

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**SICAK HADDELEME YÖNTEMİYLE ELDE EDİLMİŞ  
PROFİLİN SİMÜLASYON UYGULAMASIYLA GERİ ESNEME  
VE ARTIK GERİLME MİKTARININ BELİRLENEREK  
PROTOTİP BÜKME UYGULAMASININ  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Aytaç BAŞSÜLLÜ**

**Danışman  
Doç. Dr. Hülya DURMUŞ**



**MANİSA-2019**

**Aytaç  
BAŞSÜLLÜ**

**SICAK HADDELEME YÖNTEMİYLE ELDE EDİLMİŞ PROFİLİN SİMÜLASYON  
UYGULAMASIYLA GERİ ESNEME VE ARTIK GERİLME MİKTARININ  
BELİRLENEREK PROTOTİP BÜKME UYGULAMASININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**2019**

## TEZ ONAYI

Aytaç BAŞSÜLLÜ tarafından hazırlanan "**Sıcak Haddeme Yöntemiyle Elde Edilmiş Profilin Simülasyon Uygulamasıyla Geri Esneme Ve Artık Gerilme Miktarının Belirlenerek Prototip Bükme Uygulamasının Gerçekleştirilmesi**" adlı tez çalışması 03/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Doç. Dr. Hülya DURMUŞ**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Osman ÇULHA**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğr. Üyesi Mustafa EROL**  
Dokuz Eylül Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Aytaç BAŞSÜLLÜ**



# İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ .....	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT .....	X
1 GİRİŞ.....	1
2 GENEL BİLGİLER.....	6
2.1 Haddeleme .....	6
2.1.1 Haddeleme Prosesinde Sınıflandırma .....	6
2.2 Hadde Tesisleri .....	8
2.2.1 Haddelemede Ürün Çeşitleri.....	8
2.2.2 Haddelemede Üretim Akışı .....	9
2.2.3 Profillerin Haddelenmesi Süreçleri.....	11
2.2.4 Haddeleme Prosesi Süresince Etkili Kuvvet ve Geometrik Esaslar .....	16
2.3 Bükme Prosesi .....	19
2.3.1 Bükme Prosesinde Sınıflandırma .....	22
2.3.2 Vals Topları İle Bükme.....	23
2.3.3 Bükme Proseslerinde Meydana Gelen Kusurlar .....	26
2.3.3.1 Geri Esneme.....	26
2.3.3.2 Kesit Distorsiyonu .....	29
2.3.3.3 Buruşma .....	29
2.3.3.4 Kırılma .....	30
2.4 Madenlerde Tahkimat .....	30
2.4.1 Tahkimat Türleri .....	30
2.4.1.1 Çelik Tahkimatlar .....	31
2.4.1.2 Tahkimat Malzemesi Olarak Çelik Profillerin Özellikleri .....	33
3 MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	35
3.1 Materyal.....	35
3.2 Yöntemler .....	37
3.2.1 Sonlu Elemanlar Metodu Temelli Soğuk Deformasyon Simülasyonları. 39	
3.2.1.1 Üç Nokta Eğme Testi Prosesi Tasarım ve Simülasyon Faaliyetleri .....	39
3.2.1.2 Dört Toplu Profil Bükme Prosesi Tasarım ve Simülasyon Faaliyetleri 41	

3.2.2	Maden Profillerinin Prototip Soğuk Deformasyon Uygulaması.....	51
3.2.2.1	Prototip Soğuk Deformasyon Uygulama Aşaması .....	51
3.2.3	Prototip Soğuk Deformasyon Prosesi Sonrası Maden Profilleri Bükme Yüzeylerinin İncelenmesi.....	54
4	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	56
4.1	Üç Nokta Eğme Testi Simülasyon Faaliyetleri Sonuçları .....	56
4.2	Dört Toplu Bükme Prosesi Simülasyon Faaliyetleri Sonuçları .....	58
4.3	Tahribatsız Muayene Sonuçları .....	70
5	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	72
	KAYNAKLAR .....	77
	ÖZGEÇMİŞ .....	80



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><math>I_x</math></b>	X Eksenine Göre Atalet Momenti
<b><math>I_y</math></b>	Y Eksenine Göre Atalet Momenti
<b>Kg/m</b>	Profillerin 1 Metre Uzunluğunun Ağırlığı
<b>TH</b>	Toussaint-Heintzmann
<b><math>W_x</math></b>	X Eksenine Göre Mukavemet Momenti
<b><math>W_y</math></b>	Y Eksenine Göre Mukavemet Momenti



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Tane dizilimleri (a) Soğuk haddeleme (b) Sıcak haddeme .....	7
Şekil 2.2. Yarı mamuller ve kesitleri .....	8
Şekil 2.3. Haddeleme ile elde edilen ürünler .....	9
Şekil 2.4. a)Açık kalibre b)Açık kalibre c) Kapalı kalibre .....	11
Şekil 2.5. Profil haddelenmesinde kullanılan kalibre düzenlerine örnek.....	12
Şekil 2.6. NPI profili ve kesitleri .....	13
Şekil 2.7. U profil ve kesiti .....	13
Şekil 2.8. L profil ve kesitleri.....	14
Şekil 2.9. Z profil ve kesiti.....	14
Şekil 2.10. T profil ve kesiti.....	15
Şekil 2.11. Boru profil ve kesitleri .....	15
Şekil 2.12. Ray profil çeşitleri .....	16
Şekil 2.13. Özel kesitli profillere bir örnek.....	16
Şekil 2.14. Haddeleme kuvvetleri .....	17
Şekil 2.15. Soğuk deforme edilmiş profillerin kullanıldığı sektörler.....	19
Şekil 2.16. Bükme kalitesini etkileyen parametreler .....	20
Şekil 2.17. Deformasyon proseslerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	20
Şekil 2.18. Bükme açısı-esneme grafiği.....	21
Şekil 2.19. Bükme işlemlerinde meydana gelen çeki ve bası gerilmeleri.....	21
Şekil 2.20. Bükme proses örnekleri .....	23
Şekil 2.21. Vals topları ile bükme prosesi .....	24
Şekil 2.22. Vals topları kullanılarak bükme prosesi örneği ve artık gerilme meydana geliş süreci.....	24
Şekil 2.23 a) Üç toplu bükme makinesi b) Dört toplu bükme makinesi .....	25
Şekil 2.24 a) Yatay pozisyonlu profil bükme makinesi b) Dikey pozisyonlu profil bükme makinesi .....	26
Şekil 2.25. Geri esnemenin şematik görüntüsü.....	27
Şekil 2.26. Gerilme-birim deformasyon diyagramı .....	28
Şekil 2.27. a) Bükülen boruda meydana gelen et kalınlığı değişimi b) Bükülen borunun doğrultma işleminden sonraki kesit görünümü.....	29
Şekil 2.28. Bükme işlemlerinde meydana gelen buruşma .....	30
Şekil 2.29. Çelik malzemenin mekanik özellikleri .....	33
Şekil 3.1. Profil üretiminin hammaddesi olan kütük ve üretilen TH profil .....	35
Şekil 3.2. TH34 profile ait profil kesiti .....	36
Şekil 3.3. TH34 geçme tahkimat sistemi .....	37
Şekil 3.4. Simufact.forming yazılımı .....	38
Şekil 3.5. Üç nokta eğme testi simülasyon modelleme çalışması görseli.....	40
Şekil 3.6. Üç nokta eğme simülasyonu simülasyon penceresi görseli.....	41
Şekil 3.7. Dört toplu bükme prosesinde kullanılacak olan TH34 iş parçası .....	41
Şekil 3.8. Dört toplu bükme proseslerinde kullanılacak olan yan bükme topları .....	42
Şekil 3.9. Dört toplu bükme proseslerinde kullanılacak olan üst bükme topu....	42
Şekil 3.10. Dört toplu bükme proses kurgusu görünümü .....	43
Şekil 3.11. Referans alınan TH34 tahkimatına ait teknik resim .....	43
Şekil 3.12. Simufact.forming proses akış çizelgesi.....	44
Şekil 3.13. Yoğunluk grafiği.....	45
Şekil 3.14. Spesifik ısı kapasitesi.....	45
Şekil 3.15. Isı iletim katsayısı .....	46



Şekil 3.16. Isıl genleşme katsayısı .....	46
Şekil 3.17. Young modülü .....	47
Şekil 3.18. Akış gerilmesi grafiği .....	47
Şekil 3.19. Poisson oranı.....	48
Şekil 3.20. Bükme prosesinde bükme işlemini gerçekleştirecek olan tahrikli toplara ilişkin strok ve açılma hız girdileri görselleri .....	49
Şekil 3.21. Sürtünme modeli ve şartlarının tanımlanması .....	49
Şekil 3.22. Kalıp ve iş parçası sıcaklıklarının tanımlanması .....	50
Şekil 3.23. Simufact.forming yazılımında iş parçası ağ yapısının oluşturulması ve ağ yapı görüntüsü.....	50
Şekil 3.24. Simufact.forming yazılımı ile oluşturulan simülasyon kurgusu genel görünümü .....	51
Şekil 3.25. Prototip bükme uygulamalarında kullanılan boy kesim işlemi tamamlanmış işparçaları.....	52
Şekil 3.26. Dört Toplu profil bükme makinesi .....	52
Şekil 3.27. Prototip bükme uygulaması aşaması.....	53
Şekil 3.28. Prototip bükme işlemi sonrasında elde eden ilk ürünler.....	53
Şekil 3.29. Prototip bükme işlemi sonrasındaki seri üretim ürünler .....	54
Şekil 3.30. Bükülmüş TH34 profillerin; a,b) Dış yüzeyinin tahribatsız muayene aşaması örneği, c,d) İç yüzeyinin tahribatsız muayene aşaması örneği.....	55
Şekil 4.1. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonundaki gerinim dağılımı ....	56
Şekil 4.2. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonundaki gerilme dağılımı ....	57
Şekil 4.3. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonu kalıplara etkiyen kuvvet. ....	57
Şekil 4.4. TH34 profil üçnokta eğme simülasyonu sonu geri esneme davranışı .....	58
Şekil 4.5. Proses başlangıcında bükme proses simülasyonu iş parçası sıcaklık dağılımları .....	59
Şekil 4.6. Ark oluşum aşamasında bükme proses simülasyonu iş parçası sıcaklık dağılımları .....	59
Şekil 4.7. Proses sonu bükme proses simülasyonu iş parçası sıcaklık dağılımı .	60
Şekil 4.8. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu proses başlangıcındaki gerinim çıktıları.....	60
Şekil 4.9. TH34 profil dört toplu bükme prosesi galeri arkının oluşumundaki simülasyonu gerinim çıktıları.....	61
Şekil 4.10. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu radyüsün tamamlanmasındaki gerinim çıktıları.....	61
Şekil 4.11. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu sonu iş parçası gerinim çıktıları .....	61
Şekil 4.12. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu sonu iş parçasının dış yüzeyinin gerinim dağılımı .....	62
Şekil 4.13. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu sonu iş parçasının iç yüzeyinin gerinim dağılımı .....	62
Şekil 4.14. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu gerilme dağılımı verileri .....	63
Şekil 4.15. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu sonu iş parçası iç ve dış yüzey gerilme dağılımı verileri .....	64
Şekil 4.16. Bükme toplarına ait tork ihtiyacı grafikleri .....	65
Şekil 4.17. Bükme toplarına ilişkin tork gereksinim diyagramı .....	66
Şekil 4.18. Bükme toplarına etki eden X-ekseni kuvvet dağılım grafikleri.....	66
Şekil 4.19. Bükme toplarına etkiyen X-ekseni genel kuvvet dağılım grafikleri.	67
Şekil 4.20. Bükme toplarına etki eden Y-ekseni kuvvet dağılım grafikleri.....	68

Şekil 4.21. Bükme toplarına etkiyen Y-ekseni genel kuvvet dağılım grafikleri .	68
Şekil 4.22. Bükme toplarına etki eden Z-ekseni kuvvet dağılım grafikleri .....	69
Şekil 4.23. Bükme prosesi Z-ekseni kuvvetlerinin zamana bağlı değişim grafiği	70
Şekil 4.24. Bükülmüş TH34 profillerin; (a) Dış yüzeyinin tahribatsız muayene sonundaki yüzey görüntüsü ve (b) İç yüzeyinin tahribatsız muayene sonundaki yüzey görüntüsü.....	71



## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. Bazı profillerin mukavemet momenti ve rankin oranı.....	33
Tablo 3.1. TH34 profile ait kesit özellikleri çizelgesi.....	36
Tablo 3.2. S480W ve 31Mn4 malzemelere ilişkin mekanik özellikler tablosu ..	37
Tablo 3.3. Üç nokta eğme simülasyonu girdi parametreleri tablosu.....	40
Tablo 3.4. TH34 profil dört toplu profil bükme simülasyon parametreleri tablosu	44
Tablo 4.1. Bükme toplarının tahriklenmesine ilişkin tork gereksinimi tablosu..	66
Tablo 4.2. X-Eksenine ait kuvvet simülasyon çıktıları .....	67
Tablo 4.3. Bükme toplarına Y-Ekseninde etkiyen kuvvet verileri.....	68
Tablo 4.4. Bükme toplarına Z-Ekseninde etkiyen kuvvet verileri .....	69



## TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hülya DURMUŞ' a, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili hocam Sayın Doç. Dr. Osman ÇULHA' ya, yüksek lisans eğitimim sırasında desteği ve simülasyon faaliyetleri ve bükme uygulamalarının yapılması konusunda her türlü imkan ve desteği veren Sayın KOCAER Haddecilik Sanayi ve Ticaret A.Ő. Ar-Ge Merkezi çalıőanlarına, çalıőmalarım sırasında manevi desteğini her zaman hissettiğim değerli eőime, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Aytaç BAŞSÜLLÜ  
Manisa, 2019

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### Sıcak Haddeleme Yöntemiyle Elde Edilmiş Profilin Simülasyon Uygulamasıyla Geri Esneme Ve Artık Gerilme Miktarının Belirlenerek Prototip Bükme Uygulamasının Gerçekleştirilmesi

Aytaç BAŞSÜLLÜ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hülya DURMUŞ

Maden galerileri ve tünellerde kullanılan sıcak haddelenmiş Toussaint-Heintzmann (TH) ismi ile anılan maden profilleri, haddeleme prosesi sonucunda uzun ürün olarak elde edilmektedir. Kalibrasyon parametreleri ve hammadde özelliklerine göre ürün istenilen uzunlukta hat üstünde kesilmekte, platform üzerinde soğutulmakta ve son olarak doğrultulmaktadır. Fakat ürün bu şekilde galeri veya tünellerde kullanılamaz. Standartların belirttiği tolerans değerleri içerisinde ve hedeflenen galeri ark ölçülerinde olmaları gerekmektedir. Kayar tahkimat, trapezoid vb. olarak monte edilebilmeleri için soğuk deforme edilmiş veya bükülmüş olmalıdırlar. Bükme esnasında en önemli tasarım girdisi % deformasyon ve geri esneme miktarı ile deformasyon yüküdür.

Bu çalışmada; TH kesitte ve farklı boyutlarda sıcak veya termomekanik olarak haddelenmiş maden veya tünel profillerinin galeri tipine göre soğuk deformasyon şartları araştırılmıştır. Geri esneme ve kalıntı gerilme miktarının tespiti ve optimize edilmesi için sonlu elemanlar metodu temelli bükme simülasyonları çalışmaları yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu temelli bükme simülasyon çalışmalarından elde edilen proses parametrelerine göre prototip bükme faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Böylece maden ve tünel tahkimat sistemi elemanları olan kemerlerin elde edilmesi sağlanmıştır. Simülasyon destekli deformasyon süreçleri ve prototip bükme uygulamaları birbirleri ile kıyaslanarak geri esnemenin telafisine ve maden profillerinin soğuk deformasyon süreçlerindeki çatlak oluşumunun engellenmesine ilişkin çıktılar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** TH Profil, Soğuk Deformasyon, Geri Yaylanma, Kalıntı Gerilme, Bükme, Simülasyon

2019, 81 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Realization of Prototype Bending Application by Determining Back Stretch and Residual Stress Amount by Applying Profiled Simulation Using Hot Rolling Method**

**Aytaç BAŞSÜLLÜ**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Metallurgy And Materials Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hülya DURMUŞ**

The mine profiles, which are called hot rolled Toussaint-Heintzmann (TH) used in mining galleries and tunnels, are obtained as a long product as a result of rolling process. According to the calibration parameters and raw material properties, the product is cut to the desired length on the line, cooled on the platform and finally straightened. However, the product cannot be used in galleries or tunnels in this way. They must be within the tolerance values specified by the standards and in the dimensions of the targeted gallery arc. They must be cold deformed or cold bent as they can be assembled as sliding support formations, trapezoid, etc. During bending, the most important design input is the % deformation and springback amount with deformation load.

In this study; Cold deformation conditions of hot or thermomechanically rolled mine or tunnel profiles of different temperature and sections of TH section were investigated. Finite element method based bending simulations have been done to determine and optimize the amount of springback and residual stress. According to the process parameters obtained from bending simulation studies based on finite element method, prototype bending activities were performed. Thus, the arches with the elements of the mine and tunnel support system were obtained. Simulation supported deformation processes and prototype bending applications were compared with each other and the results were obtained for the compensation of springback and the prevention of crack formation in the cold deformation processes of metal profiles.

**Keywords:** TH Profile, Cold Deformation, Springback, Residual Stress, Bending, Simulation

**2019, 81 pages**

# 1 GİRİŞ

Malzemelerin ısıtılması ve soğutulması suretiyle talaş kaldırmaksızın, malzemenin belirlenmiş olan bir eksen etrafında döndürülmesi ile şekillendirildiği bükme yöntemlerindeki teknolojinin son zamanlarda giderek gelişmesi birçok sektörde bükme ürünlerinin kullanıma sebep olmuştur. Özellikle, otomotiv, uçak sanayi, kimyasal madde üretim fabrikaları, demir çelik sektöründe karşılaşılan bükme ürünlerinin elde edilmesi bükme makineleri vasıtasıyla gerçekleştirilmekte olup bükme işlemleri demir ve demirdışı alaşımlara uygulanan kuvvetler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.

Bükme prosesinin birçok çeşidi bulunmaktadır. Belirtilen ihtiyaç, ürün biçimi ve özelliklerine göre uygun bükme yöntemi seçilebilmektedir. Bükme yöntemi ile şekillendirme için geçmişte konvansiyonel yöntemler kullanılmaktaydı. Ancak günümüzde maden ve tünelcilik sektöründe olmak üzere enerji mühendisliği yapıları gibi sektörlerde gerekli ihtiyaçların karşılanmamasından ve geri esneme olayının engellenememesi sebebiyle oluşan güçlükler, yüksek oranlı malzeme firesi ve yüksek üretim maliyetlerinden dolayı üç ve dört toplu bükme makinelerinden faydalanılarak şekillendirme işlemi yapılmaktadır.

Metalik malzemelerin, kütük, slab ve blum gibi yarı mamullerin tav fırınında östenitleme sıcaklığına kadar ısıtılması, üzerine kalibreler açılmış merdanelerden geçirilmesi ile plastik deformasyon uğratılması, akabinde kontrollü soğutma ile tane oluşumunun sağlanması sonrasında tamamlama işlemleri arasında yer alan doğrultma ile standart ölçü toleranslarının sağlanması aşamalarını takip eden sıcak haddeleme işlemleri ile elde edilen ürünlerden birisi de Toussaint-Heintzmann (TH) profillerdir.

Belirtilen profiller, burkulma, eğilme vb. mekanik zorlamaların altında en verimli profil özelliğine sahip olmasında dolaydır ki maden ve tünelcilik sektöründe yeri oldukça büyüktür. Tahkimat malzemesi olarak kullanılacak olan profillerin rankin oranlarının yani  $W_x/W_y$  oranlarının 1'e yakın olması istenmektedir. TH profiller için, y eksenini mukavemet değeri ile x eksenini mukavemet değeri birbirine eşittir. Bu sebepten dolayı  $W_x/W_y$  oranı 1'e yakındır. Bu sebepten dolayı TH profilleri, fazla yükleme ve yanal burulma vb. mekanik zorlamalar altında

kullanılacak en iyi profil özelliğine sahiptir. Ancak sıcak haddeleme sonrasında uzun mamul yerine at nalı formunda bükülmüş olarak maden ve galerilerde kullanılmaktadır. Bükme işlemi sırasında ve sonrasında profil de geri esneme olayları yaşanmaktadır ve gerçekleşen bu geri esneme olayı profilin kesit şekli, bükme yarıçapı ve malzemenin mekanik özellikler gibi parametrelere göre farklılık göstermektedir.

TH profilin bükülmesinde özellikle, alt ve üst vals toplarının profili mesnetlediği, yan topların bükme yarıçapına göre bükme işlemlerini gerçekleştirdiği ve vals toplarının profili döndürerek ilerletmesi prensibine göre çalışan üç ve daha fazla vals toplu bükme işlemlerinden yararlanır. Buna ek olarak dört toplu bükme, üç toplu bükmeğe göre daha dar toleranslarda bükme işlemlerinin gerçekleşmesi nedeni ile daha fazla üstünlük göstermektedir. Ancak toplu bükme prosesinde geri esneme engellenemez ve telafi edilemez, bu sebepten dolayı makine kapasitesine bağlı olarak tek kademe ve daha fazla kademede işlemler gerçekleştirilerek kalıcı şekil değişimi yapılmaktadır.

Yang M. ve arkadaşı (1987) yaptıkları çalışmada, deney ve simülasyon uygulamaları yapmışlardır. U kesit iş parçasının şekillendirmesinin üç toplu bükme prosesine göre simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. İş parçası özelliklerine ait eğilme momentlerinin dağılımını silindir yer değişimine göre belirlemişlerdi. Buna ek olarak silindir konumu ve iş parçasının son durumdaki eğimi arasındaki eğimi elde etmeyi başarmışlardır [1].

Penekli U. (2008) yaptığı tez çalışmasında, sonlu elemanlar metodunu kullanmış ve T, U ve boru alüminyum profillerin geri yaylanma durumlarını ve kesit alanlarında bozulmaları gözlenlemiştir. Her profil için farklı bükme yarıçapı, kalınlık gibi değişkenler kullanılarak analizler yapmıştır. Boru profillere uygulanmış olan kuvvetin geri yaylanmaya etkileri irdelenmiştir. Bu kuvvet profilde gerdirmeye sebep olmuş ve böylece geri yaylanma açısında düşme oluşmuştur. Ayrıca, borulardaki kesit alanda düzleşme sorununun giderilmesi için değişik basınçlar uygulanmıştır. Basınç uygulanmasıyla, söz konusu sorun büyük ölçüde giderilmiştir. Bu kapsamda, bükme yarıçapı, bükme açısı, kalınlık, kuvvet ve basınç gibi etkenlere göre geri



yaylanma ve kesit alandaki problemler ile ilgili sonuçlar elde edilerek, literatür ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır [2].

Özdemir A., (2010) yaptığı tez çalışmasında, farklı kalınlıklardaki sac malzemeleri, değişik kalıp açıları ve farklı zımba uç yarıçapında V bükme metodu ile şekillendirmiştir. Geri esnemeyi ise, yapay sinir ağı ile tahmin etmişlerdir. Sert malzemelerin aynı işlem altında daha fazla geri esnemekte olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca geri esneme ile zımba ucu yarıçapı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Sonlu elemanlar metodu ile deney sonuçlarının yaklaşık %85 oranında örtüşüğünü belirlemiştir [3].

Feng Z. ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada, silindirik bükme esnasında yanal silindirlerin konumunun belirlenmesi ile ilgili olarak ihtiyaç duyulan kabulleri yapmışlar ve hem deney hem de sonlu elemanlar metodlarını kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre deney ve simülasyon çıktılarının birbiri ile uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir [4].

He Y. ve arkadaşları (2011) yaptıkları çalışmada, hafif ürün elde edilmesi için anahtar üretim teknolojilerinden biri haline gelen boru bükme prosesini ele almışlardır. Bükme davranışları ile çoklu hasarlı analizi yoluyla, bükmede yaygın sorunları belirleme konusundaki ilerlemeler, iç kemerde buruşmazlık dengesizliği, dış kemerde çatlama, yayılma durumu, kesitte meydana gelen deformasyon, şekillendirme limiti ve işlemi hakkında özetlemeler yapmışlardır [5].

Hudovernik M. ve arkadaşlarının (2012) yapmış oldukları çalışmada, bükme işlemlerinde eğilme momenti ve kuvvetinin tespiti için çalıştıkları sayısal modelin doğruluğunun sağlanmasını yapmışlardır. Buna ek olarak yükleme ve boşaltma koşullarındaki gerilme-gerinim şartlarını daha detaylı ele almışlardır [6].

Vatter P.H. ve arkadaşının (2013) yaptıkları çalışmada, üç boyuta sahip şekil ve geometrilerin elde edilmesi için işlem durumlarını incelemiştir. Makine şartlarının ve makine sistematüğünü etkileyen tüm parametrelerin ele alınması suretiyle sonlu elemanlar analizleri geliştirmişler ve meydana gelen sarmal yapıların

geometri üzerindeki etkilerini araştırmak amacı ile varyant simülasyon yapmışlardır [7].

Sitar M. ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları çalışmada, kesit bazında geri esneme olayı teorisi irdelenmiş ve asimetrik bir kesitin elasto-plastik eğme-bükme işleminden sonra ortaya çıkan geri yaylanma özellikleri araştırılmıştır. Elastik-nonlinear malzeme özellikleri, izotropik ve kinematik sertleştirme parametrelerini içeren bir model oluşturulmuştur. Proses sırasında ortaya çıkan gerilmeler kesit bükülmesi, dönme ve nötr eksenin değişiminin bir fonksiyonu olarak elde edilmeye çalışılmıştır. T ve L kesitler üzerinden yapılan simülasyon, malzeme modeli ve proses modeli gerçekleştirilmiştir [8].

Ghiotti A. ve arkadaşlarının (2017) çalışmasında, üç toplu bükme işlemleri süresinde bükülmüş olan ürünlerin doğru ve gerçek zamanlı olarak ölçümlerine müsaade eden atalet ölçüm yöntemlerine dayanmakta olan yeni bir hat üzerine yaklaşım sunmuşlardır. Doğrulama deneyleri yapmışlar ve ölçüm doğruluğunu değerlendirmişlerdir [9].

Simonetto E. ve arkadaşlarının (2017) çalışmalarında, üç toplu bükme işlem esnasında boruların bazı kısımlarındaki hasar ve kusurların belirlenmesi için dinamik analiz yöntemlerin uygunluğunu araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarını farklı sektörlere ait işlem şartlarına göre uygulamışlar ve elde ettikleri çıktıları karşılaştırarak, araştırma bulgularını değerlendirmişlerdir. İşlem şartlarının gerçek zamana göre ayarlanması amacıyla doğru geri bildirim verdiğini çalışmalarında belirtmişlerdir [10].

Spoorenberg R.C. ve arkadaşlarının (2011) çalışmalarında; köprülerde ve binalarda kullanılan geniş flanş aralığına sahip yapı profillerinin bükülmüş-soğuk form verilmiş şekilde kullanılmasından dolayı işlem sırasında ortaya çıkan artık gerilmelerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizde kullanılan yöntem, sıcak haddelenmiş profillerin kullanım yerlerine göre son şekillerinin verildiği silindir bükme yöntemidir ve işlem oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada bükme işleminin sonlu elemanlar simülasyonu malzemede ve geometri de nonlineariteyi dikkate almış ve kontak modeli uygulanmıştır. Proses sonucu numerik

olarak elde edilen artık gerilme değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında sonlu elemanlar analizlerinin artık gerilmelerin hesaplanması için uygun bir aracı olduğu tespit edilmiştir [51].

Hermes M. ve arkadaşlarının (2008) alışmasında, profiller için uç boyutlu bükmenin yapılabileceği yeni yöntem önermişlerdir. Göstermiş oldukları yöntem sayesinde uzun simetrik ve asimetric profillerin yüzey sorunları yaşanmaksızın uç boyutlu olarak büklebileceklerini ve asimetric profillerde oluşan istenmeyen torsiyonun denge momenti ile engellenebileceğini belirterek önerilerini vurgulamışlardır [52].

Bu tez çalışmasının ana amacı, sıcak haddeleme üretim prosesi ile elde edilen simetrik kesite sahip maden ve tünel profillerinin soğuk deformasyon özelliklerinin belirlenmesi ve bükme uygulamasının gerçekleştirilmesidir. Çalışmanın ilk aşamasında; sıcak haddeleme ile üretilen simetrik kesite sahip maden ve tünel profillerinin soğuk deformasyon esnasında sıralı plastik deformasyon özelliklerinin mekanik mukavemet özellikleri açısından araştırılmıştır. İkinci aşamada; maden ve tünel profili kesit bazında sıralı soğuk deformasyon prosesinin sonlu elemanlar simülasyonu ile gerilme-şekil değiştirme dağılımı, geri esneme, artık gerilme, eğme-bükme kuvveti-deplasman eğrilerinin profil bazında elde edilmiştir. nc aşamada, sonlu elemanlar metodu destekli simülasyon faaliyetleri neticesinde elde edilen bükme parametrelerinin gerçek bükme uygulamasında kullanılarak geri esneme miktarının ve bükme kalitesinin belirlenmesi süreçleri tasarlanmıştır. Son aşamada ise; simülasyon ıktıları ile prototip bükme uygulamasının sonuçları kıyaslanmıştır.

Bu kapsamda, sonlu elemanlar metodu gibi sayısal yöntemlerin geliştirilmesi yapısal elik elemanların maksimum dayanımlarının gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilebilme olanaklarını genişletmiştir. Bu yöntemler sayesinde tahkimat sistemi elemanları olan TH34 kemerlerin çarpılma oluşumları, artık gerilmelerin miktarı ve dağılımları ile mekanik özellikleri gibi parametreler hakkında detaylı bilgi sağlanması mümkün hale getirilmiştir. Ayrıca madencilik-tünel sektörüne özgü soğuk deformasyon süreçlerine ait literatür açığının kapatılmasına katkıda bulunulmuştur.

## 2 GENEL BİLGİLER

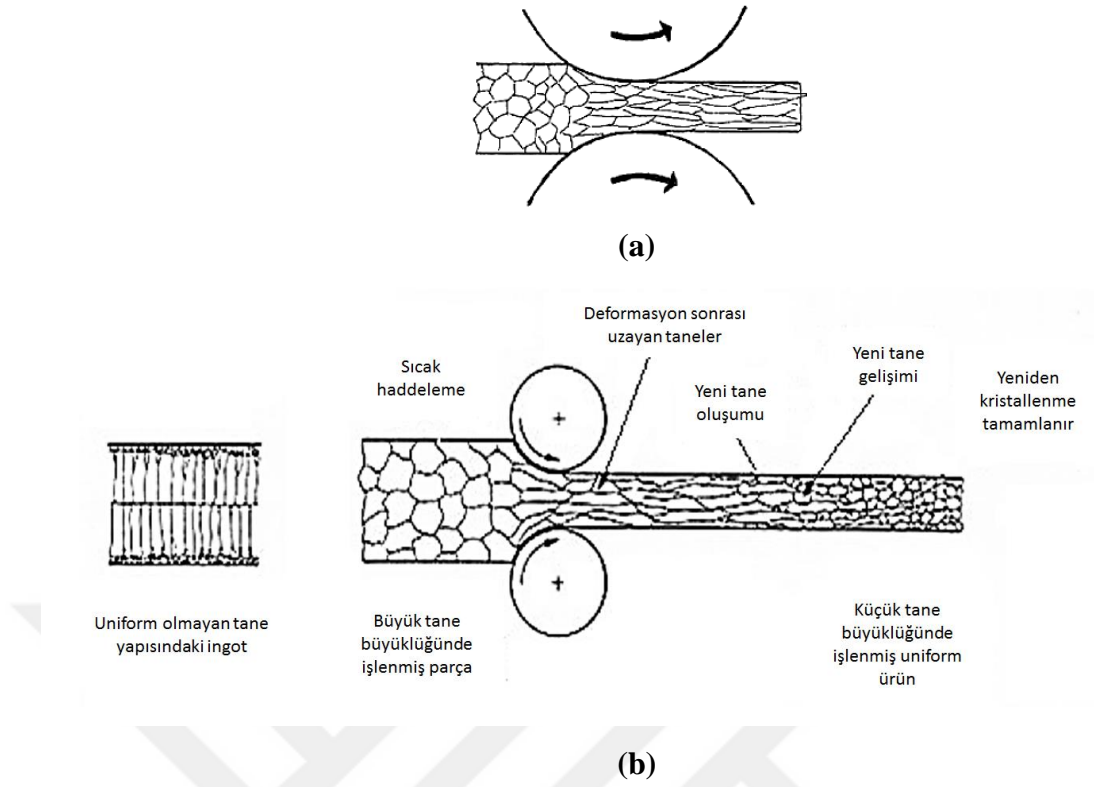
### 2.1 Haddeleme

İki merdanein eksenleri etrafında dönmesi ve malzemelerin bu merdaneler arasından geçirilmesi ile yapılan plastik şekil verme işlemlerine haddeleme denir. Plastik deformasyon ile şekillendirilen tüm malzemelerin yaklaşık %95'inin şekillendirildiği haddelemede, üretim hızı ve sürekliliği ile işlem ve ürün kontrolünün kolay olması nedeni ile en çok kullanılan plastik şekil verme yöntemidir. Haddelemede, işlem görece malzemenin sıkıştırılması suretiyle daha yoğun hale getirilmesi ve malzemelerin daha küçük kesit formatına getirilmesi olmak üzere iki temel amaç vardır [11-13].

Merdanelerin malzemeyi sıkıştırması suretiyle radyal basma gerilmeleri ve malzeme ile merdaneler arasında sürtünme vasıtası ile oluşan yüzey kayma gerilmeleri neticesinde malzeme deformasyonu sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra malzemenin merdaneler arasında ilerlemesini sürtünme kuvveti sağlamaktadır. Böylece belirtilen işlem ile işlem görmüş malzemelerin boyu uzarken, kesiti küçülmekte ve ayrıca genişliğinde bir miktar artış meydana gelmektedir. Bu olaya yayılma denir. Yayılma miktarı, işlem görmüş malzemeye uygulanan deformasyon oranı ve merdane çapından etkilenmektedir [11].

#### 2.1.1 Haddeleme Prosesinde Sınıflandırma

Haddeleme, şekillendirme işlemleri sırasındaki malzeme sıcaklık değerlerine göre soğuk ve sıcak olmak üzere iki sınıfta gruplandırılmaktadır. Bu grupların adlandırılması yeniden kristalleşme sıcaklığına göre yapılmakta olup, soğuk haddeleme için malzeme sıcaklığının yeniden kristalleşme sıcaklığının altında olması, sıcak haddeleme için ise malzeme sıcaklığının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde olması gerekmektedir. Haddeleme prosesi ve haddeleme prosesinde iş parçası malzemenin tane yapısında meydana gelen değişimlere ilişkin görsel Şekil 2.1' de gösterilmektedir.



**Şekil 2.1.** Tane dizimleri (a) Soğuk haddeleme (b) Sıcak haddeme [15]

Levha, şerit ve tellerin yaygın olarak elde edildiği soğuk haddelemede pekleşme sebebi ile mukavemette yaklaşık %20 artış görülmekte olup, yüzey durumu daha iyidir ve boyutsal dar tolerans mevcuttur.

Sıcak haddeleme düşük sayılarda haddeleme işlemi ile metallerin büyük oranlarda şekillendirilmesini sağlar. Sıcak haddelenen malzemeler tavlamaya ihtiyaç duymazlar. Yüksek sıcaklık, malzemede artık gerilimin toplanmasını engeller. Sonuç olarak malzemenin kararlılığı soğuk haddelenen malzemedен daha iyidir.

Sıcak haddeleme malzemenin mekanik özelliklerinden daha çok malzemenin şeklini ve geometrisini işlemekle ilgilidir. Bu ise, önce bir parçayı veya malzemeyi kritik sıcaklığının üzerinde ısıtarak ve sonra da malzemeyi istenilen ebatta ve özellikte şekillendirecek kontrollü bir yük uygulayarak yapılır.

Sıcak haddeleme yoluyla kare, yuvarlak, yassı, çokgen, kesit, şerit, halka, köşebent, T, I, U, H profil, ray gibi mamuller üretilir. Sistemin giriş malzemesi

olarak slab, blum, beam blank ve kütük olarak adlandırılan yarı-mamuller kullanılır [14].

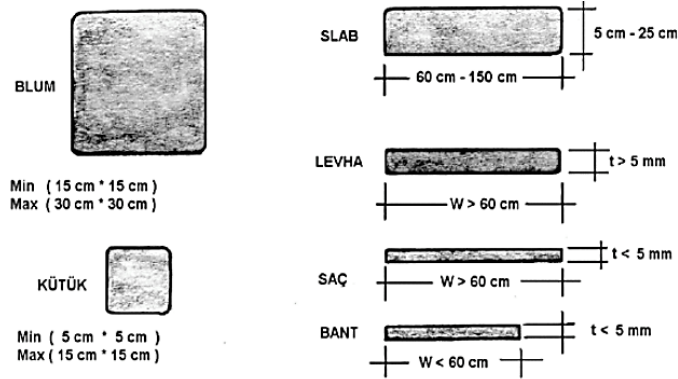
## 2.2 Hadde Tesisleri

Hadde tesisleri büyüklüklerine göre, blok hadde tesisi, orta ebat hadde tesisi ve ufak ebat hadde tesisi olmak üzere üç grupta sınıflandırılır. Burada belirtilen blok hadde tesisi yarı mamul haddeleyen tesisleri, orta ebat hadde tesisi profilde 80'den, yuvarlakta 30'dan büyük hadde yapan tesisleri içermektedir.

Hadde mamulüne göre, profil hadde tesisleri, yuvarlak çubuk hadde tesisleri, sac ve levha hadde tesisleri, boru hadde tesisleri ve özel mamul hadde tesisleri olarak sınıflandırılan hadde tesisleri çalışma tarzına göre ise, tersinir hadde tesisi, universal hadde tesisi, açık sistem hadde tesisi, açık ve kontinü hadde tesisi, tam kontinü hadde tesisi olarak gruplandırılabilir [16].

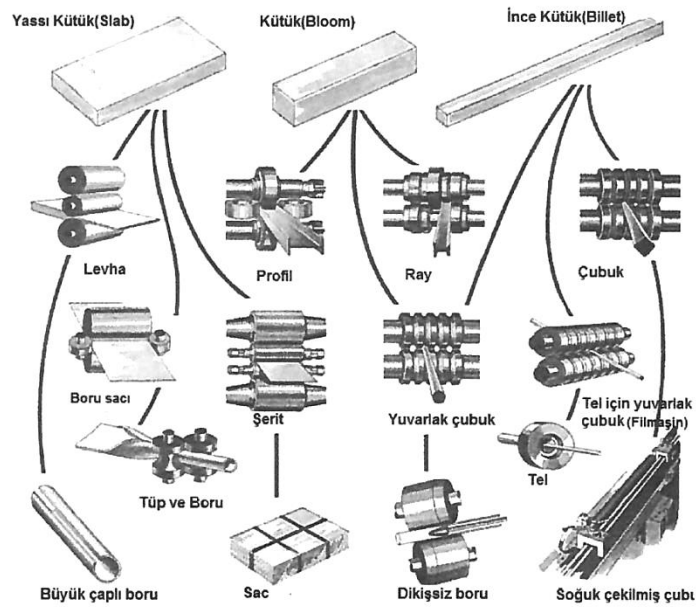
### 2.2.1 Haddede Ürün Çeşitleri

Gördükleri işlem sonucunda elde edilen ürünler için kesit, boyut ve şekillerine göre özel terimler kullanılmaktadır. Çelik ingotun haddelenmesi ile slab, blum ve kütük gibi yarı mamuller elde edilmektedir. Yarı mamul olarak belirtilen slab dikdörtgen kesitlidir. Slabın haddelenmesi ile kendi kesitine göre daha küçük kesitlere sahip levha, sac ve bant vb. yassı ürünler üretilir. Elde edilen bu ürünler için kesin bir sınır değer yok olsa da, genellikle Şekil 2.2'de verilen sınır değerlere sahiptirler [17].



Şekil 2.2. Yarı mamuller ve kesitleri [17, 18]

Haddelenmiş ürünlerin elde edilebilmesi amacıyla ürünlerin fiziki ölçülerini, kesit alanlarını, metre başına ağırlıklarını ve tolerans ağırlıklarını belirten ulusal ve uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak haddeleme işlemleri gerçekleştirilir. Standartlar yarı mamul olarak kullanılan slab ve blum ürünlerin son nihai halini alacağı ray, sac, profil gibi ürünler (Şekil 2.3) için ayrı ayrı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra haddelenen metalin yüzey kalitesi, çelik kimyasal kompozisyonu, mekanik özellikleri, çelik mikro-makro yapısı, test metotları vb. işlemleri kapsayan standartlarda mevcuttur [18, 19].



Şekil 2.3. Haddeleme ile elde edilen ürünler [18]

### 2.2.2 Haddelemede Üretim Akışı

Malzemenin haddeleme işlemine hazırlanması: Haddeleme süresince en önemli şart yüzey kalitesinin durumu olduğundan dolayı haddelenecek ürünün yüzey kusurlarının mümkün olduğunca arındırılmış olması gerekmektedir. Genel olarak ingotlar blok haddesinden önce ısıtılmak için tav çukurlarına yerleştirilmektedir ve sıcak sevk yapılmaktadır. Bu sebeple ingotlara yüzey temizleme işlemi yapılmamaktadır. Blok hadde tezgâhında üretilen ve yarı mamul niteliğindeki slab ve bluma yapılan yüzey temizleme işlemi sonucunda yüzey kusurları giderilmektedir. Bazı özel çelikler ele alındığında, ara sıra ingotlar, sıcak ve soğuduktan sonra olmak üzere yüzey temizleme işlemlerine maruz bırakılmaktadır. Ayrıca katılaşma

esnasında gelişen sıvı seviyesinin düşmesi sonucunda oluşan kafa lunkerileri kesilmektedir[20].

Isıtma: Malzemelere en iyi plastik özelliklerin kazandırılması ve hadde mamullerinin istenen kaliteye sahip olmasının sağlanması amacıyla sıcak haddelemeden önce malzemeler ısıtılmakta olup, bu süreç en önemli üretim basamağıdır. Isıtma işlemlerinde sıcaklık ve süre en önemli parametrelerdir. Sıcaklık ve süre malzemeye bağlı olarak seçilmekte olup seçilen sıcaklık ve bu sıcaklıkta tutma süresi doğrudan mamule yansımaktadır. En yüksek sıcaklığın solidüsün 100-150°C altında olması gerekmekte olup belirlenen sıcaklıkta tutma süresinin ise gerektiğinden fazla uzun olması durumunda, yakıt harcaması artmakta bunun yanı sıra çelikler için demir kaybı ve dekarbürizasyona sebep olmaktadır [20].

Bu bilgilere ek olarak haddeleme sıcaklığı ve işlem sırasında kullanılan sıcaklık değerleri elde edilecek nihai ürünün kalınlığına da bağlıdır. Kalın ürünlerde bu sıcaklık, tanımlanan sınır değerlerden fazladır ve bu sebeple ısıtma sürecinin bitmesine dek, çelik malzemelerin iç özelliklerini kaba taneden ince taneye kadar doğrudan etkilemektedir [21].

Haddeleme aşamasında en önemli parametre sıcaklık olup, haddeme işlemi başlangıcında haddeleme sıcaklığı malzemeye bağlı olarak mümkün olduğunda yüksek seçilmelidir. Belirtilen sıcaklık solidüse göre belirlenmekte olup yaklaşık 100-200°C altında olmalıdır. Örnek verilecek olursa alaşımsız takım çelikleri için 1150°C, orta karbonlu çelikler için 1200°C, düşük karbonlu çelikler için 1260°C haddeleme sıcaklığı mevcuttur. Haddeleme işlemlerinin sonrasındaki sıcaklık değeri ötektoid altı ve üstü çelikler için farklılık göstermekle birlikte ötektoid altında A<sub>3</sub> sıcaklığının 50-100°C, ötektoid üstünde A<sub>1</sub> sıcaklığının biraz üzerinde olması gerekmektedir. Bu sıcaklık, karbonlu alaşımsız takım çelikleri için 80°C, orta karbonlu çelikler için 900°C, düşük karbonlu çelikler için 950°C olarak verilebilmektedir. Hadde sonundaki sıcaklık değeri mamulde beklenen özelliklere göre seçilmektedir [20].

Haddeleme işlemlerinden sonra malzeme doğrultma, yüzey temizleme, ultrasonik ve yüzey çatlak tespiti vb. tamamlama işlemlerinden geçirilerek kalite

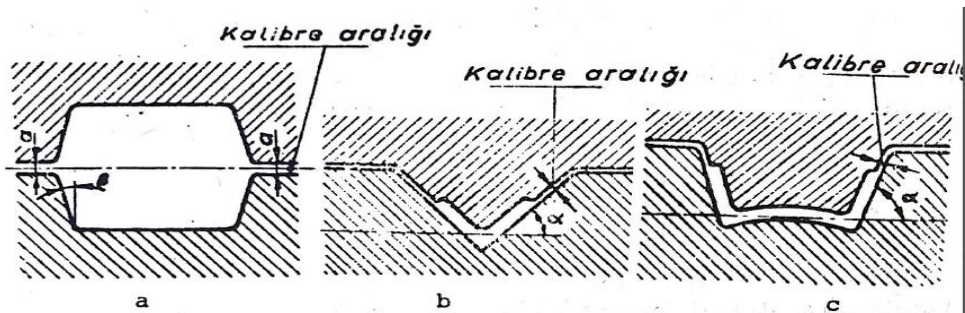


kontrol süreçleri gerçekleştirilmektedir. Yüzeyde bulunan çatlaklar kabuk soyma veya taşlama işlemleri ile giderilebilirken, malzemede iç kusur teşkil eden kısımlar kesilmekte ve hurdaya ayrılmaktadır [20].

### 2.2.3 Profillerin Haddelenmesi Süreçleri

Çeşitli kesite sahip çubuklar, profiller, köşebentler, demiryolu rayları vb. ürünlerin üretimi sıcak profil haddelene prosesi ile gerçekleştirilmektedir [17]. Bu süreç genel olarak demir esaslı malzemelere uygulanmaktadır. Belirtilen ürünlerin elde edilebilmesi amacıyla yarı mamul olarak blum ve kütük kullanılmakta olup, yarı mamullerin birkaç kademedan geçirilmesi suretiyle istenilen ebadlarda profiller elde edilmektedir. Bu nedenle yarı mamulleri, kesitleri küçülen ve sonuç olarak istenilen ürünün belirlenen kesit ve şekline göre oluşturulan kalıp merdanelerden geçirilmektedir. Böylece, birlikte çalışan iki merdanelerin üzerine elde edilmek istenen profile ait şekilli aralıklar açılmaktadır. Bu şekilli aralık kalibre olarak adlandırılırken, kalibre açılmış merdanelerin ismi kalibreli merdane olarak tanımlanmaktadır [17].

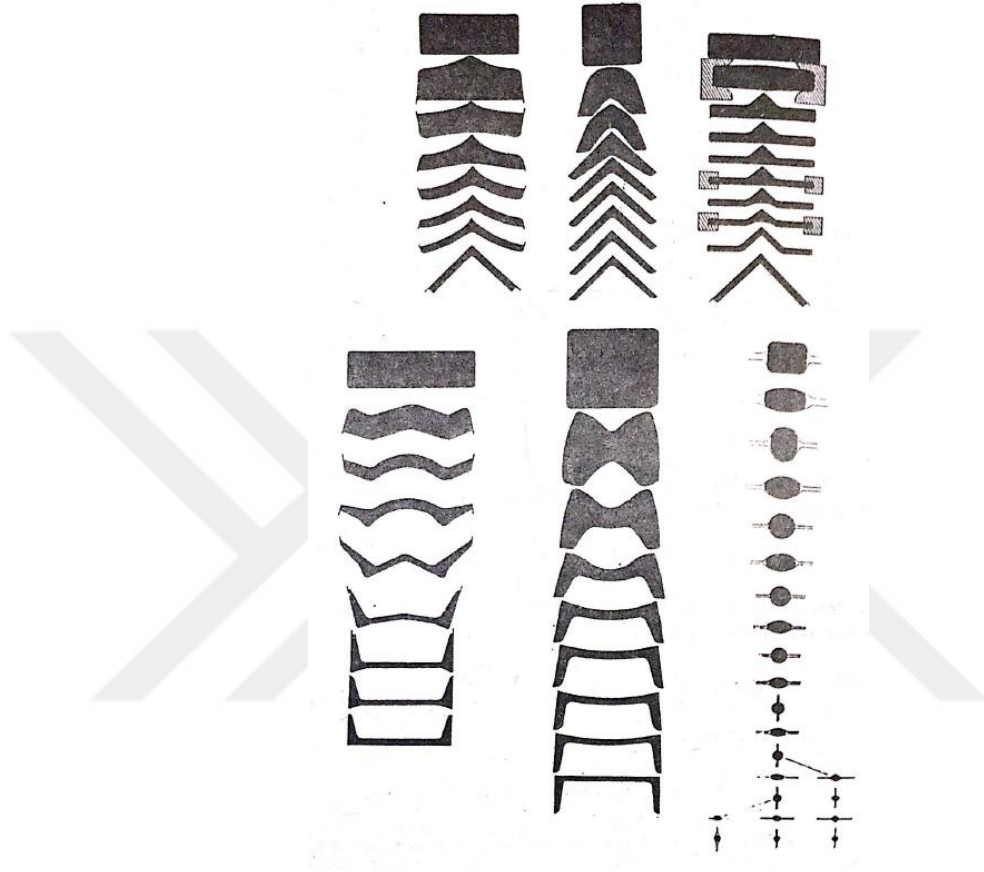
Açık ve kapalı olmak üzere ikiye ayrılan kalibreler Şekil 2.4'te, merdaneler arasındaki kalibre aralığının merdane eksenine paralel olması durumu Şekil 4a'da ve kalibre aralığının merdane eksene yaptığı  $\alpha$  açısı  $60^\circ$  den küçük olması durumunda yani açık kalibre Şekil 2.4b'de ve belirtilen  $\alpha$  açısının  $60^\circ$  den büyük olması durumunda yani kapalı kalibre Şekil 2.4c'de görüldüğü gibidir [17].



Şekil 2.4. a)Açık kalibre b)Açık kalibre c) Kapalı kalibre [17]

Kalibre yüksekliği, haddelenecek malzemenin kalınlığından azdır, ancak genişlik fazladır. Böylece malzeme kalibreli merdanelerden geçerken kalınlık

azalırken genişlik artmaktadır. Genişleyen kesitin kalibre açıklığını doldurması gerekmektedir. Genişleyen kesit daraltılmak istendiğinde malzeme 90° döndürülür ve tekrar haddelenir. Böylece bir malzemenin iki boyutu haddelenmekte olup, kesit küçültülmektedir [17].



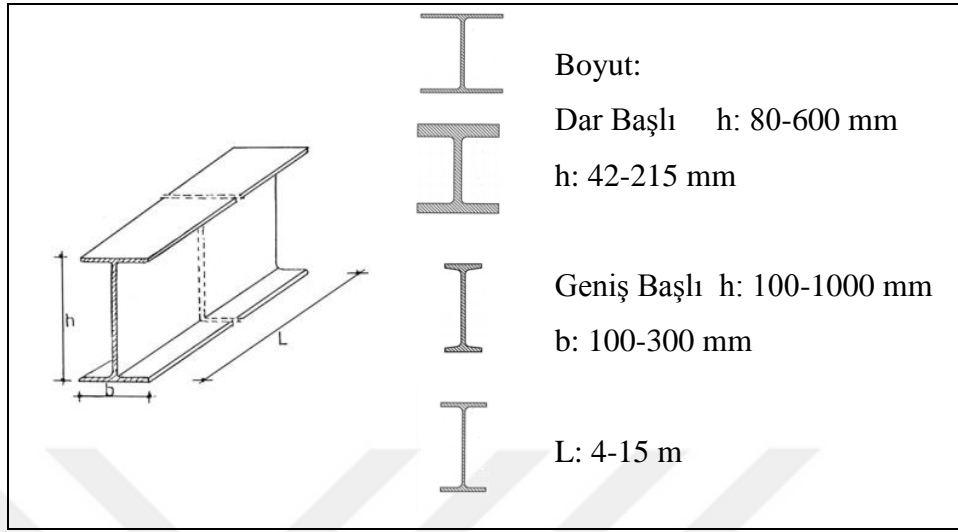
**Şekil 2.5.** Profil haddelenmesinde kullanılan kalibre düzenlerine örnek [17]

Biçimlerine göre incelenirse, çelik fabrikalarında belli standartlara göre yapısal çelikler üretilmektedir. Bu ürünler hadde ürünler olarak bilinmekte olup, bu parçalar değişik kesitlerde ve farklı boylarda üretilmektedir. Bu ürünler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

a. Profiller

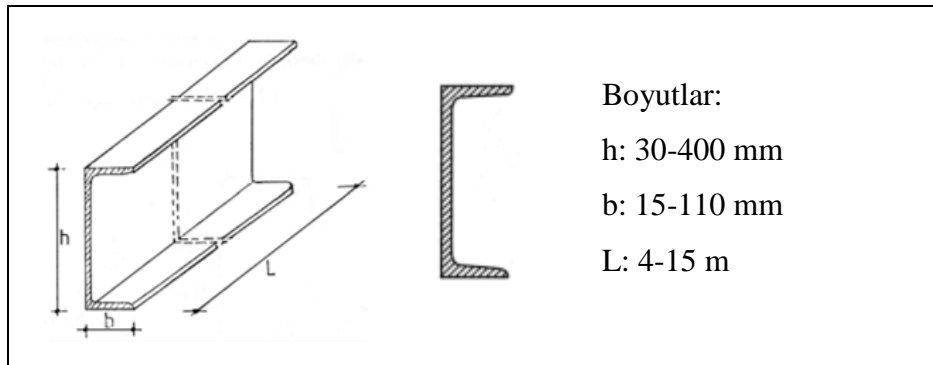
- NPI Profiller: Kesit olarak I harfine benzemesi sebebiyle I profiller olarak bilinen bu profiller en önemli profillerdendir. Birçok çeşidi olan bu profillere örnek olarak, I (normal profil), IPE, IPEo, IPEv, IPB, IPBl, IPBv profilleri

sayılabilmektedir. Buna ek olarak yatay ve düşey taşıyıcı sistem bileşenleri olarak kullanılmaktadırlar [22, 23].



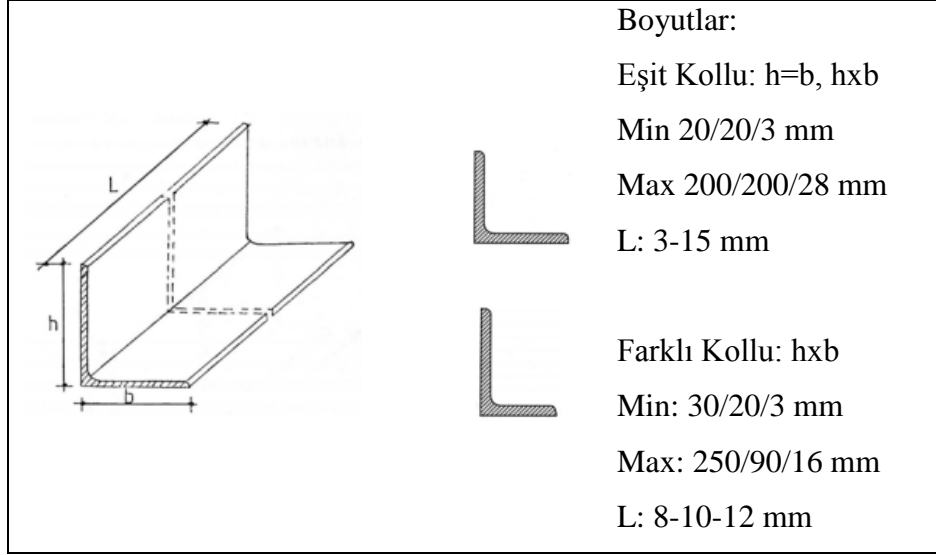
Şekil 2.6. NPI profili ve kesitleri

- NPU Profiller: Kesit şekil itibari ile U harfine benzemektedir Bu sebeple, bu profiller genel olarak U profil olarak adlandırılmaktadır. İki baş ve bir gövdesi mevcuttur. Kullanım yerleri ise, yatay ve düşey taşıyıcı sistem birleşenleridir [22,23].



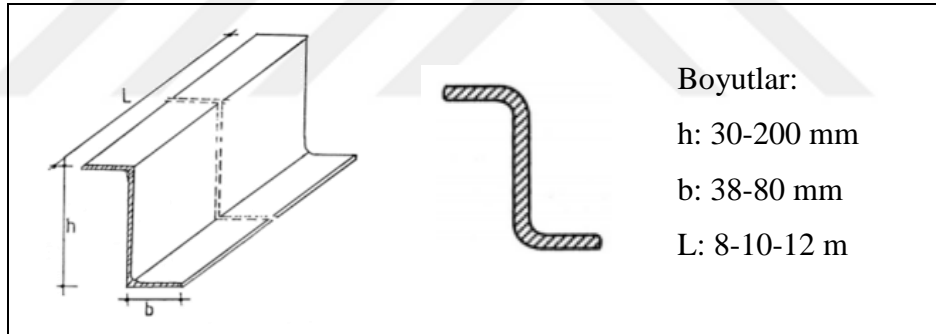
Şekil 2.7. U profil ve kesiti

- NPL Profiller: Şekil olarak L harfi gibidir. Genel olarak köşebent, korniyer ya da köşe profili olarak isimlendirilirler. Kol uzunluklarına ikiye ayrılmaktadırlar ve göre eşit kollu veya farklı kollu olabilirler. Kullanım yerleri yatay ve düşey taşıyıcı sistem bileşenidir [22-24].



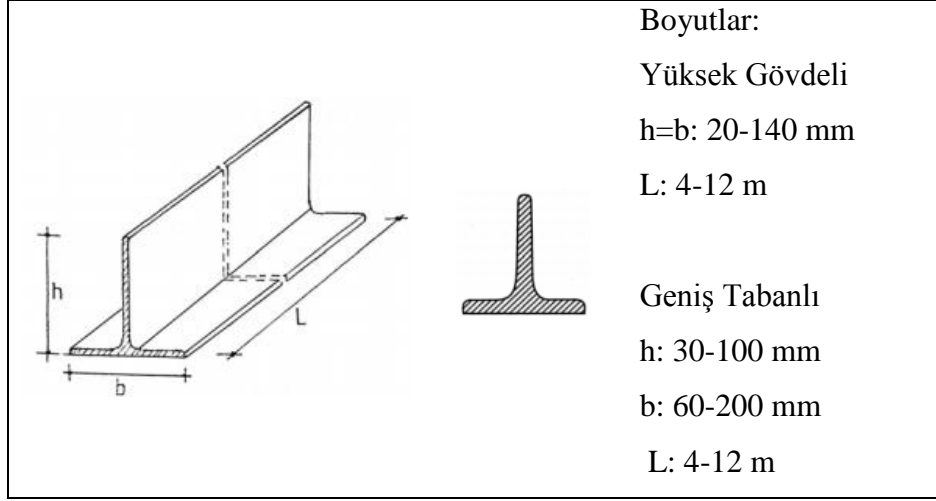
**Şekil 2.8.** L profil ve kesitleri

- NPZ Profili: Şekli Z harfine benzemekte olup Z profil olarak adlandırılırlar. Kullanım yerleri tek veya kompozit olarak taşıyıcı sistem birleşenidir [22, 23].



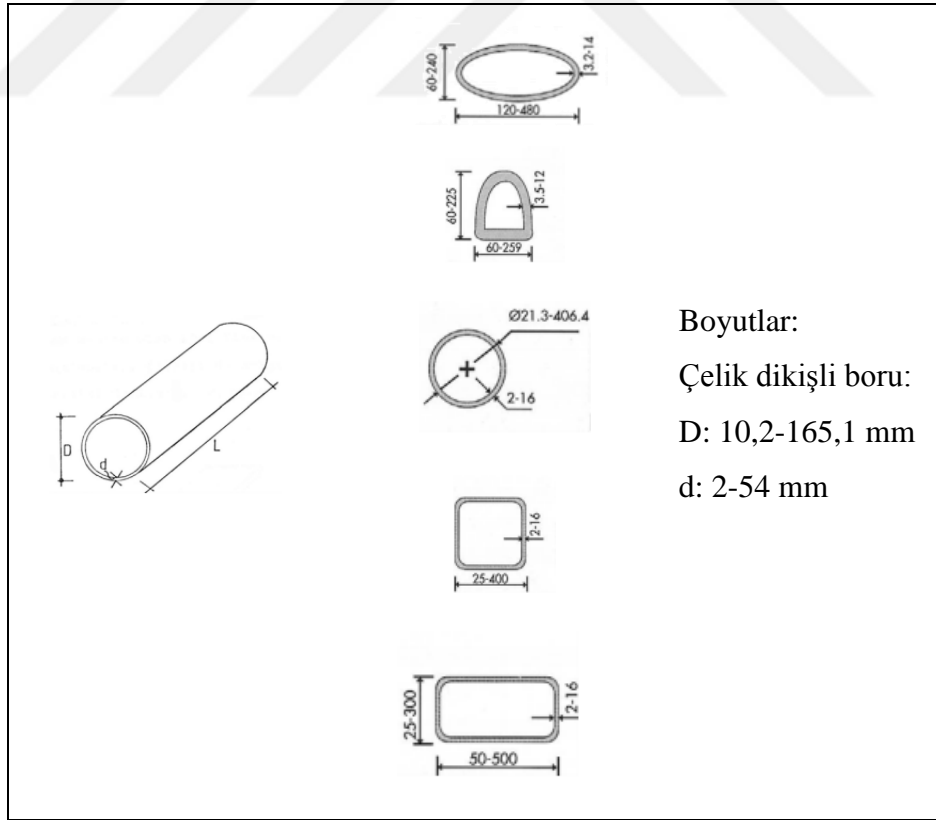
**Şekil 2.9.** Z profil ve kesiti

- NPT Profilleri: T harfine benzemeleri sebebi ile T profil olarak isimlendirilirler. Yüksek gövdeli ve geniş tabanlı olarak iki çeşitleri vardır. Yüksek gövdelilerde taban genişliği ve gövde yüksekliği birbirine eşittir. Geniş tabanlı da ise taban genişliği gövde yüksekliğinden iki kat fazladır. Taşıyıcı sistemlerin yatay ve düşey bileşenlerini oluşturmaktadırlar [22-24].



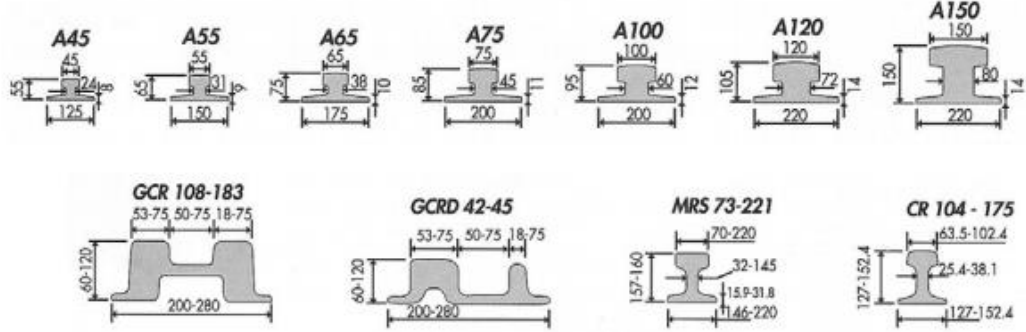
Şekil 2.10. T profil ve kesiti

- Boru profil: Taşıyıcı sistemde kullanılmakta olup düşey ve yatay bileşenleri oluşturmakta olan bu profillerin bileşim noktaları diğer profillere göre farklılık göstermektedir [22, 23]



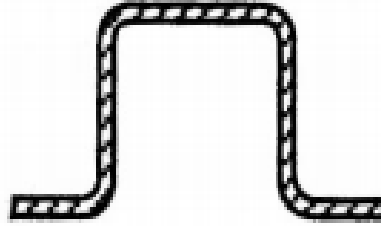
Şekil 2.11. Boru profil ve kesitleri

- Ray Profilleri: Genellikle demir yollarında ve asansörlerde kullanılan bu profilin birden fazla şekilleri vardır [21].



Şekil 2.12. Ray profil çeşitleri

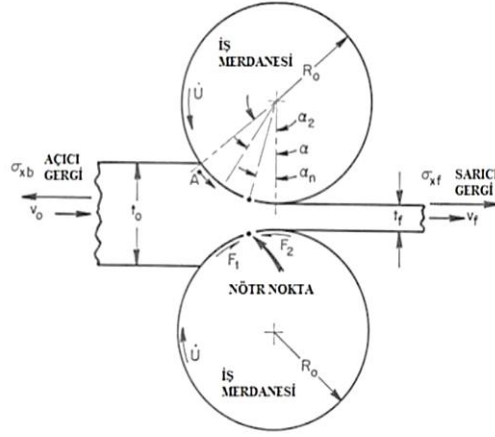
- Özel Kesitli Profiller: Özel amaçlar için üretilen ve kullanılan bu profil çeşit yönünden zengindirler [21].



Şekil 2.13. Özel kesitli profillere bir örnek

#### 2.2.4 Haddelene Prosesi Süresince Etkili Kuvvet ve Geometrik Esaslar

Haddelenede etki eden kuvvetleri ve haddelene geometrisini gösteren ilişki Şekil 2.14'de gösterilmiştir.  $w_0$  genişliğine ve  $h_0$  kalınlığına sahip olan bir sac malzeme,  $v_0$  hızı ile merdanelere girmektedir ve haddelenerek  $v_1$  hızında merdanelerden  $h_1$  kalınlığına sahip nihai ürün olarak çıkmaktadır.



**Şekil 2.14.** Haddelene kuvvetleri [18]

Haddelenmiş ürünün sacın  $w_1$  genişliği yayılma nedeniyle  $w_0$  genişliğinden biraz büyüktür, buna rağmen genişlik değişmiyor olarak varsayılırsa, haddelene süresince merdaneler tarafından malzemeye uygulanan radyal basma kuvvetleri malzemenin boyuna doğru uzamasını sağlamaktadır.

Malzemenin çıkış hızı  $v_1$ , giriş hızından büyük olmalıdır. Aksi takdirde haddelenecek olan malzemede düşey elementleri distorsiyon uğrayabilmektedir. Haddelenen malzeme hızı girişten çıkışa doğru artmaktadır. Merdane yüzey hızı sabit olup giriş ve çıkış hızları arasındadır. Malzemenin merdaneler arasından geçtiği hız bir noktada merdane yüzey hızına eşit olup bu nokta nötr noktadır. Merdanelerle malzeme arasına temas boyunca her nokta için malzemeye radyal basma kuvveti  $P_r$  ve  $F$  sürtünme kuvveti olmak üzere iki kuvvet etki etmektedir.

Giriş düzlemi ile merdane merkezlerinin birleştirilmesi için düzlem arasındaki  $\alpha$  açısı kavrama açısı veya temas açısı olarak bilinmektedir. Malzemelerin  $F$  sürtünme kuvveti ile merdaneler arasında çıkışa doğru gidebilmesi amacıyla sürtünme katsayısı  $\mu$  ve kavrama açısı  $\alpha$  ile aralarında  $\mu > \alpha$  gibi bir ilişki söz konusudur [25].

Haddelenede iki çeşit elastik şekil değişimi vardır. Biri, haddelenen malzemenin deformasyona göstermiş olduğu direnç ile merdaneleri itmesi merdanelerin elastik deformasyon sınırlarında eğilmesidir. Merdanelerde oluşan

elastik şekil değişimi ile birlikte merdanelerin bağlı olduğu hadde kasalarında ve merdanelerin arasındaki mesafenin ayarlanmasını sağlayan vidalama sistemlerinde de elastik şekil değişimleri gözlenmektedir. Bu durumda, hadde tezgâhlarında ki elastik deformasyon malzemenin çıkış kalınlığının merdaneler arasındaki mesafeden fazla olmasından dolayı haddelenecek kalınlığa göre olan merdaneler arasındaki mesafe etkilenir.

Haddelenen ürün için kalınlığı hassas olarak sağlamak için tezgâhların uygulanan kuvvet ile doğrusal olarak artmakta olan elastik karakteristiğini bilmek gerekmektedir. Bunun yanı sıra malzemenin  $h_0$  kalınlığında haddelenmesi esnasında çıkış kalınlığının uygulanan kuvvet de değişimi bilinmelidir [25].

Haddeleme kuvveti merdaneleri malzemeye bastırmak için kullanılan kuvvettir. Bu kuvvet aynı zamanda haddelenen malzemenin mukavemetine bağlı olarak malzemenin merdaneleri birbirinden uzaklaştırmaya çalıştığı kuvvete eşittir. Bu nedenle haddeleme kuvveti merdaneleri birbirinden ayırma kuvveti olarak da isimlendirilir.

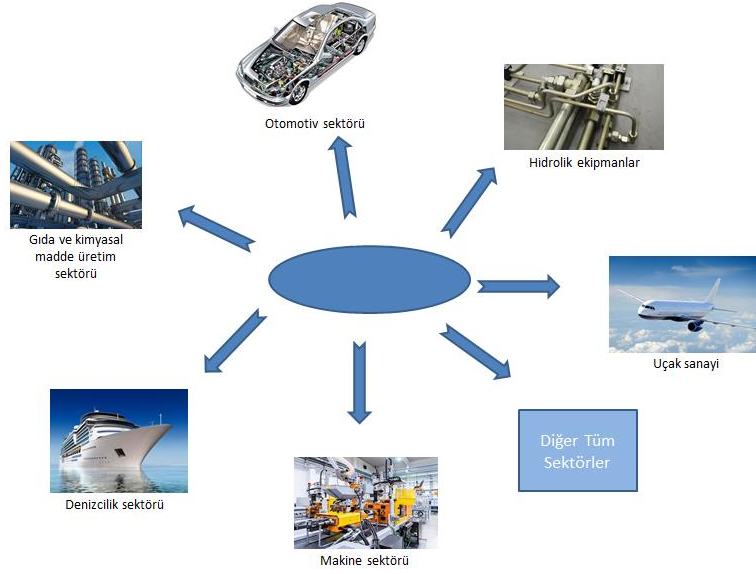
Hadde kuvvetinin temas yüzeyine bölümü ile hadde basıncı elde edilir. Haddelenen ürünün genişliğinin temas boyuna çarpımı ise temas yüzeyini vermektedir. Nötr noktada hadde basıncının değeri en yüksektir, sonrasında azalır. Haddeleme için gerekli olan moment ve güç, hadde kuvvetinin etki ettiği noktanın merdane merkezlerine göre konumları ile belirlenmektedir [25].

Sürtünme katsayısı ile deformasyon durumu, merdane çapı ve deformasyon oranı haddeleme kuvvetini etkilemektedir. Hadde esnasında sürtünme katsayısı değeri temas yayı boyunca her noktada farklı olmakla birlikte, sürtünme katsayısı değerinin saptanması zordur, bu sebep ile ortalama sabit bir sürtünme katsayısı kabul edilmektedir. Malzemenin merdanelere giriş ve çıkışında uygulanan çekme gerilmeleri yassı malzeme haddelenmesinde hadde kuvvetini azaltmaktadır. Çekme gerilmeleri, hadde basıncını da azaltma etkisindedir. Ancak nötr nokta yeri az değişir. Çekme gerilmesinin yalnızca girişte uygulanması durumunda nötr nokta çıkış düzleminde doğru hareket etmektedir [25].



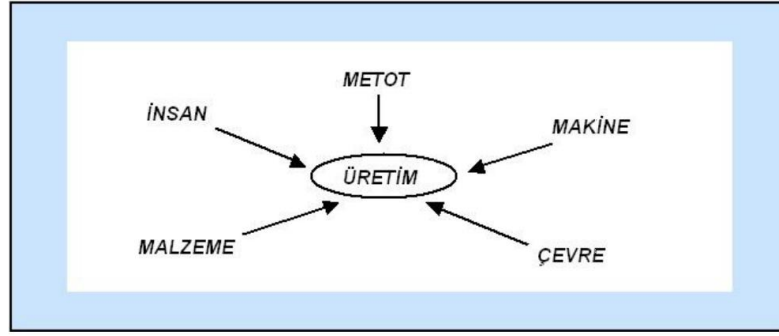
### 2.3 Bükme Prosesi

Malzemelerin sahip olduğu doğrultularının, sıcak ve soğuk işlemler ile belirlenen ve istenen doğrultuya getirilmesi amacıyla malzemenin belli bir eksen etrafında döndürülmesi suretiyle uygulanan şekillendirme işlemleri bükme olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde bükme teknolojisindeki ilerleme ile birlikte son zamanlarda ihtiyaç haline gelen bükme makineleri otomotiv, kimyasal madde üretim sanayi, denizcilik sektörü, uçak sanayi, hidrolik sanayi gibi sektörlerin yanı sıra birçok sektörde kullanılmaktadır. Belirtilen ve bunun yanında olası diğer sektörlerde farklı özellik ve uygulamalarda kullanılan malzemelerin büküm işlemleri kusursuz ve hatasız bir şekilde bükme makineleri ile yapılmaktadır. Bükme makineleri bakır, alüminyum, demir ve benzeri malzemelerin şekillendirilmesi işlemlerinde kullanılmaktadır. Böylece zamandan ve maliyetten eş zamanlı tasarruf sağlanabilmektedir [26, 27].



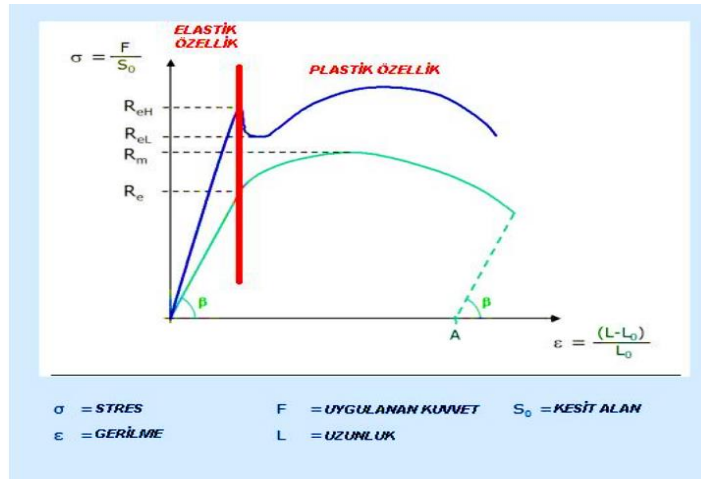
**Şekil 2.15.** Soğuk deforme edilmiş profillerin kullanıldığı sektörler [28]

Bükme kalitesi birçok faktörden etkilenmektedir. Kaliteyi etkileyen faktörler üretimde, metot, çalışanın bilgi ve becerisi, makine hâkimiyeti, malzeme cinsi ve özelliği, malzemenin makine ve işe uygunluk durumu, makine yetkinliği ve çevredir. Kalitenin artması bu faktörlerin tümünün sağlanması ile mümkündür. Bazılarının sağlanamaması durumunda kalitede düşme görülür.



**Şekil 2.16.** Bükme kalitesini etkileyen parametreler [28]

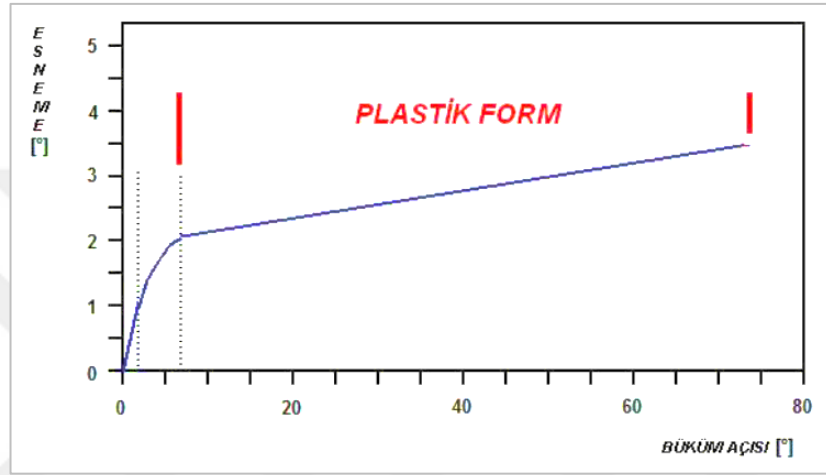
Bükme işleminde ilk aşama olarak, bükme işlemi yapılan soğuk malzemenin elastik özelliği dikkate alınmaktadır. Şekil 2.17’de verilen Hooke kuralına göre, bükme işlemi yapılan malzeme öncelikle elastik ve plastik hal durumları ele alınır. Malzemenin plastik özelliği, bükme sırasında uygulanan kuvvetin malzemenin elastik sınırını aştığı anda görülmektedir. Örnek verilecek olursa, belirli bir kuvvet ile çekilen bir yay tekrar uzadıktan sonra ilk halini alıyorsa bu durum yayın elastik özelliğinde olduğunu ve kuvvetin elastiklik diyagramında olduğunu belirtmektedir. Uygulanan kuvvetin artırılması ile bırakıldığında eski haline dönmez, bu durumda yay elastiklik özelliğini kaybeder ve plastik özellik kazanır.



**Şekil 2.17.** Deformasyon proseslerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi [28]

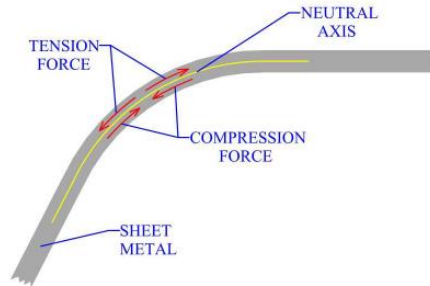
Elastik özellik sonucunda, malzemeye bükme işlemi gerçekleştirdikten sonra malzeme Hooke kuralına göre elastik bölgede şekillendirilirse, malzeme

şekillendirme sonrasında açma yapmaktadır. Bükme sırasında malzeme üzerine uygulanmış olan kuvvet sebebiyle oluşan potansiyel enerji, bükme sonrasında dış gerilme ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle istenmiş olan dereceden farklı bir sonuç oluşmaktadır. Açma/yaylanma iki durumda incelenirse sırasıyla elastik form alanı incelendiğinde doğrusal bir artış söz konusu değildir (Şekil 2.18). Açma/yaylanmada doğrusal artış, malzemenin elastiklik özelliğini kaybetmesi ile plastik özellik gösterdiği bölgeye geçtiği andan itibaren olur.



Şekil 2.18. Bükme açısı-esneme grafiği [28]

Bükme işlemleri sırasında malzeme üzerine farklı kuvvetler etki etmektedir. Büküm iç kısmında basma kuvveti oluşurken, dış kısmında çekme kuvveti oluşmaktadır. Böylece basma gerilmelerinin olduğu yüzey kısalırken, çekme gerilmesinin olduğu yüzey uzamaktadır. Çekme ve basma gerilmeleri Şekil 2.19'da görüldüğü gibidir. Nötr ekseninde ise, malzeme boyunda değişiklik oluşmaz [28, 29].



Şekil 2.19. Bükme işlemlerinde meydana gelen çeki ve bası gerilmeleri [29]

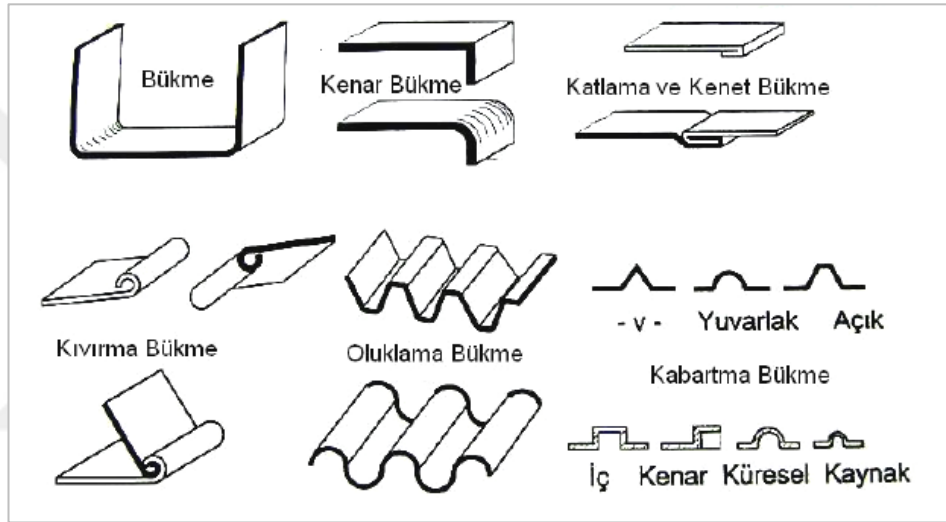
### 2.3.1 Bükme Prosesinde Sınıflandırma

Bükme tipleri iş parçasına verilecek şeklin özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Genel olarak bükme çeşitleri altı ana başlık altında toplanmaktadır.

- **Bükme**, Sac malzemeden kesilen parçanın istenilen şekle ulaşması veya dayanımının artırılması için gerçekleştirilen kalıplama işlemidir. Buna ek olarak bükme işlemleri, en çok kanal açılan, delinen ve boşaltılan ürünler üzerinde bulunan kısımların şekil değiştirmesinin önlenmesi ve yırtılmasına karşı dayanımlarının artırılması için uygulanmaktadır.
- **Kenar bükme**, Bükülen malzemenin boyunun uzadığı ve yırtılmanın meydana geldiği bükme, kenar bükmedir. Buruşma ve yırtılmaların meydana gelmesi önlenilse de uzama kontrol edilemez.
- **Kıvrırma bükme**, Kıvrırma bükme, kalıplanan malzemelerin kenar dayanımlarının artırılması, kesme dolayısıyla oluşan kesici çapakların giderilmesinin yanı sıra iki malzemenin mafsallı bir şekilde birleştirilmesi gerçekleştirilmesi amacıyla yapılan kalıplama yöntemidir.
- **Katlama ve kenet bükme**, Genel olarak giyim eşyası sanayinde kullanılan sac malzemelerden yapılacak olan makine malzemelerine uygulanmakta olan işlem katlama ve kenet bükmedir. Katlama işlemleri, çapak giderme ve malzeme dayanımının kazandırılması amacıyla uygulanmaktadır. 180° döndürülen uç, birbiri üzerine katlanmaktadır. İki ucu birleştirilecek olan silindir, kazan vb malzemelere uygulanan işlem ise kenet yapmadır.
- **Oluklama bükme**, Oluklama bükme işlemlerinin amacı düz sac levhaların dayanımının artırılması ile biçimlendirilmeleri sonrasında şekil değiştirmelerinin engellenmesidir. Al ve galvanizli sac malzemeler ile yapılması gerekmekte olan makine malzemelerinde uygulanan bu kalıplama işlemleri sonucunda elde edilen ürünler genellikle duvar panolarında, çatı levhalarında, gölgelik vb yerlerde kullanılmaktadır.

- **Kabartma bükme** Genel olarak sac malzeme uç kısımlarına uygulanan işlemler flaş, kıvrırma, katlama vb işlemlerdir. Sac malzemelerin kenar kısımlarından uzak olan bölgelerin şekillendirilmesi ve çökertilmesi işlemi ise kabartma bükme olarak tanımlanabilir ve bu işlem simetrik şekilde kalıplanamayan malzeme çevresine uygulanmaktadır. Kaburga ve kenar süsleme, ofset ve süsleme kalıplama olmak üzere sınıflandırılabilirler.

Bükme işlemleri sonucunda elde edilen ürünlere ait örnekler Şekil 2.20’de verilmiştir [30, 31].

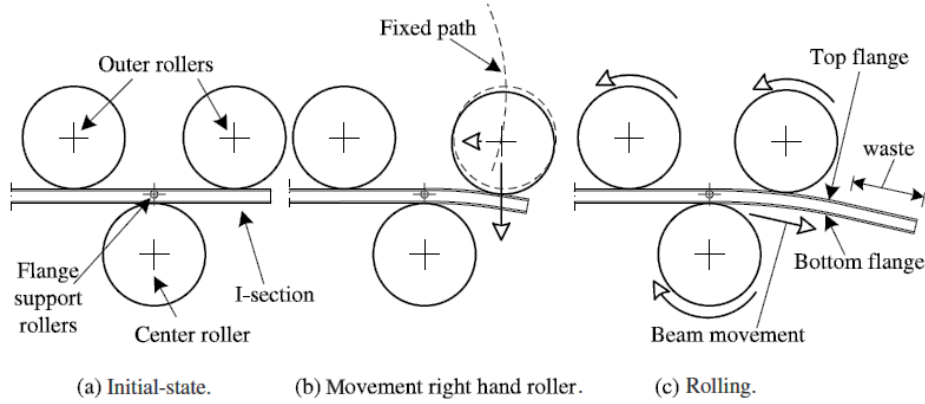


Şekil 2.20. Bükme proses örnekleri [29]

### 2.3.2 Vals Topları İle Bükme

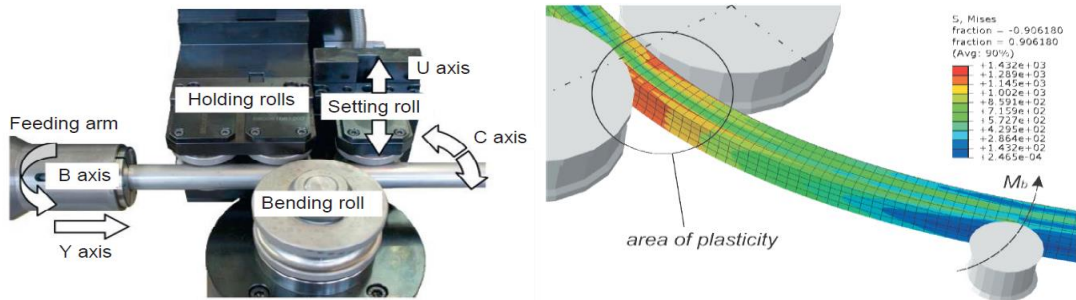
Metal şekillendirme sektörü başta olmak üzere enerji mühendisliği yapıları, maden ve tünelcilik sektörü ve inşaat sektöründe kullanılan yarı mamullerin üretiminde sıklıkla kullanılan işlemler üç ve dört toplu bükme işlemleridir [32-35]. Metal bükmede; kalıp ile bükme, geri bükme vb. yöntemler bulunmakta ve kullanılmaktaydı. Üç ve dört toplu bükme makinelerinin kullanımının başlaması ile birlikte konvansiyonel yöntemlerin kullanımı sonucunda meydana gelen geri esnemenin telafisinde yaşanan güçlükler, bükme sonucunda oluşan yüksek malzeme firesi, yüksek üretim maliyetleri, Şekil 2.21’de gösterilmekte olan işlem sonrasında şekillendirme sebebiyle kalan düzlemsel yüzeylerin geniş olması vb. sorunların

önlenmesi ve dar toleranslarda tek pasoda ve birden fazla pasoda bükme ile şekillendirme amaçlanmıştır.



**Şekil 2.21.** Vals topları ile bükme prosesi

Üç toplu profil bükme makinesi sistemine ait şema Şekil 2.22’de gösterilmektedir. Alt top konumu sabittir. Üst ve alt top dikey düzlemde eksenleri çakışır vaziyette çalışır. Üst top hareketli olup, y ekseninde hareket eder. Alt ve üst toplar arasında soğuk deformasyon yapılacak profilin konumlandırılarak yan topun y ekseninde hareketi ile bükme kavis yarıçapı ölçüsüne getirilmektedir. Topların dönme hareketi ile profil ilerletilir ve belirlenmiş olan bükme kavis yarıçapı ölçülerine göre bükme işlemi yapılır [36].



**Şekil 2.22.** Vals topları kullanılarak bükme prosesi örneği ve artık gerilme meydana geliş süreci

Dört toplu profil bükme prosesi, üç toplu bükme işlemlerine göre üstünlük göstermektedir. Çünkü, dört toplu bükme işlemleri sonunda profil uç kısmında

düzlemsel olarak kalan bölge azdır ve daha dar toleranslarda şekillendirme işlemi yapılır [36, 37]. Üç ve dört toplu bükme makineleri ile dikey pozisyonda ve yatay pozisyonda çalışan makinelerin birbirlerine göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilmektedir:



**Şekil 2.23** a) Üç toplu profil bükme makinesi b) Dört toplu profil bükme makinesi

Şekil 2.23 b’de gösterilmekte olan dört toplu profil bükme makinelerinde profiller iki yan vals topu arasına mesnetlendiğinden, üç toplu bükme prosesinde gözlemlenen profilin kayması problemi ile karşılaşılmamaktadır.

Bükme prosesi dört vals topu vasıtası ile yapıldığından daha dar toleranslar içerisinde üretim yapılması ve profil uç kısımlarında çok daha kısa düzlemsel bölgenin elde edilmesine imkân sağlanmaktadır. Kayar tahkimatlarda TH profillerin artan yük ile birlikte birbirleri üzerinden kayabilmesi için düzlemsel bölgenin en az ölçüde elde edilmesi gerekmektedir.

Özellikle ön bükme işlemi esnasında iki adet yan vals topu da operasyona etki ettiğinden daha kısa proses süresi sağlaması ile birlikte daha kontrollü bir bükme prosesi elde edilir.

Şekil 2.24’ de gösterilmekte olan dikey ve yatay pozisyonda bükme işlemini gerçekleştiren bükme mekanizmaları birbirleri ile kıyaslandığında ise proses özelliklerine göre makinelerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmektedir:

- Dikey pozisyonda çalışan bükme makinelerinde bükme işlemi yapılacak olan ve kg/m ağırlığı büyük olan profillerin bükme işlemlerinde; taşıma işlemlerinin ergonomik olmayışı ve iş kazası potansiyeli taşınması,
- Dikey pozisyonda çalışan makinelerde bükme radyüslerinin büyük olduğu durumlarda işletme bina yüksekliklerin yeterli olmamasından dolayı prosesin gerçekleştirilememesi,
- Bükme öncesi, bükme prosesi esnasında ve bükme işlemi sonrasında taşıma, istifleme gibi işlemlerin otomasyonunun en verimli şekilde yatay çalışmada gerçekleştirilebilmesi,
- Dikey çalışan sistemlerde bükme vals toplarının montaj-demontaj işlemlerinin uzun sürmesi ve zor oluşu olarak listelenebilir.



**Şekil 2.24** a) Yatay pozisyonlu profil bükme makinesi b) Dikey pozisyonlu profil bükme makinesi

### 2.3.3 Bükme Proseslerinde Meydana Gelen Kusurlar

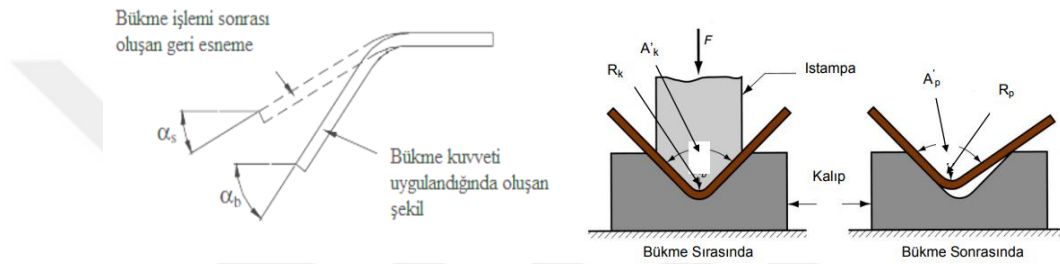
Bükme işlemi sırasında, iş parçası geri esneme, kesit distorsiyonu, buruşma ve kırılma gibi çeşitli kusurlara maruz kalır.

#### 2.3.3.1 Geri Esneme

Gerilim-gerinim dağılımları, istenen kusursuz bükme profilinin elde edilebilmesi için bükme işlemlerinde oldukça önemlidir. Bükme işlemlerinde,



malzeme elastik sınırı aşılar fakat max çekme gerilmesi aşılmaz. Bu sebeple, malzeme orijinal esnekliğinin bir kısmına hala sahiptir. Malzemeye uygulanmış olan yükün kaldırılması sonucunda malzeme eski halini almak için direnç göstermekte ve bükülmüş olan malzeme bir miktar geri yaylanmakta olup bu sergilenen harekete geri esneme denir [38]. Kısacası, şekil verme işlemlerinin takibinde yük boşaltılması esnasında bir metal parçanın şeklinin elastik değişime uğraması olarak açıklanabilmektedir [30, 31]. Bu değişim ile bitmiş parçalarda, sonraki şekillendirme işlemlerde değişikliğe ve artan toleranslara sebep olmaktadır. Bu sebeple bu durum, üretilen ürünlerin kalite, ölçü ve görünüşlerinde sorunlara neden olmaktadır [39, 40].



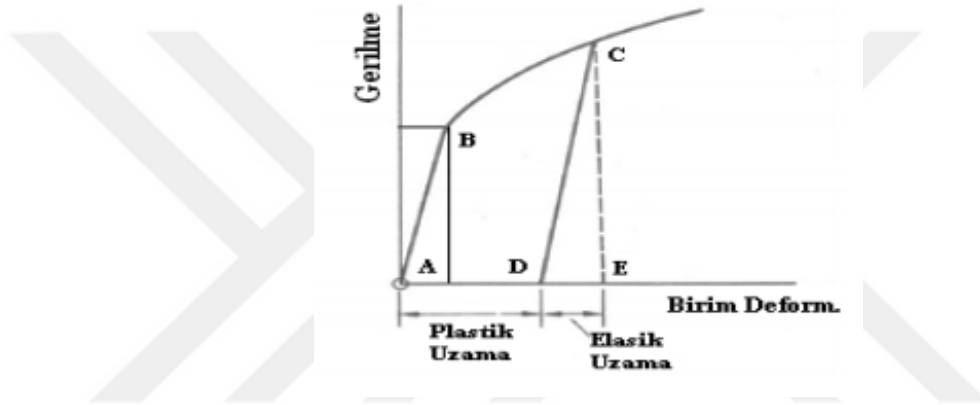
**Şekil 2.25.** Geri esnemenin şematik görüntüsü [20].

Buna ek olarak geri yaylanma, şekillendirme kalıplarının malzeme üzerinden kaldırılması sonrasında karşılaşılan gerilmelerin, malzemede yayılması olarak da belirtilebilir [41]. Biten ürünlerde boyut ve şekil doğruluğunu etkileyen en önemli faktör geri esnemedir [42]. Sac malzemelerde kalıntı gerilmelerin oluşması ve şekillendirilmiş parçalarda boyutsal doğruluğun etkilenmesine neden olan işlem bükme işlemi olup, bu problemler bükme işlemlerinin sonrasında gerçekleşmektedir [43]. Sonuç olarak kalıntı gerilmelerin belirginleşen dağılımları ile geri esneme meydana gelmekte ve istenen nihai ürün geometrisi elde edilememektedir [44]. Geri esnemenin önceden tahmin edilmesi ile bükme ile şekillendirilmiş ürünlerin, istenilen toleranslar içinde kalabilmesi ve son geometrik şeklin doğru belirlenmesi sağlanabilmektedir [45]. Bu tahmin, ancak sac malzemenin iç gerilme dağılımlarının en verimli şekilde belirlenmesi ile sağlıklı bir şekilde yapılabilmektedir [46].

Bükme açısının geri esnemeye bağlı olarak artırılması, bükme bölgesinin geri esnemeyecek şekilde ezilmesi, parçanın gerdirilerek bükme işlemlerinin

gerçekleştirilmesi, malzeme üzerindeki kuvvetin bekleme süresinin arttırılması gibi yöntemler ile ürünlerde istenmeyen geri esneme önlenmektedir [38].

Şekil 2. 26’ da verilen gerilme birim deformasyon eğrisi ile geri esneme sebepleri açıklanabilir. Elastik bölge AB doğrusu ile gösterilen kısım olup, gerilme birim deformasyon ilişkisinin orantılı olarak değiştiğini ifade etmektedir. Kuvvetin kaldırılması ile malzeme D değerini almaktadır. Bu malzemenin plastik bölgedeki elastikliğini belirlemektedir. DE malzemenin geri esnemesini belirtmektedir. AD ise kalıcı plastik deformasyondur.



Şekil 2.26. Gerilme-birim deformasyon diyagramı [47]

Geri esneme miktarı; sac metal parçanın kalınlığı, sac numunelerin cinsi, zımba yükünün malzeme üzerinde kalma süresi, uygulanan bükme kuvveti, hadde yönü, kalıp boşluğu, bükme yarıçapı ve sıcaklık gibi birçok faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [29].

Sac malzemelerin şekillendirme sonrasında meydana gelen geri esneme, istenilen geometrinin etkilenmesi nedeniyle telafi edilmelidir. Uygun kalıbın tasarlanması ile geri esneme telafi edilse de tamamen ortadan kaldırılamaz [45, 48].

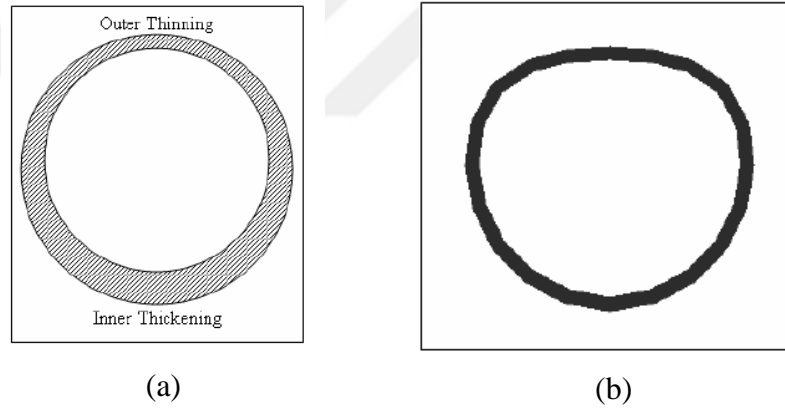
Geri esnemenin telafisi için birçok yöntemlerden faydalanılmaktadır. En sık karşılaşılan yöntemlerden biri geri esneme miktarının önceden tahmin edilmesi ve tahmin edilen açı değerlerine göre sac malzemenin fazla büküldüğü işlem olan aşırı bükmedir. Böylelikle bükme momentinin kaldırılmasından sonra parça tahmin

edilmiş olan açı değerlerine kadar geri esnemektedir ve istenilen parça geometrisi böylece elde edilir [45, 49].

Ek olarak geri esnemenin önüne geçmek için uygulanan başlıca yöntemler şunlardır: bükme açısının artırılması, çift bükme tekniği, ezerek bükme, germe altında bükme, zımba ucunun iç bükey yapılması ve zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesidir [20].

### 2.3.3.2 Kesit Distorsiyonu

Tüp gibi kapalı bölümler için ortak enine kesit problemleri duvar kalınlığı değişikliği ve düzleşmedir. Borunun dış tarafı gerilme stresine maruz kaldığından, dış taraftaki kalınlığı azalır. Ve tüpün iç tarafı basınç stresine maruz kaldığından, iç taraftaki kalınlığı artar. Düzleştirme, tüpe iç direnci olmadığı için borunun dış yüzeyinin çökmesinden kaynaklanır (Şekil 2.27)[2].



**Şekil 2.27.** a) Bükülen boruda meydana gelen et kalınlığı değişimi b) Bükülen borunun doğrultma işleminden sonraki kesit görünümü

### 2.3.3.3 Buruşma

İnce duvarlı bir kiriş büküldüğünde, iş parçasının iç tarafında basınç gerilmeleri vardır. Bu basınç gerilmeleri yüksekse iş parçasının göbek bölgesinde eğilme ve kırışma yüzeyi oluşur (Şekil 2.28). Bu kırışma olayı, özellikle büyük çaplı, ince çeper kalınlığına ve dar bükülme yarıçapına sahip elemanlar için proses parametreleri uygun değilse ortaya çıkar [2].



**Şekil 2.28.** Bükme işlemlerinde meydana gelen buruşma

#### **2.3.3.4 Kırılma**

İnce duvarlı kirişlerin dış yüzeyi bükme işlemleri sırasında çekme gerilimine maruz kalır. Dış yüzeyde üretilen gerilim, nihai gerilme mukavemeti değerini aştığında, malzeme boyun vermeye başlar ve daha sonra kırılır [2].

### **2.4 Madenlerde Tahkimat**

Tahkimat madencilikğin en önemli kısımlarından birini oluşturmaktadır. Tahkimat genel olarak, yeraltı işletmelerinde çeşitli amaçlarla açılan yeraltı boşluklarının, belirli sürede kendisini emniyette tutması amacıyla kullanılmakta olan destek üniteleridir. Tahkimatlar genel hatlarıyla, madenleri oluşturan galeri gibi açıklıkların can ve mal güvenliğinde çalışılır durumda tutulması amacıyla yapılmış olan ağaç, beton veya çelikten üretilen malzemelerdir. Oldukça fazla çeşitlilik gösteren tahkimat işlemleri, teknolojinin ve işletmenin maddi imkânlarına bağlı olarak, ahşaptan yapılan tahkimatlardan, hidrolik ile çalışan makinelere kadar değişmektedir. Sonuçta, seçilen ve kullanılmakta olan tahkimatların asıl işlevi, çevre kayaçların ölü yükünü taşımak değildir. Aksine kayanın kendini taşımasına yardım ederler [50].

#### **2.4.1 Tahkimat Türleri**

Madencilikte doğal ve yapay olmak üzere iki çeşit tahkimat yolu bulunmaktadır. Doğal tahkimatta, kaya kendini tahkim etmektedir. Kaya açıklıklarındaki topuk vasıtasıyla kaya kendini tutar ve bir başka tahkime gerek

duymaz. Yapay tahkimatta ise, kaya kendini tahkim etmez ona yardımcı çeşitli ek düzeneklerle oluşturulur. Tahkimat türleri aşağıda verilmiştir; [50]

- Ağaç tahkimatlar
- Çelik tahkimatlar (trapez, TH vb.)
- Çelik hasırlar
- Kaya saptamaları
- Püskürtme betonlar
- Mekanize (yürüyen) tahkimat

Madencilik faaliyetlerinin başlangıcından günümüze kadar kullanılan tahkimat çeşidi ağaç tahkimattir. Günümüzde çelik tahkimat profili ağaç tahkimatın yerini almışsa da hala orta ölçekli maden işletmelerinde ağaç tahkimat uygulamaları mevcuttur. Ağaç tahkimatların nakliye ve montajı kolaydır ancak mukavemetleri yapısal durumlarına bağlı olarak değişmektedir. Buna ek olarak nemden kolay etkilenir, bu sebeple mantar ve bakteri üretimi bakımından büyük dezavantaja sahiptirler [50].

Yeraltı kömür madenlerinde özellikle günümüzde çelik profil, çelik hasır, kaya saptama ve kalkan tipi tahkimat sıklıkla kullanılmaktadır. Çelik diğer malzemelere göre homojen yapıdadır, uygun şekil verilebilir, ağır yükte diğer malzemelere göre daha mukavemettir ve elastik modülünün diğer malzemelere göre daha yüksek olması sebebiyle birçok avantaja sahiptir. Bu sebeple eğilme gibi durumlarda olumlu sonuçları vardır. Bunun yanı sıra çelik pahalıdır ve korozyona uğrayabilmeleri en önemli dezavantajları arasında yer almaktadır [50].

#### **2.4.1.1 Çelik Tahkimatlar**

Yeraltı işletmelerinde uzun süre kullanılan çelik tahkimatların ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Buna karşın diğer malzemelere göre bazı üstünlüklerinden dolayı galeri ve taban yollarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [50].

Yeraltı işletmelerinde kullanılacak çelik malzemelerden istenen özellikler;

1. Akma sınırı yüksek olmalıdır.

2. İstenen şekli kolaylıkla almalıdır.
3. Deformasyondan sonra çelik birkaç kez düzeltilip tekrar kullanılabilir.

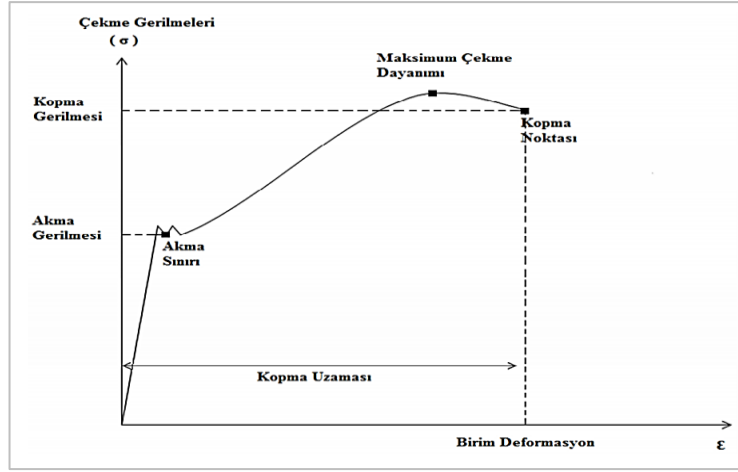
Çeliğin tahkimat malzemesi olarak kullanılmasının üstünlükleri;

1. Endüstriyel bir ürün olduğundan dolayı yapısal kusuru oldukça azdır.
2. Çeliğin elastisite modülü, diğer malzemelere göre yüksektir.
3. Çelik tahkimat sistemleri çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilmektedir.
4. Doğal koşullardan daha az etkilenir.
5. Aşırı deformasyona maruz kalan çelik tahkimat parçaları düzeltilerek tekrar kullanılabilir.

Çeliğin tahkimat malzemesi olarak kullanılmasının dezavantajları ise;

1. Oldukça pahalıdır.
2. İşletme koşullarında korozyona maruz kalırlar.
3. Taşınmaları ve kurulumları zordur.
4. Özel bağlantı elemanları ve düzenekler gerektirir.

Çelik, yapı olarak hem gevrek hem de sünek olmaktadır. Karbon, çeliklerin özelliklerinin belirlenmesindeki en önemli elementtir. Karbon miktarına bağlı olarak, çeliğin sertliği, esnekliği, sünekliği ve gerilme özellikleri değişmektedir. Karbon miktarının artması sertliğin artmasına sebep olmaktadır ancak kırılmalıkta artmakta, kaynaklanabilirlik ve süneklik gibi özellikler azalmaktadır. Tahkimat malzemesi olarak kullanılan çeliklerde dikkat edilen özellikler Şekil 2.29' da ki gibidir [50].



**Şekil 2.29.** Çelik malzemenin mekanik özellikleri [50]

#### 2.4.1.2 Tahkimat Malzemesi Olarak Çelik Profillerin Özellikleri

Tahkimat malzemesi olan çelik profil, Alman standardı DIN 21541 normuna göre üretilmektedirler. Belirtilen normda üretilen profilin mukavemet momenti (W) ile kesit alanı (F) arasında; [50]

$$F(\text{cm}^2)=0,202W(\text{cm}^3)+9,75 \quad \text{şeklinde bir bağıntı vardır.}$$

Profilde oluşan eğilme momenti ile mukavemet momenti ters orantılıdır.

Rankin oranı, çelik profillerde basınç direncinin burkulma direncine oranıdır. Bu oran 1'e yaklaştıkça profilin dayanımı artmakta olup bu değerden uzaklaştıkça profil dayanımı düşmektedir. Üç farklı profil cinsine ait rankin oranları Tablo 1'de verilmiştir [50].

**Tablo 2.1.** Bazı profillerin mukavemet momenti ve rankin oranı [50]

Özellik	I Profil	Kare Profil	TH Profil
$W_x (\text{cm}^3)$	155	7	58
$W_y (\text{cm}^3)$	50	14	63
Rankin Oranı	1,5	5,3	1,3
Birim Ağırlık (kg/m)	33,5	14	21

Tablo 2. 1'de de görüldüğü gibi dayanımı en yüksek profil, rankin oranı 1 'e yakın olan TH profiller, zor yeraltı şartlarına en uygun profillerdir [50].





### 3 MATERYAL VE YÖNTEMLER

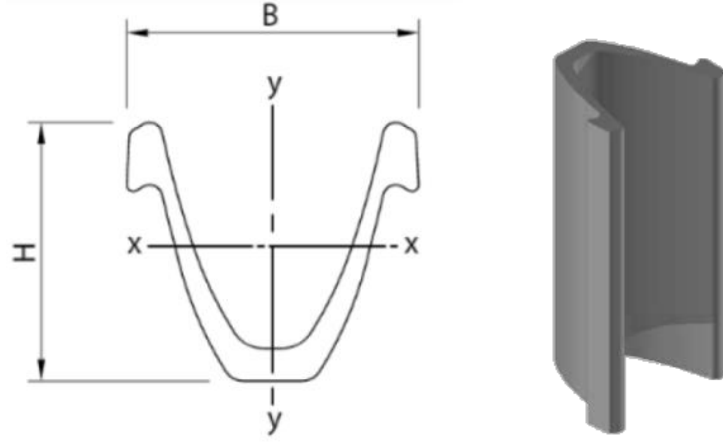
#### 3.1 Materyal

Tez çalışması kapsamında kimyasal kompozisyonu belirlenmiş olan kütük malzemeler; Toussaint-Heintzmann profilini elde etmek amacı ile sıcak haddeleme süreçlerinin hammaddesi olarak kullanılacaktır.



**Şekil 3.1.** Profil üretiminin hammaddesi olan kütük ve üretilen TH profil

Sahip olduğu özel kesit tasarımı sayesinde dikey ve yatay eksenlerindeki mukavemet momentleri birbirine çok yakın olan TH profilleri burkulma, eğilme, burulma gibi mekanik zorlamaların mevcut olduğu sistemlerde kullanılabilen en ideal profildir [24]. Bu özelliği sayesinde maden galerileri ve tünel inşaat faaliyetlerinde tahkimat sistemlerini oluşturan başlıca elemanlar olarak kullanılmaktadır. Sıcak haddeleme prosesi ile elde edilen TH profilleri uzun profiller halinde elde edilmekte fakat bu hali ile galeri veya tünellerde kullanılamamaktadır. Standartların belirttiği galeri ve açıklıklarda olmaları gerekmekte olup, kayar tahkimat, trapezoid, vb. şekillerde montaj gerçekleşmesi için soğuk olarak deforme edilmeleri veya bükülmeleri gerekmektedir [25-27]. Maden ve tünel profillerinin bükme proses tasarımı çalışmalarında Şekil 3.2’de gösterilmiş olan, TH34 profiller referans alınmıştır.



**Şekil 3.2.** TH34 Profile ait profil kesiti

Şekil 3.2’ de gösterilmekte olan ve simülasyon faaliyetlerine hazırlık aşamasındaki modelleme çalışmalarında kullanılan TH34 profilin kesit özelliklerine ilişkin veriler Tablo 3.1’ de gösterilmektedir.

**Tablo 3.1.** TH34 profile ait kesit özellikleri çizelgesi

Profil Cinsi	B (mm)	H (mm)	$I_x$ ( $cm^4$ )	$I_y$ ( $cm^4$ )	$W_x$ ( $cm^3$ )	$W_y$ ( $cm^3$ )
TH34	171	136,5	870	1.182	122	138

Geçme tahkimat ismi ile de anılan TH tahkimatlar iç içe geçmiş iki profilin bağ çevresinden gelecek aşırı kuvvetlere karşı birbirleri yüzeyinde boyuna eksende kaymaları prensibine dayanmaktadır. Artan yük yoğunluğu ile tahkimatların bağlantı elemanları olan kelepçelerin yükü boşaltması amacı ile profillerin bir miktar kaymaya izin vermesi ile tahkimatta artan gerilmenin kontrollü bir şekilde azalması sağlanmaktadır. Böylelikle tahkimatın hasar görmesi engellenmektedir. Şekil 3.3’ de TH34 kesite sahip geçme tahkimat sistemi örneği gösterilmektedir.



**Şekil 3.3.** TH34 geçme tahkimat sistemi

Maden ve tünelticilik sektöründe tahkimat elemanı olarak kullanılan profilin bükülmesi ve tasarımlarda istenilen geometriye getirilmesi aşamalarında yararlanılan bükme makinesi ile bükme prosesi tasarımları süreçlerinde kullanılan 31Mn4 ve S480W malzemelerine ait mekanik özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** S480W ve 31Mn4 malzemelere ilişkin mekanik özellikler tablosu

Malzeme Cinsi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama
S480W	480	650	17
31Mn4	350	550	18

### 3.2 Yöntemler

Toussaint-Heintzmann (TH) kesiti bazında soğuk deformasyon özellikleri belirlenmesi, maden galerisi veya tünel çelik tahkimat sistemlerinin simülasyon analizleri ve prototip uygulaması olarak belirlenen somut çıktılar aşağıdaki ana amaç ve hedeflerin gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkacaktır.

Bu kapsamda, sıcak haddeleme üretim prosesi ile elde edilen simetrik kesite sahip maden ve tünel profillerinin soğuk deformasyon özelliklerinin belirlenmesi olarak belirlenen ana amaç;

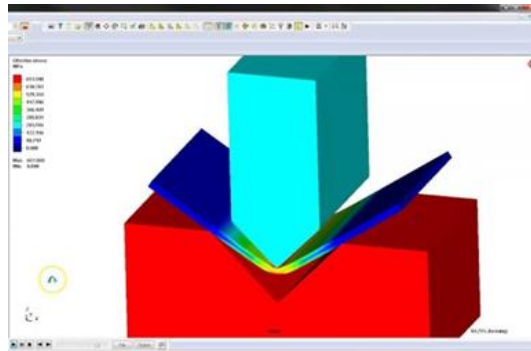
- Sıcak haddeleme ile üretilen aksel simetrik kesite sahip maden ve tünel profillerinin soğuk deformasyon esnasında kademeli plastik deformasyon özelliklerinin araştırılması,

- Maden ve tünel profili kesit bazında kademeli soğuk deformasyon prosesinin sonlu elemanlar simülasyonu sonucunda stres-strain dağılımı, artık gerilme, eğme - bükme kuvveti - deplasman vs. değerlerinin profil bazında elde edilmesidir.

Yukarıda belirtilen faaliyetler için analitik ve deneysel olarak uygulanacak çözüm yöntemlerinin başında eğme-bükme simülasyonu uygulamaları gelmektedir. Simülasyon uygulamasında sonlu elemanlar yöntemi uygulanacak olup profil kesiti bazında gerilme-şekil değiştirme dağılımı, kuvvet, deplasman, kritik deformasyon bölgelerinin elde edilerek en verimli proses parametrelerinin elde edilmesi ve elde edilen bükme parametreleri ile gerçek uygulamasının yapılarak sonuçların doğrulanması hedeflenmektedir.

Belirtilen faaliyetler kapsamında;

- Mikro alaşımlı çelik hammaddeye sahip maden profilinin şekillendirilebilirlik özelliklerinin irdelendiği sonlu elemanlar metodu temelli simülasyon faaliyetleri boyunca simufact.forming yazılımı kullanılmış olup, simülasyon faaliyetleri boyunca elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri irdelenerek tasarlanacak olan en verimli bükme prosesine ilişkin vals toplama etkiyen kuvvet, tork gereksinimi verilerinin elde edilerek gerçek uygulamalardaki makine kapasitesine uygunluğu incelenecektir.



**Şekil 3.4.** Simufact.forming yazılımı

- Sonlu elemanlar metodu temelli bükme simülasyonları neticesinde elde edilen en verimli bükme prosesine ait parametreler kullanılarak dört toplu profil bükme makinesinde gerçek bükme uygulaması gerçekleştirilmiştir.

- Gerçek bükme uygulaması sonucunda elde edilen bükülmüş profile ait geri esneme miktarının tespiti, bükme prosesi öncesinde referans alınan bükme radyüs ölçülerine göre tasarlanan mastar vasıtası ile kontrol edilmiştir. Ayrıca soğuk deformasyon aşamasında malzemede hasarın meydana gelip gelmediğinin belirlenmesi amacı ile bükülmüş malzemeye sıvı penetrant testi uygulanarak çatlak kontrolü yapılmıştır.

### **3.2.1 Sonlu Elemanlar Metodu Temelli Soğuk Deformasyon Simülasyonları**

Madencilik ve tünel inşaa sektörlerinde yüksek yük taşıma kabiliyeti ve ısıll işleme uygunluğu özellikleri ile öne çıkan TH profillerden TH34 ebadındaki profillerin bu tez kapsamında uzun ürün halinde iken referans alınan galeri ark ölçüsü gerekliliklerini sağlamak amacı ile boy kesilecek ve sonlu elemanlar metodu destekli üç nokta eğme simülasyonu yürütülerek maksimum geri esneme miktarının öngörüsü yapılmıştır. Yapılan geri esneme öngörüsünün ardından ise dört toplu profil bükme prosesi tasarlanarak, iş parçası olan TH profile bükme işlemi uygulanacaktır. Ardından, bükülmüş profilin yeraltı açıklığının radyüs tolerans limitlerine uygun şekilde ve soğuk deformasyon prosesi kaynaklı üretim hatalarından arındırılmış şekilde elde edildiğinin kontrolü sağlanmıştır.

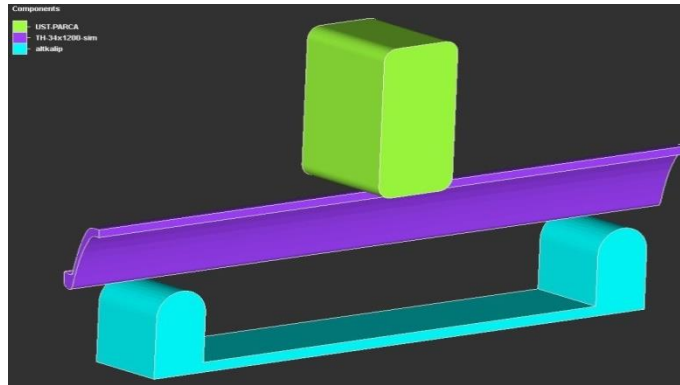
#### **3.2.1.1 Üç Nokta Eğme Testi Prosesi Tasarım ve Simülasyon Faaliyetleri**

S480W malzemeye sahip TH34 profilin DIN21530 standardı doğrultusunda kurgulanan üç nokta eğme testi simülasyonu ile malzeme özellikleri ve deformasyon miktarının geri esneme davranışına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, hedeflenen ark ölçülerini sağlayacak olan ve kuvvetin uygulanış doğrultusu için üç nokta eğme numunesine hadde yönüne dik yönde soğuk deformasyon uygulanarak gerilme-şekil değıştirme dağılımları ile geri esneme miktarının eldesi sağlanmıştır.

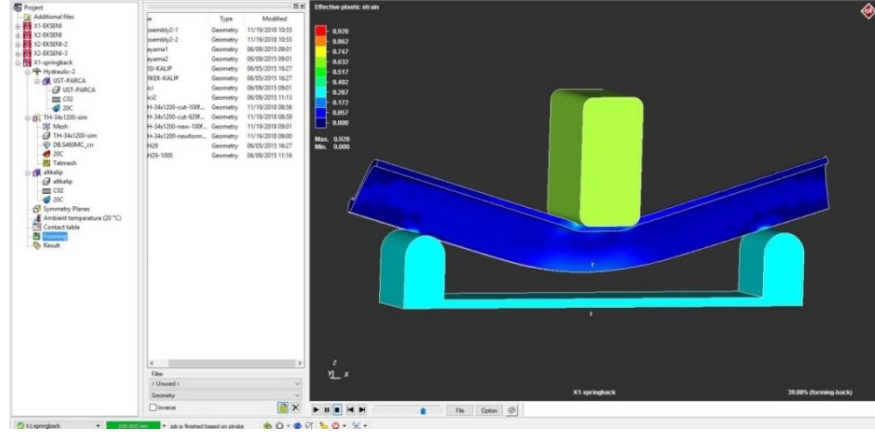
**Tablo 3.3.** Üç nokta eğme simülasyonu girdi parametreleri tablosu

Simülasyon Parametresi	Parametre Girdisi
İş parçası Malzeme Cinsi	S480W
İş parçası Sıcaklığı	24°C
Kalıp Malzeme Cinsi	Rijit Kalıp
Kalıp Sıcaklığı	24°C
Pres Cinsi	Hidrolik Pres
Pres Hızı	5 mm/sn
Strok	120 mm
Mesh Yapısı	Hexmesh
Mesh Boyutu	3,2 mm

S480W malzemeli TH34 profilin geri esneme miktarının simülasyon destekli olarak tespiti aşamasında iş parçasının simetrik geometriye sahip olması avantajından faydalanılarak iş parçasının simetrik yarısı kullanılarak çözüm süresi kısaltılmıştır. Tablo 3.3’ de verilmiş olan simülasyon parametreleri kullanılarak üç nokta eğme testi simülasyonu başlatılmış ve girdi parametrelerinin neticesinde simülasyon çıktıları elde edilmiştir. Üç nokta eğme testi simülasyonu modelleme aşamasına ilişkin görsel Şekil 3.5’de, simülasyon çalışmasına ilişkin envanter ve simülasyon penceresi bilgilerine ait görsel ise Şekil 3.6’ da gösterilmiştir.



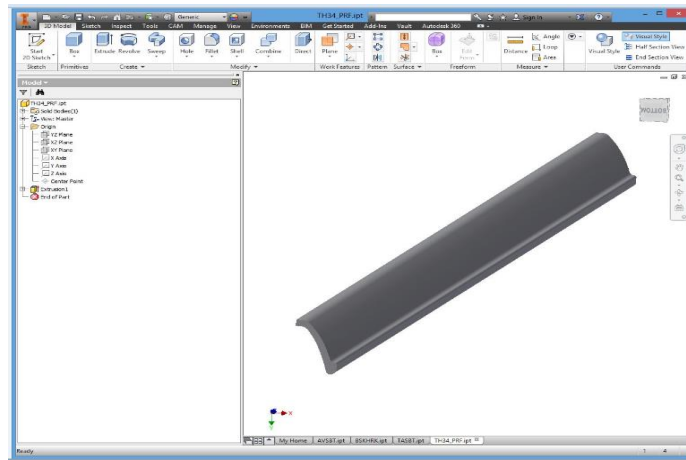
**Şekil 3.5.** Üç nokta eğme testi simülasyonu modelleme çalışması görseli



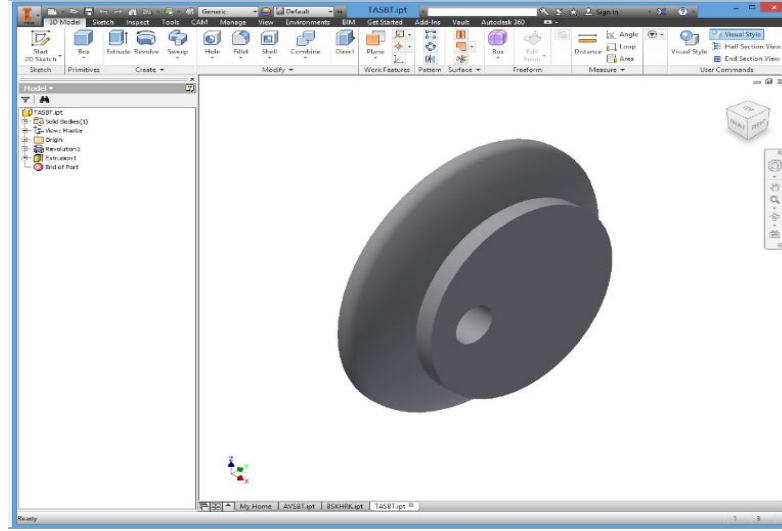
Şekil 3.6. Üç nokta eğme testi simülasyonu envanter ve simülasyon penceresi görseli

### 3.2.1.2 Dört Toplu Profil Bükme Prosesi Tasarım ve Simülasyon Faaliyetleri

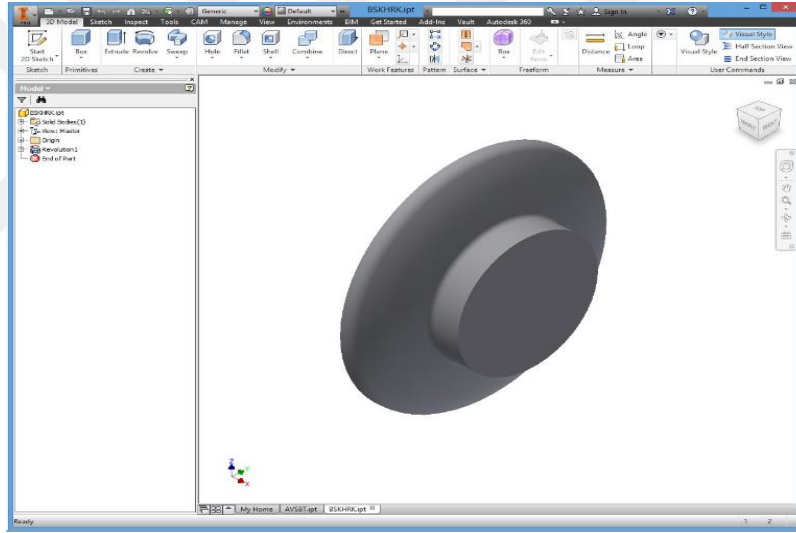
Tez çalışmasının bu aşamasında, AutoCad ve simufact.forming yazılımları kullanılmıştır. Analizde kullanılacak olan kalıplar AutoCad yazılımı ile üç boyutlu olarak modellenmiştir. Simülasyon faaliyetleri süresince iş parçası olarak kullanılacak olan TH34 profil ve bükme işlemlerini iş parçasında katlanma, yırtılma ezilme gibi kusurlara neden olmayacak şekilde gerçekleştirmek üzere tasarlanmış olan bükme topları üç boyutlu olarak modellenmiş ve .stl formatına dönüştürülerek simufact.forming yazılımı içerisine entegre edilecek şekilde kaydedilmiştir. Katı modelleme çalışmaları sonunda elde edilen modeller Şekil 3.7 - Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Dört toplu bükme proseslerinde kullanılacak olan TH34 profili iş parçası



**Şekil 3.8.** Dört toplu bükme proseslerinde kullanılacak olan sağ ve sol bükme topu

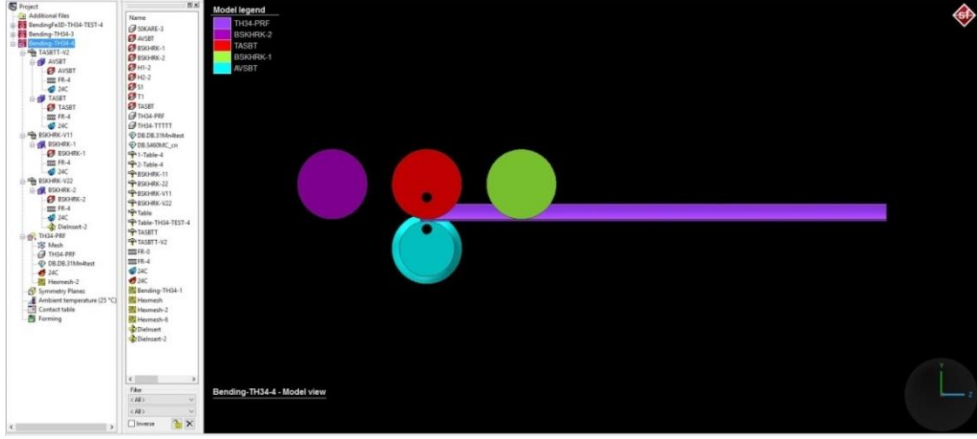


**Şekil 3.9.** Dört toplu bükme proseslerinde kullanılacak olan üst bükme topu

Oluşturulan modeller simülasyon faaliyetleri gerçekleştirilecek olan bükme prosesi için gerekli olan kalıplar alt top, üst top, sağ yan top, sol yan top ve iş parçasını içermektedir. Elde edilen modeller program üzerinde montajlanarak simufact.forming yazılımına aktarılmıştır.





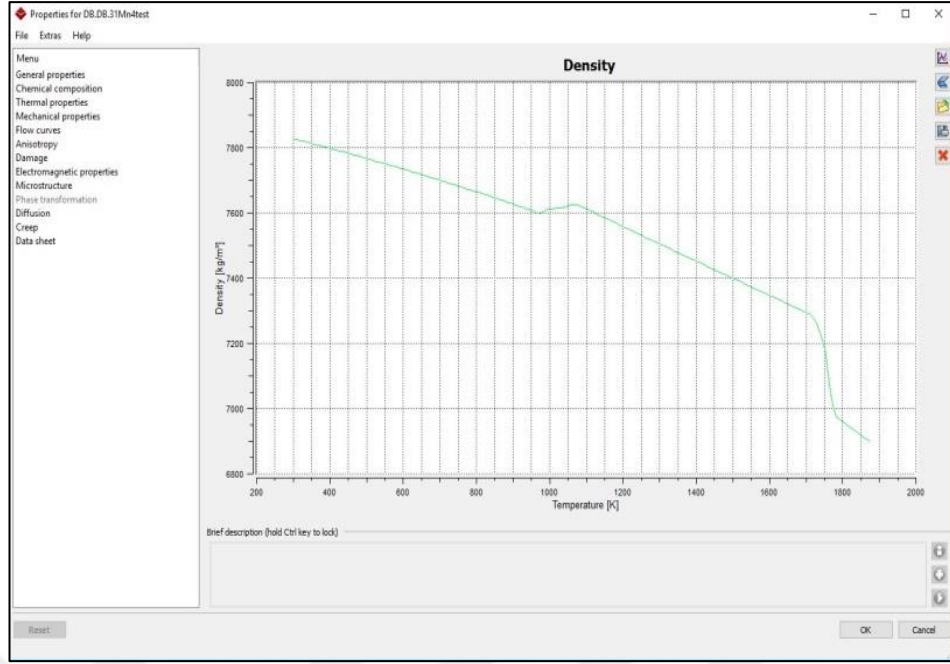


**Şekil 3.12.** Simufact.forming proses akış çizelgesi

Sonlu elemanlar metodu destekli soğuk deformasyon süreçleri simülasyonlarında, Tablo 3.2’ de gösterildiği üzere iş parçası malzemesi olarak S480W seçilmiş olup, simülasyon yazılımı içerisinde mevcut malzeme kütüphanesinden malzeme ataması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları süresince kullanılan diğer parametrelere ilişkin bilgiler ise Tablo 3.4.’de gösterilmiştir.

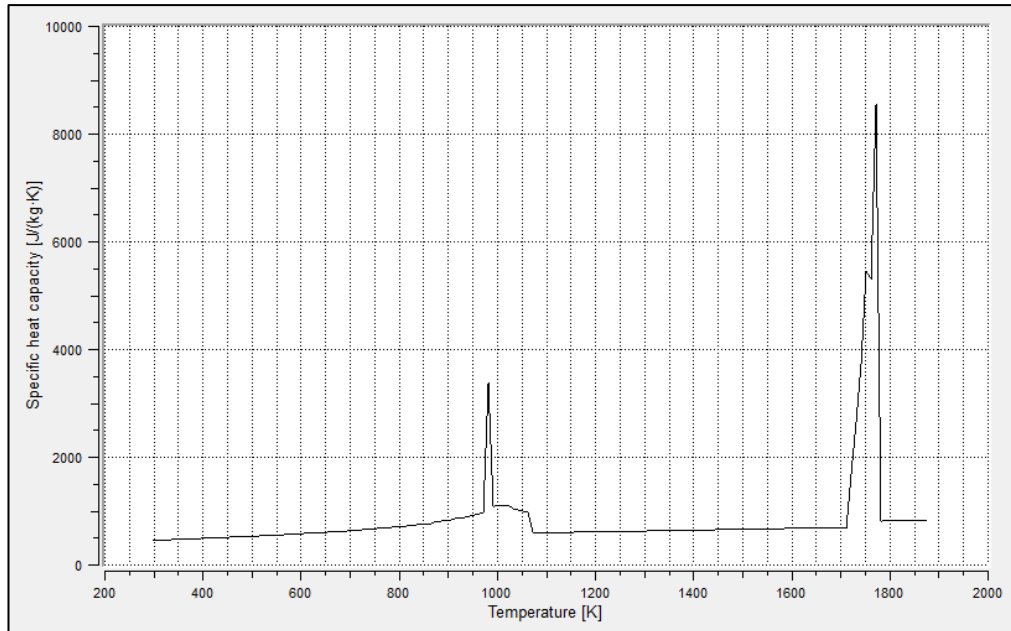
**Tablo 3.4.** TH34 Profil dört toplu profil bükme simülasyonu girdi parametreleri tablosu

<b>İş parçası Malzemesi</b>	S480W
<b>Bükme Topları Malzemesi</b>	Rijit Kalıp
<b>Kalıp ve İş parçası Sıcaklıkları</b>	24°C
<b>Mesh Tipi ve Mesh Boyutu</b>	HexMesh, 3,2 mm
<b>Mesh Eleman Sayısı</b>	117352
<b>Sürtünme Modeli ve Katsayısı</b>	Coulomb, 0,4
<b>Çözüm Süresi</b>	239,3 Saat

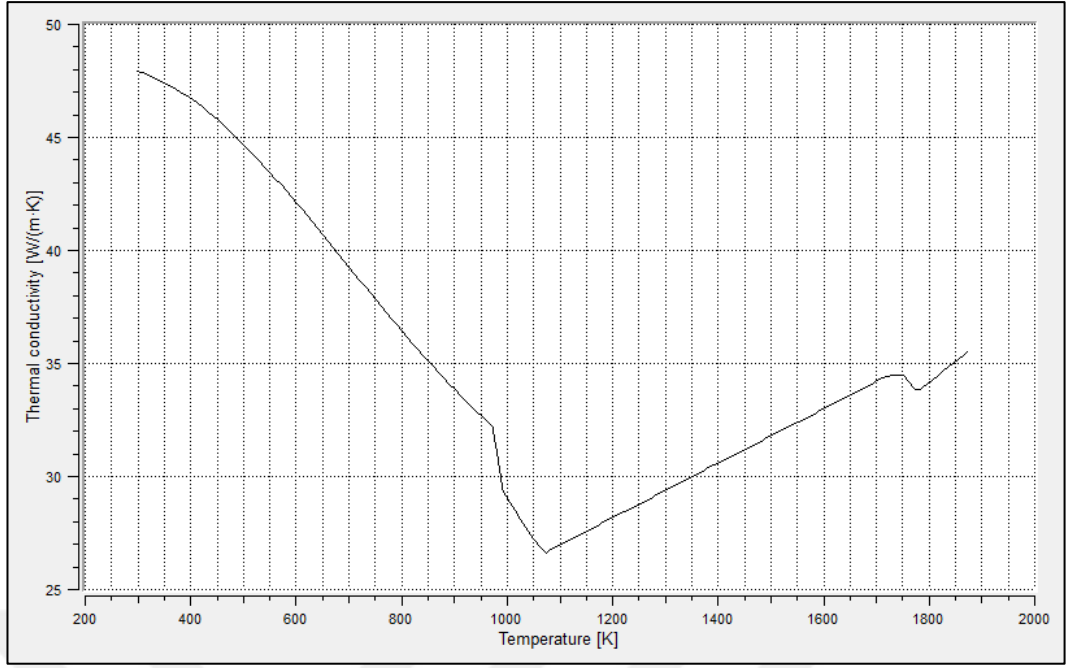


**Şekil 3.13.** Yoğunluk grafiği

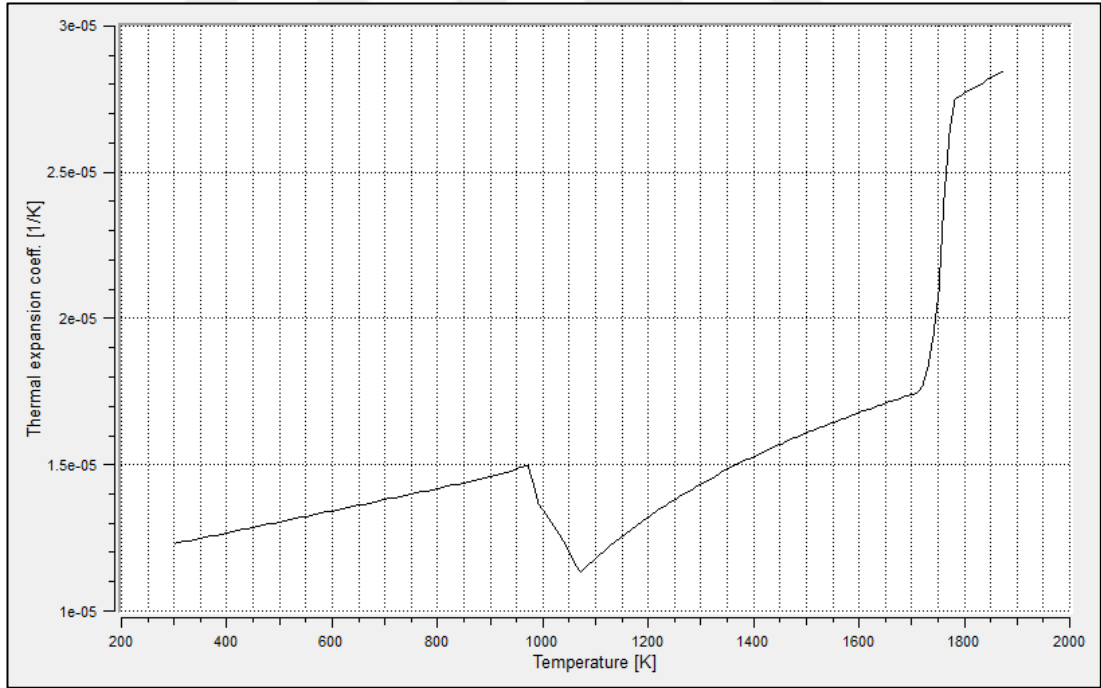
Simülasyon süreçlerinde kullanılan malzeme parametrelerine ilişkin görseller ise Şekil 3.14 - Şekil 3.19' da gösterilmektedir.



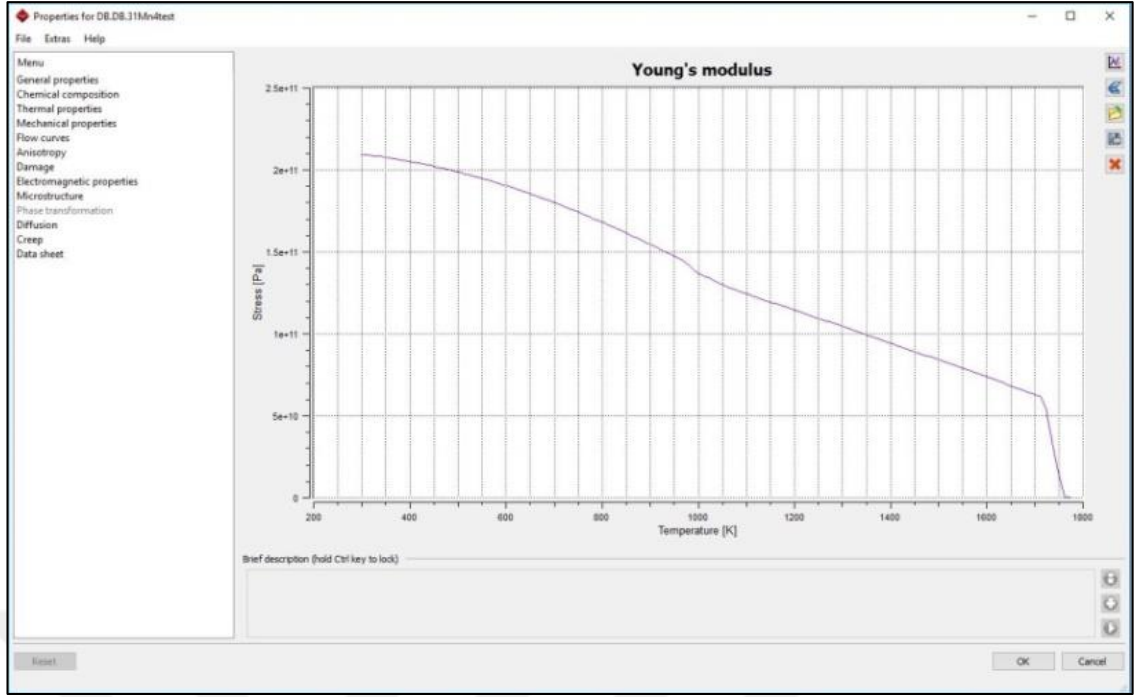
**Şekil 3.14.** Spesifik ısı kapasitesi



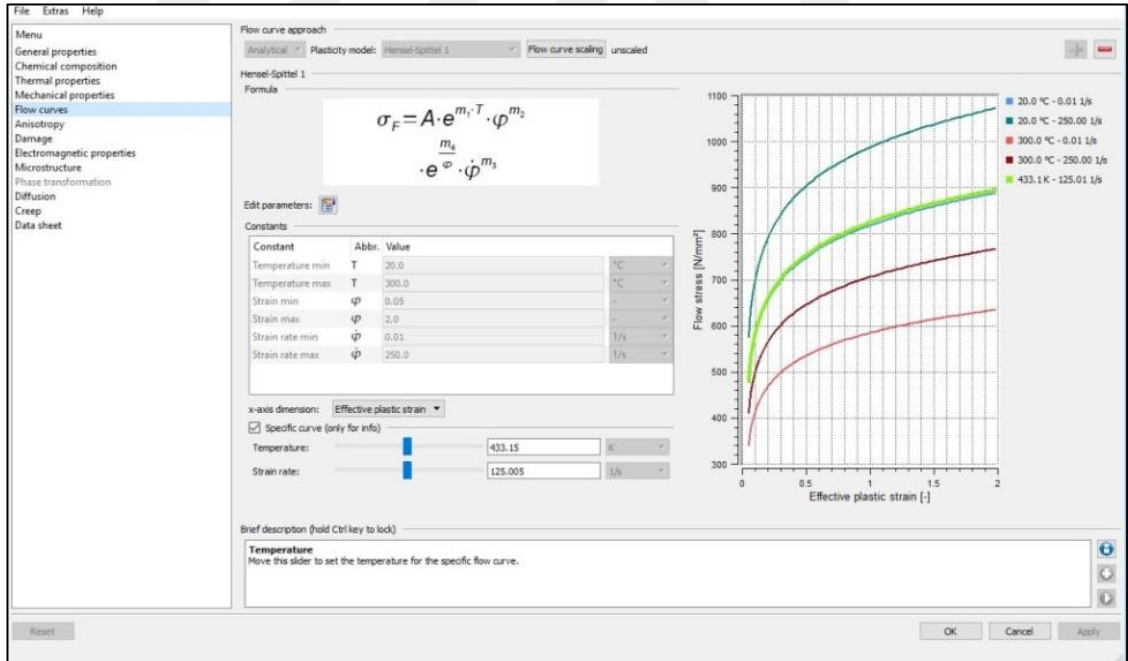
Şekil 3.15. Isı iletim katsayısı



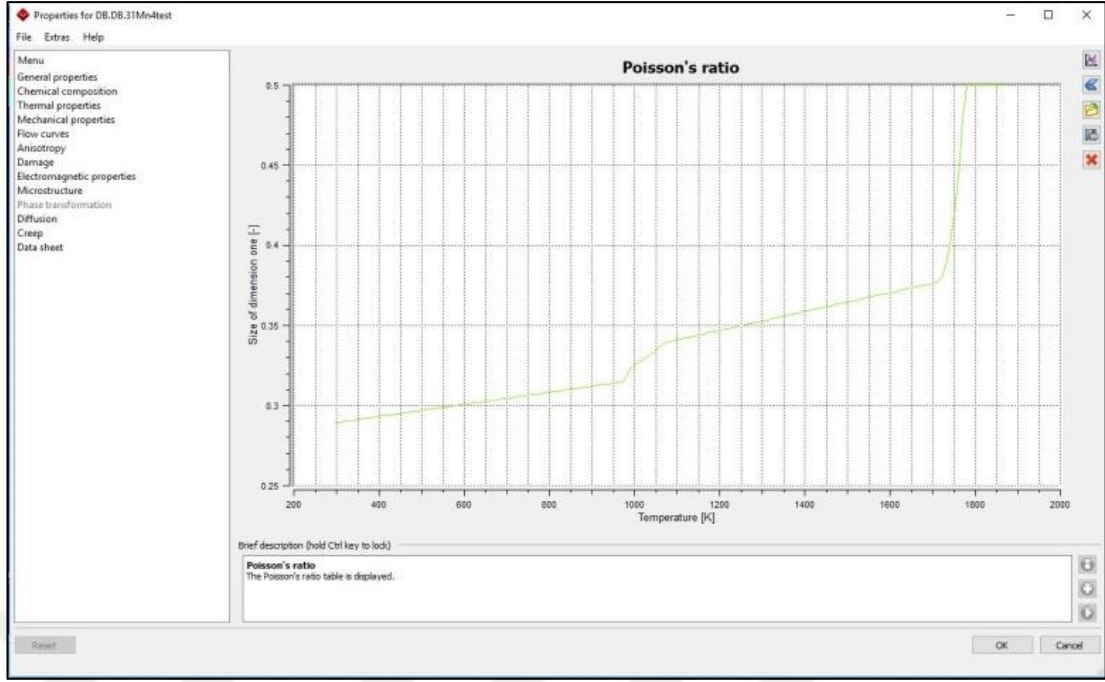
Şekil 3.16. Isıl genleşme katsayısı



Şekil 3.17. Young modülü



Şekil 3.18. Akış gerilmesi grafiği



Şekil 3.19. Poisson oranı

Bükme prosesleri vals toplarının kendi eksenleri etrafında dönmesi ve profile dik yönde baskı uygulamaları ile gerçekleştirileceğinden dolayı pres tipi olarak dönme hareket sistemi yani “Tabular Motion (Translation&Rotation)” seçilmiştir. Şekil 3.20’ de gösterildiği üzere asıl bükme işlemini gerçekleştirecek olan sağ yan top, iş parçasını toplar arasına merkezleyerek baskı yapacak olan üst top ve iş parçası ilerleme hareketini yapacak olan sol yan topun tahriklenmesine ilişkin kurgulanan strok ve dönme açıları verileri tanımlanmıştır.

ESKHK-V11

Press type: Tabular motion (translation & rotation)

Table type: Time/Stroke

Time	Stroke X	Stroke Y	Stroke Z	Angle
s	mm	mm	mm	°
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.59	0.0	20.0	0.0	155.4
2.6	0.0	20.0	0.0	0.0
6.6	0.0	20.0	0.0	0.0
22.0	0.0	20.0	0.0	1398.0

Brief description (hold Ctrl key to lock)

ESKHK-V22

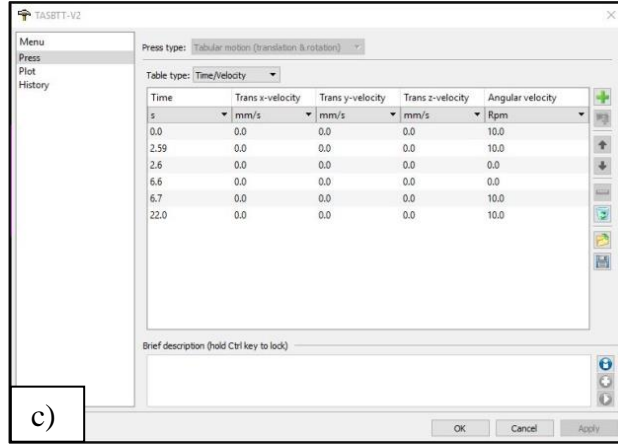
Press type: Tabular motion (translation & rotation)

Table type: Time/Stroke

Time	Stroke X	Stroke Y	Stroke Z	Angle
s	mm	mm	mm	°
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.59	0.0	0.0	0.0	155.4
2.6	0.0	-80.0	0.0	0.0
6.6	0.0	-160.0	0.0	0.0
22.0	0.0	-160.0	0.0	1398.0

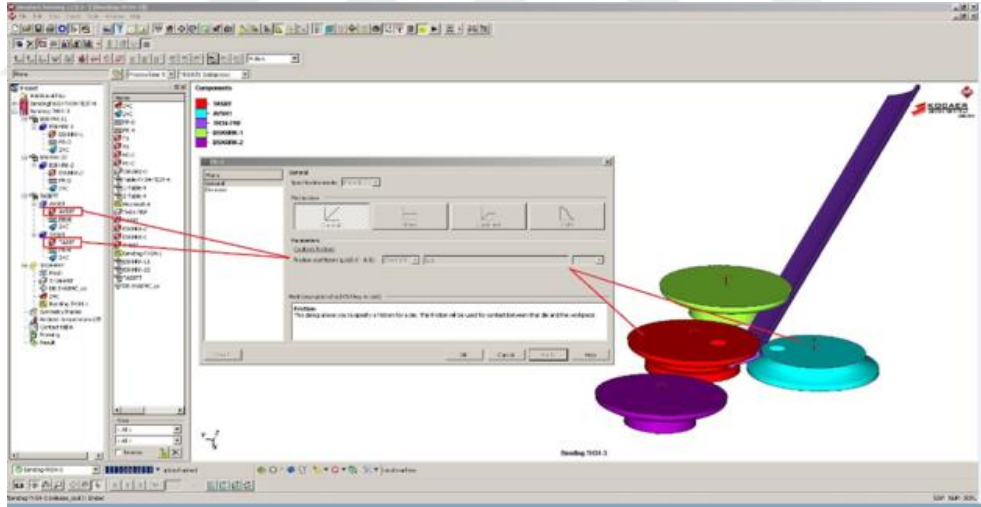
Brief description (hold Ctrl key to lock)

Press dialog page  
Select the press to be used here.



**Şekil 3.20.** Bükme prosesinde bükme işlemini gerçekleştirecek olan tahrikli toplara ilişkin strok ve açısız hız girdileri görselleri a) Sol yan top b) Sağ yan top c)Üst top

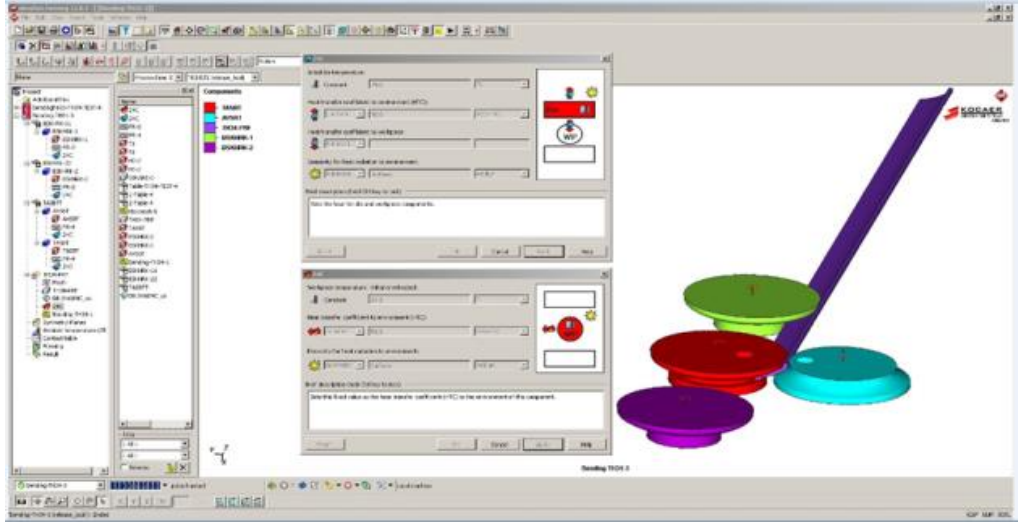
Sürtünme modeli olarak, Coulomb sürtünme modeli seçilmiştir. Sürtünme katsayısı olarak ise gerçek üretimler neticesinde elde edilen veriler doğrultusunda 0,4 değeri girilmiştir.



**Şekil 3.21.** Sürtünme modeli ve şartlarının tanımlanması

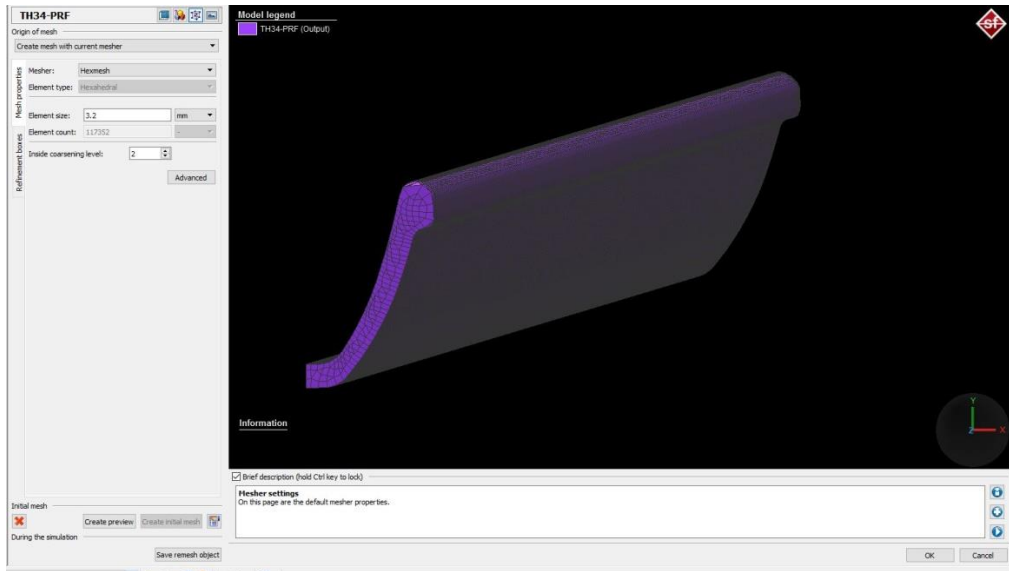
Bükme işlemi soğuk şartlarda gerçekleştirilmiş olup kalıp sıcaklıkları ve iş parçası sıcaklığı, dışarıdan herhangi bir şekilde ısı transferi olmadığı için ortam sıcaklığı olan 24°C olarak belirlenmiştir.





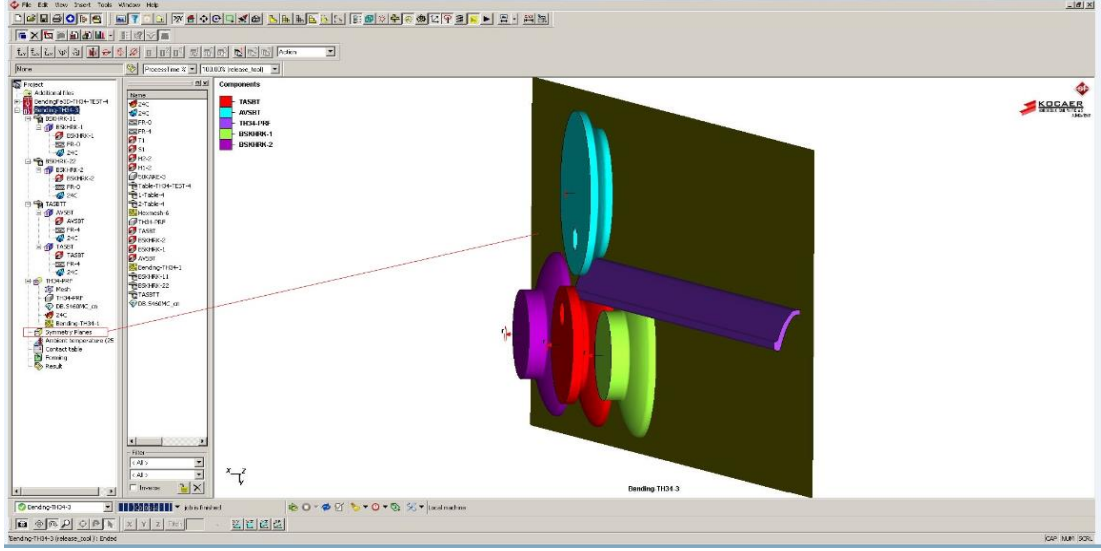
**Şekil 3.22.** Kalıp ve iş parçası sıcaklıklarının tanımlanması

Dört toplu bükme işlemlerinde iş parçası olan TH profilin mesh yapısı için Hexmesh kullanılmış olup element tipi Hexahedral'dir. İş parçasının ağ yapısını, 3,2 mm eleman boyu ve 117352 eleman sayısına sahip bir ağ yapısı oluşturmaktadır. Simülasyon faaliyetleri boyunca çözüm süresini kısaltabilmek amacı ile profilin simetrik yarısı kullanılmıştır. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24' de simetrik yarı model kullanılan simülasyon kurgusuna ilişkin görseller gösterilmektedir.



**Şekil 3.23.** Simufact.forming yazılımında iş parçası ağ yapısının oluşturulması ve ağ yapı görüntüsü





**Şekil 3.24.** Simufact.forming yazılımı ile oluşturulan simülasyon kurgusu genel görünümü

### 3.2.2 Maden Profillerinin Prototip Soğuk Deformasyon Uygulaması

Sonlu elemanlar metodu destekli soğuk deformasyon süreçleri boyunca mevcut bükme makinesinin kapasite verileri kullanılmış, bükme simülasyonları neticesinde iş parçasında meydana gelen gerilme değerleri incelenerek optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon süreçlerinin tamamlanmasını takiben prototip bükme uygulamalarında kullanılacak olan bükme vals topları imal edilmiştir.

#### 3.2.2.1 Prototip Soğuk Deformasyon Uygulama Aşaması

Simülasyonlarda kullanılan ve referans alınmış galeri kesitine göre şekillendirilecek olan TH34 profillerin proses tasarımı aşamasında belirlenen ölçülerde boy kesim işlemleri tamamlanmıştır. Simülasyon faaliyetlerinden elde edilmiş olan dönme hızı, strok gibi bükme proses parametreleri makine kontrol panosu üzerinden programlanmış ve prototip uygulama faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.25 - Şekil 3.29' da prototip bükme uygulamalarına ilişkin görseller gösterilmektedir.



**Şekil 3.25.** Prototip bükme uygulamalarında kullanılan boy kesim işlemi tamamlanmış iş parçaları



**Şekil 3.26.** Dört toplu profil bükme makinesi



**Şekil 3.27.** Prototip bükme uygulaması aşaması; a) İş parçasının sıfır konumuna getirilmesi b) Bükme işlemi başlangıcı c) Radyüs oluşturma aşaması

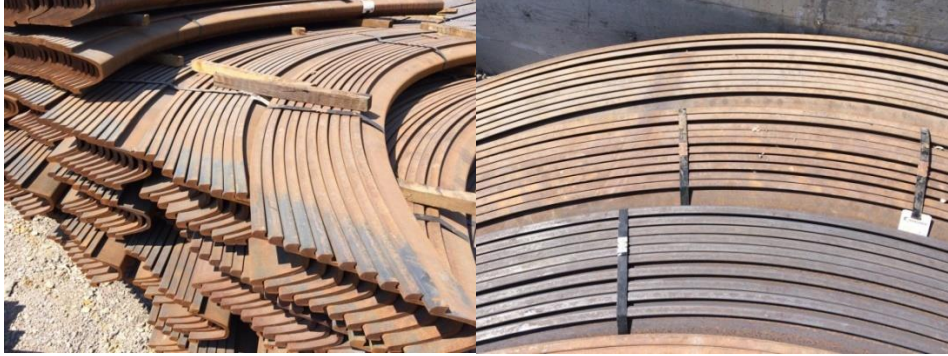


**Şekil 3.28.** Prototip bükme işlemi sonrasında elde eden ilk ürünler

Şekil 3.28' de gösterilmiş olan ilk numunelerin masterlar ile gerçekleştirilen ölçü kontrollerinin ve gözle muayenelerinin tamamlanmasını takiben Şekil 3.29' da



gösterildiği üzere seri üretim aşamasına geçilmiş olup 150 adet TH34 profil bükülmüştür.



**Şekil 3.29.** Prototip bükme işlemi sonrasında seri üretimlerden elde edilen ürünler

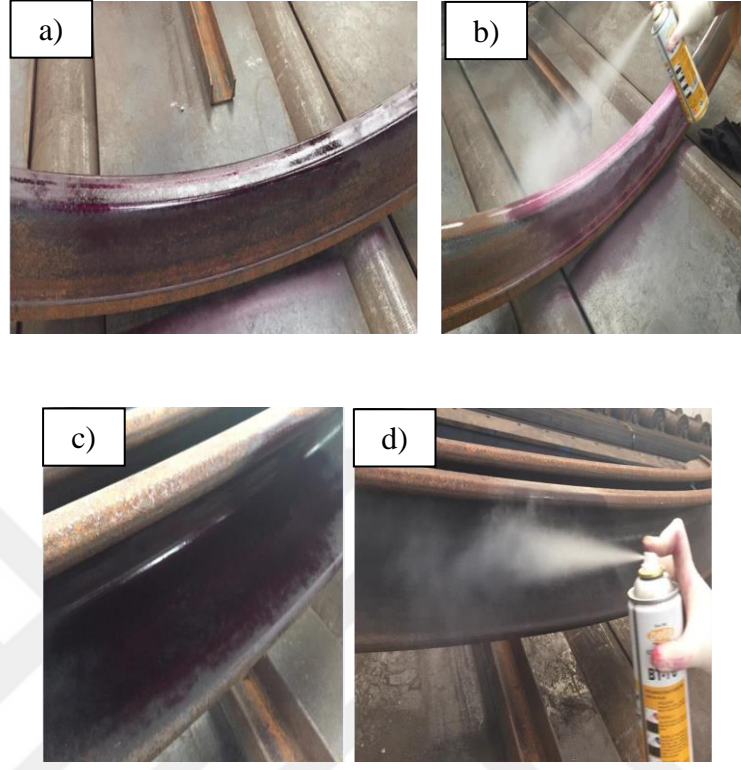
### **3.2.3 Prototip Soğuk Deformasyon Prosesi Sonrası Maden Profilleri Bükme Yüzeylerinin İncelenmesi**

Bükülmüş profil yüzeylerindeki kılcal çatlaklar, maden ve tünel inşa sektöründeki tahkimatları oluşturmada olan tahkimatların servis ömrünün belirlenmesindeki en büyük etkidir. Bu sebeple kılcal çatlakların varlığının tespiti ile düşük kaliteli ürünlerin piyasaya sürülmesinin engellenmesi, tahribatsız muayene yöntemleri sayesinde gerçekleştirilebilir.

Sıvı penetrant testi uygulaması için işlem prosedürlerinin dikkatli bir şekilde takip edilmesi gerekmektedir. Yüzey hazırlık aşaması ilk basamak olup, ön temizlik işlemleri bu aşamada yer alır. Temizlik işleminden sonra penetrant sıvı, yüzeye uygulanır ve yüzeye açık olan süreksizliklerin penetrasyonu için beklenilir. Malzeme üzerinde biriken fazla penetrantın giderilmesinden sonra kullanılan penetrant tipine uygun sırayla kurutma veya geliştirici prosesi uygulanır. Geliştirici süreksizlik içerisindeki penetrantı dışarı çıkararak görünürlüğünü artırır. Penetranta tabi olan parçanın yüzeyi incelendikten sonra penetrant ve geliştiriciye ait kalıntıları gidermek için son temizlik yapılmaktadır.

Referans alınan galeri ölçülerine göre bükme prosesi gerçekleştirilmiş profillerin yüzeyinde oluşan süreksizlikler, yapısal bozukluklar ve yüzeyin durumu vb. kaliteyi etkileyen unsurların tespit edilmesi amacı ile gözle muayene yapılmış

sonrasında gözle görülemeyecek kılcal çatlakların tespiti için penetrant sıvı muayenesi yapılmıştır.

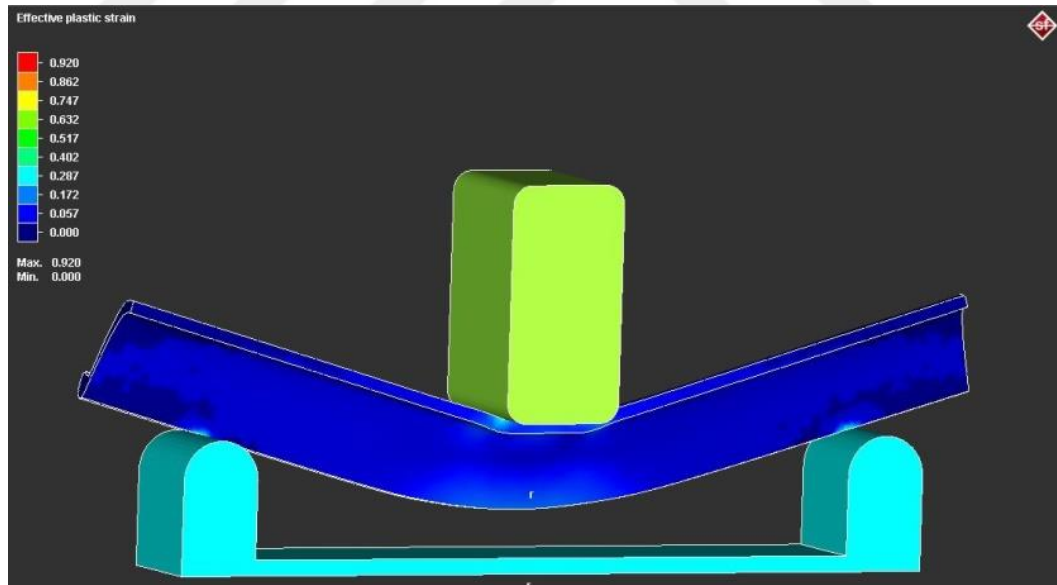


**Şekil 3.30.** Bükülmüş TH34 profillerin; a,b) Dış yüzeyinin tahribatsız muayene aşaması örneği, c,d) İç yüzeyinin tahribatsız muayene aşaması örneği

## 4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Üç Nokta Eğme Testi Simülasyon Faaliyetleri Sonuçları

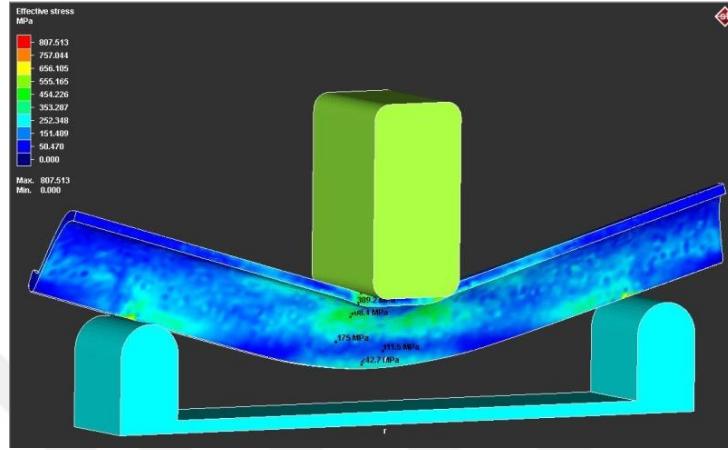
Bükme işlemlerinde malzeme cinsi, bükme yarıçapı, kalıp geometrisi ve deformasyon hızı gibi parametrelerin değişiminden etkilenecek değişim gösteren malzemelerin geri esneme davranışının belirlenmesinde en sık kullanılan yöntem olan üç nokta eğme testi ile malzemelerin deformasyon hızına, kalıp geometrisine ve deformasyon miktarına göre geri esneme oranları kolaylıkla elde edilebilmektedir. Sonlu elemanlar metodu destekli dört toplu profil bükme simülasyonları öncesinde S480W malzemeli TH34 profilin geri esneme miktarı Tablo 3.3’ de gösterilmiş olan simülasyon parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen üç nokta eğme testi simülasyonu ile belirlenmiştir. Şekil 4.1’ de görüldüğü üzere kurgulanan simülasyon neticesinde 120 mm’ lik deplasman oluşumu süresince anlık olarak profil yüzeyinde en çok 0,92 oranında plastik gerinim meydana gelmiş olup, strokun tamamlanıp üst kalıbın yukarı konuma gelmesi ile malzeme yüzeyinde meydana gelen maksimum plastik gerinim miktarının 0,28 seviyelerinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.1. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonunda elde edilen gerinim dağılımı

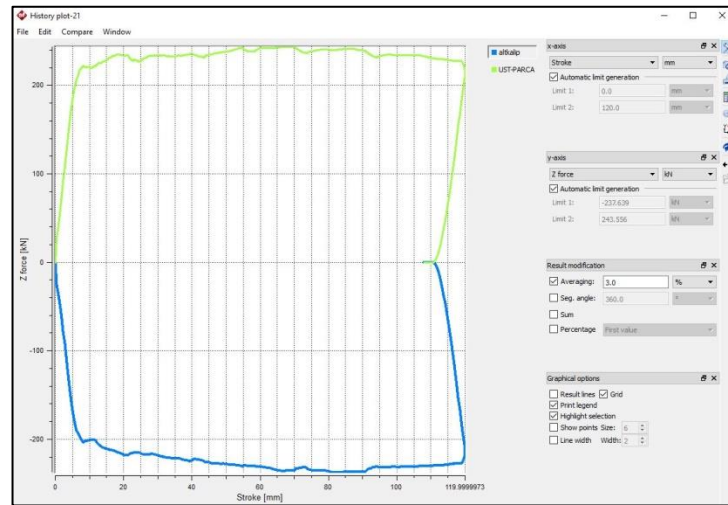
Şekil 4.2’ de görüldüğü üzere kurgulanan simülasyon neticesinde 120 mm’ lik deplasman oluşumu süresince anlık olarak profil yüzeyinde en çok 807,5 MPa gerilme meydana gelmiş olup, strokun tamamlanıp üst kalıbın yukarı konuma

gelmesi ile malzemenin üst kalıp ile temas yüzeyi olan taban bölgesinde meydana gelen maksimum gerilmenin 389 MPa seviyelerinde bası gerilmesinin gerçekleştiği, alt kalıba yakın olan ayak bölgesinde ise maksimum çeki gerilmesinin 242 MPa olduğu görülmektedir.



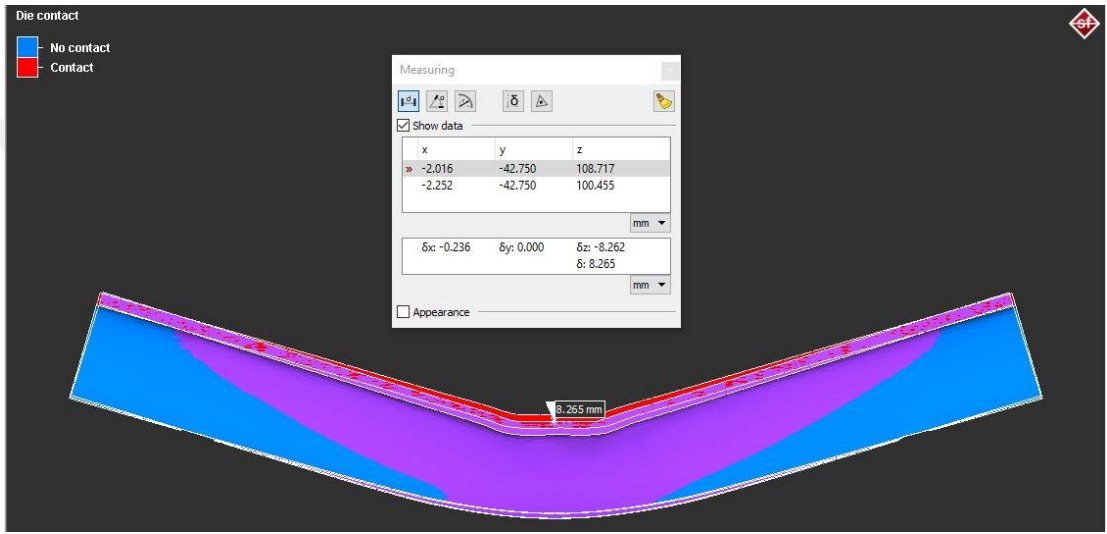
Şekil 4.2. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonunda elde edilen gerilme dağılımı

Şekil 4.3’ deki strok-z eksenli kuvveti grafiğinden de görüldüğü üzere üç nokta eğme testi simülasyonu süresince alt kalıba z eksenli doğrultusunda 474 kN, üst kalıba z eksenli doğrultusunda 487 kN kuvvet etki etmektedir. Simülasyon çalışmaları süresince iş parçası olan TH34 profilin simetrik yarısı analizlerde kullanıldığından grafik verilerinin iki katının alınması ile bu sonuca ulaşılmaktadır.



Şekil 4.3. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonunda kalıplara etkiyen kuvvetler

Şekil 4.4’ de ise üst kalıbın 120 mm stroğu tamamladığı anda iş parçası TH34 profilin bükülmüş fakat üst kalıbın henüz geri stroğa başlamadığı andaki kesit görüntüsünün, üst kalıbın 12 mm geri stroğa gelmesi anında iş parçasının geri esnemesinin oluşturduğu kesit geometrisi üst üste bindirilerek geri esneme miktarının tayin edilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.4’ deki simülasyon ekran görüntüsünden de görüleceği üzere profil taban bölgesine 120 mm deplasman uygulanmasının ardından üst kalıbın geri çekilmesi ile birlikte profilde 8,26 mm geri esnemenin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.4. TH34 profilin üç nokta eğme simülasyonu sonunda geri esneme davranışı

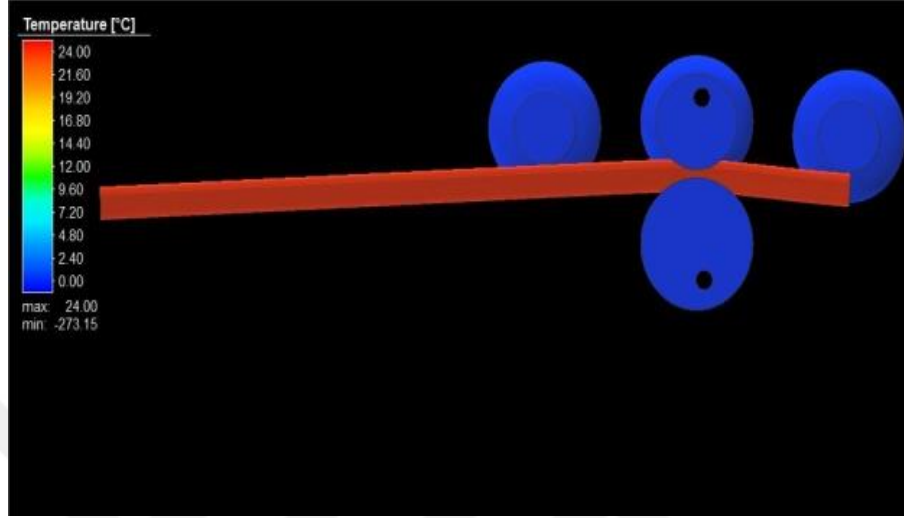
## 4.2 Dört Toplu Bükme Prosesi Simülasyon Faaliyetleri Sonuçları

Maden ve tünel inşa sektöründe yeraltı açıklıklarının tahkiminde kullanılan TH34 profiller için yapılan bükme simülasyon faaliyetleri sırasında TH34 profillerde meydana gelen eşdeğer gerilmeler, gerinim değerleri, sıcaklık dağılımları ile bükme vals toplarına etkileyen kuvvetler ve tork gereksinimleri elde edilmiştir. S480W hammaddeye sahip TH34 profilin dört toplu bükme makinesi kullanılarak gerçekleştirilen proses simülasyonları süresince iş parçasında meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 24°C sıcaklıkta bükme prosesine giriş yapan iş parçasının proses boyunca sıcaklığının değişmediği görülmektedir.

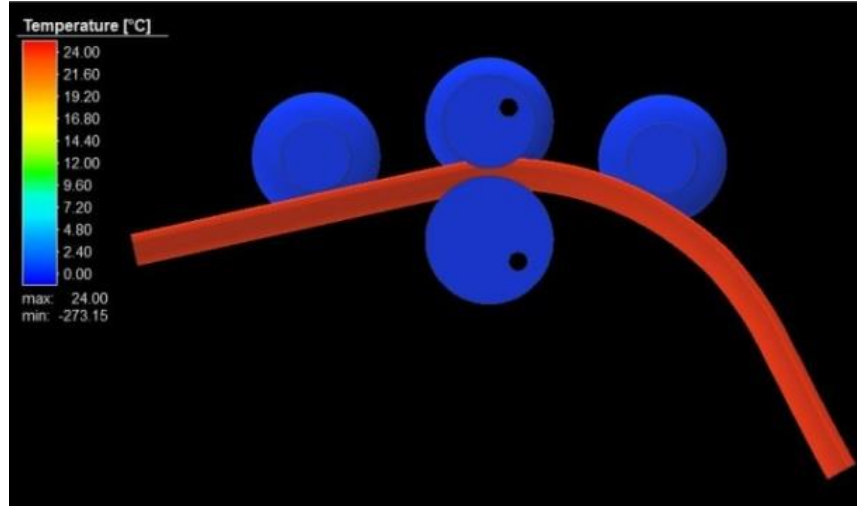
Bükme prosesi boyunca iş parçası yüzeyinde meydana gelen artık gerilmelerin en düşük düzeyde gerçekleşmesi amacı ile optimize edilen proseste



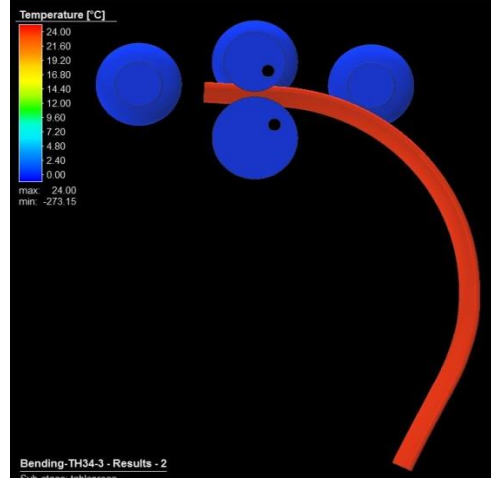
eksenler doğrultusunda iş parçasına etkiyen yükün ve sürtünme kuvveti etkilerinin minimum seviyede olduğu dolayısıyla proses esnasında iş parçası yüzey sıcaklıklarında herhangi bir değişimin gözlemlenmediği Şekil 4.5 – Şekil 4.7 ' de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Proses başlangıcında bükme proses simülasyonu iş parçası sıcaklık dağılımları



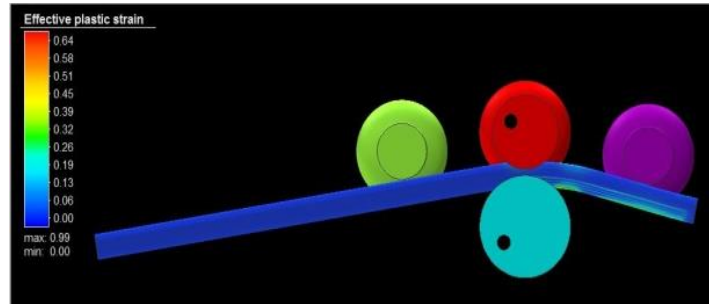
Şekil 4.6. Ark oluşum aşamasında bükme proses simülasyonu iş parçası sıcaklık dağılımları



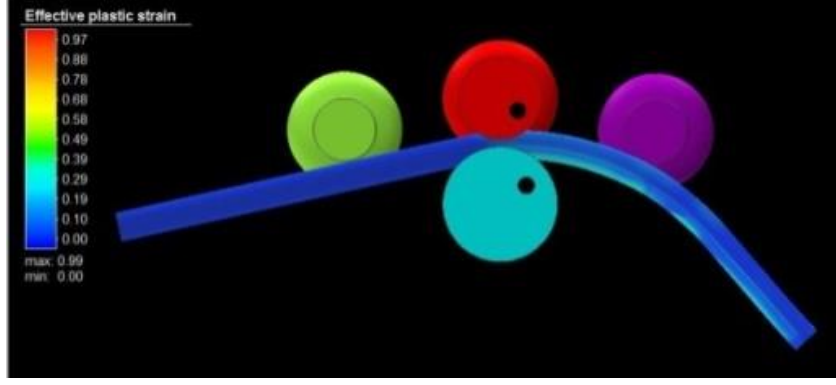
**Şekil 4.7.** Proses sonunda bükme proses simülasyonu iş parçası sıcaklık dağılımları

S480W hammaddeye sahip TH34 profilin dört toplu bükme makinesi kullanılarak gerçekleştirilen proses simülasyonları süresince iş parçasında meydana gelen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, 24°C sıcaklıkta bükme prosesine giriş yapan iş parçasının proses boyunca sıcaklığının değişmediği görülmektedir.

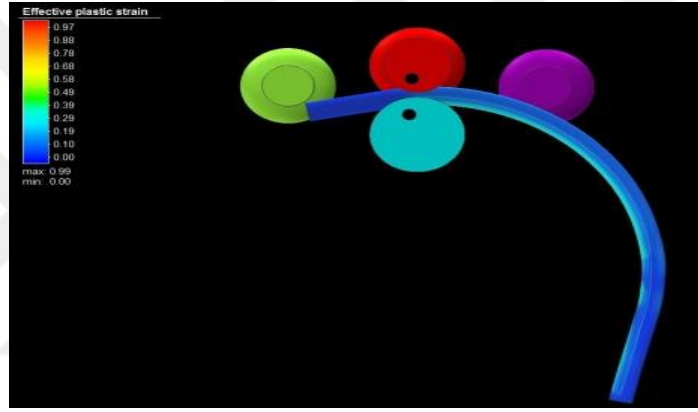
Bükme prosesi boyunca iş parçası yüzeyinde meydana gelen artık gerilmelerin en düşük düzeyde gerçekleşmesi amacı ile optimize edilen prostele eksenler doğrultusunda iş parçasına etkiyen yükün ve sürtünme kuvveti etkilerinin minimum seviyede olduğu dolayısıyla proses esnasında iş parçası yüzey sıcaklıklarında herhangi bir değişimin gözlemlenmediği Şekil 4.5 – Şekil 4.7’ de gösterilmektedir.



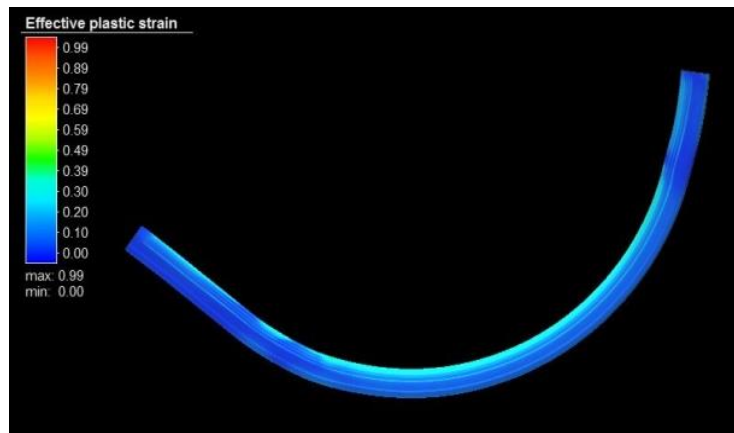
**Şekil 4.8.** TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu proses başlangıcındaki gerinim çıktıları



Şekil 4.9. TH34 profil dört toplu bükme prosesi galeri arkının oluşumundaki simülasyonu gerinim çıktıları



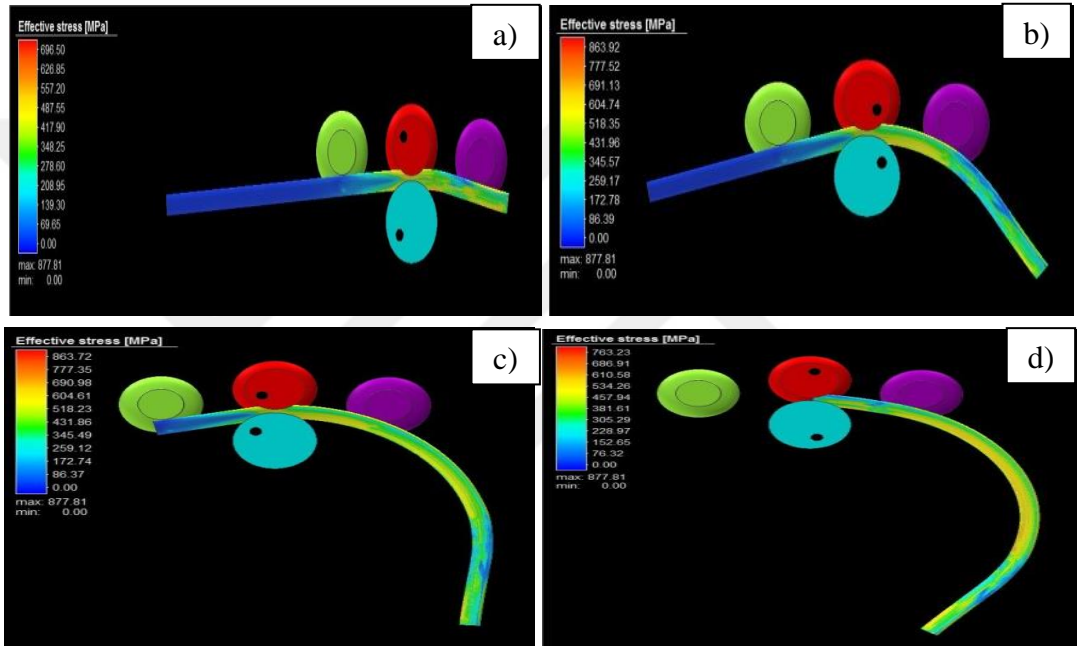
Şekil 4.10. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu radyüsün tamamlanmasındaki gerinim çıktıları



Şekil 4.11. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu sonu iş parçası gerinim çıktıları



değerleri dağılımı incelendiğinde, iş parçası dış yüzeyinde meydana gelen en yüksek gerinim değerinin 0,32 değeri ile bükme toplarının iş parçası ile temas ettiği ve profil taban yüzeyi olarak nitelendirilen yüzeylerde meydana geldiği görülmektedir. İş parçası dış yüzeyinde bükme prosesi sonrasında meydana gelen gerinimler incelendiğinde ise, bükme toplarının temas ettiği yüzeyler boyunca gerinim miktarının 0,7 seviyelerine ulaştığı, dolayısıyla iş parçası iç yüzeyinde meydana gelen gerinimlerin dış yüzeyinde meydana gelen gerinimlerden yüksek olduğu Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’ de gösterilmektedir.

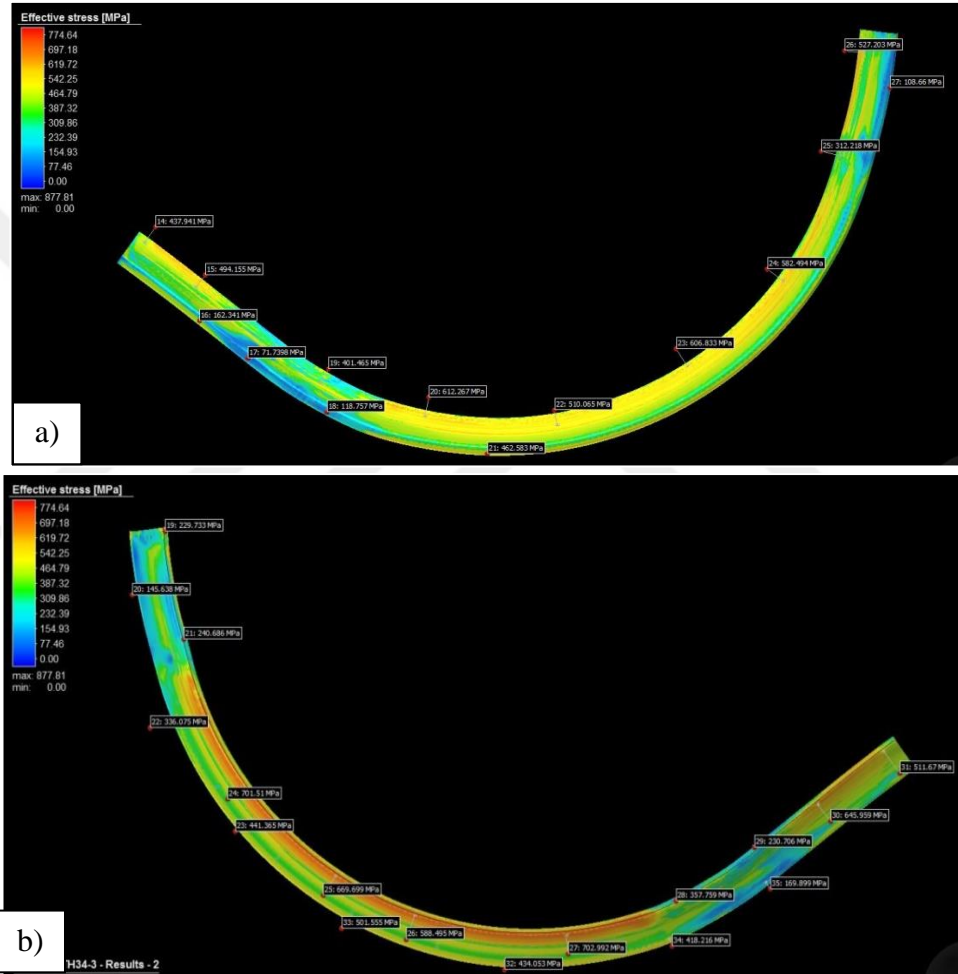


**Şekil 4.14.** TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu gerilme dağılımı verileri; a) Proses başlangıcı b) Galeri arkının oluşumu c) Radyüsün tamamlanması d) Bükme prosesi sonu iş parçası

TH34 profilin referans galeri kesiti doğrultusunda kurgulanan bükme prosesine ilişkin Şekil 4.14’ de gösterilen efektif gerilme verileri incelendiğinde, Şekil 4.14 a’ da gösterildiği üzere bükme prosesinin başlangıcında alt bükme topu ile sağ yan bükme topu arasında konumlanan iş parçasının bası kuvvetleri etkisi ile Şekil 3.18’ de gösterilen akış eğrileri doğrultusunda ihtiyaç duyulan plastik gerilmeye ulaştığı, dolayısıyla kalıcı şekillendirmenin uygulandığı belirlenmiştir. Profilin bükme toplarının dönme hareketi ile iş parçası bükme işini gerçekleştiren sağ yan topa doğru ilerletilmekte ve iş parçası dış yüzeyinde bükme prosesi esnasında

bölgesel olarak Şekil 4.14.'c de gösterildiği üzere 863 MPa seviyelerine kadar gerilmenin meydana geldiği görülmektedir.

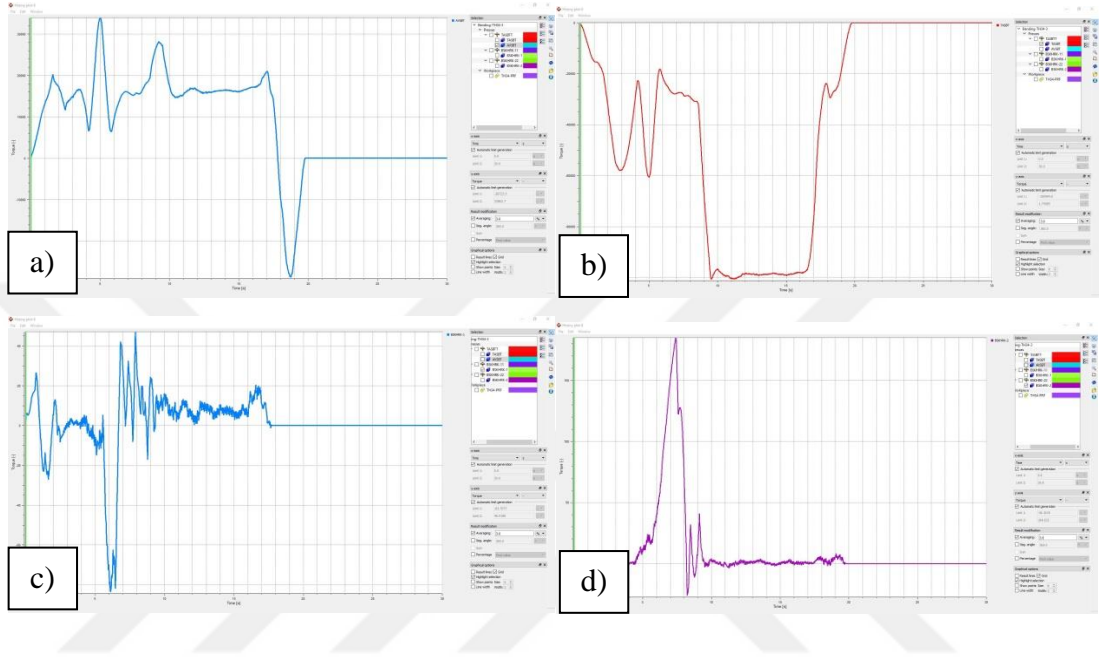
Bükme prosesinin tamamlanmasını takiben ise maksimum gerilme değerinin düşüş gösterdiği ve bükme topları ile iş parçası temas yüzeyi olan taban dış bölgesinde maksimum gerilmenin 612 MPa, minimum gerilme değerinin ise 437,9 MPa olduğu Şekil 4.15' de gösterilmektedir.



Şekil 4.15. TH34 profil dört toplu bükme prosesi simülasyonu sonu iş parçası iç ve dış yüzey gerilme dağılımı verileri a) Dış yüzey gerilme dağılımı b)İç yüzey gerilme dağılımı

İş parçası olan TH34 profilin iç yüzeylerinde meydana gelen gerilme dağılımları incelendiğinde ise, proses sonunda taban bölgesine yakın bölgelerde 700 MPa seviyelerine kadar gerilmelerin artış gösterdiği, taban bölgesinden ayak

bölgesine doğru ilerledikçe ise gerilme büyüklüklerinin 145 MPa seviyelerine kadar düşüş gösterdiği Şekil 4.15 b' de gösterildiği üzere belirlenmiştir. Profilin taban bölgesinde gerilmelerin yüksek olmasının başlıca nedeni ise geri esneme miktarının azaltılması kapsamında bükme işi yapılırken profile 0,5 mm taban ezme uygulaması ile deformasyon uygulanmasıdır.



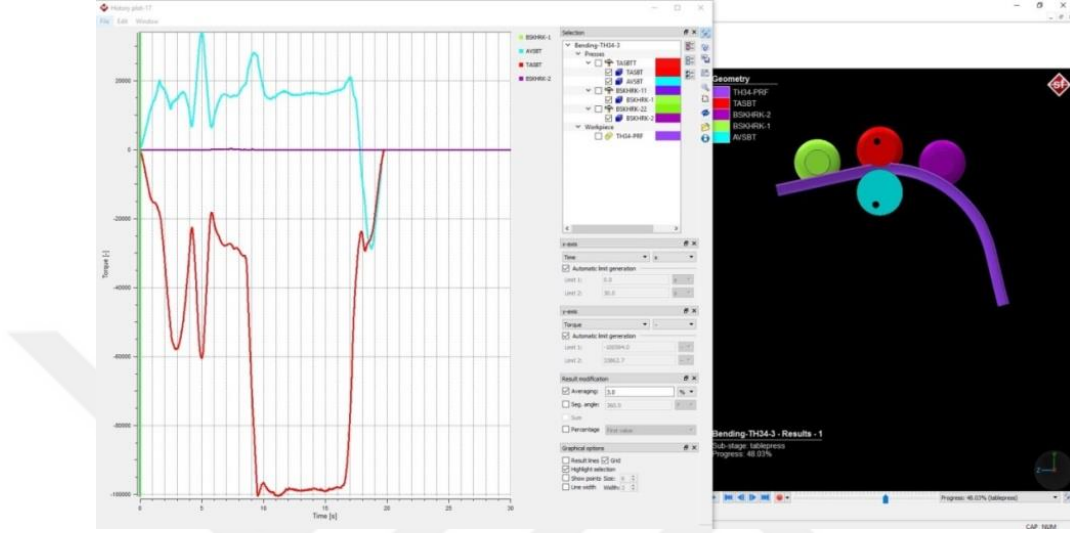
**Şekil 4.16.** Bükme toplarına ait tork ihtiyacı grafikleri a) Alt bükme topu b) Üst bükme topu c) Sol bükme topu d) Sağ bükme topu

Simülasyon faaliyetlerinin yan topların tahrikli olduğu ve yan topun birinin bükme işlemi sırasında malzemeye kuvvet ve baskı uyguladığı diğerinin ise üst ölü bölgede durması ile söz konusu malzemeye kuvvet uygulamadığı proseste, tahrik mekanizmalarının ihtiyacı olan döndürme momentleri; alt bükme topunun 67.725,4 Nm; üst bükme topunun 201.188,0 Nm; sağ bükme topunun 369,3 Nm; sol bükme topunun 167,4 Nm olup, yan bükme toplarının kontrollü bükme işlemlerini gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Simülasyon çalışmaları boyunca bükme toplarına ait tork gereksinimlerine ait tork-zaman grafikleri Şekil 4.16'da, bükme toplarının tahriklenmesine ilişkin maksimum tork gereksinim tablosu ise Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

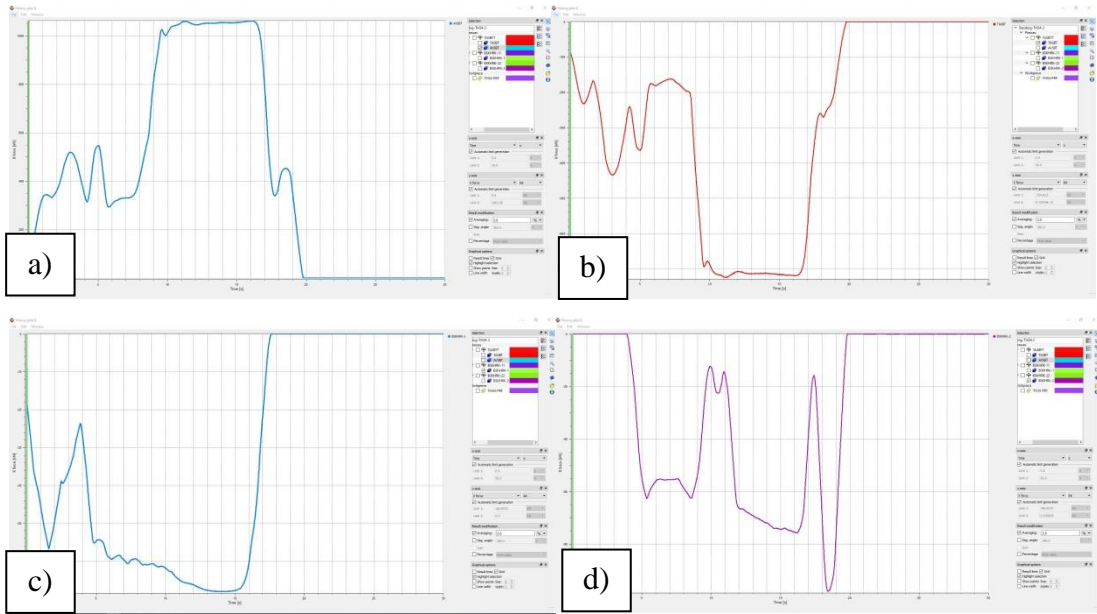


**Tablo 4.1.** Bükme toplarının tahriklenmesine ilişkin tork gereksinimi tablosu

	Alt Top	Üst Top	Sol Yan Top	Sağ Yan Top
Dönme Momenti (Nm)	67.725,4	201.188,0	167,4	369,3



**Şekil 4.17.** Bükme toplarına ilişkin tork gereksinim diyagramı



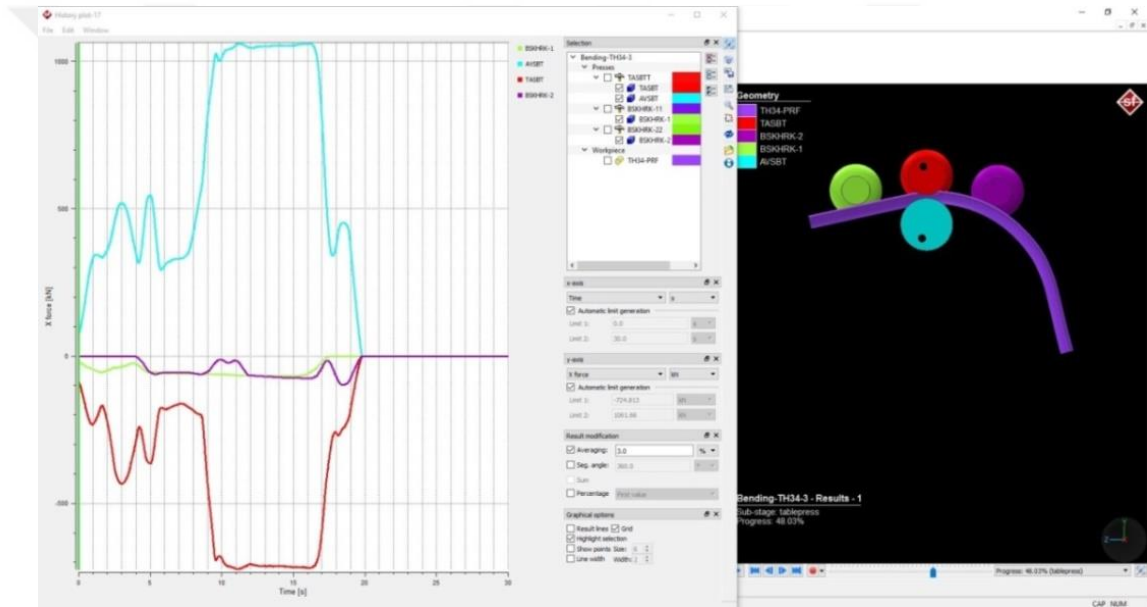
**Şekil 4.18.** Bükme toplarına etki eden X-ekseni kuvvet dağılım grafikleri a) Alt bükme topu b) Üst bükme topu c) Sol bükme topu d) Sağ bükme topu



X-ekseni boyunca üst bükme topuna maksimum 1.449,6 kN, alt bükme topuna 2.123,3 kN, sağ yan bükme topuna 196,1 kN, sol yan bükme topuna 136,2 kN kuvvet etki ettiği belirlenmiştir. Simülasyon destekli soğuk deformasyon faaliyetleri neticesinde bükme toplarına X-ekseninde etki eden maksimum kuvvetlere ilişkin simülasyon çıktıları Tablo 4.2' de verilmektedir.

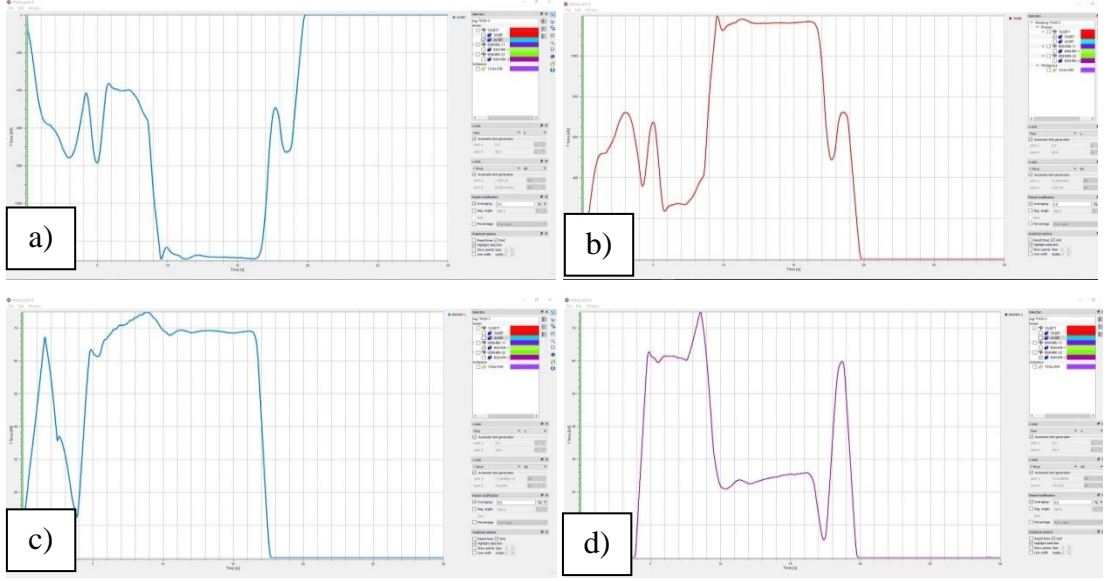
**Tablo 4.2.** X-eksenine ait kuvvet simülasyon çıktıları

	Alt Top	Üst Top	Sol Yan Top	Sağ Yan Top
Etkiyen Kuvvet (kN)	2.123,3	1.449,6	136,2	196,1



**Şekil 4.19.** Bükme toplarına etki eden X-ekseni genel kuvvet dağılım grafikleri

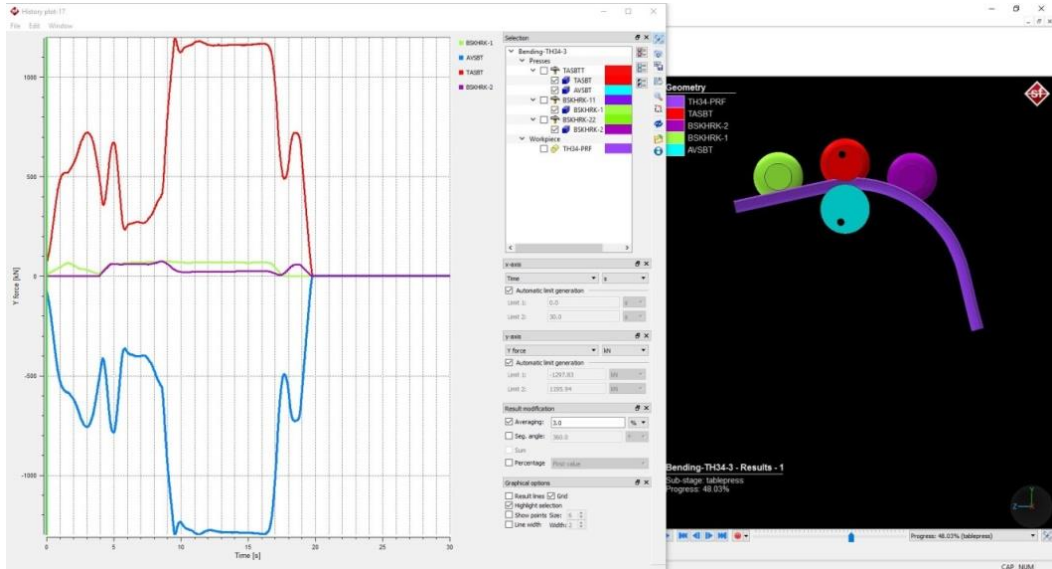
Simülasyon faaliyetleri sonucunda; Y-ekseni boyunca üst bükme topuna maksimum 2.391,9 kN; alt bükme topuna 2.595,7 kN; sağ yan bükme topuna 149,7 kN; sol yan bükme topuna 149,6 kN kuvvet etki ettiği belirlenmiştir. Simülasyon faaliyetleri boyunca Y-ekseni doğrultusunda bükme toplarına etki eden kuvvetlerin zaman ile değişimine ait grafikler Şekil 4.20' de, bükme toplarına etki eden maksimum Y-ekseni kuvvetleri verileri ise Tablo 4.3' de gösterilmektedir.



**Şekil 4.20.** Bükme toplarına etki eden Y-ekseni kuvvet dağılım grafikleri a) Alt bükme topu b) Üst bükme topu c) Sol bükme topu d) Sağ bükme topu

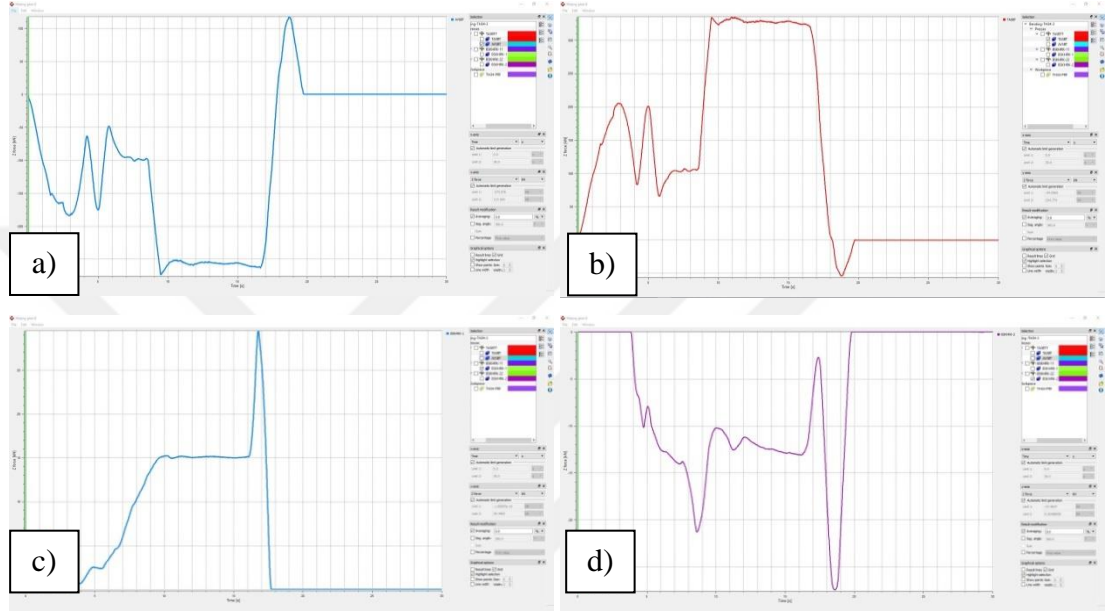
**Tablo 4.3.** Bükme toplarına Y-ekseninde etkiyen kuvvet verileri

	Alt Top	Üst Top	Sol Yan Top	Sağ Yan Top
Etkiyen Kuvvet (kN)	2.595,7	2.391,9	149,6	149,7



**Şekil 4.21.** Bükme toplarına etki eden Y-ekseni genel kuvvet dağılım grafikleri

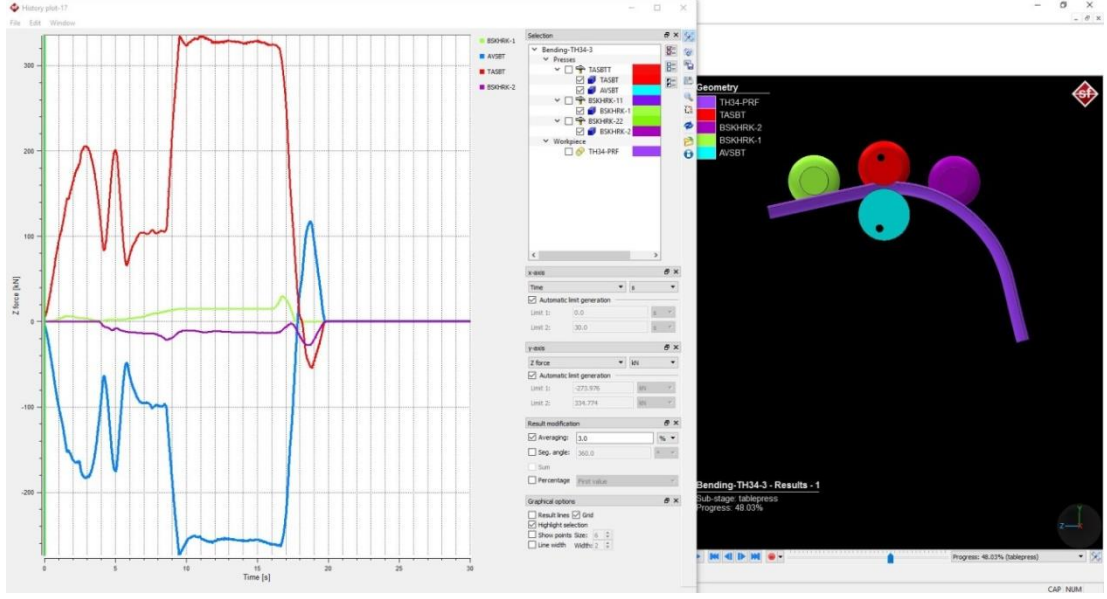
Simülasyon faaliyetleri sonucunda; Z-ekseni boyunca üst bükme topuna maksimum 669,6 kN; alt bükme topuna 547,9 kN; sağ yan bükme topuna 54,9 kN; sol yan bükme topuna 58,9 kN kuvvet etkidiği belirlenmiştir. Simülasyon faaliyetleri boyunca Z-ekseni doğrultusunda bükme toplarına etki eden kuvvetlerin zamanla değişimine ait grafikler Şekil 4.21’ de, bükme toplarına etki eden maksimum Z-ekseni kuvvetleri verileri ise Tablo 4.4’ de gösterilmektedir.



**Şekil 4.22.** Bükme toplarına etki eden Z-ekseni kuvvet dağılım grafikleri a) Alt bükme topu b) Üst bükme topu c) Sol bükme topu d) Sağ bükme topu

**Tablo 4.4.** Bükme toplarına Z-ekseninde etkiyen kuvvet verileri

	Alt Top	Üst Top	Sol Yan Top	Sağ Yan Top
Etkiyen Kuvvet (kN)	547,9	669,6	58,9	54,9



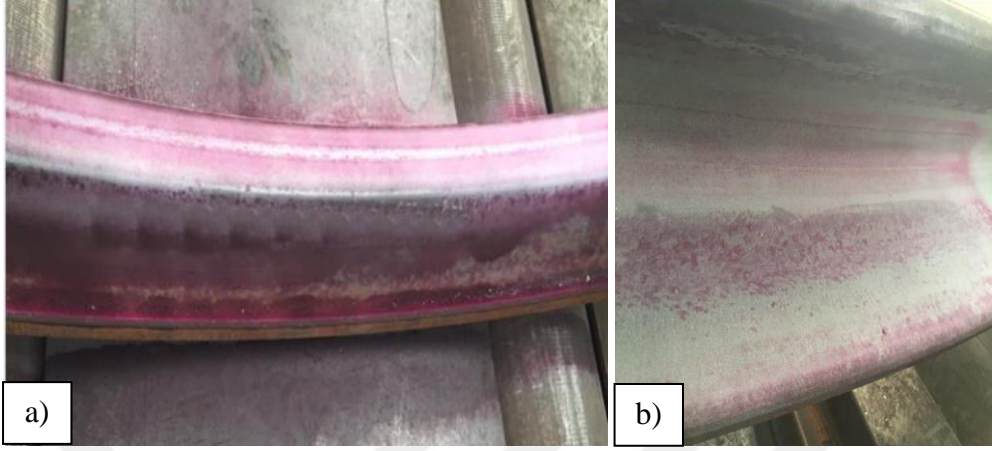
Şekil 4.23. Bükme prosesi Z-ekseni kuvvetlerinin zamana bağlı değişim grafiği

### 4.3 Tahribatsız Muayene Sonuçları

Madencilik ve tünel inşa sektöründe oluşturulan yeraltı açıklıklarının desteklenerek öngörülen servis ömrü boyunca açıklığın güvenilir bir şekilde hizmetine devam etmesi için kullanılan destek üniteleri olan tahkimat sistemlerinin en önemli elemanları olan tahkimat kemerleri, haddeleme prosesi neticesinde uzun ürün halinde elde edilmiş ve tez çalışması kapsamında referans alınan galeri ark ölçüleri doğrultusunda boy kesim işlemlerinin tamamlanmasının ardından sonlu elemanlar metodu temelli simülasyon çalışmaları sonucunda optimize edilen deformasyon parametreleri kullanılarak soğuk olarak bükülmüş profil kemerleri halini almıştır.

Haddeleme yöntemi ile elde edilmiş olan iş parçasının, bükme prosesi gereği haddeleme yönüne paralel düzlemde bükülmesinin yüksek çatlak oluşum riski içermesi nedeniyle sayısal simülasyonlar kullanılmasının sağladığı avantaj ile deformasyon kontrollü olarak sağlanmıştır. Tasarlanan deformasyon sürecinin çatlak oluşumuna neden olmadığının doğrulanması amacı ile sıvı penetrant testi iş parçası iç ve dış yüzeyleri ile taban ve ayak bölgelerine uygulanmıştır. Şekil 4.24’ de gösterilmekte olan iş parçası yüzeylerinde herhangi bir çatlama ile karşılaşılmamış olup, bükülmüş ve tahkimat kemeri halini almış TH34 profilin kurgulanan

deformasyon süreci ile yeraltı açıklıklarının tahkimat işlemlerinde güvenli bir şekilde kullanılabilceği belirlenmiştir.



**Şekil 4.24.** Bükülmüş TH34 profillerin; (a) Dış yüzeyinin tahribatsız muayene sonundaki yüzey görüntüsü ve (b) İç yüzeyinin tahribatsız muayene sonundaki yüzey görüntüsü

## 5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Madencilik ve tünel inşa sektörlerinde yapay olarak oluşturulan yeraltı açıklıklarının öngörülen servis ömrü boyunca işlevini güvenilir bir şekilde yerine getirmesinden birinci derecede sorumlu olan TH tahkimat sistemi kemerlerinin, öncelikli olarak haddeleme yolu imal edilerek malzeme yapısının haddeleme doğrultusunda deforme olmasının ardından galeri arkı oluşturmak üzere haddeleme doğrultusuna paralel olarak bükülmesi amacı ile gerçekleştirilen soğuk deformasyon sürecinin yüksek çatlak oluşturma riski içermesi, deformasyon miktarının kontrollü bir şekilde uygulanmamasının ise hem çatlak oluşum riskini hem de kalıntı gerilmelerin büyüklüğünü artırarak tahkimat kemerlerinin çalışma ortamındaki mekanik mukavemetini doğrudan etkileyecektir.

Birçok endüstriye yarı-mamul girdisi sağlayan sac-metal sanayisinde ise yarı-mamul mekanik mukavemetine etki eden uygunsuzlukların dışında deformasyon süreçlerinde geri-esneme olayının göz ardı edilmesinin yarı-mamullerin montaj süreçlerini doğrudan etkileyerek yeniden işleme maliyetlerini artırdığı bilinmektedir. TH tahkimat sistemi elemanları olan TH kemerlerin de soğuk deformasyon süreçlerinde benzer şekilde malzeme-deformasyon miktarı-geri esneme davranışının irdelenerek bükme süreçlerinde gözardı edilmesi; kg/m ağırlıklarının sac-metal yarı-mamullere kıyasla çok büyük olan TH kemerlerin nihai kullanıcının tahkimat montaj işlemleri esnasında üretim duruşlarına sebep olarak yeniden işleme maliyetlerinin yanı sıra kurulum işçilik maliyetlerini de büyük ölçüde artıracaktır.

Sonlu elemanlar metodu temelli soğuk deformasyon simülasyonları süreçlerine ait özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok sektöre yönelik uygulamalarının literatürde mevcut olmasına karşın TH tahkimat elemanlarının soğuk şekillendirme işlemlerine ilişkin literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Yüksek güvenlik katsayılı tasarımlarla çalışmalarını yürüten madencilik ve tünel inşa sektöründe kullanılan tahkimat elemanlarına yönelik yukarıda belirtilen risklerin elimine edilmesi kapsamında, bükme prosesleri gibi ikincil üretim proseslerine ilişkin sonlu elemanlar metodu temelli deformasyon süreçlerinin

tasarlanarak sayısal model-gerçek üretim entegrasyonlu şekilde yürütülen bu tez çalışması genel hatları ile değerlendirildiğinde tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan simülasyon faaliyetleri sonuçları incelendiğinde, meydana gelen eşdeğer gerilmeler malzemelerin akma dayanımlarından yüksek olduğu ve plastik şekil verme işlemlerinin malzeme akış gerilmelerinin maksimum değerlerinden düşük seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Böylece, malzemeye plastik bölge sınırları içerisinde gerilme uygulandığında, elde edilen sonuçlara göre malzemelerde hasarın oluşmayacağı görülmektedir.

TH34 profilin referans alınan galeri kesiti doğrultusunda soğuk deformasyon proseslerini içeren sonlu elemanlar simülasyonlarının tork ve bükme toplarına etkiyen kuvvetleri incelendiğinde, istenilen ark ölçüsünde bükme işlemini gerçekleştirmek için gerekli tork gereksiniminin makine bükme kapasitesine göre yeterli olduğu ve bükme simülasyonları boyunca bükme toplarına etki eden kuvvetlerin bükme toplarının mukavemet değerlerinden düşük olduğu dolayısı ile tasarlanan prosesin mevcut bükme makinesi kullanılarak başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

S480W malzemeli TH34 kesitli profilin deformasyon karakteristiğine uygun şekilde geri-esneme miktarının simülasyon destekli olarak belirlenerek tasarlanan kontrollü deformasyon süreçlerinin gerçek üretimler sonunda elde edilen kemerlerin master ölçümleri ile karşılaştırılması sonucunda, bükülmüş profillerin referans alınan galeri ark ölçüleri tolerans limitleri içerisinde radyüs ölçülerine sahip olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla üç nokta eğme testi simülasyonu neticesinde elde edilen geri esneme miktarı ile 0,5 mm taban ezme uygulaması kapsamında kurgulanan proseslere ait simülasyon ve gerçek üretimlerinin ölçüsel bazda birbiri ile örtüştüğü belirlenmiştir. Geri esnemenin telafisi amacı ile uygulanan taban ezme işleminde malzemede oluşturulan bası gerilmelerinin artışı ile geri esneme miktarının düşürülebileceği sonucuna varılmaktadır.

TH34 profillerinin dört toplu bükme proseslerinde bükme topunun sağladığı deformasyon yükünün iş parçasının ilerletilmesi durumunda iç gerilmelerin elastik anlamda yeniden dağılım gösterdiği ve meydana gelen geri esnemeyi karakterize ettiği sonucuna varılmaktadır. Tahkimat profillerinde meydana gelen geri esnemeler,

yükün boşaltılması sürecinde iç gerilmelerin rahatlamasından kaynaklandığı için, gerilme değerinin hesaplamasında geçerli olan tüm parametrelerden etkilenmektedir. Bu nedenle, iş parçası malzeme özellikleri ve kalıp geometrisi ile deformasyon hızı ve büyüklüğü gibi işlem değişkenlerinin geri esneme karakteristiği üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır.

Simülasyon destekli soğuk deformasyon süreçlerinde TH34 profilin bükme topları arasında kalan taban bölgelerinde bükme esnasında üst top ve sağ yan topun sağladığı basma kuvvetleri etkisi ile bası gerilmelerinin, ayak bölgelerinde ise çeki gerilmelerinin meydana geldiği belirlenmiştir. TH34 profillerinin 4 toplu profil bükme proseslerinde meydana gelen bası gerilmelerinin büyüklüğünün, çeki gerilmelerinin büyüklüğünden düşük seviyelerde meydana geldiği, profil iç yüzeylerinde meydana gelen gerilmelerin ise dış yüzeylerinde meydana gelen gerilme değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür.

Haddeleme yönüne paralel yönde gerçekleştirilen bükme işlemlerinde çatlak oluşumu ile sıkça karşılaşılmakta, madencilik ve tünel inşaa sektöründe kullanılan tahkimat profillerinin bükme proseslerinin ise doğası gereği haddeleme yönüne paralel yapılması gerektiği bilinmektedir. Tahkimat profillerinin soğuk deformasyon süreçlerine ilişkin gerçekleştirilen simülasyon faaliyetleri neticesinde elde edilen proses parametrelerinin prototip bükme işlemlerinde kullanılarak gerçekleştirilmesi ile deformasyon miktarının mümkün olduğunca düşük seviyelerde ve kontrollü olarak uygulanması sağlanarak çatlak oluşumunun engellenebildiği prototip bükme prosesi sonunda gerçekleştirilen NDT testleri ile belirlenmiştir. Dolayısıyla hadde yönüne paralel yönde gerçekleştirilecek olan bükme proseslerinde plastik deformasyon miktarının mümkün olduğunca düşük seviyelerde gerçekleştirilerek çatlak oluşum riskinin engellenebileceği sonucuna varılmıştır.

Yapılan görsel muayene sonucunda, gözle görülecek boyutta hataların olmadığı tespit edilmiştir. Galeri ölçülerine ve açıklıklarına göre bükülmüş olan profillerin büküm bölgelerinin içi ve dış yüzeylerinde gözle görülemeyecek boyuttaki hataların, süreksizliklerin ve yapısal bozuklukların tespit edilmesi amacıyla yapılan sıvı penetrant sonucunda her iki yüzeyde de herhangi bir hata ile karşılaşılmamıştır.



Bu sebeple, ürün kalitesini etkileyen bir sebep olmadığından en verimli bükme prosesinin gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Tez çalışmaları süresince gerçekleştirilen Sonlu Elemanlar Metodu destekli simülatif faaliyetler neticesinde, soğuk şekillendirilmiş bir elemanın imalat işlemine bağlı olarak elemanda oluşan artık gerilmelerin eşdeğer plastik gerinim miktarları ile ilgili olduğu belirlenmiştir.

Soğuk deformasyon süreçleri sonunda iş parçasında meydana gelen artık gerilme miktarının bükme yarıçapı, deformasyon miktarı ve iş parçası malzemesinin malzeme özelliklerine bağlı olduğu belirlenmiştir. Soğuk deformasyon süreçlerinin proses parametrelerinin belirlenmesi aşamasında yapılacak olan optimizasyon çalışmalarının elde edilecek olan ürünün yük taşıma kapasitesine doğrudan etki edeceği tez çalışması kapsamında elde edilen önemli bulgular arasında yer almaktadır.

Soğuk deformasyon süreçlerinin malzemedeki meydana gelen gerilme ve şekil değiştirme miktarlarının büyüklüğü ile orantılı olarak o malzemenin mekanik mukavemetinin artırılıp azaltılabileceği, malzemenin mekanik mukavemet özelliklerinin geliştirilebilmesinin ise malzeme özellikleri ve üretim süreci parametrelerinin etkisi altında olduğu belirlenmiştir.

Simülasyon destekli soğuk deformasyon süreçlerinin prototip gerçek üretimlerle örtüşmesi neticesinde; temelinde test ve simülasyon çıktılarının yer aldığı ve bükme işlemleri için simülasyon çıktılarına göre yeni bir süreç tasarımı yapılmıştır. Bu yeni soğuk deformasyon süreçlerinde bükme işlemleri otomasyon sistemi ile yapılmakta olup, ürün bazında gerçekleştirilmekte olan bükme simülasyonlarına göre elde edilen optimum parametreler bükme makinesine ayar parametreleri olarak aktarılmakta ve otomasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan özgün süreç sayesinde, esnek üretim mantığına dayalı olarak bükme prosesi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Proses optimizasyon çalışmaları neticesinde ise işlem koşullarına bağlı malzeme fireleri ve üretim maliyetlerinin azaltılması sağlanmış ve ürün başına düşen katma değer miktarı artırılarak aşırı deformasyon uygulamasının neden olabileceği çatlak oluşum

riski kaynağında yok edilerek madencilik sektöründe yoğun bir şekilde kullanılan tahkimat elemanlarının ülkemiz madenciliğine arz edilmesi sağlanmıştır.

Maden ve tünel profillerinin sıcak haddeleme teknikleri ile üretimi esnasında uygulanan deformasyon miktarı ve soğuma süreçlerinin modellenerek simülasyon destekli profil üretiminin sağlanması, üretim kaynaklı olarak malzeme içeriğinde meydana gelen artık gerilme miktarının belirlenmesi ve soğuk deformasyon süreçlerinin iş parçası olan TH34 profildeki gerilme geçmişi ile birlikte bükme proseslerine tabi tutulması ile gerçeğe daha yakın sonuçların ortaya konması konusunda önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Maden ve tünel profillerinin dört toplu bükme makinesi vasıtasıyla gerçekleştirilen bükme proseslerini içeren bu tez çalışması kapsamındaki simülasyon destekli bükme prosesleri neticesinde elde edilen artık gerilme miktarı çıktılarının doğrulanması amacı ile tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemlerini de içeren çalışmalar yapılması literatürde maden ve tünel profillerinin soğuk deformasyon süreçleri neticesinde malzemedeki artık gerilmelerin sayısal ve deneysel olarak belirlenmesi konusundaki literatür eksikliğini kapatılması konusunda önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Yang, M., Shima, S. Simulation of pyramid type three-roll bending process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1988, 30(12), 877-886.
2. Penekli, U. Finite Element Analysis Of Bending Operation Of Aluminum Profiles, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2008,1-9 s. (Yüksek Lisans Tezi)
3. Özdemir, A. Sac Metal Ürünlerde Geri Esneme Miktarının Deneysel ve Sonlu Elemanlarla Tespiti, Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 2010, 5-17 s. (Yüksek Lisans Tezi)
4. Feng, Z., Champiaud, H. Modeling and simulation of asymmetrical three-roll bending process. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2011, 19, 1913-1917.
5. He, Y., Heng, L., Zhiyong, Z., Mei, Z., Jing, L., Guangjun, L. Advances and trends on tube bending forming technologies. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2012, 25, 1-12.
6. Hudovernik, M., Staupendahl, D., Gharbi, M., Hermes, M., Tekkaya, A.E., Kuzman, K., Slabe, J.M. 3D Numerical analysis of 2d profile bending with the torque superposed spatial bending method. *Journal of Mechanical Engineering*. 2013, 59, 139-147.
7. Vatter, P.H., Plettke, R. Process model for the design of bent 3-dimensional free-form geometries for the three-roll-push-bending process. *Procedia CIRP*. 2013, 7, 240-245.
8. Sitar, M., Kosel F., Brojan, M. Numerical and experimental analysis of elastic-plastic pure bending and springback of beams of asymmetric cross-sections. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015, 90, 77-88.
9. Ghiotti, A., Simonetto, E., Bruschi, S., Bariani ,P.F. Springback measurement in three roll push bending process of hollow structural sections. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2017, 66(1), 289-292.
10. Simonetto, E., Ghiotti, A., Bruschi, S. Dynamic detection of tubes wrinkling in three roll push bending. *Procedia Engineering*. 2017, 207, 2316–2321.
11. Yeşil, H. Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerde Haddeme Yön ve Miktarının İşlenebilirlik Üzerine Etkileri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 2003, 34-42 s. (Doktora Tezi)
12. Wusatowski, Z. *Fundamentals of Rolling*. Pergamon Press, US, 1969, 440-500 s.
13. Lenard, J. G., Pietrzyk, M. and Cser L. *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products*. Elsevier Science, Amsterdam, Hollanda, 1999, 250-300 s.
14. URL: Metalurji ve Malzeme Platformu, <http://www.metalurjik.net/genel/soguk-haddeleme-islemi.html> (Erişim Tarihi:18.09.2018).
15. Aydoğan, İ.K. Haddeme Prosesinde Malzeme Karakteristiğindeki Değişimlerin İncelenmesi Ve Modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007, 12-14 s. (Yüksek Lisans Tezi)
16. İkiz, B. Sıcak Haddemede Tempcore Prosesi. Mustafa Kemal Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 2009, 4-8 s. (Yüksek Lisans Tezi)
17. Kayalı, E. S., Ensari, C. *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*. Bilim Teknik Yayınları, İstanbul, Türkiye, 1986, 260-293 s.

18. Cerit, A.A. Plastik Şekil Verme Yöntemleri. Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojisi Ders Notu.
19. Akyalçın, B. Çeliklerin Haddelenmesinde Malzeme Modelleme. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2008, 5-20 s.(Yüksek Lisans Tezi)
20. Çapan, L. Metallere Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 1999, 207-240 s.
21. Deren, H., Erdoğan, U., Piroğlu, F. Çelik Yapılar. Çağlayan Kitabevi, İstanbul Türkiye, 2003, 200-530 s.
22. Çamlıbel, N. Çelik Yapıların Tasarım İlkeleri. İstanbul Kültür Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi. İstanbul, 2001.
23. Akdumanlar, E. Türkiye’de Çelik Yapı Tasarım ve Yapım Sorunları. Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 1986, 4-18 s.(Yüksek Lisans Tezi)
24. Karaduman, M. Çelik Yapılar. Nobel Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, 2002, 20-130 s.
25. Kayalı, E. S., Ensari, C. Metallere Plastik Şekil Verme İlke Ve Uygulamaları. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1991, 20-45 s.
26. Yavuz, M. Boru Bükme Kalıp Tasarımı ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 2011, 9-12 s. (Yüksek Lisans Tezi)
27. Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2008, 23, 231-238.
28. Karataş, E., İpek, U., Altınok, M., 2010. Boru Bükme Kalıbı Tasarımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bursa, 2010. (Makine Tasarım Projesi)
29. Uzun, İ., Erişkin, Y. Sac Metal Kalıpcılığı. MEB, Ankara, 1997, 253-286 s.
30. Erişkin, Y. Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu, Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi, Ankara, 1986, 73-126 s.
31. Tiryakioğlu, M.F. AA 2024 ve AL 5754 Sac Metal Malzemelerde Bükme Esnasında Oluşan Geri Esneme Miktarının Deneysel Verilerle Matematiksel Olarak Modellenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 2013, 11-22 s. (Yüksek Lisans Tezi)
32. Spoorenberg, R.C., Snijder, H.H., Hoenderkamp, J.C.D. Finite element simulations of residual stresses in roller bent wide flange sections. Journal of Constructional Steel Research. 2011, 67, 39-50.
33. Spoorenberg, R.C., Snijder, H.H., Hoenderkamp, J.C.D. Experimental investigation of residual stresses in roller bent wide flange steel sections. Journal of Constructional Steel Research. 2010, 66, 737-747.
34. Hudovernik, M., Staupendahl, D., Gharbi, M., Hermes, M., Tekkaya, E., Kuzman, K., Slabe, J.M. 3D numerical analysis of 2D profile bending with the torque superposed spatial bending method. Journal of Mechanical Engineering. 2013, 59, 139-147.
35. Chatti, S., Hermes, M., Tekkaya, A.E., Klenier, M. The New TSS bending process: 3D bending of profiles with arbitrary cross-sections. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2010, 59, 315–318.
36. Feng, Z., Champlaud, H. Modeling and simulation of asymmetrical three-roll bending process. Simulation Modelling Practice Theory. 2011, 19, 1913-1917.

37. Hua, M., Baines, K., Cole, I.M. Continuous four-roll plate bending: a production process for the manufacture of single seamed tubes of large and medium diameters. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1999, 39, 905-935.
38. Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies. *Materials and Design*. 2008, 29, 1043-1050.
39. Altan, T., Ngaile, G., Palaniswamy, H. Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, 146, 28-34.
40. Sitar, M., Kosel, F., Brojan, M. Numerical and experimental analysis of elastic–plastic pure bending and spring back of beams of asymmetric cross-sections. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015, 90, 77–88.
41. Zhang, D., Cui, Z., Chen, Z., Ruan, X. An analytical model for predicting sheet springback after V-bending. *Journal of Zhejiang University Science A*. 2007, 8(2), 237-244.
42. Bhupatiraju, M., K., Shivpuri, R., Altan, T. An Investigation of Bend Angle and Springback Control in Straight Line Bending. Engineering Research Center for et Shape Manufacturing. The Ohio State University, Columbus, 1994, C/SM-S-94-13.
43. Mkaddem, A., Saidane, D. Experimental approach and rsm procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, 189, 325-333.
44. Axinte, C., Chirita, B., Cristea, I., Schnakovszky, C. Optimization procedure for the springback reduction in sheet metal forming. *Metalurgia International*. 2008, 3(11), 27-34.
45. Tekiner, Z. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004,145, 109-117.
46. Gau, J. T. A Study Of The Influence Of The Bauschinger Effect On Springback In Two-Dimensional Sheet Metal Forming. The Ohio State University, Columbus, OHIO, 1999, 42-52 s. (Doktora Tezi)
47. Schuler GmbH, “Metal Forming Handbook”, Springer, Berlin, Almanya, 1998, 38-48 s.
48. Gan, W., Wagoner, R.H. Die design method for sheet springback. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2004, 46, 1097-1113.
49. Carden, W.D., Geng, L.M., Matlock, D.K., Wagoner, R.H. Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002, 44, 79-101.
50. Doğan, İ. Tabanyolu Tahkimatı Olarak Geçme (TH) Bağ Uygulamaları Ve Performans Değerlendirmeleri. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 2012, 3-58 s. (Yüksek Lisans Tezi)
51. Spooenberg, R.C., Snijder, H.H., Hoenderkamp, J.C.D. Finite element simulations of residual stresses in roller bent wide flange sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011, 67, 39–50.
52. Hermes, M., Chatti, S., Weinrich, A., Tekkaya, A.E. Three-dimensional bending of profiles with stress superposition. *International Journal of Material Forming*. 2008, 1, 133 –136.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aytaç BAŞSÜLLÜ  
Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1977  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : a.bassullu@kocaerhadde.com

### Eğitim Durumu

Lise : Selma Yiğitalp Lisesi, 1994  
Lisans : Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2000  
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

### Mesleki Deneyim

GAMA-Orben Makina	2000-2001
Faisal Electro-Mechanical Company	2001-2006
Micha Galvaniz A.Ş.	2007-2012
KOCAER Haddecilik San. Tic. A.Ş.	2012-...

### Yayınları

Başsüllü, A., Durmuş, H. Maden ve Tünelcilik Sektöründe Kullanılan Sıcak Haddelenmiş TH34 Profilin Bükme Prosesine İlişkin Simülasyon Destekli Tasarımı, Prototip Üretimi ve Tahribatsız Muayene Yöntemi ile Analizleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi, 2018, ‘‘Basım Aşamasındadır’’

Akkaş, M., Kilerci, İ., Başsüllü, A., Kocaer, B., Akıncı, O. Loading Machine Prototype Design For Increasing Carbon Release Reduction, Productivity and Working Environment Safety. 1.th International Univesity Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress, 18-19 Dec, 2017, Manisa.

Kilerci, İ., Kocaer, B., Başsüllü, A., Akkaş, M., Sevgi, E. New Section Profiles Which Will Be Used in Steel Construction Bridge Manufacturing. 1.th International

Univesity Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress, 18-19 Dec, 2017, Manisa.

Başsüllü, A., Kocaer, B., Akkaş, M., İpek, O., Öneş, B. Simulation Aided Analysis of Determining of Load-Carrying Capacity of Yielding Steel Arch Support. 1.th International Univesity Industry Cooperation, R&D and Innovation Congress, 18-19 Dec, 2017, Manisa.

Şahan N., Başsüllü A., Sevgi E., Kilerci İ., Kocaer B., “Sıcak Haddeme ile Üretilen Çelik Profillerin Soğuma Davranışlarının Simülasyon Programı Yardımıyla Analiz Edilmesi”, Uluslararası Mesleki Bilimler Sempozyumu 2017, pp. 72-78, Antalya.

