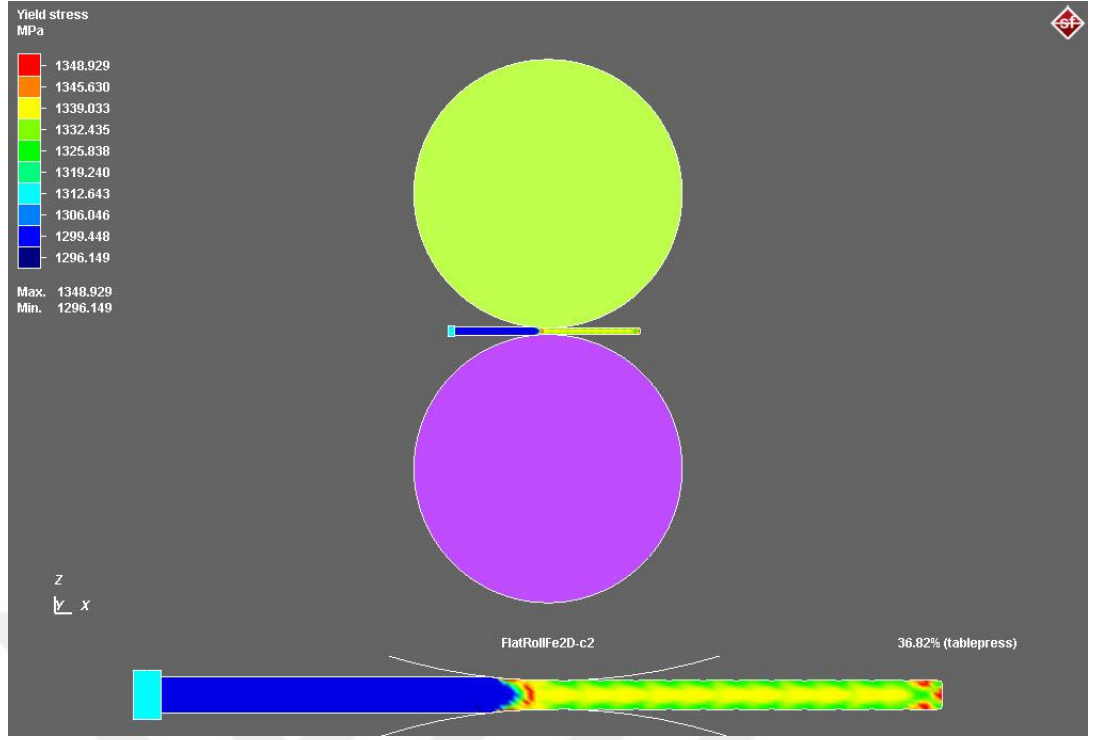
Ti-6Al-4V malzemesi ve μ 0.3 değeri için 610-710 ve 810 mm merdane çapları için oluşan gerilme dağılımları Şekil 7.34, Şekil 7.35 ve Şekil 7.36'daki gibidir.



Şekil 7.34. 610mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı



Şekil 7.35. 710mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı



Şekil 7.36. 810mm merdane çapı için iş parçası üzerinde oluşan gerilme dağılımı

Ti-6Al-4V malzemesi için iş parçası üzerinde oluşan yüksek gerilme değerleri için merdane çapının artmasıyla birlikte oluşan gerilme dağılımında ki değişiklikler net olarak gözlemlenememiştir fakat parça üzerindeki gerilme dağılımlarında küçük değişimler olduğu gözlemlenmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstride yaygın olarak kullanılan, plastik şekil verme yöntemlerinden biri olan haddeleme sisteminin sonlu elemanlar yöntemi ile sistemde kullanılan parametrelerin sonucu nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak haddeleme sistemi için kritik öneme sahip μ sürtünme katsayısının iş parçası üzerinde oluşan kuvvetleri nasıl etkilediği araştırılmıştır. Daha sonra malzeme türünün, plastik şekil verme davranışlarına etkisini araştırmak amacıyla 3 farklı malzeme türü kullanılarak, plastik şekil verme yöntemlerinden biri olan haddeleme sistemi üzerinde nasıl değişti incelenmiştir. Çalışmanın son bölümünde haddeleme sisteminde iş parçasına şekil veren, plastik deformasyonu sağlayan merdane çaplarının sistemi nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu 3 temel konuda bulunan sonuçlar şu şekildedir;

1) Sürtünme Katsayısına Göre Sonuçlar;

- Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda, sistemde oluşan μ sürtünme katsayısının değeri arttıkça iş parçası üzerinde meydana gelen Z Kuvvetinin de arttığı görülmüştür.
- Çok yüksek Z Kuvvetinin oluştuğu sistemlerde μ sürtünme katsayısı değerinin oluşan kuvvet üzerinde çok az etkisi olduğu görülmüştür.
- Sürtünme katsayısı değerinin artması belirli bir kritik değerden sonra oluşan Z Kuvvetini etkilemediği görülmüştür. Tüm malzeme tipleri için optimum μ değerinin 0.2 ile 0.3 arasında olduğu ön görülmüştür.

2) Malzeme Türüne Göre Sonuçlar;

- Teorik bilgiler ve yapılan diğer çalışmalar doğrultusunda bu çalışmada da yapılan analizlerde malzeme türünün plastik şekil verme üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- İş parçası üzerine etkiyen Z Kuvvetinin malzeme türüne göre değiştiği gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan malzeme türleri için haddeleme yetenekleri şu şekilde sıralanabilir; MgAZ31 – Al2024 – Ti-6Al-4V

3) Merdane Çaplarına Göre Sonuçlar;

- Her üç malzeme içinde yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda merdane çapının iş parçası üzerinde oluşan kuvvetleri ciddi oranda etkilediği gözlemlenmiştir.
- Artan merdane çapı ile birlikte iş parçası üzerinde oluşan Z Kuvvetinin de arttığı görülmüştür.
- Merdane çapının artması haddeleme sistemi için ciddi maliyet artışına sebep olmaktadır. Bu nedenle merdane çapı seçilirken plastik deformasyon için yeterli en küçük çap değeri seçilmelidir.

Daha önce yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde haddeleme parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan incelemeleri görülmektedir. Fakat bu çalışmalarda özellikle sürtünme katsayısının geniş değer aralığında incelenmediği, malzeme türünün haddeleme kuvvetleri üzerindeki etkisinin araştırılmadığı ve merdane çaplarının tüm bu parametreler doğrultusunda incelenmediği görülmüştür. Bu çalışma da tüm bu parametreler sonlu elemanlar

yöntemi ile incelenip haddeleme sistemi üzerine farklı bakış açısı kazandırmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak yapılabilecek çalışmalar; sıcak haddeleme içinde yapılarak parametrelerin sıcaklıkla olan değişimi incelenebilir, sürtünme katsayısının değeri düşürülerek daha hassas sonuçlar alınabilir, daha farklı kristal yapıdaki malzemeler karşılaştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] İkiz, B. Sıcak Haddelemede Tempcore Prosesi. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 2009, 56s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [2] Orak, İ.M., Erkaymaz, H. Soğuk Haddehane Tandem Sisteminin Bulanık Mantık İle Modellenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs, 2011, Elazığ.
- [3] Çapan, L. Metallerde Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitapevi, İstanbul, 2010, 442 s.
- [4] Groover, M.P., Fundamentals Of Modern Manufacturing. Thomson Digital, United States of America, 2010, 1025 s.
- [5] Yıldız, Y., Alüminyum Folyo Haddelemede Kullanılan Merdanelerin Taşlama Operasyonu İle Kazandıkları Yüzey Özelliklerinin Haddeleme Prosesine Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2011, 101 s.
- [6] Kayalı, E.S., Çimenoglu, H. Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları Problemleri ve Çözümleri. Bilim Teknik Yayın Evi, İstanbul, 1995, 105 s.
- [7] Toptaş, C., Yassı Çelik Haddelemede Kullanılan Sıcak Şerit Haddehane Hadde Merdanelerinin Aşınma Parametrelerinin Optimizasyonu İle Servis Ömürlerinin Uzatılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2015, 99 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [8] Altınkaya, H., Ray Ve Profil Haddeleme İşlemlerinin Simülasyonu. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 2015, 129 s. (Doktora Tezi)
- [9] <http://www.onderalioglu.com/portfolio-3/sunumlar/389-haddeleme> (Ziyaret tarihi: 12.05.2019)
- [10] Köseoğlu, M. S., Yassı Çelik Haddeleme İşleminde Merdane Yük Parametrelerinin İncelenmesi ve Merdane Konumlandırma. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 2008, 81 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [11] Baykal, H., Alüminyum Alaşımlarının Soğuk Haddelenmesinde Yük Hesabı Metodlarının Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 1999, 77s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [12] Erol, R., Gaz Altı Ark Kaynağı Yönteminde Proses Parametrelerinin Yapıdaki Çarpılmaya Etkisinin İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik, 2017, 76s. (Yüksek Lisans Tezi)

- [13] Koç, S. Asansör Kılavuz Ray Konsollarının Gerilme Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2009, 121s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [14] Bedir, S. Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi Ve Sonlu Elemanların Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007, 177s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [15] Erol, R. Gaz Altı Ark Kaynağı Yönteminde Proses Parametrelerinin Yapıdaki Çarpılmaya Etkisinin İncelenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik, 2017, 76s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [16] Erdil, A.B. Portal Krenlerin Tasarımı Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007, 126s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [17] Kartal F., AISI 316L paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğinin sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2010, 139s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [18] Gök. K., Gök. A., Ansysworkbench – Bilgisayar Destekli Yapısal Analiz Uygulamaları. Süleyman Neşeli, Abaküs Kitap, 2018, 376s.
- [19] Ovalı. İ., Esen. C., Ansys Workbench. Kodlab Yayın, İstanbul, Türkiye, 2017, 550s.
- [20] Yüksel. M., Meran. C., Malzeme Bilgisine Giriş, Tmmob Makina Mühendisleri Odası, Denizli, Türkiye, 2013, 568s.
- [21] Savaşkan. T., Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi, Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul, Türkiye, 2017, 419s.
- [22] Li, Pubo., Chen, Tijun. Tensile Properties and Fracture Behavior of a Powder-Thixoformed 2024Al/SiCp Composite at Elevated Temperatures. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, 2017, 408-421.
- [23] Lee, Sanghyun., Ham, Hye Jeong., Kwon, Su Yong., Kim, Sok Won., Suh, Chang Min. Thermal Conductivity of Magnesium Alloys in the Temperature Range from -125 °C to 400 °C. Int J Thermophys, 2013, 2343-2350.
- [24] Dinda, G.P., Song, L., Mazumder., Fabrication of Ti-6Al-4V Scaffolds by Direct Metal Deposition. Metallurgical And Materials Transactions A, 2008, 2914-2922.
- [25] Devarajan, K., Prakash., Ramesh, Dr. Ajith., FEM Analysis of Effect of Rolling Parameters on Cold Rolling Process. Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, 2012, 35-40.
- [26] Gunasekera, J.S., Jia, Zhengjie., Malas, J.C., Rabelo, L., Development of a neural network model for a cold rolling process. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998, 597-603.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cemal ESEN

Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1994

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : cml.esn94@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Çiğli Yıldız Tinas İzmiroğlu Anadolu Lisesi, 2012

Lisans : Pamukkale Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 2016

Mesleki Deneyim

Korbis Çelik A.Ş. 2018-2018

Barok Savunma ve Tasarım Mühendislik 2018- (halen)

Yayınları

1. Ovalı. İ., Esen. C., Ansys Workbench. Kodlab Yayın, İstanbul, Türkiye, 2017, 550s.
2. Ovalı. İ., Esen. C., Projeler ile Catia. Kodlab Yayın, İstanbul, Türkiye, 2017, 469s.
3. Ovalı. İ., Esen. C., Uygulamalar İle Autocad. Kodlab Yayın, İstanbul, Türkiye, 2018, 236s.
4. Ovalı. İ., Esen. C., SolidWorks ile Tasarımdan İmalata. Gökçe Ofset, Ankara, Türkiye, 2015, 531s.