

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



BİMETALİK U PROFİL ÜRETİMİ İÇİN MAKARALI BÜKME HATTI TASARIMI VE İMALATI

Doktora Tezi

Burhan SARIOĞLU

Danışman

Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1002 Hızlı Destek kapsamında 222M462 proje numarası ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.21.003 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Burhan SARIOĞLU tarafından, **Prof. Dr. Kemal YILDIZLI** danışmanlığında hazırlanan "**BİMETALİK U PROFİL ÜRETİMİ İÇİN MAKARALI BÜKME HATTI TASARIMI VE İMALATI**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 29.5.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Ali DURMUŞ Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Bahattin KANBER Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Kemal YILDIZLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Özgür DEMİRCAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

29 /05/ 2023
Burhan SARIOĞLU

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: BİMETALİK U PROFİL ÜRETİMİ İÇİN MAKARALI BÜKME
HATTI TASARIMI VE İMALATI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 24/04/2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 3

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

29 / 05 / 2023
Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

ÖZET

BİMETALİK U PROFİL ÜRETİMİ İÇİN MAKARALI BÜKME HATTI TASARIMI VE İMALATI

Burhan SARIOĞLU
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doktora, Mayıs/2023
Danışman: Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Çift katmanlı saclar, farklı özelliklerdeki iki metalin yapıştırıcı ile yapıştırma, basınç kaynağı, soğuk ve sıcak haddeleme, patlatma kaynağı ve rulo yapıştırma (roll bonding) gibi çeşitli yöntemlerle üretilmesidir. Çift katmanlı saclar tek bir metal ile sağlanamayacak özellikleri sağlayabilmek için kullanılmaktadır. Üretilen çift katmanlı saclar ile yüksek mekanik özellikler, korozyon direnci, hafiflik, yüksek aşınma direnci, elektriksel iletkenlik, termal kararlılık ve şok emicilik gibi farklı özellikler elde edilir. Makaralı bükme (roll forming) işlemi ardı ardına konumlandırılmış şekillendirme istasyonlarının içerisinde sac malzemenin geçerken bükülerek istenilen profil kesitinin elde edilmesi yöntemidir. Makaralı bükme, farklı kesitlerdeki profil parçaların kolay bir şekilde imalatını sağlayan gelişmiş bir üretim sistemidir. Bu çalışmada, Al 1050 (H14) alüminyum alaşımı ve 304 kalite paslanmaz çelik levhaları yüzeylerin kimyasal ve mekanik temizliğinden sonra üst üste istiflenerek ısıtıcı fırında 430°'de, 60 dk tavlanıp üç çevrimde rulo yapıştırma yöntemiyle birbirine bağlanmıştır. Üretilmiş olan çift katmanlı levhalar, çalışma için özel olarak imal edilmiş olan makaralı bükme hattıyla şekillendirilerek 500 mm boyunda U profil imal edilmiştir. Sonrasında, makine ayar parametreleri değiştirilerek U profil şekillendirilmesi sırasında meydana gelen boyuna eğilme ve kenar yüzeyde dalgalanma kusurlarının büküm açısı artışı, istasyonlar arası mesafe ve hat hızı parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, 500 mm boyunda U profil için, istasyon sayısının 8'den 4'e düşürülmesi ile boyuna eğilmenin deneysel çalışmada 8,1 mm, simülasyon çalışmasında ise 7,6 mm olduğu görülmüştür. 4 istasyonlu modelde kenar dalgalanmanın ise hem deneysel çalışmada hem de simülasyon çalışmasında bariz şekilde orta çıktığı görülmüştür. 500 mm boyunda U profil için, istasyonlar arası mesafenin 156 mm'ye düşürülmesi ile boyuna eğilmenin deneysel çalışmada 0,7 mm, simülasyon çalışmasında ise 0,9 mm olduğu görülmüştür. 250 mm ve 400 mm istasyonlar arası mesafede yapılan testlerde herhangi bir kalite farkı görülmemiştir. Profil kesitine göre, belirli bir limit mesafenin altında bu kusurlar ortaya çıkarken, belirli bir limitin üzerinde mesafe atırılsa dahi herhangi bir değişikliğin olmadığı gözlenmiştir. 500 mm boyunda U profil için, hat hızının 51,5 mm/s'den 193 mm/s'ye çıkarılarak üretilen profil kesitlerinde herhangi bir fark olmadığı gözlenmiştir. Sonuç olarak makaralı bükme yöntemiyle, çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhasına şekil verilmesinde büküm açısı artışının, istasyonlar arası mesafe değişimi ve hat hızı değişimine göre daha önemli bir kriter olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Çift katmanlı saclar, Rulo yapıştırma, Makaralı bükme

ABSTRACT

DESIGN AND MANUFACTURE OF ROLL FORMING LINE FOR BIMETALLIC U PROFILE PRODUCTION

Burhan SARIOĞLU
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering
Ph.D., May/2023
Supervisor: Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Bimetallic sheets are the production of two metals with different properties by various methods such as adhesive bonding, pressure welding, cold and hot rolling, blast welding and roll bonding. Bimetallic sheets are used to provide features that cannot be achieved with a single metal. With the produced double layer bimetallic sheets, different properties such as high mechanical properties, corrosion resistance, lightness, high wear resistance, electrical conductivity, thermal characteristic and shock absorbency are obtained. The roll forming process is the method of obtaining the desired profile by bending the sheet material while passing through the forming stations positioned respectively. Roll forming is an advanced production system that enables easy manufacturing of profile parts of different cross-sections. In this study, Al 1050 (H14) aluminum alloy and 304 quality stainless steel plates were stacked on top of each other after chemical and mechanical cleaning of the surfaces, annealed in the heater oven at 430° for 60 minutes and bonded to each other by roll bonding method in three cycles. The double-layered sheets produced were shaped with a roll forming line specially manufactured for the study and a 500 mm long U profile was produced. Afterwards, by changing the machine setting parameters, how the longitudinal bowing and edge waviness defects that occur during the U profile shaping change depending on the bending angle increase, the distance between stations and the line speed parameters were investigated experimentally and numerically. The results show that for a 500 mm long U profile, by reducing the number of stations from 8 to 4, the longitudinal bowing is 8.1 mm in the experimental study and 7.6 mm in the simulation study. In the 4-station model, the edge waviness was observed to be prominent both in the experimental study and in the simulation study. For a 500 mm long U profile, it was observed that the longitudinal bowing was 0.7 mm in the experimental study and 0.9 mm in the simulation study by reducing the distance between stations to 156 mm. No quality difference was observed in the tests performed at the distance between 250 mm and 400 mm stations. According to the profile section, while these defects appear below a certain limit distance, it has been observed that there is no change even if the distance is increased above a certain limit. It has been observed that there is no difference in the profile sections produced by increasing the line speed from 51.5 mm/s to 193 mm/s for the 500 mm long U profile. As a result, it has been seen that the increase in bending angle increment is a more important criterion than the change in the distance between stations and the change in line speed in shaping the double-layered Al 1050-304 stainless steel plate with the roll forming method.

Keywords: Bimetallic sheets, Roll bonding, Roll forming

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca yardımlarını ve tecrübelerini benimle paylaşan ve bana her türlü desteği veren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kemal YILDIZLI'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmamın başından itibaren değerli fikirleri ve yönlendirmeleri ile bana yardımcı olan Makine Mühendisliği Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Naci KURGAN ve Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Özgür DEMİRCAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca desteklerini benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan değerli eşim Emine SARIOĞLU'na ve beni bugünlere getiren ve her zaman yanımda olan değerli anneme ve babama teşekkür ederim.

Tez çalışmalarına verdikleri teknik desteklerinden dolayı Data M Sheet Metal Solutions GmbH ve Netform Mühendislik Makine Metal firmalarına teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 1002 kapsamında 222M462 proje numarasıyla desteklenmiştir.

Bu tez çalışması, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Ofisi tarafından desteklenmiştir. (Proje Numarası: PYO. MUH. 1904.21.003)

Burhan SARIOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Konusu	1
1.2. Tezin Amacı	2
1.3. Tezin Bölümleri	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Rulo yapıştırma ile ilgili yapılan çalışmalar	5
2.2. Makaralı bükme yöntemiyle ilgili yapılan çalışmalar	10
2.2.1. Geleneksel makaralı bükme yöntemiyle yapılan deneysel çalışmalar	10
2.2.2. Makaralı bükme ile yapılan sayısal çalışmalar	16
2.2.3. Esnek makaralı bükme (FRF) ile yapılan çalışmalar	22
2.2.4. Makaralı bükme yönteminde akıllı imalat teknolojisi destekli yapılan çalışmalar	24
3. RULO YAPIŞTIRMA (ROLL BONDING)	28
4. MAKARALI BÜKME (ROLL FORMING)	31
4.1. Rulo sac açma makinesi	35
4.2. Doğrultucu ve sürücü	35
4.3. Kaynak ünitesi	37
4.4. Pres ünitesi	37
4.5. Makaralı bükme ünitesi	38
4.5.1. Makaralı bükme istasyonu bileşenleri	39
4.6. Doğrultma düzeltme istasyonu	39
4.7. Uçar makas	40
4.8. Makaralı bükme imalatında ortaya çıkan kusurlar	41
4.8.1. Boyuna eğilme (longitudinal bowing)	42
4.8.2. Yanal eğilme (camber)	44
4.8.3. Burulma (twisting)	44
4.8.4. Açılma-kapanma (flare)	45
4.8.5. Geri yaylanma (spring back)	46
4.8.6. Kenar dalgalanması (edge waviness)	47
4.8.7. Delik ovalitesi bozukluğu (ovality)	47
4.9. Makaralı bükme prosesinde yapılan matematiksel hesaplamalar	48
4.9.1. Sac açılım hesaplamaları	49
4.9.2. Birim şekil değişimi hesaplamaları	50
4.9.3. Deformasyon uzunluğu hesabı	51
4.9.4. Form istasyonu sayısı hesabı	53
5. MATERYAL VE YÖNTEM	56
5.1. Malzeme	59
5.1.1. Al 1050 (H14) (EN AW 1050) alüminyum alaşımı levha	60
5.1.2. AISI 304 (EN 1.4301) kalite paslanmaz çelik levha	61
5.2. Yöntem	62
5.2.1. Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi	62
5.2.2. Sac levhaların yüzey hazırlık işlemlerinin yapılması	66

5.2.3. Sac malzemelerin birleştirilip çift katmanlı sac elde edilmesi (Rulo yapıştırma)	68
5.2.4. Rulo yapıştırma makinesi tasarımı ve imalatı.....	68
5.2.5. Sac levhaların birleştirilmesi	71
5.2.6. Birleştirilen çift katmanlı levhalara mikro sertlik, çekme ve soyulma testlerinin uygulanması.....	72
5.2.6.1. Mikro sertlik.....	72
5.2.6.2. Çift katmanlı levhalara çekme ve soyulma testleri uygulanması.....	74
5.2.6.3. Birleştirilen çift katmanlı levhaların iç yapı muayeneleri (SEM)	76
5.2.7. Sac açılım ölçüsünün belirlenmesi	77
5.2.8. U profil çiçek açılımının yapılması	78
5.2.9. Ön analiz çalışmasının yapılması	80
5.2.10. İstasyon form makaralarının tasarımı	82
5.2.11. Sonlu elemanlar analizi için algoritma seçimi	83
5.2.12. Sonlu elemanlar analizi için model geliştirilmesi.....	84
5.2.13. Sonlu elemanlar analizi için eleman seçimi.....	85
5.2.14. Sonlu elemanlar analizi için kontak seçimi	86
5.2.15. Sonlu elemanlar analizi için sac levha sınır koşulları	87
5.2.16. Sonlu elemanlar için form makaraları sınır koşulları	87
5.2.17. Pekleşme modeli seçimi	88
5.2.18. Akma kriteri seçimi	90
5.2.19. Makaralı bükme makinesinin tasarlanması ve imalatının yapılması.	91
5.2.20. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhasından deneysel testlerin yapılması	95
5.2.20.1. Büküm açısı artışı deneyleri.....	96
5.2.20.2. İstasyonlar arası mesafe değişimi deneyleri.....	97
5.2.20.3. Farklı hat hızları deneyleri	99
5.2.21. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhasından simülasyon testlerinin yapılması	99
5.2.21.1. Büküm açısı artışı simülasyon deneyleri	101
5.2.21.2. İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon deneyleri	102
5.2.21.3. Farklı hat hızları simülasyon deneyleri.....	103
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	104
6.1. Sac levhaların ısıtılma işlem öncesi ve sonrası çekme test sonuçları.....	104
6.1.1. Isıl işlem öncesi çekme deneyi test sonuçları	104
6.1.2. Isıl işlem sonrası çekme deneyi test sonuçları	107
6.2. Sac levhaların ısıtılma işlem öncesi ve sonrası sertlik testi sonuçları.....	109
6.3. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalarının çekme testi sonuçları.....	109
6.4. Çift katmanlı levhaların soyulma testi sonuçları.....	112
6.5. Çift katmanlı levhaların iç yapı muayene (SEM) sonuçları.....	113
6.6. Çift katmanlı levhaların standart makine ayar parametreleri ile yapılan deneysel sonuçları.....	114
6.7. Çift katmanlı levhanın standart makine ayar parametreleri ile yapılan simülasyon sonuçları.....	115
6.7.1. Deneysel, simülasyon ve tasarım kesitlerinin karşılaştırılması	115
6.7.2. Deformasyon uzunluğunun tespiti	117
6.7.3. Sac levhanın üst ve alt bölgesindeki meydana gelen birim şekil değişimi değerleri ve kalınlık değişimi	119
6.7.4. Makaralı bükme hattı boyunca sac malzemede oluşan boyuna birim şekil değiştirmeler.....	120
6.7.5. Makaralı bükme hattı boyunca meydana gelen hız değişimi.....	121
6.8. Büküm açısı artışı deneysel sonuçları	122
6.9. Büküm açısı artışı simülasyon sonuçları.....	124
6.10. İstasyonlar arası mesafe değişimi deneysel sonuçlar	130
6.11. İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon sonuçları.....	132

6.12. Hat hızı değişimi deneysel sonuçlar.....	138
6.13. Hat hızı değişimi simülasyon sonuçları	138
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	143
8. TEZİN ÇIKTILARI	147
KAYNAKLAR	148
EKLER	157
ÖZ GEÇMİŞ.....	160



SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

μm	: Mikron
r	: Yarıçap
t	: Sac levha kalınlığı
l_0	: İlk levha genişliği
l_1	: Düz kenar uzunluğu
l_2	: Düz kenar uzunluğu
l_b	: Büküm bölgesinin uzunluğu
l_{φ}	: Tarafsız eksenin çember uzunluğu
r_u	: Bükülme bölgesindeki tarafsız eksenin yarıçapı
r_i	: İç büküm yarıçapı
α	: Bükme açısı
σ	: Gerilme (stress)
σ_{max}	: Maksimum asal gerilme
σ_{min}	: Minimum asal gerilme
σ_{akma}	: Malzeme akma gerilmesi
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	: Asal gerilmeler
$\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$	: Kayma gerilmeleri
ε	: Birim şekil değişimi (strain)
L	: Sac levha uzunluğu
L_t	: Makaralı bükme tezgah uzunluğu
ΔL	: Sac levhada meydana gelen uzama
θ	: Bükme açısı
θ_1	: Bir önceki istasyonda meydana gelen bükülme açısı
θ_2	: Mevcut istasyondaki bükülme açısı
θ_p	: Belirli bir istasyonda ön görülen büküm açısı
d	: İstasyonlar arası mesafe
n	: İstasyon sayısı
z_1	: Bir önceki istasyonda deforme olmuş bölge
z_2	: Mevcut istasyona girerken meydana gelen deforme olmuş bölge
a	: Büküm kenarı yüksekliği
σ_y	: Akma gerilmesi
E	: Elastisite modülü

δ_e : Elastik deformasyon limit değeri
D : Bilya çapı
d : İz çapı



KISALTMALAR

AHSS	: Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik (Advanced High-Strength Steel)
UHSS	: Ultra yüksek mukavemetli çelik (Ultra High-Strength Steel)
HSS	: Yüksek mukavemetli çelik (High-Strength Steel)
DP	: Çift fazlı çelik (Dual Phase)
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
EN	: Avrupa standardı (European Norm)
AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
BS	: İngiliz standardı (British standards)
DIN	: Alman standartları (Deutsches Institut für Normung)
JIS	: Japon endüstri standartları (Japanese Industrial Standards)
NF	: Fransız standartları (Normes Françaises)
MMC	: Modifiye Mohr-Coulomb
SAE	: Otomobil Mühendisleri Derneği (Society of Automobile Engineers)
SPCC	: Japon üretim standardı JIS G 3141 tarafından tanımlanan ticari bir soğuk haddelenmiş çelik kalitesi
SPFC	: Japon üretim standardı JIS G 3141 tarafından tanımlanan ticari bir soğuk haddelenmiş yüksek mukavemetli çelik kalitesi
SPFH	: Japon üretim standardı JIS G 3141 tarafından tanımlanan ticari bir sıcak haddelenmiş yüksek mukavemetli çelik kalitesi
FRF	: Esnek makaralı bükme (Flexible Roll Forming)
CRF	: Makaralı bükme (Cold Roll Forming)
PVC	: Polivinil klorür
St	: Çelik (Steel)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Cu	: Bakır
Ag	: Gümüş
Zn	: Çinko
Ni	: Nikel
Mn	: Mangan
Ti	: Titanyum
TiAl ₃	: Titanyum aluminid
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit

FE	: Sonlu elemanlar (Finite Element)
FEA	: Sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis)
FEM	: Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method)
RB	: Rulo yapıştırma (Roll Bonding)
ARB	: Birikimli rulo yapıştırma (Accumulative Roll Bonding)
CARB	: Çapraz birikimli rulo yapıştırma (Cross Accumulative Roll Bonding)
CZM	: Yapışkan bölge modeli (Cohezive Zone Model)
YMK	: Yüzey merkezli kübik
HMK	: Hacim merkezli kübik
HCP	: Hekzagonal kafes
HV	: Vickers sertlik değeri
HB	: Brinel sertlik değeri
MPa	: Megapaskal
KİTAM	: Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi
SAMLAB	: Samsun Uluslararası Akredite Metal Metroloji ve Kalibrasyon Labaratuvarı
DTM	: Deformasyon Teknoloji Modülü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Deforme olmuş numune (a) tek istasyonlu, (b) iki istasyonlu	18
Şekil 3.1. Üç katlı kompozit yapının şematik gösterimi	28
Şekil 3.2. Rulo yapıştırma işleminin şematik gösterimi	29
Şekil 3.3. Rulo yapıştırma prosesi sırasında birleşim bölgesinde meydana gelen difüzyonun şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.4. Çift katmanlı levhalarda yan büküm kenarında oluşan (a) kırışma ve (b) ayrılma (delaminasyon) kusuru.	30
Şekil 4.1. Makaralı bükme proses şeması	31
Şekil 4.2. Makaralı bükme yöntemiyle üretilmiş profil kesitleri	32
Şekil 4.3. Makaralı bükme ürünlerinin kesit tipine göre sınıflandırılması.....	32
Şekil 4.4. Makaralı bükme tezgahı görseli ve sigma profil kesitinin operasyon kademeleri (çiçek açılımı).....	33
Şekil 4.5. Makaralı bükme tezgâhı şematik gösterimi	34
Şekil 4.6. Esnek makaralı bükme (FRF).....	34
Şekil 4.7. Rulo sac açma makinesi.....	35
Şekil 4.8. Rulo doğrultma ve sürme makinesi	36
Şekil 4.9. Makaralı bükme hattı makas kaynak ünitesi.....	37
Şekil 4.10. Roll forming hattı pres ünitesi	38
Şekil 4.11. Makaralı bükme ünitesi	38
Şekil 4.12. Makaralı bükme makinasında bulunan ana bileşenler	39
Şekil 4.13. Düzeltme doğrultma istasyonu	40
Şekil 4.14. Uçar makas ünitesi.....	40
Şekil 4.15. Makaralı bükme ile şekillendirme işleminde meydana gelen kusurlar.....	42
Şekil 4.16. Boyuna birim şekil değişimlerinin oluşturduğu boyuna eğilme kusuru	43
Şekil 4.17. Makaralı bükme hattından çıkan bir parçada oluşan boyuna eğilme kusuru	43
Şekil 4.18. Dört farklı büküm açısında meydana gelen boyuna eğilme kusuru.....	44
Şekil 4.19. Yanal eğilme kusuru	44
Şekil 4.20. Burulma kusuru	45
Şekil 4.21. Açılma-kapanma (flare) kusuru	46
Şekil 4.22. Deneyisel ve sayısal şapka kesitli (hat shape) profilde görülen geri yaylanma kusuru	47
Şekil 4.23. Kenar dalgalanma kusurunun deneyisel ve sayısal sonuçları	47
Şekil 4.24. Delikli profillerde meydana gelen ovalite bozuklukları	48
Şekil 4.25. L bükülmüş bir parçanın ilk sac genişliğinin hesaplanması	49
Şekil 4.26. İki istasyon arasında kalan sac levha birim şekil değişimi.	51
Şekil 4.27. İki istasyon arasında düz sac metalin deformasyonu	52

Şekil 4.28. (a) Sac levhanın iki istasyon arasında şekil alması (b) Şekil alan profilin enine kesiti	53
Şekil 4.29. Form açısı metodu	54
Şekil 5.1. Deneysel uygulamalarda yapılacak işlemlerin proses şeması.....	59
Şekil 5.2. Spectrolab marka M12 Hibrit model metal analiz cihazı	60
Şekil 5.3. Çekme testi gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	63
Şekil 5.4. Çekme testi numune kalıbı ve basılan numuneler	64
Şekil 5.5. Çekme test numuneleri hadde yönüne 0°, 45° ve 90°	64
Şekil 5.6. Çekme testi için hazırlanmış numuneler a) Al 1050 test numuneleri, b) 304 paslanmaz test numuneleri, b) Isıl işlem görmüş Al 1050 ve paslanmaz test numuneleri.....	65
Şekil 5.7. Çekme testlerinde kullanılan Instron 5982 çekme test cihazı ve çekme testi işlemi	66
Şekil 5.8. a) Ham yüzey b) polisajlanmış yüzey	66
Şekil 5.9. Numunelerin aseton yardımıyla kimyasal temizliğinin yapılması.....	67
Şekil 5.10. Sac levhaların paslanmaz tel fırça ile polisajlanması işlemi.....	67
Şekil 5.11. Rulo yapıştırma işleminin proses şeması.....	68
Şekil 5.12. Rulo yapıştırma makinesi tasarımı ve imalatı.....	69
Şekil 5.13. Rulo yapıştırma makinesi ısıtma düzeneği	69
Şekil 5.14. Rulo yapıştırma makinesi hadde silindirlerinin ısıtılması	70
Şekil 5.15. Isıtma düzeneğine termostat ve termokupların bağlanması.....	70
Şekil 5.16. Sıcaklık verilerinin Dali 08 programı ile alınması.....	71
Şekil 5.17. Rulo yapıştırma işlemiyle birleştirilmiş Al 1050-304 paslanmaz bimetalik levhası	71
Şekil 5.18. Isıl işlem sonrası oluşan yüzey tabakasının polisaj ile giderilmesi.....	72
Şekil 5.19. Brinel sertlik deneyi.....	73
Şekil 5.20. Brinell sertlik ölçüm cihazı ve sertlik ölçümü	74
Şekil.5.21. Çift katmanlı çekme test numunesinin hazırlanması	75
Şekil 5.22. ASTM D1876-08(2015) soyulma test numunesi ölçüleri ve soyulma testinin yapılması.....	76
Şekil 5.23. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	76
Şekil 5.24. Sabit yay uzunluğu (solda) ve sabit yarıçap (sağda) şekillendirme stratejilerinin gösterimi	77
Şekil 5.25. Üretilecek olan U profilin kesit ölçüleri	78
Şekil 5.26. Copra FR programında geri yaylanma hesabı	79
Şekil 5.27. U profil çiçek açılımı ve büküm açısı artışları.....	79
Şekil 5.28. U profil sac levha açılım ölçüsü hesabı	80
Şekil 5.29. Yapılan çiçek açılımına göre Copra RF programında her bir istasyonda akma dayanım limitinin kontrolü	81
Şekil 5.30. Makaralı bükme tezgâhı form makaraları 2D tasarımları	82

Şekil 5.31. Form makaraları ve sac levhanın 3D tasarımları	83
Şekil 5.32. Sonlu elemanlar analizi için seçilen eleman modeli	85
Şekil 5.33. Tek tabaka 304 paslanmaz çelik levha simülasyon çalışmaları için eleman ve düğüm noktası sayılarının belirlenmesi	86
Şekil 5.34. 304 kalite paslanmaz çelik U profil sonlu elemanlar analizi	87
Şekil 5.35. Sünek bir malzemede gerilme birim şekil değiştirme eğrisi üzerinden pekleşmenin gösterimi.....	88
Şekil 5.36. İzotropik pekleşme davranışının şematik gösterimi	89
Şekil 5.37. Kinematik pekleşme davranışının şematik gösterimi	90
Şekil 5.38. Makaralı bükme makinesi tasarım resmi	92
Şekil 5.39. Üretilen makaralı bükme makinesinde üretilebilecek profil kesit ölçüleri ve sac kalınlık ölçüleri.....	92
Şekil 5.40. 3. istasyon mesh modeli ve sonlu elemanlar analiz sonucu.....	94
Şekil 5.41. Makaralı bükme makinesi imalat görüntüsü.....	95
Şekil 5.42. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik U profil imalat resimleri	96
Şekil 5.43. Büküm açısı artışı deneyleri (a) Deney 1 (std) (8 istasyon), (b) Deney 2 (4 istasyon)	97
Şekil 5.44. İstasyonlar arası mesafe 156 mm (Deney 3).....	98
Şekil 5.45. İstasyonlar arası mesafe 250 mm (Deney 1 (std))	98
Şekil 5.46. İstasyonlar arası mesafe 400 mm (Deney 4).....	99
Şekil 5.47. İki katman levha simülasyon çalışmaları için eleman ve düğüm noktası sayılarının belirlenmesi	100
Şekil 5.48. Simülasyon için form makaralarının ve çift katmanlı levhanın modellemesi ...	100
Şekil 5.49. Simülasyon için çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çeliğinin modellenmesi	101
Şekil 5.50. Deney 1(std) (8 istasyon) büküm açısı artışı simülasyon testi.....	102
Şekil 5.51. Deney 2 (4 istasyon) büküm açısı artışı simülasyon testi	102
Şekil 5.52. İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon testleri (a) Deney 3 (156 mm), (b) Deney 1(std) (250 mm), (c) Deney 4 (400 mm).....	103
Şekil 6.1. Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik çekme testi sonucu kopan numune görselleri ..	105
Şekil 6.2. Al 1050 çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	106
Şekil 6.3. 304 paslanmaz çelik çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ...	106
Şekil 6.4. Isıl işlem sonrası Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik malzemelerin çekme test sonucu kopan numune görselleri	107
Şekil 6.5. Al 1050 ısıl işlem sonrası yapılan çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	108
Şekil 6.6. 304 paslanmaz çelik ısıl işlem sonrası yapılan çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	108
Şekil 6.7. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik çekme testi sonucu kopan numune görselleri	110
Şekil 6.8. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik çekme testi sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	111

Şekil 6.9. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik soyulma testi sonucu ayrılan numune görselleri	112
Şekil 6.10. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik soyulma yükü grafiği	113
Şekil 6.11. Hesaplanan ortalama soyulma kuvveti	113
Şekil 6.12. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalarının birleşim bölgesindeki iç yapının (SEM) görüntüleri a) x50 yakınlaştırma, b) x100 yakınlaştırma, c) x250 yakınlaştırma	114
Şekil 6.13. Makaralı bükme hattında üretilen çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik U profilinin ölçü kontrolleri	115
Şekil 6.14. Simülasyon sonucu elde edilen U profil kesitinin ölçüleri	116
Şekil 6.15. 3D tarayıcı yardımıyla deneysel üretilmiş U profil kesitinin modelinin çıkarılması	116
Şekil 6.16. Profil kesit ölçüleri (a) Tasarım kesiti, (b) Simülasyon kesiti, (c) Deneysel kesit	117
Şekil 6.17. (a) Tasarım kesiti, (b) Simülasyon kesiti, (c) Deneysel kesit, ölçülerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 6.18. Sac levhanın 1. İstasyondan 2. İstasyona geçişi sırasında meydana gelen deformasyon uzunluğu	118
Şekil 6.19. Seçilen düğüm noktasındaki kesite göre malzeme üst ve alt yüzeyinde oluşan çekme ve basma birim şekil değiştirme değerleri.....	119
Şekil 6.20. Sac levhada meydana gelen kalınlık değişimi	120
Şekil 6.21. Makaralı bükme hattı boyunca her bir istasyonda U profilde meydana gelen boyuna birim şekil değiştirmeler	121
Şekil 6.22. Sac levhanın makaralı bükme hattında ilerleme hızı değişimi	122
Şekil 6.23. Deney 1(std) (8 istasyon) üretilen profil görüntüsü	122
Şekil 6.24. Deney 2 (4 istasyon) üretilen profil görüntüsü	123
Şekil 6.25. Deney 2 sonucunda meydana gelen kenar dalgalanması kusuru	123
Şekil 6.26. Deney 2 sonucunda meydana gelen tabakalar arası ayrılma (delaminasyon)....	124
Şekil 6.27. Deney 1(std) (8 istasyon) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler	124
Şekil 6.28. Deney 2 (4 istasyon) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler	125
Şekil 6.29. 4 istasyon ve 8 istasyonlu modelde oluşan eş değer plastik birim şekil değiştirme grafiği	126
Şekil 6.30. 4 istasyon ve 8 istasyonlu modelde oluşan eş değer elastik birim şekil değiştirme grafiği	126
Şekil 6.31. 4 istasyon ve 8 istasyonlu modelde oluşan toplam eş değer birim şekil değiştirme grafiği	127
Şekil 6.32. Deney 1(std) (8 istasyon) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri.....	128
Şekil 6.33. Deney 1(std) (8 istasyon) bitmiş profil kesiti izometrik görüntüsü	128
Şekil 6.34. Deney 2 (4 istasyon) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri.....	129
Şekil 6.35. Deney 2 (4 istasyon) profil kesitinde kenar yüzeyde oluşan dalgalanma kusuru	129

Şekil 6.36. Profil kesiti üzerindeki von Mises gerilme dağılımı a) Deney 1(std) b) Deney 2	130
Şekil 6.37. Deney 3 (156 mm) üretilen profil görüntüsü	131
Şekil 6.38. Deney 1 (std) (250 mm) üretilen profil görüntüsü	131
Şekil 6.39. Deney 4 (400 mm) üretilen profil görüntüsü	132
Şekil 6.40. Deney 3 (156 mm) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler	133
Şekil 6.41. Deney 1 (std) (250 mm) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler	133
Şekil 6.42. Deney 4 (400 mm) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler	134
Şekil 6.43. İstasyonlar arası mesafe değişimi eş değer plastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	135
Şekil 6.44. İstasyonlar arası mesafe değişimi eş değer elastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	135
Şekil 6.45. İstasyonlar arası mesafe değişimi toplam eş değer birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	136
Şekil 6.46. Deney 3 (156 mm) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri	137
Şekil 6.47. Deney 1(std) (250 mm) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri	137
Şekil 6.48. Deney 4 (400 mm) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri	138
Şekil 6.49. Profil kesiti üzerindeki von Mises gerilme dağılımı a) Deney 3 (156 mm), b) Deney 1 (250 mm), c) Deney 4 (400 mm)	138
Şekil 6.50. Hat hızı değişimi eş değer plastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	139
Şekil 6.51. Hat hızı değişimi eş değer elastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	139
Şekil 6.52. Hat hızı değişimi toplam eş değer birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	140
Şekil 6.53. Deney 1(std) (51,5 mm/s) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri	140
Şekil 6.54. Deney 5 (193 mm/s) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri	141

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Rulo yapıştırma ile yapılan literatür çalışmaları	10
Tablo 2.2. Makaralı bükme ile yapılan literatür çalışmaları	25
Tablo 5.1. Al 1050 alüminyum alaşımı ve 304 paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özellikleri.....	59
Tablo 5.2. Al 1050 alüminyum alaşımı uluslararası standartları karşılaştırma tablosu	60
Tablo 5.3. Al 1050 alüminyum alaşımının tespit edilen ve tedarikçiden alınan kimyasal içerikleri.....	61
Tablo 5.4. 304 paslanmaz çelik uluslararası standartları karşılaştırma tablosu	62
Tablo 5.5. 304 kalite paslanmaz çelik sacının tespit edilen ve tedarikçiden alınan kimyasal içerikleri.....	62
Tablo 5.6. Ön analiz çalışması sonrası istasyonlar arası olması gereken minimum mesafeler	82
Tablo 5.7. Analiz modeli için geliştirilen tezgah parametreleri.....	85
Tablo 5.8. Makaralı bükme hattında her bir istasyonda meydana gelen kuvvetler.....	93
Tablo 5.9. Makaralı bükme makinesinde yapılacak deneysel parametreler	96
Tablo 5.10. Büküm açısı artışı değişimi	97
Tablo 5.11. İstasyonlar arası mesafe değişimi	98
Tablo 5.12. Hat hız değişimleri.....	99
Tablo 6.1. Isıl işlem öncesinde ve ısıtıl işlem sonrasında ölçülen Brinel sertlik değerleri	109
Tablo 6.2. Isıl işlem öncesinde ve ısıtıl işlem sonrasında mekanik özelliklerin karşılaştırılması	112
Tablo 6.3. İstasyonlar arası geçişte sac levhada meydana gelen deformasyon uzunluğu değerleri.....	118
Tablo 6.4. Çalışmaların deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	142

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Konusu

Gelişen teknoloji ve sanayi ile birlikte enerji tasarrufu ve manevra kabiliyeti için hafif ve dayanıklı malzemelere ihtiyaç vardır. Bu sebeple çift katmanlı malzemelere artan bir ihtiyaç söz konusudur. Çift katmanlı saclar, farklı kalınlıklardaki iki metalin basınç kaynağı, soğuk haddeleme, sıcak haddeleme, yapıştırıcı ile yapıştırma, patlatma kaynağı ve rulo yapıştırma gibi farklı yöntemlerle birleştirilmesi ile üretilir. Çift katman levhalar, tek bir metalin sağlayamayacağı özellikleri sağlamak için kullanılır. Çift katman özelliği sayesinde yüksek mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik, termal kararlılık, hafiflik, korozyon dayanımı ve şok emicilik gibi özellikler elde edilir.

Makaralı bükme tekniği, arka arkaya dizilmiş form makaraları kullanılarak sac şeritten boru, kapalı veya açık kesitli profil üretme işlemidir. Bu operasyon sırasında her bir form makarası bükme işlemine ufak katkılar sağlayarak sonunda istenen kesitte bir profil elde edilene kadar sürer. Makaralı bükme uzun veya çok büyük miktarda tedarik edilmesi gereken parçaların üretimi için esnek ve hızlı bir üretim yöntemidir. Makaralı bükme, üretilmek istenen profillerin dar toleranslarda ve aynı ölçülerde sürekli olarak üretilmesini sağlar. Makaralı bükme hattı kurulurken hat üzerine ilave edilen pres üniteleriyle delme, şişirme gibi operasyon adımları, üretim zamanından büyük tasarruflar sağlamaktadır. Makaralı bükme tekniğiyle üretilmiş profiller, diğer üretim yöntemleriyle üretilmiş profillere göre daha yüksek dayanım özelliklerine sahiptir. Diğer üretim teknikleriyle üretilmesi zor olan boru formu ve ince kesitli profiller bu yöntemle rahatlıkla üretilir.

Tez çalışması kapsamında Al 1050 alüminyum sac levhası 100 x 500 x 0,8 mm ölçülerinde ve 304 kalite paslanmaz sac levhası 100 x 500 x 0,6 mm ölçülerinde ebatlanarak yüzey hazırlık işlemleri yapılmıştır. Yüzeyler önce yağ, toz, kir, oksit v.b. kalıntılardan arındırılmak için aseton yardımıyla temizlenmiştir. Daha sonra her bir levha çifti birleşecek olan yüzeyleri 0,3 mm paslanmaz tel kanlığına sahip tel fırça ile polisajlanmıştır. Polisaj işlemi tamamlandıktan sonra sac levhalar üst üste istiflenerek ısıtıcı fırında tavlama işlemine tabi tutulmuş ve tez çalışması kapsamında özel olarak imal edilmiş olan üç istasyonlu rulo yapıştırma tezgahında kalınlık azaltılarak birleştirilmiştir. Üretilen bu levhaların soyulma ve çekme testleri yapılarak mekanik performansları belirlenmiş ve daha sonra birleşim bölgesinin iç yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Birleştirilmiş olan çift katmanlı levhalar,

tez çalışması kapsamında özel olarak imal edilmiş olan sekiz istasyondan oluşan makaralı bükme tezgahına girerek kademe kademe şekillendirilerek 31,5 x 41 x 31,5 mm kesit ölçülerinde 500 mm uzunluğunda U profil üretimi gerçekleştirilmiştir.

Makaralı bükme tezgâh parametreleri değişkenlerinin üretilen profilin kalitesine olan etkileri deneysel olarak incelemek için büküm açısı artışı, istasyonlar arası mesafe ve hat hızı değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar COPRA FEA programında modellenerek simülasyon çalışmaları yapılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Tez çalışması kapsamında Al 1050 alüminyum alaşımı ve 304 kalite paslanmaz çelik sac levhaları uygun yüzey hazırlık işlemlerinden sonra rulo yapıştırma işlemi ile birleştirilmiştir. Birleşen levhalara soyulma ve çekme testi uygulanarak levhaların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra Al1050-304 paslanmaz sac levha çiftinin birleştirilmesi ile oluşturulmuş çift katmanlı levhaların makaralı bükme yöntemiyle şekillendirme prosesleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sonlu elemanlar programı Copra FEA ile yapılan sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bu sayede çift katmanlı yapıya sahip bir levhanın makaralı bükme yöntemiyle U profil kesitine dönüşmesi sırasında şekillendirme prosesleri belirlenmiş ve üretilen profil kesitinde oluşan kusurların sebepleri araştırılmıştır.

Alüminyum, deniz suyuna ve endüstrideki kirli ortam şartlarına karşı çok iyi korozyon direncine sahip bir malzemedir. 304 kalite paslanmaz çelikler, dışardan gelebilecek kuvvetlere karşı mukavemeti yüksek bir malzemedir ve bu özelliklerinden dolayı darbeye maruz kalınan ortamlarda çok fazla tercih edilirler. Bu iki malzemenin bir araya gelmesiyle ortam şartlarına ve dışardan gelebilecek etkilere dayanıklı ve hafif bir çift katmanlı malzeme elde edilecektir. Bu metal çiftlerinin bir araya gelmesiyle mekanik anlamda üstün özellikler, estetik açıdan güzel yapılar ve ortam şartlarına dayanıklı ürünler ortaya çıkacaktır. Bu ürünlerin hem mamul olarak hem de yarı mamul olarak birçok sektörde kullanılabileceği düşünülmektedir.

1.3. Tezin Bölümleri

Birinci bölümde tezin konusu hakkında genel bilgiler verilmiş ve tez çalışması kapsamında nelerin yapılacağı özetlenmiştir. Daha sonra yapılan bu tez çalışmasının

amacından bahsedilerek ortaya çıkan ürün ve çalışmaların endüstriye ne gibi katkılar vereceğinden bahsedilmiştir. Sonrasında tezin hangi bölümlerden oluşacağı hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde tez konusu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara değinilmiştir. Tez çalışması iki bölümden oluştuğu için öncelikle literatürde bulunan rulo yapıştırma ile yapılmış olan çalışmalara değinilmiştir. Literatürde birbiriyle mekanik anlamda bağlanabilen sac levhaların bağlanma parametreleri ve proses hakkında bilgiler anlatılmıştır. Daha sonra çalışmanın ikinci kısmı olan makaralı bükme tekniği ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara değinilmiştir. Makaralı bükme prosesinde en sık karşılaşılan imalat kusurlarından bahsedilmiş ve bu kusurlara sebebiyet veren proses parametrelerinin etkilerinden bahsedilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar yazılımlarının bu alanda ne kadar önemli ve gerekli olduğu yapılan deneysel çalışmalar ile sayısal çalışmaların desteklenmesi ile gösterilmiştir.

Üçüncü bölümde rulo yapıştırma işlemi ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Rulo yapıştırma işleminin nasıl yapıldığı ve işlem parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu imalat tekniğinde dikkat edilmesi gereken proses parametreleri üzerinde durulmuş ve bu parametrelerin ürün kalitesine etkilerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde makaralı bükme tekniğiyle ilgili genel bilgiler verilmiştir. Makaralı bükme işleminin proses parametrelerinden bahsedilmiş. Bir makaralı bükme tezgahında olması gereken ekipmanlar hakkında temel bilgiler verilmiştir. Makaralı bükme yöntemiyle imalat sırasında ortaya çıkan üretim kusurlarından bahsedilmiş ve bu kusurların proste hangi parametrelere bağlı olduğuna değinilmiştir.

Beşinci bölümde;

- Rulo yapıştırma: Birleştirilip şekil verilecek levhalar hakkında bilgiler verilmiş ve bunların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Levhaların yüzey hazırlık işlemleri yapılmıştır. Levhaları birleştirecek olan rulo yapıştırma tezgahının tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Sonrasında levha çiftleri birleştirilerek elde edilen çift katmanlı levhaların mekanik özellikleri belirlenmiştir.
- Makaralı bükme: Çift katmanlı levhalara şekil verecek olan makaralı bükme tezgahının imalatı için öncelikle üretilecek U profilin çiçek açılımı yapılmış istasyon sayısı ve form makaralarının geometrisi belirlenmiştir. Belirlenen istasyon sayısı ve form makaralarına göre analiz çalışmaları yapılarak optimum çiçek açılımı ve form makara

geometrisi belirlenmiş ve makaralı bükme tezgahının tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan tezgâh üzerinden statik analizler yapıldıktan sonra deneysel testlerde kullanılacak olan makaralı bükme makinesinin imalatı gerçekleştirilmiştir.

- Deneysel testler: Birleştirilmiş olan Al 1050-304 paslanmaz çelik çift katmanlı kompozit levhasının makaralı bükme tezgahında U profil şeklini alması için gerekli deneysel testler yapılmış. İstasyonlar arası mesafe, büküm açısı artışı, hat hızı parametreleri değiştirilerek denemeler yapılmıştır ve bu değişkenlerin üretilen profil kesiti üzerine etkileri incelenmiştir.
- Simülasyon testleri: Birleşmiş olan levha çiftinin sonlu elemanlar yazılımı COPRA FEA da modellenerek deneysel testlerde uygulanan parametre değişiklikleri simülasyon testleri içinde yapılmış ve sonuçlar deneysel testler ile karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde çalışmadan elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar incelenmiştir. Makaralı bükme işleminde proses parametrelerinin değiştirilmesinin profil kesiti üzerine etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve tartışılmıştır.

Yedinci bölümde deneysel ve sayısal testler sonucu elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve literatür ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Sekizinci bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen çıktılar sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür taraması kapsamında ilk aşamada çift katmanlı levhaların üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Çift katmanlı levhaların imalatı için endüstride çok farklı üretim yöntemleri mevcuttur bu yüzden literatür araştırmaları rulo yapıştırma yöntemiyle yapılan çift katmanlı sac imalatı ile sınırlandırılmıştır.

Rulo yapıştırma yöntemiyle imalatla, bağlanma mekanizmasının davranışını anlamak ve bağlanma sürecindeki etkili parametreleri araştırmak için birçok araştırma yapılmıştır. Rulo yapıştırma işlemi sırasında metallerin bağlanmasının çeşitli faktörlerden etkilendiği bildirilmiştir bunlar; kalınlık azaltma, haddeleme sıcaklığı, rulo yapıştırma işleminden önce ve sonra metallere yapılan tavlama işlemi, bağlanma süresi, hadde silindirlerinin yuvarlanma yönü, metallerin saflığı, metallerin kafes yapısı, metallere uygulanan yüzey hazırlıkları, hadde silindirlerinin yuvarlanma hızı ve birleştirilen metallerin cinsidir.

İkinci aşama üretilen çift katmanlı levhaların makaralı bükme hattında şekillendirilmesidir. Bu kapsamda literatür de makaralı bükme yöntemiyle yapılan geniş çaplı literatür taramasında tek tabakalı birçok metal ile çeşitli kesitlerdeki profiller (U, V, şapka kesiti, b v.b.) üretilmiş ve üretim sırasında birçok parametrenin imal edilen profil kesiti üzerine etkileri incelenmiştir. Makaralı bükme imalatında en çok karşılaşılan üretim kusurları, boyuna eğilme, kenar yüzeyde dalgalanma, geri yaylanma, burulma ve delikli profillerde deliklerde meydana gelen şekilsel bozukluklar incelenmiştir. Literatürde bu kusurlara etki eden; büküm açısı artışı, istasyonlar arası mesafe, büküm kenarı yüksekliği, sac kalınlığı, form makara çapı, hat hızı, form makaraları arasındaki boşluk, sürtünme parametreleri gibi değişkenler incelemiş ve bu değişkenlerin profil kalitesine etkileri araştırılmıştır.

Bununla birlikte, çift katmanlı sacların makaralı bükme ile şekillendirme işleminde, tek tabakalı malzemelere kıyasla homojen olmayan mekanik özellikleri nedeniyle ilave şekil kusurları ve birleşim bölgesinin homojen olmayan iç yapısından dolayı arayüz ayrılması (delaminasyon) meydana gelebilir.

2.1. Rulo yapıştırma ile ilgili yapılan çalışmalar

Çift katmanlı sacların, aynı kalınlığa sahip olan tek tabakalı malzemelerle kıyaslandığında hafif yapıda olması, farklı teknik özellikleri bir arada sunabilmesi bu malzemelere olan ihtiyacı gün geçtikçe arttırmaktadır. Çift katmanlı levha üretim yöntemlerinin başında gelen rulo yapıştırma yöntemiyle üretim tekniği imalat

avantajlarından dolayı tercih edilen bir metottur. Özellikle bu alanda farklı malzemelerin birleştirilip iç yapının incelenmesi ve bağlanma parametrelerinin araştırılması adına birçok çalışma yapılmıştır.

Chang vd. (2009), çalışmalarında magnezyum (Mg) ve alüminyum (Al) levhaları rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirmişler ve birleşim bölgesindeki iç yapıyı analiz ederek iç yapıdaki nötron kırınımını ölçmüşlerdir.

Gholami vd. (2021), iki alüminyum plaka arasına pirinç levha yerleştirip rulo yapıştırma yöntemiyle üç katlı bir sandviç levha üretmişler ve bu levhaların mekanik özelliklerini, kırılma yüzeylerini ve aşınma davranışlarını ölçmüşlerdir. En yüksek çekme dayanımını alüminyum malzemede birinci döngüde elde etmişler, ARB döngülerinin sayısı arttığında çekme dayanımında ve uzama da herhangi bir değişikliğin olmadığını tespit etmişlerdir. Pirinç ve alüminyumdaki en yüksek sertlik değerini ise dördüncü döngünün sonunda tespit etmişlerdir.

Rouzbeh vd. (2023), Al 1050 ve Mg-AZ31B metallerinin rulo yapıştırma tekniğiyle birleştirip oluşan çift katmanlı levhaların arayüz davranışlarını soyulma testi ve kayma testi ile deneysel olarak incelemişlerdir. Daha sonra, LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı aracılığıyla Al/Mg kompozit levha için çekme mukavemeti ve şekillendirme limit eğrisi simüle edilmiştir. Sonlu eleman simülasyonlarının doğruluğunu iyileştirmek için çekme-ayırma kuralı ve yapışkan bölge modeli (Cohezive Zone Model) (CZM) arayüz modellemesi yapmışlardır. (CZM) modeli ile yapılan çalışmaların, deneysel çalışmalarda yapılan sonuçlara göre; çekme mukavemeti, delaminasyon bölgesindeki gerilmeyi ve kırılma gerilmesini sırasıyla %2, %7 ve %6,7 hata ile doğruladığını tespit etmişlerdir.

You vd. (2021), çapraz birikimli rulo yapıştırma (CARB) tekniğini kullanarak mikron ve nano ölçekli katmanlara sahip Cu/Ag kompozit levhasını üretmişlerdir. Her bir katmanın iç yapı morfolojisinin evrimini, mekanik özelliklerini ve termal kararlılıklarını araştırmışlardır. Üretmiş oldukları Cu/Ag nano katmanlı kompozitte aynı anda yüksek mukavemet, yüksek elektrik iletkenlik ve mükemmel termal kararlılık elde etmişlerdir. Üretilen kompozit levhalardan 938,1 MPa değerinde bir çekme mukavemeti elde etmişlerdir.

Dehsorkhi vd. (2011), Al 1050 ve çinko (Zn) levhaları kullanarak %50 kalınlık azaltma ile rulo yapıştırma tekniğiyle çift katmanlı levha üretmişlerdir. Bu yüksek

kalınlık azaltma ile alüminyum içerisinde 3µm mertebesinde parçalanmış çinko katmanlarının homojen dağılımına sahip bir Al/Zn kompoziti üretmişlerdir. Her bir ARB çevriminde yapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. ARB döngüleri sırasında, ARB döngü sayısı arttıkça mukavemet ve mikrosertliğin arttığı, ilk döngülerde uzamanın arttığı ve daha sonra azaldığı gözlenmiştir.

Mozaffari vd. (2010), 1060 alüminyum (Al) ve nikel (Ni) levhalar kullanarak ARB yöntemiyle Al/Ni kompozit levhasını üretmişlerdir. ARB geçişleri sayısı arttıkça nikel tabakalarının boyun verdiği ve kırıldığı gözlenmiştir. Altı ARB geçişinden sonra, alüminyum matriste homojen olarak dağılmış parçalanmış nikel katmanları olan çok katmanlı bir Al/Ni kompozitini üretmişlerdir. Her bir ARB geçişinde yapının mekanik özellikleri incelenmiştir. ARB sırasında geçiş sayısı arttıkça birim şekil değiştirme miktarının arttığı ve üretilen kompozitlerin mukavemet, mikrosertlik ve uzama değerlerinin de arttığı gözlenmiştir.

Tang vd. (2015), alüminyum ve yumuşak çelik malzemeyi rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirip Al/St kompozit levhasını üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada yüzey polisaj işleminde çelik tel kullanmak yerine flap disk kullanmanın daha iyi bir yüzey kalitesi sunduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça bağlanma mukavemetinin de arttığını görmüşlerdir. Yapılan çalışmada haddeleme yönünde yapılan polisaj işleminin hadde yönüne dik ve hadde yönüne 45° yapılan polisaj işlemine göre daha iyi bir yapışma yüzeyi sunduğu belirtilmiştir.

Wei vd. (2009), oda sıcaklığında ARB ile üretilmiş ultra ince taneli Al/Mn alaşımının mikro yapısı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Beş ARB döngüsünden sonra küresel parçacık şeklindeki MnAl₆ fazı matris içinde üniform olarak dağılmıştır. Çekme testleri, Al/Mn kompozit levhasının beş ARB döngüsüne kadar bile ani bir kırılma olmaksızın akma sonrasında birim şekil değiştirme sertleştirme davranışı sergilediğini göstermiştir. ARB döngüleri ne kadar fazlaysa, Al/Mn numunelerinin işleme sertleşme oranındaki azalmanın o kadar küçük olduğu tespit edilmiştir.

Nejad vd. (2017), 400°C sıcaklıkta Al/Paslanmaz çelik/Al kullanarak 3 katmanlı bir kompozit üretmişlerdir. Sonrasında oda sıcaklığında ARB işlemini yedi kez tekrarlayarak Al parçacıklarının matris içerisine dağılmalarını sağlamışlardır. Çekme testi sonuçlarına göre Al malzemenin çok yüksek mukavemet özellikleri gösterdiğini

ancak düşük süneklik gösterdiğiniz bulmuşlardır

Mehr vd. (2014), çalışmalarında Al_2O_3 kaplamanın ve haddeleme sonrası tavlamanın farklı Al/Cu şeritlerinin bağ dayanımı üzerindeki etkisini incelenmişlerdir. Bu amaçla, alüminyum şeritler üzerine farklı kalınlık derecelerinde Al_2O_3 filmi kaplanarak rulo yapıştırma yöntemiyle bakır şeritler ile birleştirilmiştir. Elde edilen parçalara soyulma testi uygulanmış, oksit film kalınlığının belli bir değere (20 μm) kadar arttırılmasıyla bağ dayanımını arttırdığını, belirli bir değerden sonra bağ yapısını azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca haddeleme sonrası yapılan tavlamanın da bağ yapısını zayıflattığını bildirmişlerdir.

Abbasi vd. (2010), haddeleme sırasında kalınlık azaltma, haddeleme sıcaklığı, haddeleme hızı, haddelenen sacın kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi işlem parametrelerinin iki katmanlı Cu/Cu şeritleri arasındaki bağ dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Artan kalınlık azaltma, haddeleme sıcaklığı, şerit genişliği ve yüzey pürüzlülüğünün soyulma mukavemetinde artışa neden olduğu, haddeleme hızının ve şerit başlangıç kalınlığının artmasının ise soyulma mukavemetinde azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Li vd. (2008), proses ve yüzey hazırlama koşullarının yapıştırma üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Kalınlık azaltma bir eşik değere ulaştığında iki levha arasındaki yapıştırma gerçekleştirilebilir. Yüzeylerin yağdan arındırılması ve ardından polisajlanmasının, katmanlar arasında güçlü bir bağ oluşturduğu öne sürülmüştür. Ayrıca yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı metallerin hacim merkezli kübik (HMK) ve hekzagonal kafes (HCP) yapılı metallere göre daha kolay bağlandığı gösterilmiştir. Ayrıca aynı türden malzemelerin yapıştırılmasında sertliğin önemli bir kriter olduğunu belirtmişlerdir.

Chen vd. (2006), Al(ASM-1100)/Mg (AZ31) levhalarını ARB işlemi ile üç döngüde başarılı bir şekilde birleştirmişlerdir. Al ve Mg alaşımlarının tane büyüklükleri, üç döngüden sonra 875nm ve 656nm olarak ölçülmüştür. Al ve Mg alaşımlarının sertliği, üç döngüden sonra HV42 ve HV90 olarak ölçülmüştür.

Grydin vd. (2013), alüminyum (EN AW-1070) ve çelik (1.4401) malzemeyi birleştirerek birleşim bölgesindeki iç yapıyı analiz etmişlerdir. Gerçekleştirilen analiz, yaklaşık olarak malzeme arayüzünde sürekli, ince ve düzgün bir intermetalik faz tabakasının oluşumunu göstermiştir. 3 μm kalınlığında bir yapışma bölgesi ve 70 MPa

bir yapışma mukavemeti elde etmişlerdir.

Heydari vd. (2017), alüminyum 1050 ve saf bakır kullanarak rulo yapıştırma (RB) işlemi ile Al/Cu kompozit levhalar üretmiştir. RB işlemi sırasında sac levhaların bağ mukavemetinin iyileştirilmesi için kalınlık azaltma oranları optimize edilmiştir (sırasıyla %10, %20 ve %30). Ayrıca ABAQUS yazılımında kalınlık azaltma oranları, haddeleme sıcaklıkları ve çekme gerilmeleri için çift katman levhaların deformasyonunu modellemek için Sonlu Elemanlar (FE) simülasyonu kullanılmıştır. Sonuçlar, çift katman Al/Cu levhalarındaki gerilim dağılımının asimetrik bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ayrıca soyulma testi ile bağ yapısının mukavemeti belirlenmiş ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile bağlanma bölgesindeki arayüz incelenmiştir.

Chen vd. (2015), çok katmanlı kompozit levhaların ana üretim süreçlerini tanıtmışlar ve farklı ARB süreçleri sırasında mikroyapı evrimini ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Metallerin farklı deformasyon dirençleri ve plastik deformasyon yetenekleri nedeniyle iç yapının homojen olmadığını tespit etmişlerdir. Bu homojensizlikler araştırılarak deformasyon özellikleri ve rulo yapıştırma mekanizmaları incelenmiştir.

Pita vd. (2020), Al 1050 malzeme kullanarak ARB işlemi sırasında yüzey sıcaklığının ve tane boyutunun mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. ARB işlemi sırasında yüzey sıcaklığı arttıkça tane boyutunun arttığı gözlenmiştir.

Ye vd. (2022), rulo yapıştırma işlemi ile üretilen Ni/Ti kompozitlerinin farklı tavlama sürelerinde ve sıcaklıklarda intermetalik faz oluşumunun çekme özellikleri ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, katmanların birbirine iyi bir şekilde bağlandığını, ancak Ni katmanlarının plastik deformasyon sürecinde kararsızlıklar yaşadığı görülmüştür.

Wang vd. (2020), Ti6Al4V ve AA6061 sac levhalarını rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirip birleşim bölgesinin iç yapısını incelemişler ayrıca birleştirdikleri çift katmanlı levhanın mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Sonuçlar, 550°C'nin üzerinde birleşim bölgesinde TiAl₃ fazının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Al atomları, TiAl₃ tabakası boyunca baskın difüzyon atomlarıydı ve Ti/TiAl₃ arayüzünde Ti atomları ile reaksiyona girdiği görülmüştür.

Tablo 2.1. Rulo yapıştırma ile yapılan literatür çalışmaları

Yıl	Araştırmacı	Malzeme	Birleştirme yöntemi	Deneyisel testler	Simülasyon
2009	Chang vd.	Mg/Al	RB	Deneyisel	-
2021	Gholami vd.	Al/Pirinç/Al	RB	Deneyisel	-
2023	Rouzbeh vd.	Al/Mg	RB	Deneyisel	Ls-Dyna
2021	You vd.	Cu/Ag	RB	Deneyisel	-
2011	Dehsorkhi vd.	Al/Zn	RB	Deneyisel	-
2010	Mozaffari vd.	Al/Ni	RB	Deneyisel	-
2015	Tang vd.	Al/Steel	RB	Deneyisel	-
2009	Wei vd.	Al/Mn	RB	Deneyisel	-
2017	Nejad vd.	Al/AISI304/Al	RB	Deneyisel	-
2014	Mehr vd.	Al/Cu	RB	Deneyisel	-
2010	Abbasi vd.	Cu/Cu	RB	Deneyisel	-
2006	Chen vd.	Al/Mg	RB	Deneyisel	-
2013	Grydin vd.	Al/Steel	RB	Deneyisel	-
2017	Heydari vd.	Al/Cu	RB	Deneyisel	Abaqus
2015	Chen vd.	Mg/Al	RB	Deneyisel	-
2020	Pita vd.	Al	RB	Deneyisel	-
2022	Ye vd.	Ni/Ti	RB	Deneyisel	-
2020	Wang vd.	Ti6Al4V/AA6061	RB	Deneyisel	-

2.2. Makaralı bükme yöntemiyle ilgili yapılan çalışmalar

2.2.1. Geleneksel makaralı bükme yöntemiyle yapılan deneyisel çalışmalar

Dönmez vd. (2011), alüminyum ve yumuşak çelik malzemeden U profil kesitinin imalatı sırasında kenar yüzeylerde meydana gelen dalgalanmayı Taguçi yöntemi ile üç değişkenli ve iki seviyeli L8 tam eşleşmeli deney yöntemiyle incelemişlerdir. Kenar yüzde dalgalanma sorununa etki eden en büyük parametrenin kenar büküm yüksekliği olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kenar dalgalanma kusuruna etki eden yan kenar büküm yüksekliği ile malzeme türü ve form makaralarının dizilişi ile malzeme türü arasında etkileşimler olduğunu tespit etmişlerdir.

Watari vd. (1998), çalışmalarında önceden delinmiş, geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik(AHSS) kullanarak makaralı bükme yöntemiyle U ve V kesit şekli verilmesine etki eden, hat hızı, istasyonlar arası mesafe, form makara çapı gibi

parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. İmalat sırasında ortaya çıkan kusurları önlemek için yeni tasarım yönergeleri önerilmiş ve kusur içermeyen önceden delinmiş ürünlerin üretimi için ampirik denklemler sunulmuştur.

Wiebenga vd. (2013), DP780 çeliğinin makaralı bükme yöntemiyle V profil şeklini alması sırasında boyuna eğilme ve geri yaylanma kusurlarını incelemişlerdir. Geri yaylanmanın son istasyondaki iyileştirmeler ile düzeltilebileceği, boyuna eğilmenin ise form makaraları arasındaki boşluğun optimize edilerek azaltılabileceğini bulmuşlardır.

Su vd. (2023), makaralı bükme ile imalatla, şekillendirme kalitesini iyileştirmek ve geri yaylanma kusurlarını azaltmak için optimize edilmiş segmentli sınır kombinasyonuna sahip bir büküm açısı dağıtım fonksiyonu önermişlerdir. Şapka (hat shape) şeklindeki profil kesiti için her şekillendirme geçişinden sonra saclardaki gerilim ve birim şekil değiştirme dağılımları, COPRA FEA sonlu elemanlar yazılımını kullanarak analiz etmişlerdir.

Paralikas vd. (2010), geliştirilmiş yüksek mukavemetli(AHSS) DP600 sac malzemedan U kesit üretilirken hat hızı, istasyonlar arası mesafe, form makaraları arası boşluk ve form makara çapının şekillendirme prosesine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Makaralı bükme hattı boyunca istenmeyen plastik birim şekil değiştirmelerin birikmesi kenar dalgalanması, bombe ve boyuna eğilme gibi kusurların kaynağı olabileceğinden, makaralı bükme hattı boyunca birim şekil değiştirmelerin tepe noktaları malzemenin akma sınırını aşmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca elde edilen sonuçları sonlu elemanlar çalışmalarıyla desteklemişlerdir.

Safdarian vd. (2015), St14 sac levhasından makaralı bükme yöntemiyle V profil imalatı sırasında meydana gelen boyuna eğilme kusurunun büküm açısı artışı, sac kalınlığı, büküm kenarı yüksekliği, sürtünme, makine hızı ve istasyonlar arası mesafenin etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Boyuna eğilmeye sebep olan uzunlamasına birim şekil değişiminin büküm açısı artışı ve sac kalınlığı artışı ile arttığını diğer yandan büküm kenarı uzunluğu ve istasyonlar arası mesafe arttıkça azaldığını bulmuşlardır. Sürtünmenin ve makine hızının ise boyuna eğilmede herhangi bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Abeyrathna vd. (2016b), çift fazlı 780 (DP780) sac levhasını kullanarak U profil üretimi gerçekleştirmişlerdir. Makaralı bükme ile şekillendirmede gözlemlenen en

yaygın kusurun boyuna eğilme olduğu ve bu kusurun da form makaralarının şerit levhaya uyguladığı yük ve tork kontrolüyle azaltılabileceğini deneysel denemeler ve sayısal analiz yoluyla incelemişlerdir.

Bidabadi vd. (2015), ASTM A283 C sınıfı delikli bir sacın U form kesiti verilmesi sırasında delik ovalitesi üzerine etki eden parametreleri deneysel olarak incelemişlerdir. İstasyonlar arası mesafe, büküm açısı artışı, sac kalınlığı, taban genişliği, yağlama, delikler arası mesafe, deliklerin kenara olan mesafesi gibi parametre değişkenlerini kullanarak üretim sırasında delik kalitesini incelemişlerdir. Delik ovalitesi üzerine etki eden en büyük parametrenin büküm açısı artışı olduğu en az etkinin ise sac taban genişliği ve yağlama olduğunu tespit etmişlerdir.

Bidabadi vd. (2016), UHSS malzemeden U profil kesiti imalatı sırasında en yaygın kusur olarak ortaya çıkan boyuna eğilme kusurunun sebeplerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sac kalınlığı, form makara büküm yarı çapı, sac genişliği, büküm açısı artışı ve istasyonlar arası mesafe değişkenlerinin bu kusura etkisini incelemişler. Boyuna eğilme kusuruna en çok etki eden parametrelerin sac kalınlığı, büküm açısı artışı ve sac genişliği olduğunu tespit etmişlerdir.

Bidabadi vd. (2016), delikli AISI S201 sacından U profil üretimi sırasında boyuna eğilmeye etki eden faktörleri deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. İstasyonlar arası mesafe, büküm açısı artışı, sac kalınlığı, taban genişliği, yağlama, delikler arası mesafe, deliklerin kenara olan mesafesi gibi parametre değişkenlerini kullanarak üretim sırasında boyuna eğilmeye olan etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, büküm açısı artışının ve delikler arasındaki mesafenin boyuna eğilme üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Abeyrathna vd. (2017), DP780 sacından V profil üretimi sırasında her bir büküm kenarının her iki yüzeyine birim şekil değişimi ölçer yerleştirilerek bu bölgelerdeki birim şekil değişimi değerlerini ölçmüşlerdir.

Abeyrathna vd. (2017), otomotiv sektöründe çok fazla kullanılan DP600, DP1000 ve MS900 malzemeleri kullanarak U profil imalatı sırasında meydana gelen boyuna eğilme ve geri yaylanma kusurlarını incelemişlerdir. Büküm kenarı yüksekliği, büküm açısı artışı, istasyonlar arası mesafe ve sac kalınlığı gibi parametrelerin bu kusurlara olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir.

Liu vd. (2017), DP 980 sacı kullanarak şapka (hat shaped) kesiti üzerinde geri

yaylanma üzerine etki eden parametreleri deneysel ve sayısal olarak inceleyip karşılaştırmışlardır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda; geri yaylanmanın şapka flanş genişliği, büküm kenarı yüksekliği ve form makaraları arasındaki boşluğun artması ile arttığını ancak sac taban genişliği ve sac kalınlığının artması ile de azaldığını tespit etmişlerdir.

Suckow vd. (2021), AA7075 yüksek mukavemetli alüminyum malzemeden makaralı bükme yöntemiyle dairesel kesitli bir profil üretirken nihai kesit üzerinde boyuna birim şekil değişimi dağılımını ve burulma kusurlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir.

Zeinali vd. (2022), 2 mm kalınlığa sahip AL6061- T6 alüminyum sacını kullanarak U profil imalatı sırasında büküm açısı artışını önce 30° sonra 45° deneyerek büküm bölgesindeki sünek kırılma davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. 45° büküm açısında kırılmanın olduğunu gözlemlemişler ve bunu sayısal ve deneysel olarak desteklemişlerdir.

Talebi vd. (2020), AA6061-T6 alüminyum alaşımından U profil kesiti üretirken büküm bölgesindeki sünek kırılma davranışını incelemişlerdir ve sonlu elamanlar modeli ile doğrulamışlardır. Büküm bölgesindeki sünek kırılma davranışını incelemek için Modifiye Mohr-Coulomb (MMC) sünek kırılma kriterini kullanmışlar ve bunu çekme testlerine uygun bir şekilde kalibre edip Abaqus/Explicit'e entegre etmişlerdir. Deneysel testler, tek aşamalı ve çok aşamalı şekillendirme süreçleri olmak üzere iki farklı şekillendirme stratejisine dayalı olarak tasarlanmıştır. Sonuçlar, çekme testlerine dayalı kalibre edilmiş kırılma modelinin, %4,47'lik bir hata oranıyla tek aşamalı haddeleme işleminde kırılma başlangıcını tahmin edebildiğini göstermiştir. Çok aşamalı haddeleme modeli ise sayısal model ile tutarsızlık göstermiştir.

Abvabi vd. (2015), DP780 sacından V kesit üretirken sac levhanın makaralı bükme hattına girmeden belirli bir sıcaklıkta ısıtılarak form makaralarında kalınlık azaltma işlemine tabi tutulmuştur. Kalınlık azaltmanın geri yaylanmayı artırdığı, boyuna eğilmeyi ise azalttığı gözlenmiştir.

Liang vd. (2019), HSS B700L sacından b profil üretimini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, kenar dalgalanmasının oluşumunda kenar büküm yüksekliği, sac kalınlığı ve hat hızı faktörlerinin etkisinin sac kalınlığı > kenar büküm yüksekliği > şekillendirme hızı şeklinde olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca b

şeklindeki profilin dikey kenarının kenar dalgalanma boyutu, sac kalınlığının artmasıyla azalmış ve flanş yüksekliğinin artmasıyla da artmıştır.

Xu vd. (2023), alüminyum sac malzemeden asimetrik kesite sahip profillerin makaralı bükme yöntemiyle imalatı sırasında meydana gelen boyuna eğilme kusurunu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu kusura etki eden parametreler için bir doğrusal regresyon modeli oluşturmuşlar ve pareto grafiği yapmışlardır. Sonuçlar, boyuna eğilmeye etki eden en büyük parametrelerin form makaraları arası boşluğun ve büküm açısı artışlarının olduğunu, en az etkinin ise sürtünme olduğunu göstermiştir.

Weiss vd. (2017), makaralı bükme hattını besleyen rulo sac setinin (coil set) yuvarlanma yönünün üretilen profil kesitine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada iki adet rulo sac seti kullanılmıştır. Rulo sacların birinde yuvarlanma yönü yukarıdan beslenmiş diğerinde ise yuvarlanma yönü aşağıdan beslenmiştir. Aşağı yönden besleme işlemi yapılan rulodan üretilen ürünlerde burulma ve kenar dalgalanma kusurunun arttığı görülmüştür.

Mehari vd. (2022), yüksek mukavemetli DP980 çeliğinden U profil kesiti üretimi sırasında kısmi ısıtma işlemi uygulanan makaralı bükme yönteminin geri yaylanmaya etkisini incelemiş ve simülasyon ile doğrulamışlardır. Sonuçlar ısıtma işleminin geri yaylanmanın etkisini azaltmak adına iyi bir yaklaşım olduğunu göstermiştir.

Lindgren, yaptığı çalışmada soğuk haddelenmiş durumda martenzit bir iç yapıya sahip olan AISI 301 paslanmaz çeliğinin şekillendirilebilirliğini arttırmak için kısmi ısıtarak östenit ve sünek bir yapıya dönüştürüp daha sonra makaralı bükme işlemiyle U ve V profil şeklini verip tekrardan martenzit bir yapıya dönüşümünü sağlamıştır (Lindgren, 2009).

Wang vd. (2022), 301L paslanmaz çelik sacının makaralı bükme ile şekillendirilmesinde profilin boyuna birim şekil değişimini attıran parametrelerden istasyonlar arası mesafe, sürtünme kat sayısı, form makaralarının çap artışı ve hat hızı parametrelerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, form makara çap artışının maksimum birim şekil değişimi üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu ve form makara çap artışının birim şekil değişimini azaltabileceğini göstermektedir. İstasyonlar arası mesafenin küçük değerlerde birim şekil değişimini arttırdığı, büyük değerlerde ise maliyet artışını sebep olduğu için optimum bir değerde tutulması

gerektiği belirtilmiştir. Sürtünme kat sayısının artması boyuna birim şekil değişimini azalttığı görülse de bu durumun paslanmaz sac üzerinde çiziklere sebep olduğu görülmüştür. Hat hızındaki artışında belirli bir değerden sonra boyuna birim şekil değişimi değerini arttırdığı görülmüştür.

Wang vd. (2021), Q235 çeliğini kullanarak makaralı bükme yöntemiyle şapka kesitli bir profilin üretimini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Büküm açısı dağılım fonksiyonunu oluşturan beş sınır koşulu önerilmiş ve optimize edilmiştir. Büküm açısı, sac kalınlığı ve sac akma mukavemeti, önerilen şekillendirme açısı dağıtım yöntemi altında ABAQUS sonlu elemanlar simülasyon çalışması ile analiz edilmiştir. Üç biçimlendirme parametresinin, boyuna eğilme kusurlarını etkilediği gösterilmiş ve makaralı bükme şekillendirme deneyleri tamamlanmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Doğan, (2018), 800CP sacını kullanarak araç koltuk kızıağına ait profilin imalatını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Makaralı bükme tezgâhı tasarlarken tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken konular, sac açınım yöntemleri, makaralı bükme yöntemiyle üretimde karşılaşılan hatalar incelenmiştir.

Li vd. (2018), galvaniz çelik malzemeden C kesitli profil üretimi sırasında şekillendirme kalitesini araştırmak için büküm açısı artışı, hat hızı ve istasyonlar arası mesafe gibi işlem parametrelerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Büküm açısı artışının şekillendirme kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ancak seçilen hızın ve belirlenen istasyonlar arası mesafenin önemli bir etkiye sahip olmadığını görmüşlerdir.

Han vd. (2018), otomotiv imalat sektöründe çok fazla kullanılan UHSS sac malzemesinden makaralı bükme yöntemiyle V profili üreterek minimum bükülme yarı çapını belirlemişlerdir. Ayrıca makaralı bükme ile şekillendirme işlemindeki kırılma davranışını araştırmak için bir makaralı büküm tezgâhı tasarlamışlar ayrıca bunu sonlu elemanlar ortamında modelleyerek simüle etmişler ve deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Yarıçap/sac kalınlığı (r/t) = 1, 2, 3 ve 4 için haddelemede minimum bükülme yarıçapı belirlenmiş ve bükme deneylerinden elde edilen değer ile karşılaştırılmıştır. r/t = 1 ve 2 için V profilli parçaların kırılma zamanı ve kırılma yerini tahmin etmişler ve tahmin sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Murugesan vd. (2021), yaptıkları çalışmada AA5052-H32 alüminyum alaşımından simetrik kesitli U profilin makaralı bükme yöntemiyle imalatı sırasında

meydana gelen boyuna eğilme, geri esneme ve kalınlık incelmesi kusurlarını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneyleri farklı şekillendirme hızlarında ve farklı sac kalınlıklarında yapmışlardır. Sonuçlar, bitmiş parçalarda herhangi bir boyuna eğilme görülmediğini ve geri yaylanmanın ise sırasıyla sac kalınlığı ve şekillendirme hızı gibi şekillendirme parametrelerinden etkilendiğini göstermiştir. Düşük istasyon sayısı ve artan sac kalınlığında geri yaylanmanın arttığı görülmüş ayrıca yüksek hızlarda da kalınlık incelmesi olduğunu tespit etmişlerdir. Deney sonuçlarının simülasyon sonuçları ile uyum içinde olduğunu tespit etmişlerdir.

Weiss vd. (2023), 7075 alüminyum malzemeye makaralı bükme yöntemiyle V kesit şekillendirilmesinde malzemenin kırılma sınırlarını analiz etmek için bir test yöntemi araştırmışlardır. Bunun için 7075 Alüminyum alaşımı için, mikro yapı ve mekanik özelliklerde belirgin farklılıklara sahip olan T4 ve T73 tav koşullarında haddelene kırılma limitleri belirlenmiştir. Makaralı bükme şekillendirme çalışmalarında büküm istasyonlarında malzemeyi şekillendirirken sabit yarıçap ve sabit yay uzunluğu olmak üzere iki farklı yöntem kullanmışlardır. Sabit yarıçap yöntemiyle imalatın geri yaylanmayı azalttığını ve bu nedenle yüksek mukavemetli çeliklerde bu yöntemin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Galdos vd. (2014), sonlu elemanlar ortamında makaralı bükme ile şekillendirme işleminde sac levhanın makaralar arasından geçerken farklı basınçlarda meydana gelen sürtünmeyi dinamik ve statik olarak hesaplamışlardır. Sayısal modelin sac ve form makarası arasındaki temas basıncı dağılımını tahmin edebildiği gösterilmiştir ve bu nedenle bir tersine mühendislik yaklaşımı izlenmiştir. Farklı temas basınçlarında yapılan testlerde 0,145 ila 0,16 arasında değişen statik bir sürtünme katsayısı ve 0,12 ila 0,135 arasında değişen bir dinamik sürtünme katsayısı tespit edilmiştir.

2.2.2. Makaralı bükme ile yapılan sayısal çalışmalar

Makaralı bükme sürecinin uzun bir geçmişi olmasına rağmen, makine ve form makara tasarımı deneysel yapılmış çalışmalar sonrası elde edilen sonuçlara ve çalışanların tecrübelerine bağlıdır. Maliyetlerin yüksek olmasından dolayı deneysel çalışmalar çok azdır. Makaralı bükme yöntemiyle şekillendirmede daha küçük toleranslar, iyi yüzey kalitesi ve çok çeşitli profil tasarımları sebebiyle makaralı bükme prosesini etkileyen parametrelerin detaylı incelenmesi ve bu parametreler arasındaki etkileşimlerin anlaşılmasına gerek duyulmaktadır (Paralikas vd., 2011).

Tasarımcı yeni bir makaralı bükme hattı tasarlayacağı zaman üretilecek olan

profil kesitinin kaç şekillendirme adımında meydana geleceğini iyi tayin etmelidir. Şekillendirme istasyonu sayısı profilin kesitine, toleranslara ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Makaralı bükme konusunda günümüzde tasarımcıya yardımcı olan Copra FEA, Ortic, Ubeco, Shape RF gibi birçok bilgisayar yazılımı mevcuttur. Bilgisayar yazılımları, şekillendirme adımlarının sayısını tahmin etmek ve form makaralarının geometrisini önermek için basit formüller ve pratik kurallar kullanırlar. Bazı yazılımlar sonlu farklar yöntemine dayanan bilgisayarlı simülasyon tekniklerini de içerir. Bu tür analizin avantajı, simülasyon süresinin çok kısa olabilmesidir.

Simülasyonlar günümüzde endüstride ve özellikle otomotiv sektöründe endüstri mühendisliği, çarpma testleri, sac şekillendirme vb. amaçlarla giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Bu amaçla deneysel çalışmalar ile çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş ve desteklenmiştir.

Paralikas vd. (2011), DP780 sac malzemesinden U ve V kesitli profillerde makaralı bükme geçişleri sırasında meydana gelen deformasyonlar üzerine etki eden, uzunlamasına birim şekil değiştirme, sac malzemede meydana gelen kayma gerilmeleri ve geri yaylanma parametrelerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir.

Kim ve ark. (1999), kinematik olarak kararlı durum koşulunda şekil vermenin üç boyutlu analiz sürecini araştırmak için sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir makaralı bükme şekillendirme simülasyon programı geliştirmişler ve kullanmışlardır.

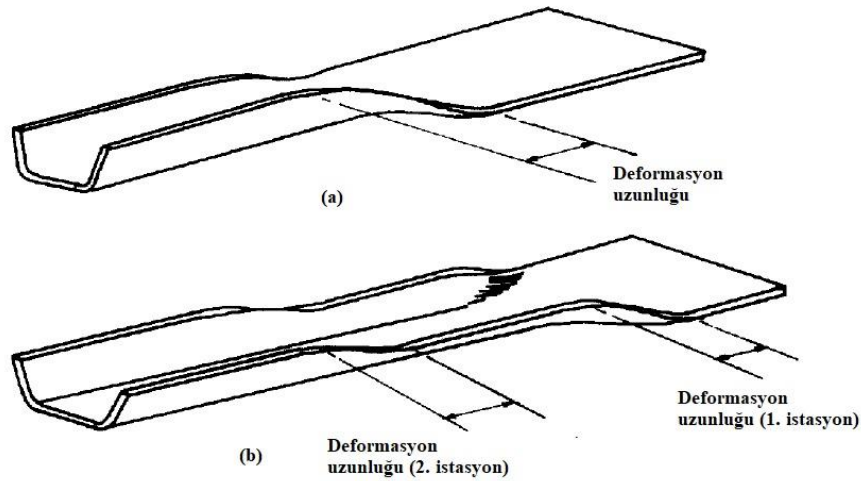
Tehrani vd. (2006), çalışmalarında ABAQUS yazılımı kullanarak SAE 1020 çeliği için simetrik kesitlerdeki kenar dalgalanma sorununu araştırmışlardır. Yapılan sonlu eleman çalışmalarında ilk istasyondaki büküm açısının bir optimum değerde tutulması gerektiğini bulmuşlardır. Bu açının fazlalığı, ilerleyen istasyonlarda gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır bu durumda kenar yüzeyde şekilsel bozukluklar meydana getirmektedir.

Liu vd. (2015), çalışmalarında, deformasyon sürecinde büküm açısı dağılımını ve boyuna birim şekil değişimini analiz etmek için yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu yeni modeli kullanarak yaptıkları hesaplama sonuçlarının, mevcut literatürdeki deneysel verilerle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca sac genişliği ve form makara çapının boyuna birim şekil değişimi üzerine etkilerini incelemişlerdir.

Kiuchi vd. (1973), bir şeridin akış çizgisini bir sinüs eğrisi olarak varsayarak dairesel kesitler oluşturmaya yönelik kapsamlı bir teorik çalışma gerçekleştirmiştir.

Jimma vd. (1981), simetrik kesite sahip profillerde makaralı bükme tezgahı form makaralarının büküm şekillerinin planlanması için gerekli form makara geçiş sayısının belirlenmesini deneysel ve analitik olarak araştırmışlardır.

Bhattacharyya vd. (1984), makaralı bükme tezgahında her şekillendirme istasyonunda deformasyon uzunluğunu (iki istasyon arası geçiş sırasında plastik şekil değişimi olan bölge bkz. Şekil 2.1.) önceden tahmin edebilen bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Şekil değiştirme enerjisinin minimum olması prensibi ile hesaplamalarını yapmışlardır. Yumuşak çelik ve alüminyum şeritlerden makaralı bükme ile yapılan profil kesitlerinde teori ile deney arasındaki uyumun son derece iyi olduğunu bulmuşlardır. Sonuçlar deformasyon uzunluğunun üretilen profil kesitinin fiziksel parametrelerine bağlı olduğunu da göstermektedir.



Şekil 2.1. Deforme olmuş numune (a) tek istasyonlu, (b) iki istasyonlu (Bhattacharyya vd., 1984)

Han vd. (2001), B spline analitik modelini kullanarak makaralı bükme yöntemiyle şekil verme sırasında meydana gelen uzunlamasına birim şekil değişiminin büküm açısı artışı ve sac kalınlığının artması ile arttığını, kesit taban genişliğinin ve istasyonlar arası mesafenin artması ile de azaldığını tespit etmişlerdir.

Traub vd. (2017), S235JR ve Docol Roll 100 çeliğinden U ve C profili üretirken büküm bölgesinde meydana gelen birim şekil değişiminin dağılımını tespit eden bir analitik model geliştirmişler ve bunu sonlu elemanlar yazılımı ile desteklemişlerdir. Analitik model ile deney sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir ayrıca profil geometrisi ve bükülme oranı (bükülme yarı çapı/sac kalınlığı), büküm

bölgesindeki birim şekil değişimi dağılımını etkileyen ana faktörler olduğunu belirlemişlerdir.

Ayrıca bazı sonlu elemanlar yazılımları geliştirilmiş ve bu yazılımlardan elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Sonlu elemanlar yazılımları ile birim şekil değişimi dağılımları ve geri yaylanma etkisinin belirlenmesi gibi etkiler önceden tahmin edilmiş ve imalat öncesi hatalar engellenerek daha az kusurlu parçalar elde edilmiştir (Bui ve Ponthot, 2008).

Jeong vd. (2008), üç elemandan oluşan bir ray altı tasarlanmış ve makaralı bükme şekillendirme işlemi simüle edilmiştir. Üretilcek profiller için iki farklı çiçek açılımı deseni belirlemişlerdir. Uzunlamasına birim şekil değişimi ve boyuna eğilmenin sayısal büyüklüğünü simülasyonun sonuçlarıyla tahmin etmişler ve iki çeşit çiçek açılımından elde edilen profillerin kaliteleri karşılaştırılmıştır.

Abvabi vd. (2017), makaralı bükme ile şekillendirmede şekillendirme sırasında elastik modüldeki bir değişikliğin geri yaylanma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yumuşak çelik, XF400 ve DP780 çelikleri kullanılarak V kesit imalatını deneysel olarak çalışmışlar ve FEA sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ön gerinim ile elastik modülün azaltılmasının, yüksek dayanımlı çeliğin makaralı bükme ile şekillendirilmesinde geri esnemeyi önemli ölçüde etkilediğini, daha yumuşak bir çelik kullanıldığında ise etkisinin daha az olduğunu göstermektedir.

Cha vd. (2013), kesitlerin şekillendirilmesini simüle etmek için form makarası ve sac malzemenin temas noktasında Lagrange tekniğini kullanarak elastik-plastik sonlu elemanlar yöntemini baz alan sayısal bir analiz programı geliştirmişlerdir. Üç istasyonlu makaralı bükme tezgahında hem yumuşak çelikten hem de yüksek dayanımlı çelikten yapılmış ürünlerin şekillendirme sonrasında meydana gelen burulma ve boyuna eğilme miktarları ölçülmüş ve FEA sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçların, geliştirilen FEA modeli ile uyumluluk gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Poursina vd. (2008), makaralı bükme hattından çıkan simetrik kanal kesitine sahip bir profilin, boyuna eğilme kusurunu engellemek için yapay bir sinir ağı(BPANN) hem de regresyon analizi geliştirmişlerdir. BPANN için bir eğitim seti hazırlamak amacıyla bazı sonlu eleman simülasyonları yapılmıştır. Yapay sinir ağının eğitiminde giriş verileri olarak; sac kalınlığı, flanş genişliği, büküm açısı ve sürtünme katsayısı kullanılmış, belirtilen çıktı olarak ise maksimum aşağı doğru eğilme kullanılmıştır. FEA ve BPANN sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu

görmüşlerdir.

Paralikas vd. (2009), sonlu elemanlar (FEA) yöntemini kullanarak, makaralı bükme şekillendirme işlemi parametrelerinin, hat hızı, istasyonlar arası mesafe, form makaraları arası boşluk ve form makarası çapının profil kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Moneke vd. (2021), CR300LA malzemesinden U profil kesiti ile yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalarda makaralı bükme işleminde gerilmeleri azaltmak için form makaraları arasındaki boşluğu optimize eden deneysel ve sayısal bir model geliştirmişlerdir.

Cheng vd. (2022), makaralı bükme işlemindeki karmaşık doğrusal olmayan elastoplastik davranışları ve büküm kusurlarını araştırmak için AHSS MS1500 malzemesin kullanarak sayısal bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen sayısal model ile burulma hatasının mekanizması ele alınmış ve şekillendirme stratejisinin burulma hatası üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tehrani vd. (2006), SAE 1020 çeliğinden boru profil üretimi sırasında kenar dalgalanmasını tahmin etmek için sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Bu tip kesitler için potansiyel olarak sınırlayıcı bir faktör olarak kenar dalgalanmasının önemi açıklanmış, ardından birinci istasyonda profil açısını artırmanın birinci ve ikinci istasyon arasındaki şerit kenarının düzlüğü üzerindeki etkisinin sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, birinci istasyondaki profil açısının belirli bir sınırı aşması durumunda, ikinci istasyonun form makaraları tarafından uygulanan ters eğmenin yerel kenar burulmasına neden olabileceğini göstermiştir.

Esposito vd. (2018), makaralı bükme yöntemiyle S320GD malzemesinden b profil üretimini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Bir 3D şerit modeli önermişler ve yaklaşımın, çok düşük bir hesaplama süresi avantajı ile yerel plastik birim şekil değişim birikimi açısından iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Boyuna eğilme kusurunun, sürtünmeden, form makaralarının neden olduğu basınçtan ve iki istasyon arası mesafeden etkilendiğini görmüşlerdir. Bununla birlikte, 3B şerit modeli, aşırı deformasyonun neden olduğu kopmaları tahmin etmek veya önceden var olan ekipman düzeni için yeni malzemenin şekillendirilebilirlik sınırını vurgulamak için yararlı bir şekilde kullanılabilir. Önerilen model, birim şekil değiştirme alanının ve gerilme üç eksenliliğinin daha iyi hesaplanmasına izin vererek hasar modellerinin uygulanması için daha uygun hale getirir.

Punin vd. (2013), bir makaralı bükme makinesinde büküm işlemleri sırasında

kesitlerin deformasyonunu incelemişlerdir. İnce kesitli yarı mamuller, makine istasyonları arasında uzunlamasına yönde dengesiz hale gelebilir bu durumda profil için belirtilen uzunluktan daha kısa bir ürün oluşmasına neden olabilir. Bu olguyu açıklamak için Euler yöntemi kullanmışlar ve ürünün boyundaki değişimi belirlemek için hesaplamalar yapmışlardır. Azalmanın boyutu, şerit üzerindeki gerilime, tezgâhın istasyon sayısına, istasyonlar arası mesafeye ve yarı mamulün kalınlığına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Egger vd. (2022), makaralı bükme şekillendirme ve yüksek frekanslı endüksiyon kaynağından oluşan bir boru üretim sürecinin simülasyonu için tam olarak birleştirilmiş üç boyutlu bir sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Çoklu fizik modeli, ikili ağ yöntemine dayanmaktadır. Kaynaklı borunun ve kaynak dikişinin geometrisinin, form makaraları üzerindeki kuvvetin, bant kenarları boyunca sıcaklığın ve ısıdan etkilenen bölge içindeki sertlik dağılımının gerçekçi bir şekilde simüle edilebileceğini göstermişlerdir.

Hong vd. (2001), tarafından yapılan sayısal çalışmalarda AISI1015 çeliğini kullanarak U profili ile yapılan sonlu elemanlar çalışmalarında, malzeme özelliklerinin, takım tasarımının ve deformasyon hızının deformasyon bölgesini etkilediğini bildirmişlerdir.

Park vd. (2010), Al3003 H3 alüminyum alaşımından yapılmış bir otomotiv parçasının makaralı bükme ile şekillendirilmesini sonlu elemanlar yazılımı olan Marc Mentat yazılımı ile incelemişlerdir. Boyuna birim şekil değişiminin dağılımı, geri esnemenin analizi, gereksiz deformasyon sonucu proseste meydana gelen başarısız sonuçlar gibi birçok önemli sonucu incelemişler ve sonuçları çelik malzemeye göre karşılaştırmışlardır. Alüminyumun boyuna birim şekil değişimi dağılımının, geri yaylanma açısının ve gereksiz deformasyonların çelikten daha yüksek olduğunu bulmuşlardır.

Bu bağlamda, karmaşık bir yapı olan makaralı bükme işlemi için makine ve form makaraları tasarımı kolay ve daha az maliyetle tasarlanmıştır. Bu yazılımlar ve deneysel çalışmalar sayesinde, makaralı bükme işlemi sırasında meydana gelen birçok kusur en aza indirilmiştir. Özellikle son yıllarda, tasarım öncesi problemlerin birçoğu, sonlu elemanlar yazılımlarının geliştirilmesi ile tahmin edilerek önlenabilir hale gelmiştir. Endüstriyel üretimde makaralı bükme işleminin önemi her geçen gün artmaktadır, bu nedenle bu alanda yapılan çalışmalar giderek daha önemli hale gelmektedir.

2.2.3. Esnek makaralı bükme (FRF) ile yapılan çalışmalar

Esnek makaralı bükme (FRF), otomotiv, demiryolu, gemi inşaatı ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan değişken kesitli profiller üretmek için geliştirilmiş makaralı büküm işleminin yeni ve gelişmiş bir çeşididir. Tüm yeni şekillendirme süreçlerinde olduğu gibi, FRF'nin deformasyon mekaniği hala tam olarak anlaşılamamıştır ve bu nedenle deneysel sonuçları sonlu elemanlar analizinden elde edilen sayısal tahminlerle birleştirilerek imalat kusurları araştırılmaktadır (Kasei vd., 2015).

Woo vd. (2018), yumuşak çelik (SPCC), SPFC590 ve SPFC1180 malzemelerinden trapez U, konveks U ve konkav U profil imalatı sırasında süreç değişkenlerinin boyuna eğilmeye etkisini deneysel ve sayısal olarak inceleyip karşılaştırmışlardır. Sonuçlar boyuna eğilmenin temel sebeplerinden birinin şekil değişimi sırasında oluşan boyuna birim şekil değiştirmelerden kaynaklandığını göstermiştir. Ayrıca boyuna eğilmeyi azaltmak için bir düzeltme doğrultma merdanesi kullanılmıştır.

Abeyrathna vd. (2022), DP600, DP1000 ve MS900 malzemelerini kullanarak esnek makaralı bükme yöntemiyle bir otomobil parçası üretip sonuçları sayısal olarak desteklemişlerdir. Çalışmalarında malzeme mukavemetinin ve büküm açısı artışının kenar dalgalanma eğilimi, geri yaylanma ve uç parlama üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Geri yaylanma ve uç parlama telafisi için bir yaklaşım geliştirmişler ve deneysel olarak bunu doğrulamışlardır. Kenar yüzde dalgalanma sorununun ise artan sayıda şekillendirme geçişiyle önüne geçilebileceğini tespit etmişlerdir.

Kim vd. (2017), SPFH540 çeliği kullanarak esnek makaralı bükme yöntemiyle değişken kesitli otobüs şasesi üretmişlerdir. Çiçek deseni ve büküm parametreleri ile form makaraları, sayısal analizle esnek makaralı bükme işlemi için optimize edilmiştir.

Kim vd. (2016), SPFC1180 malzemesinden esnek makaralı bükme yöntemiyle U kesitine sahip trapez, konveks ve konkav şekilli profillerde birim şekil değişimi dağılımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Boyuna eğilmeyi azaltmak için esnek makaralı bükme ile şekillendirmedeki yükleme modellerini araştırmışlardır. Sonuçlar boyuna eğilme yüksekliklerinin yükleme modellerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. İlk istasyondan son istasyona kadar kümülatif uzunlamasına birim şekil değişiminin, boyuna eğilme eğilimini tahmin etmede güvenilir bir indeks olduğu gösterilmiştir.

Kasaei vd. (2021), esnek makaralı bükme yöntemiyle St12 sac malzemesinden U kesitine sahip trapez, konveks ve konkav profillerinde buruşma kusurunu incelemişler. Buruşma limit eğrisine dayalı olarak geliştirilmiş olan buruşmanın başlangıcını tahmin etmeye yönelik metodoloji geliştirilmiştir. Ardından, sonlu elemanlar analizinde buruşma olasılığını tahmin etmek için buruşma limit eğrisine dayalı yeni bir kriter önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen yeni kriterin esnek makaralı bükme işleminde buruşmanın başlangıcını başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini ve sac levha şekillendirme işlemlerinin sonlu eleman analizinde buruşmayı tahmin etmek için kullanılmasının önerildiğini göstermektedir.

Woo vd. (2020), yapıştırıcı ile yapıştırdıkları çelik/alüminyum çift katmanlı levhaların esnek makaralı bükme (FRF) işlemi sırasında oluşan şekil kusurları üzerine araştırmalar yapmışlardır. Boyuna eğilme, buruşma ve delaminasyon gibi şekil kusurları, trapez, konveks ve konkav şekillere sahip üç farklı U profil kesiti üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar, proses kaynaklı boyuna birim şekil değiştirmelerin şekil kusurlarının oluşmasını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, boyuna birim şekil değiştirmeler büyük ölçüde bimetalik levhalara, bunların istiflenme sırasına ve levhalar arasında oluşan katmanın mekanik özelliklerine bağlıdır.

Yan vd. (2016), tek eksenli çekme testi verilerinin karmaşık metal şekillendirme proses simülasyonlarında kullanılmasının yetersiz olduğunu ve bu testlerden elde edilen verilerin Swift modeline dayalı ek malzeme verileri ile desteklenmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Hem tek eksenli çekme testinden elde edilen malzeme verileri hem de Swift modeli ile desteklenen malzeme verileri ile esnek rulo şekillendirme işleminin FEM modelleri ABAQUS ile oluşturulmuş ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Swift modeli kullanan simülasyonun, nihai enine kesit şekilleri açısından test edilen özellikten daha iyi çalıştığı bulunmuştur. Nispeten doğru bir simülasyon sonucu elde etmek için malzeme verilerinin uygun yapısal modelle desteklenmesinin vazgeçilmez olduğu kanıtlanmıştır.

Sreenivas vd. (2022), yaptıkları çalışmada 316 paslanmaz çeliği, DP780 ve DP1000 sac malzemelerini kullanarak değişken derinliğe sahip bir U profil kesitinin esnek makaralı bükme yöntemiyle şekillendirilmesi sırasında flanş kenarındaki uzunlamasına birim şekil değişimi dağılımını tahmin etmek için genişletilmiş bir yarı analitik model geliştirmişlerdir. Analitik tahminleri, temel koşullar için deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar. Bu çalışmada geliştirilen yeni analitik denklemlerin mevcut modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ve ilk kez esnek makaralı

bükme işleminde uzunlamasına birim şekil değişimi dağılımının tahminini mümkün kıldığını göstermişlerdir. Bu çalışmada sunulan boyuna kenar birim şekil değişimi için yeni analitik modelin, zaman alıcı FEA analizi yapılmadan önce daha hızlı süreç tasarımı ve optimizasyonu sağlayacağını ön görmüşlerdir.

2.2.4. Makaralı bükme yönteminde akıllı imalat teknolojisi destekli yapılan çalışmalar

Makaralı bükme büyük partideki imalatların kısa sürede imalatını hedefleyen bir üretim sistemidir fakat imalat süreçlerindeki en büyük problemlerden biride makine ayar parametrelerinin çok uzun ve zahmetli olmasıdır (Leonhartsberger vd., 2023).

Metaverse ve akıllı imalatın hızla gelişmesiyle birlikte, geleneksel imalat sürecinin dijitalleştirilmesi gerekliliği, endüstriler için zorlu bir görevdir.

Çin Elektronik Bilimi ve Teknolojisi Üniversitesi ve data M firması ortaklığında 2022 yılında son derece akıllı, esnek ve kendi kendine adapte olabilen bir makaralı bükme makinesi geliştirilmiştir. Makine, iyi bir kontrol sistemi ile kodlanmış kademeli motorlar tarafından kontrol edilen birkaç esnek hareketli ünitelerden oluşmaktadır. Ayrıca sistematik bir makine öğrenimi eğitim sürecinden elde edilen yüksek performanslı bir yapay zeka algoritması da bu makineye entegre edilmiştir (Ren vd., 2022).

Leonhartsberger vd. (2023), standart bir makaralı bükme makinesinin mekanik özelliklerindeki varyasyonların yeniden üretim süreçlerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu varyasyonların nedenlerini türetmek için deneyler ve simülasyonlar kullanmışlardır.

Traub vd. (2018), geliştirdikleri modelde, yardımcı sistemler sensör verileri gibi gerçek zamanlı işlem verilerini istenen işlem durumuyla karşılaştırmışlardır. Eğer bir uyumsuzluk gözlemlenirse, yardım sistemi bunun nedenini değerlendirir ve uygun ayarlamalar önerir. Sistem tarafından yürütülen işlemler hakkında ortak bir anlayış oluşturmak için, bu sistemlerdeki karmaşık karar verme süreci, matris çarpımlarına dayanan bir model ile basitleştirilmiştir. Bu uygulama sayesinde, operatör destek sistemlerinin, ürün kalitesi ve enerji verimliliği açısından makaralı bükme ile şekillendirme proseslerinin sürekli iyileştirilmesine nasıl başarılı bir şekilde katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Traub vd. (2019), makaralı bükme makinalarında sensör destekli bir üretim süreci için sistem geliştirmişlerdir. Makaralı bükme hattı, proses miktarlarını bir

referans prosete kaydetmek için kuvvet ve tork sensörleri ile donatılmış ve sonraki üretimlerde ayar parametrelerinin süresi azaltılmıştır. Bu sayede her partide eşit kalitede bir imalat gerçekleştirilmiş ve aynı zamanda operatörün işi de kolaylaşmıştır.

Lamprecht vd. (2021), geleneksel bir makaralı bükme tezgahının form makaraları olmadan şaftların doğrusal olmayan rijitlik davranışları incelenmiştir. Öncelikle hangi parametrelerin doğrusal olmayan davranışı etkilediğini bulmuşlar, böylece şaftın doğrusal olmayan rijitliğini açıklamak için uygun bir model geliştirmişlerdir. İki lineer radyal etkili yaya ve bir lineer olmayan döner yaya sahip iki destekli Timoshenko kiriş modelinin en iyi sonuçları gösterdiğini tespit etmişlerdir. Doğrusal olmayan rijitlik davranışının başlıca nedeni, tahrik tarafındaki iki yatağın çalışma boşluğu olduğunu tespit etmişler. Böylece, modelin şaftın doğrusal olmayan rijitlik davranışını tanımlamada başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Tablo 2.2. Makaralı bükme ile yapılan literatür çalışmaları

Yıl	Araştırmacı	Malzeme	Kesit şekli	Yöntem	Simülasyon
2011	Dönmez vd.	Alüminyum, yumuşak çelik	U	Deneyssel	Taguçi
1998	Watari vd.	-	U-V	Deneyssel	Amprük denklem
2013	Wiebenga vd.	DP780	V	Deneyssel	Robust optimizasyon
2023	Su vd.	Q235	Şapka	Deneyssel	Copra FEA
2010	Paralikas vd.	DP600	U	Deneyssel	Ls-Dyna
2015	Safdarıan vd.	St14	V	Deneyssel	Abaqus
2016	Abeyrathna vd.	DP780	U	Deneyssel	Copra FEA
2015	Bidabadi vd.	ASTM A283 C steel	U	Deneyssel	-
2016	Bidabadi vd.	UHSS	U	Deneyssel	ABAQUS
2016	Bidabadi vd.	AISI S201-07	U	Deneyssel	ABAQUS
2017	Abeyrathna vd.	DP780	V	Deneyssel	-
2017	Abeyrathna vd.	DP600, DP1000, MS900	U	Deneyssel	-
2017	Liu vd.	DP980	Şapka	Deneyssel	Copra FEA
2021	Suckow vd.	AA 7075	Boru profil	Deneyssel	Ubeco
2022	Zeinali vd.	6061- T6	U	Deneyssel	Abaqus
2020	Talebi vd.	AA6061-T6	U	Deneyssel	Abaqus
2015	Abvabi vd.	DP780	V	Deneyssel	Marc Mentat
2019	Liang vd.	HSS B700L	b	Deneyssel	Abaqus

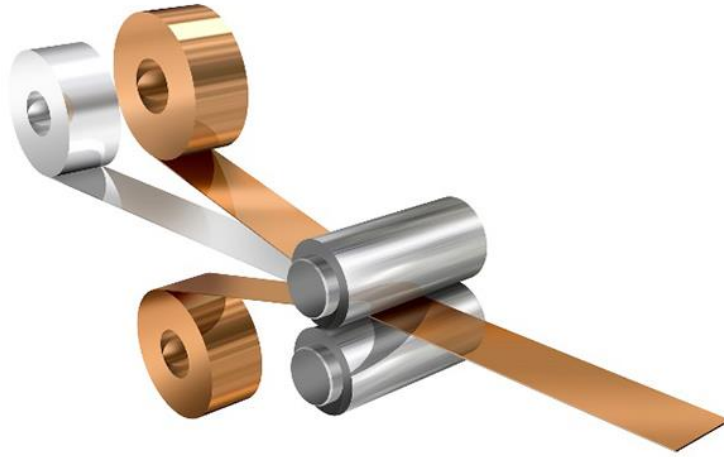
2023	Xu vd.	Alüminyum	Asimetrik kesit	Deneysel	Abaqus
2017	Weiss vd.	Thyssen 5CR12 Ti	C	Deneysel	Copra FEA
2022	Mehari vd.	DP980	U	Deneysel	Ls-Dyna
2009	Lindgren	AISI 301	U-V	Deneysel	Marc Mentat
2022	Wang vd.	AISI 301L	Asimetrik kesit	Deneysel	Copra FEA
2021	Wang vd.	Q235	Şapka	Deneysel	Abaqus
2018	Doğan	800CP	Koltuk kızıağı	Deneysel	Abaqus
2018	Li vd.	Galvaniz çelik	C	Deneysel	Marc Mentat
2018	Han vd.	UHSS	V	Deneysel	Abaqus
2021	Murugesan vd.	AA 5052	U	Deneysel	Ubeco
2023	Wiess vd.	AL 7075	V	Deneysel	Copra FEA
2011	Paralikas vd.	DP780	U-V	-	Ls-Dyna
1999	Kim vd.	-	Boru	-	FEA
2006	Tehrani vd.	SAE 1020	U	-	Abaqus
2015	Liu vd.	-	U	-	Matematik model
1973	Kiuchi vd.	-	-	-	Matematik model
1981	Jimma vd.	Karbon çelik, Paslanmaz Alüminyum	U	Deneysel	-
1984	Bhattacharyya vd.	Yumuşak çelik, Alüminyum	U	Deneysel	Matematik model
2001	Han vd.	-	-	-	Matematik model B spline
2017	Traub vd.	S235JR ve Docol Roll 100	U-C	-	Copra FEA
2008	Jeong vd.	-	U	-	Shape RF
2017	Abvabi vd.	Yumuşak çelik, XF400 ve DP780	V	Deneysel	Copra FEA
2013	Cha vd.	Yumuşak çelik, HSS	U	Deneysel	FEA
2008	Poursina vd.	Yumuşak çelik	Simetrik kesit	Deneysel	BPANN, Abaqus
2009	Paralikas vd.	DP serisi	U-V	-	Shape RF
2021	Moneke vd.	CR300LA	U	Deneysel	Marc Mentat
2022	Cheng vd.	AHSS MS1500	Şapka	-	Copra FEA

2006	Tehrani vd.	SAE 1020	Boru	-	Abaqus
2018	Esposito vd.	S320GD	b	Deneysel	Ls-Dyna
2013	Punin vd.	-	-	Deneysel	Euler
2022	Egger vd.	34Mn5	Boru	-	Marc Mentat
2001	Hong vd.	AISI1015	U	-	Copra FEA
2010	Park vd.	Al 3003	U	-	Marc Mentat
2018	Woo vd.	SPCC, SPFC590, SPFC1180	Trapez (U) Konveks (U) Konkav (U)	Deneysel	Abaqus
2022	Abeyrathna vd.	DP600, DP1000 ve MS900	Otomobil parçası	Deneysel	Copra FEA
2017	Kim vd.	SPFH540	Otobüs şasesi	Deneysel	Posco
2016	Kim vd.	SPFC1180	Trapez (U) Konveks (U) Konkav (U)	Deneysel	Abaqus
2021	Kasaei vd.	St12	Trapez (U) Konveks (U) Konkav (U)	Deneysel	Abaqus
2020	Woo vd.	Bimetalik (SPCC/ Al 1052)	Trapez (U) Konveks (U) Konkav (U)	Deneysel	Abaqus
2016	Yan vd.	Trip 590	Şapka	Deneysel	Abaqus
2022	Sreenivas vd.	316, DP780, DP100	U	Deneysel	Abaqus

3. RULO YAPIŞTIRMA (ROLL BONDING)

Günümüzde, iyi mekanik özellikler, hafiflik, korozyona ve aşınmaya karşı direnç ve termal kararlılık gibi özel yetenek ve özelliklere sahip çift katmanlı kompozit levhaların kullanımına artan bir ihtiyaç vardır (Heydari vd., 2017). Isıtma, soğutma, havalandırma, havacılık, otomotiv, gemi ve elektrik endüstrileri gibi çeşitli alanlarda bu malzemeler kullanılmaktadır. Çift katmanlı saclar farklı özelliklerdeki iki metalin, yapıştırıcı ile yapıştırma, basınç kaynağı, soğuk ve sıcak haddeleme, patlatma kaynağı ve rulo yapıştırma (roll bonding) gibi çeşitli yöntemlerle üretilmesidir.

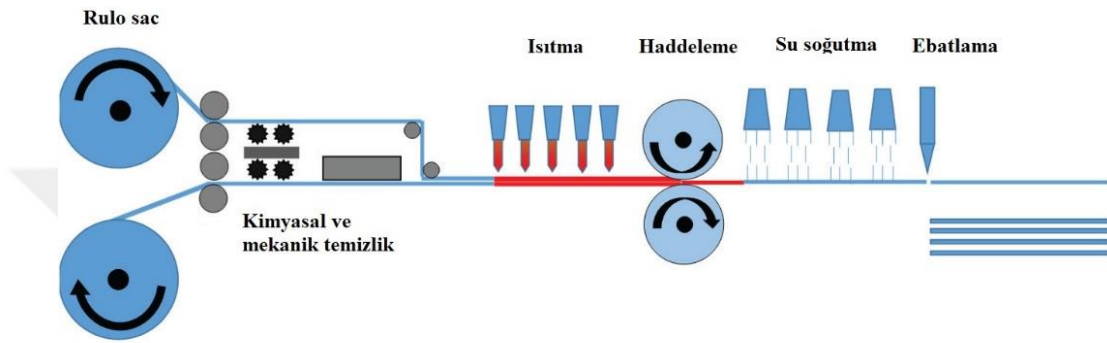
Rulo yapıştırma yöntemi, daha kısa üretim hatları, daha düşük sermaye yatırımı ve düşük üretim kapasitesinde kullanım avantajlarına sahiptir (Eslami vd., 2011). Rulo yapıştırma işlemi, aynı boyuta sahip iki sac plakanın yüzey hazırlık işlemleri yapıldıktan sonra yüz yüze birleştirilerek, önce ısıtılıp sonra haddelenmesi ile gerçekleşir. Rulo yapıştırma tekniği çift katmanlı kompozit plaka üretmek için önemli bir tekniktir, sıcaklık ve yuvarlanma basıncı etkisiyle farklı özellikteki levhalar birleştirilmektedir. Magnezyum-alüminyum, alüminyum-çelik, alüminyum-titanyum ve bakır-alüminyum dahil olmak üzere birçok çeşitli çift katmanlı kompozit plaka bu yöntemle üretilir (Grydin vd., 2013). Bu yöntemle iki tabakalı kompozit levhaların yanında ikiden daha fazla malzemenin birleştirilerek çok katlı kompozit yapılar oluşturulabilir.



Şekil 3.1. Üç katlı kompozit yapının şematik gösterimi (Köhler, 2006)

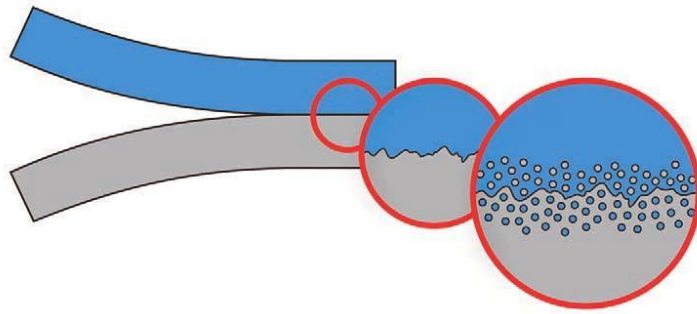
Rulo yapıştırma yöntemi ile çift katmanlı levha imalatının endüstriyel uygulaması Şekil 3.2’de görülen proses şemasındaki gibidir. Rulodan çıkan farklı özellik ve kalınlıktaki sac malzemeler önce yüzeydeki yağ, kir, toz v.b. gibi

kalıntılardan arındırılmak için kimyasal bir yüzey temizleme işlemine tabi tutulur. Sonrasında yüzeylerin mekanik anlamda birbirine bağ kurabilmesi için yüzeyde bir mekanik temizlik ile yüzey uygun hale getirilir. Sonrasında levhalar üst üste istiflenerek belirli bir süre ısıtılıp hadde silindirleri arasından geçirilerek kalınlık azaltma ile birleşimleri sağlanır. Kalınlık azaltma işlemi ihtiyaca göre birkaç çevrim tekrar edebilir. Rulo yapıştırma tezgahından çıkan çift katmanlı levhalar soğutma işleminin ardından uygun ölçülerde ebatlanıp kullanıma hazır hale getirilirler.



Şekil 3.2. Rulo yapıştırma işleminin şematik gösterimi (Avsec vd., 2019)

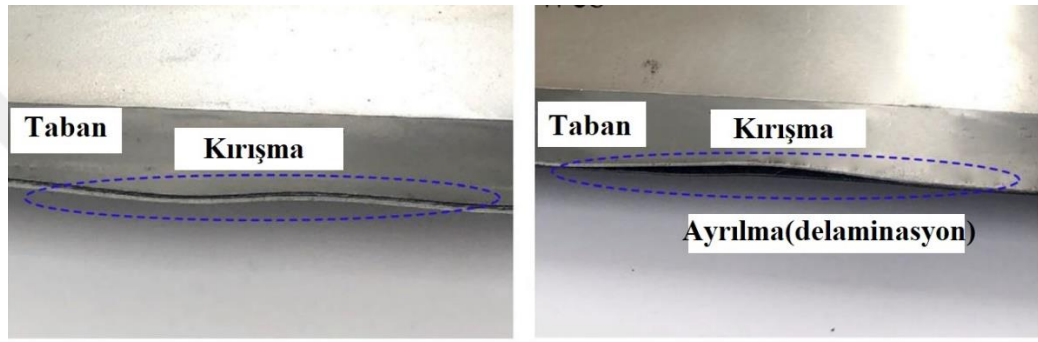
Rulo yapıştırma yönteminin iyi anlaşılabilmesi için, birleştirilecek olan metallerin cinsi, yüzey hazırlık işlemleri, tavlama süresi ve sıcaklığı, kalınlık azaltma oranı, çevrim sayısı, hadde silindirlerinin hızı, hadde silindirlerinin çapı gibi değişkenleri ve bu değişkenlerin kullanılan malzemelerle olan etkileşimlerinin çok iyi bilinmesi gerekir.



Şekil 3.3. Rulo yapıştırma prosesi sırasında birleşim bölgesinde meydana gelen difüzyonun şematik gösterimi (Merkblatt 383, 2013)

Rulo yapıştırma imalatında karşılaşılan en büyük sorunların başında iç yapıdaki birleşimin homojen olmayan bir dağılım göstermesidir. İç yapıda meydana gelen bu homojen düzensizlikler, üretilmiş malzemenin mekanik özelliklerinde de büyük

değişiklikler oluşturmaktadır. Rulo yapıştırma ile imal edilmiş ürünlerde en sık karşılaşılan kusurların başında kenar yüzeylerde kırışma (bkz. Şekil 3.4.(a) ve birleşim bölgesinde levhaların birbirinden ayrılması (delaminasyon) (bkz. Şekil 3.4.(b) gelmektedir. Çift katmanlı levhaların mamul ürüne dönüşüm sırasında uygulanan mekanik zorlanmalar karşısında levhaların farklı mekanik özelliklerinden dolayı uygulanan kuvvetlere farklı tepkiler verecektir bu durumda levhalar birbirinden farklı uzama özellikleri gösterecek ve kırışma denilen imalat kusuru ortaya çıkacaktır. Bir diğer kusur ise iç yapının homojen bir özellik göstermemesinden dolayı birleşim arayüzünün birbirinden ayrılması (delaminasyon) olayının gözlenmesidir.



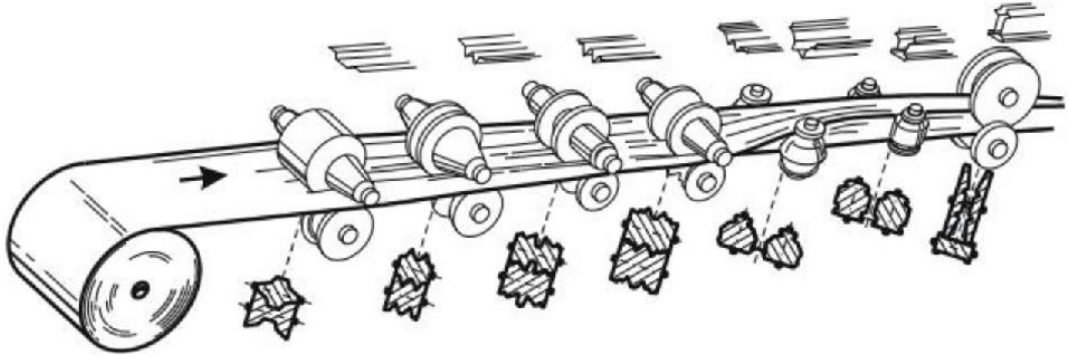
(a)

(b)

Şekil 3.4. Çift katmanlı levhalarda yan büküm kenarında oluşan (a) kırışma ve (b) ayrılma (delaminasyon) kusuru (Woo vd., 2020).

4. MAKARALI BÜKME (ROLL FORMING)

Makaralı bükme, işlenen malzemenin hacmi göz önüne alındığında, sac metal ürünlerinin üretimi için en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biridir (Halmos, 2005). Makaralı bükme (roll forming) ya da soğuk rulo şekillendirme (CRF), dünya çapında bir metal şekillendirme işlemidir ve bugün makaralı bükme ile şekillendirme ürünlerini binalar, araçlar, uçaklar, mobilya ve ev aletleri gibi çok çeşitli uygulamalarda bulabiliriz (Lindgren, 2009). Makaralı bükme tekniği, ardı ardına dizilmiş form makaraları kullanılarak sac şeritten boru, kapalı veya açık profil üretme işlemidir. Bu operasyon sırasında her bir makara bükme işlemine ufak katkılar sağlar ve istenen kesitte bir profil elde edilinceye kadar bu işlem sürer (Panton vd., 1996). Genel olarak makaralı bükme yöntemini Şekil 4.1'deki gibi ardışık makaralar arasında rulo halindeki sac malzemesinin geçirilmesi yoluyla istenilen profil kesitini kademeli olarak elde etmek olarak tarif edilebilir.



Şekil 4.1. Makaralı bükme proses şeması (Han vd., 2018)

İlk makaralı bükme makinesi 1910 yılında, otomobil gövdelerinde kullanılan çamurlukların üretimi için, Carl M. Yoder tarafından tasarlanıp üretilmiştir. Makaralı bükme yöntemiyle bükme konusundaki bilginin araştırılması ve geliştirilmesi için 1992 yılının başlarında Net Şekil İmalatı Mühendislik Araştırma Merkezi'nde (ERC / NSM) makaralı bükme üzerine birleşik bir proje başlatılmıştır (Duggal, 1995).

Makaralı bükme ile şekillendirme işlemi, istenilen uzunlukta ve sabit kesitler içeren ürünleri imal eden yüksek verimli ve yüksek hızlı bir üretim sürecidir. Makaralı bükme işlemi ile imal edilen parçalar arasında market rafları ve dikmeleri, beyaz eşya bileşenleri, PVC pencere profilleri, kablo taşıyıcı profilleri, otomobil parçaları ve otoyol bariyerleri gibi çeşitli örnekler verilebilir. Makaralı bükme uzun veya çok büyük miktarda tedarik edilmesi gereken parçaların üretimi için esnek ve hızlı bir

Üretim yöntemidir (Sweeney & Grunewald, 2003). Diğer retim yöntemleriyle üretilmesi zor olan boru profiller ve ince kesitli profiller bu yöntemle rahatlıkla retilabilir. Şekil 4.2’de makaralı bükme ile üretilmiş bazı profil kesitleri görülmektedir.



Şekil 4.2. Makaralı bükme yöntemiyle üretilmiş profil kesitleri (Hisada, 2023)

Makaralı bükme ile őekillendirilmiő ürünler, kesit profillerinin geometrisine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma açık, kapalı, kilitli ve kaynaklı olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 4.3. Makaralı bükme ürünlerinin kesit tipine göre sınıflandırılması (Sidek, 2013)

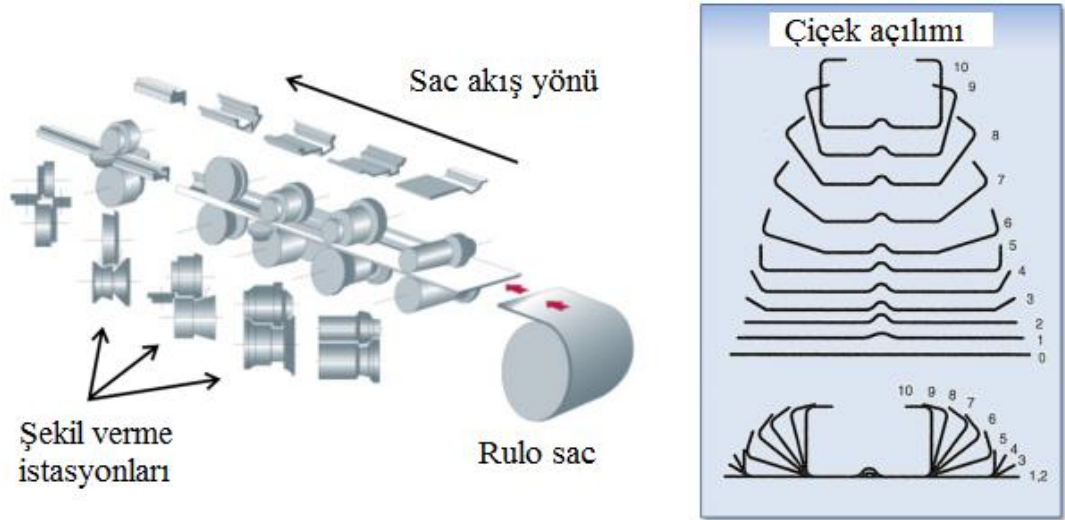
Birçok endüstri, özellikle mühendislik uygulamaları yapan firmalar olmak üzere, makaralı bükme ürünlerini kullanmaktadırlar;

- Konstrüksiyon-Yapısal bölümler, kapı kasaları, kılavuz kanalları ve kepenk ıtaları.
- Bina- pencere çerçeveleri, çatılar, oluklar ve perde duvar bölümleri.

- Otomobil güçlendirici parçalar, tamponlar, şasi, kapı çerçeveleri ve panel bölümleri.
- Uçak gövdesi kirişleri, helikopter kanadı ön kenarları ve jet motoru contaları.
- Ev aletleri, fırınlar için kulplar, çekmece rayları, pervazlar ve yapısal kirişler.
- Mobilya ve aksesuarları, metal dolaplar, raflar, dikmeler ve yatay taşıyıcılar.
- Otoyol bariyerleri, yol işaretleri, korkuluklar.

Endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla geleneksel makaralı bükme tezgâhları veya özel olarak dizayn edilmiş tezgâhlar kullanılır.

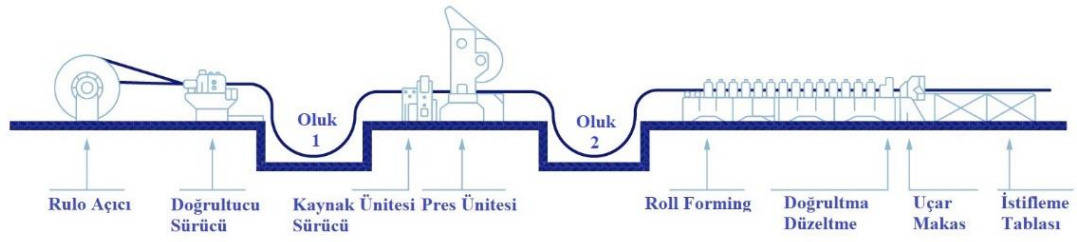
Bu yöntemde esas prensip; sac malzemenin elastikiyet sınırında bükülerek şekillendirilmesidir. Üretilecek parçanın tüm boyu, hep aynı ölçü ve kesitte olması gerekir. Parçanın eninde veya çaprazında yapılması gereken işlemlerde veya operasyon adımlarının eşit ölçülerde olduğu hallerde, bu yöntemde üretim yapılabilir. Üretilecek parçanın final kesitinden yola çıkarak, operasyon kademeleri (çiçek açılımı) belirlenir. Şekil 4.4’de nihai profil kesitinden yola çıkarak bir sigma profilin kademe kademe büküm aşamaları (çiçek açılımı) gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Makaralı bükme tezgahı görseli ve sigma profil kesitinin operasyon kademeleri (çiçek açılımı)

Geleneksel bir makaralı bükme tezgahında arka arkaya dizilmiş bir den fazla form istasyonu bulunur. Her istasyonda sac malzemeye şekil veren alt, üst ve bazı durumlarda yan form makaraları olabilir. Geleneksel bir makaralı bükme tezgâhı genel olarak Şekil 4.5’de gösterilen kısımlardan meydana gelmektedir. Ayrıca hatlar

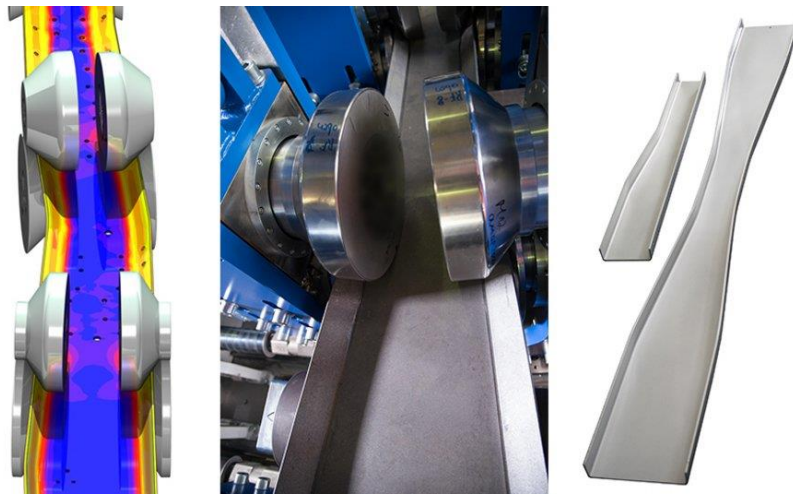
arasında optimizasyonu sağlamak için oluk denilen belirli yükseklik ve genişliklerde çukurlar bulunmaktadır.



Şekil 4.5. Makaralı bükme tezgâhı şematik gösterimi

- Rulo sac açma makinesi
- Doğrultucu ve sürücü
- Kaynak ünitesi sürücü
- Pres ünitesi
- Makaralı bükme ünitesi
- Doğrultma düzeltme istasyonu
- Uçar makas
- İstifleme tablası

Geleneksel makaralı bükme işlemi, tek tip bir enine kesite sahip bileşenlerin imalatı ile sınırlıdır, esnek makaralı bükme ise genişlik ve derinlikte değişkenlik gösteren parçalar üretilebilir. Bu sayede daha fazla esneklik ve daha fazla form çeşitliliğine sahip parçalar rahatlıkla üretilebilir. Bu imalat yöntemi ile üretilen profiller sayesinde gelen yüklere göre profil kesiti optimize edilmiş oluyor ve bu sayede maliyetler minimumda tutulmuş oluyor.



Şekil 4.6. Esnek makaralı bükme (FRF) (Data M, 2021)

Esnek makaralı bükme yöntemi ile özellikle otomotiv sektöründe aynı parçanın farklı yerlerinde farklı kesit ölçüleri elde edilebilir (Yan vd., 2014). Esnek makaralı bükme şekillendirme prosesinin önemli parametrelerinden biri, istasyonlar arası mesafenin tasarımında kilit rol oynayan deformasyon uzunluğudur. Esnek makaralı bükme ile şekillendirmede, geleneksel makaralı bükme şekillendirmenin aksine istasyonlar arası mesafenin her yerde aynı olmaması gerekmektedir (Badparva vd., 2023).

4.1. Rulo sac açma makinesi

Entegre bir üretim hattında, ilk başta yer alan makine Şekil 4.7’de görülen rulo sac açma makinesidir. Yüksek sayıda olan ürünün seri bir şekilde üretimi için, tabaka sac yerine rulo sac kullanmak gerekir. Rulo saclar üretilecek ürüne göre genişliği ayarlanıp bobin halinde sarılmış saclardır. Rulo saclar bobin gibi sarılmış olduklarından, yüzeyleri iç büküm bir deformasyona uğramıştır. Soğuk halde olan sacın zemberek gibi harmonik sarımı sırasında büküm direnci yüklenmiştir. Endüstride kullanılan mekanik, hidrolik, çift tamburlu ve paletli olmak üzere çeşitli tiplerde rulo açıcılar vardır.



Şekil 4.7. Rulo sac açma makinesi (İMT machinery, 2021)

4.2. Doğrultucu ve sürücü

Rulo açma makinesinde açılan saclar sarım sırasındaki eğriliğin giderilmesi için rulo açıcının hemen önüne yerleştirilen Şekil 4.8’de görülen bir diğer makine olan rulo sac doğrultma ve sürme makinesi ile de doğrultup daha sonra sürülmesi gerekir. Aksi

halde rulo, doğrultulamamış olur. Bu durumda olan rulo, preste bulunan kalıba sürülemez. Preste bulunan kalıba sürülen ve beslenen rulo sac, pres koç tablası iniş ve kalkışlarına senkronize olacak bir şekilde beslenmek zorundadır. Presin her bir vuruşu, bir iniş ve bir yukarı kalkış olarak gerçekleşen doğrusal bir harekettir. Bu iki yönde hareketin tamamlanması sonucu; presin bir kursu (strok) oluşur. Rulo sac besleme makinesinin sacı belirli hatvelerde sürmesi gerekir. Örneğin dakikada 60 vuruş yapan bir presin, 30 saniyesi iniş diğer 30 saniye ise kalkış hareketlerinde geçecektir. Alt kalıba üst kalıbın çarpması için geçen süre 30 saniyelik bir zaman diliminde gerçekleşecek demektir. Baskı operasyonundan sonra ise, presin koç tablasına bağlı olan üst kalıp yukarı kalkıp alt kalıptan ayrılmış olacaktır. İşte tam bu iniş veya yukarı kalkış (kalıpların birbirinden ayrılma) süresinde 0,1-0,2 saniye gibi rulo sac sürülmüş olmalıdır. Eğer bu besleme süresi ve besleme hatveleri iyi ayarlanmaz ise rulo bant kalıplar arasında sıkıştırılmış olur. Rulo sacın sürme hatvelerinin progresif kalıplarda, operasyon istasyonları arasına göre, adımlı kesmelerde de işlem parça boyutlarına göre ayarlanması gerekir. Rulo besleme makineleri büyük panel saclarının preslenmesinde kullanılacaksa; tahrik edilmesi servo motorlu ve hidro-pnömatik sıkma çeneli olmalıdır. Eğer dar bantlar kullanılmakta ise böyle durumlarda pnömatik işlevli olanların seçimi yeterli olacaktır.

Ayrıca presin iniş ve çıkışlarındaki kombinasyonu hattın hızı ile senkronize edebilmek için bu ünitenin çıkışına (bkz. Şekil 4.5.) oluk denilen belirli yükseklikte çukurlar açılır.



Şekil 4.8. Rulo doğrultma ve sürme makinesi (İMT machinery, 2021)

4.3. Kaynak ünitesi

Makaralı bükme hattının sürekli beslenmesi için biten rulo sacı ile bir sonraki rulo sacının birbirine birleştirilmesi Şekil 4.9'da görülen makas kaynak hattında yapılır. Burada biten rulo sac ile yeni rulo sac önce uçları kesilerek düzeltme işlemi yapılır daha sonra alın altına getirilerek kaynatma ve temizleme işlemi yapılır. Bu operasyon sırasında makaralı bükme hattının mutlaka durdurulması gereklidir.



Şekil 4.9. Makaralı bükme hattı makas kaynak ünitesi

4.4. Pres ünitesi

Makaralı bükme hattına girmeden önce üretilmek istenen profil kesitinin üzerinde herhangi bir geometrik şekil varsa veya profil üretiminde istenen boyda kesme işlemini yapmak için uçar makas sisteminin işini kolaylaştırmak amacıyla pres hattında sac malzeme üzerine uygun geometrik boşaltmalar Şekil 4.10'da görülen pres ünitesinde yapılır. Pres ünitesi, hat hızı ile senkronize bir şekilde hareket etmesi için hemen ön kısmında yine aynı şekilde bir oluk açılır (bkz. Şekil 4.5.).



Şekil 4.10. Roll forming hattı pres ünitesi (İMT machinery, 2021)

4.5. Makaralı bükme ünitesi

Pres hattından çıkan malzeme istenilen profil kesitini oluşturmak için art arda dizilmiş form makara setlerinin bulunduğu Şekil 4.11’de görülen makaralı bükme hattına girer. Her bir istasyonda saca nihai şeklini vermek için büküm operasyonları gerçekleştirilir. Hat üzerinde bulunan istasyon sayısı üretilecek profil kesitine göre tasarımcı tarafından belirlenir. Her bir istasyonda sac malzemeye nihai şeklini verecek olan alt ve üst form makaraları bulunur ve gerekli istasyonlarda yan form makaraları da ilave edilebilir.



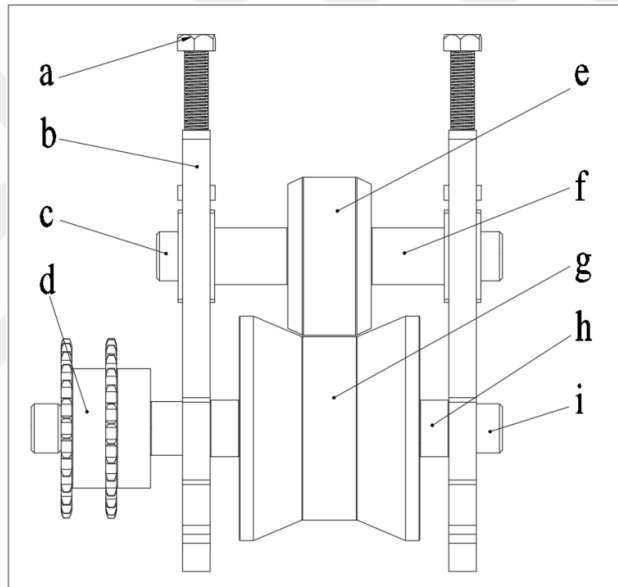
Şekil 4.11. Makaralı bükme ünitesi (Dimeco, 2021)

Makaralı bükme hatları istasyon sayısına göre en az bir redüktörlü motor ile tahrik edilir. Kullanılacak motorun gücü, makinede üretilecek profilin kesiti, istasyon

sayısı, sac malzemenin türü ve kalınlığına göre yapılan hesaplamalar sonucu belirlenir. Roll form hatlarında tahrik sistemi zincir dişli sistemi veya dişli çark sistemi şeklinde olabilir.

4.5.1. Makaralı bükme istasyonu bileşenleri

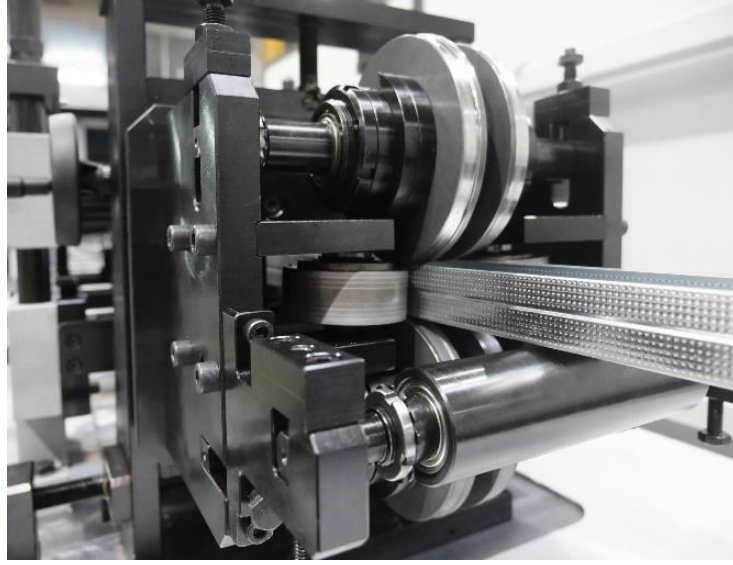
Bir makaralı bükme hattı ardı ardına dizilmiş sac malzemeye her bir adımda şekil veren bir dizi form istasyonlarından oluşur. Şekil 4.12’de bir form istasyonunda bulunan ana bileşenler görülmektedir. Her bir istasyon sağ ve sol olmak üzere birer istasyon bloğu, alt ve üst miller, form makaraları, tahrik dişlisi, form makaralarını merkezleme için kullanılan burçlar ve ihtiyaca göre yan form makaralarından oluşmaktadır.



Şekil 4.12. Makaralı bükme makinasında bulunan ana bileşenler a) ayar mili b) istasyon ayağı c) üst mil d) tahrik dişlisi e) üst form makarası f) üst burç g) alt form makarası h) alt burç i) alt mil

4.6. Doğrultma düzeltme istasyonu

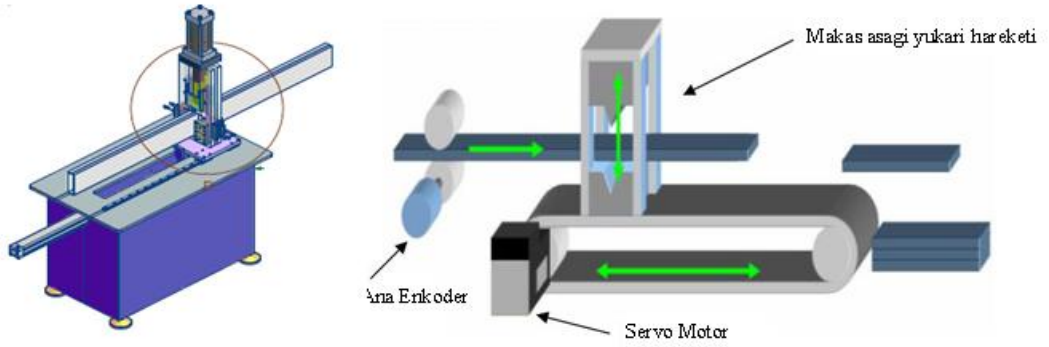
Makaralı bükme hattından çıkan profil kesitine istenen tolerans ölçülerini sağlayabilmek adına son kısma Şekil 4.13’deki gibi bir kalibrasyon istasyonu yerleştirilir. Bu kalibrasyon istasyonu nihai profil kesitinde olabilecek muhtemel kusurların önüne geçebilmek adına profile uygulanan bir kalibrasyon şekillendirmesidir.



Şekil 4.13. Düzeltilme doğrultma istasyonu

4.7. Uçar makas

Makaralı bükme hattından çıkan profil istenen boy ve uzunlukta Şekil 4.14’de görülen uçar makas yardımıyla kesilir. Hattın hızını kesmemek için uçar makas sistemine servo motor yardımıyla hareket verilir. Daha sonra üretilen parçalar istif ünitesine yerleştirilir.



Şekil 4.14. Uçar makas ünitesi

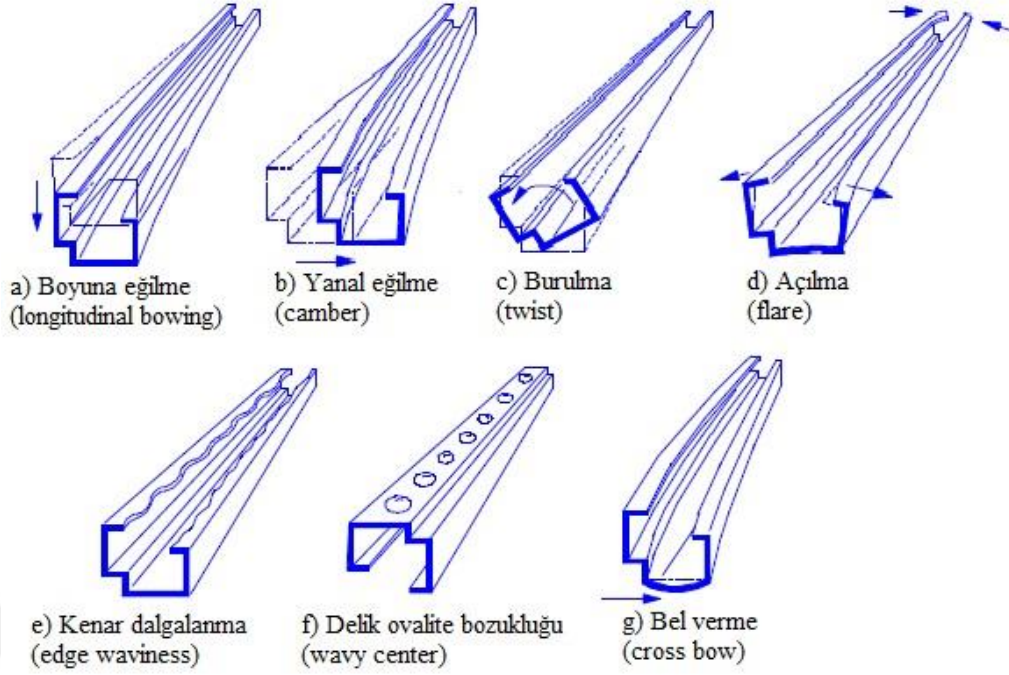
Makaralı bükme, istenilen kesite sahip profilleri küçük toleranslarda ve sürekli aynı ölçüde üretmeye imkân sağlar. Makaralı bükme yöntemi oldukça verimli bir üretim yöntemidir ve bu yöntemin kullanımı her yıl artmaktadır. Yöntemin diğer metal şekillendirme işlemlerine kıyasla avantajı, zımba, kaynak, sıkma vb. ilave işlemlerin prosese dahil edilebilmesidir ve bu nedenle doğrudan kullanıma hazır profiller üretmek mümkündür (Watari & Ona, 1998). Plastik şekil verilebilen tüm malzemeler bu yöntemle üretilebilir, örneğin alüminyum, çelik, paslanmaz çelik, bakır v.b. Profilin

üretilebileceği hız, kesitin toleransına, malzemeye ve makinenin malzeme ile ne kadar hızlı beslenebileceğine bağlı olarak 15 m/dk ile 185 m/dk arasında değişebilir. Makaralı bükme ile üretilen profillerin malzeme kalınlıkları 0,15 mm'den 19 mm ye kadar değişebilir (Lindgren, 2009).

4.8. Makaralı bükme imalatında ortaya çıkan kusurlar

Makaralı bükme ile imalat sırasında tasarımdan kaynaklı veya proses değişkenlerinin optimizasyonundan kaynaklı bir takım imalat kusurları ortaya çıkabilir. Ayrıca, çelik malzemenin ister soğuk haddelenmiş olsun ister sıcak haddelenmiş olsun, artık gerilmelerin varlığı büyük bir sorundur. Aynı hattan çıkan rulo saclar bile kendi içinde farklı özellikler gösterebilmektedir. Makaralı bükme işleminde de şekillendirmeyi güçleştiren temel neden gerilmelerin dengesiz dağılımıdır. Bir diğer parametre ise form istasyonlarının ayarlanırken düzgün bir şekilde hizalanmaması ve form makarası boşluklarının uygun şekilde verilmemesidir. Bu sebeple tasarımdan imalata kadar olan süreçte bu parametrelerin iyi irdelenmesi gerekmektedir.

Makaralı bükme imalatında en çok karşılaşılan üretim kusurları, boyuna eğilme, yanal eğilme, burulma, geri yaylanma, kenar yüzeyde dalgalanma, delikli profillerde deliklerde meydana gelen şekilsel bozukluklar ve bel vermedir. Bu kusurlara etki eden parametreler ise; büküm açısı artışı, istasyonlar arası mesafe, büküm kenarı yüksekliği, sac kalınlığı, form makara çapı, hat hızı, form makaraları arasındaki boşluk ve sürtünmedir.

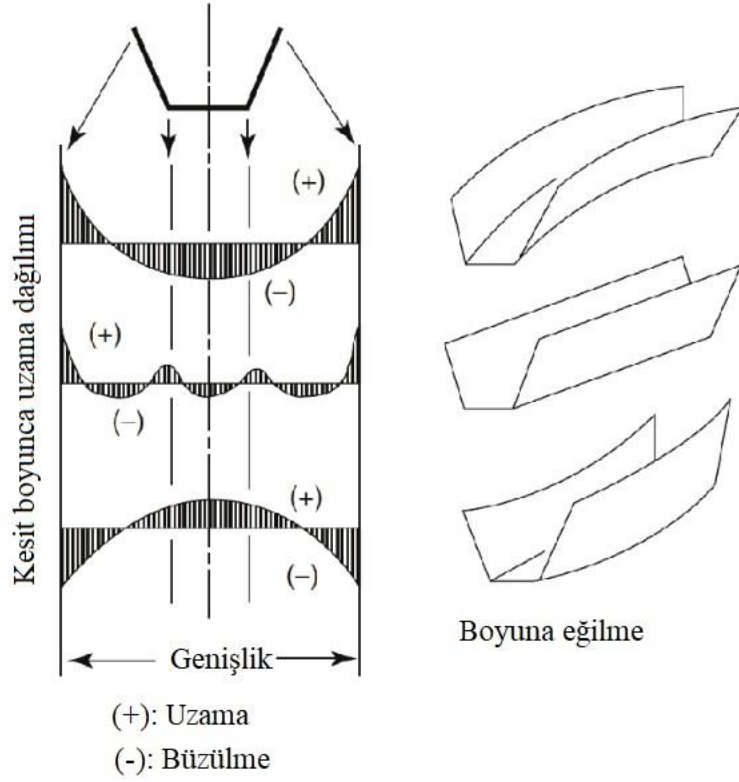


Şekil 4.15. Makaralı bükme ile şekillendirme işleminde meydana gelen kusurlar (Halmos, 2005)

Bu kusurlar genel olarak imalat sırasındaki tutarsızlıklardan kaynaklanmaktadır. Bu kusurların önüne geçmek için parça tasarımı, malzeme türleri, takım sistemi ve işlem sıraları gibi birçok faktör dikkate alınmalıdır (Sidek, 2013).

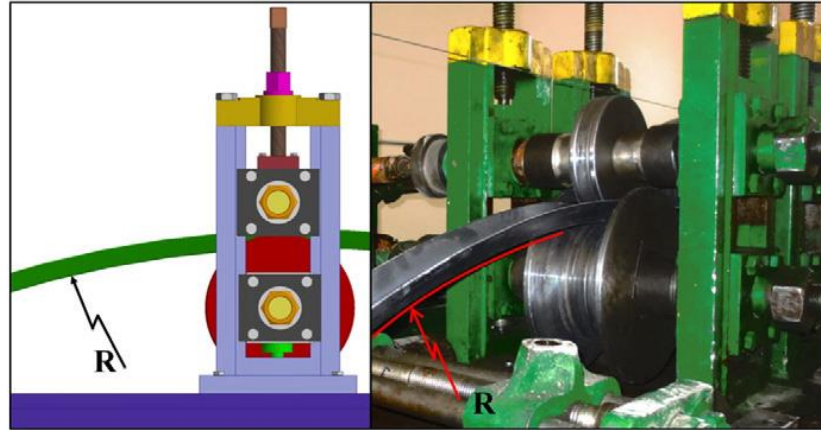
4.8.1. Boyuna eğilme (longitudinal bowing)

Makaralı bükme ile şekillendirilme sırasında sac levha her bir istasyondan geçerken belirli açılarda bükülerek geçmektedir. İstasyonlardan geçtiği sırada oluşan bu bükümler malzeme üzerinde birim şekil değişimine sebebiyet vermektedir. Bu birim şekil değişimlerinin artarak düzensiz bir şekilde dağılması üretilen profilde gerçekleşen uzamaların kesit boyunca eşit olarak dağılmamasına sebep olmaktadır (bkz. Şekil 4.16.). Kesitin herhangi bir kısmının diğer bölgelere daha fazla uzaması doğrusallığın kaybolmasına sebep olmaktadır.



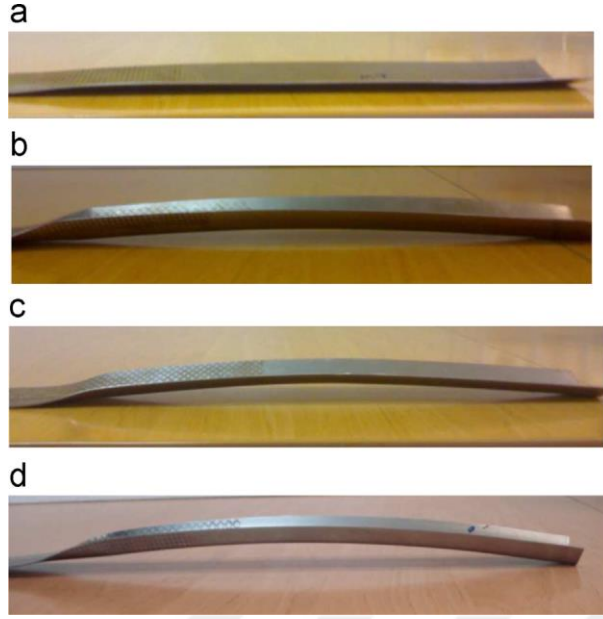
Şekil 4.16. Boyuna birim şekil değişimlerinin oluşturduğu boyuna eğilme kusuru (Sun vd., 2019)

İşte bu doğrusallığın bozulmasından dolayı kesitte yana, aşağı veya yukarı eğilmeler olmaktadır. Şekil 4.17’de makaralı bükme hattından çıkan bir profilin boyuna eğilme davranışı görülmektedir.



Şekil 4.17. Makaralı bükme hattından çıkan bir parçada oluşan boyuna eğilme kusuru (Bidabadi vd., 2016)

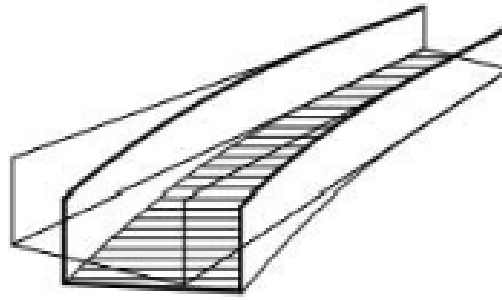
Şekil 4.18’de bir büküm istasyonunda 15°, 30°, 45° ve 60° büküm açılarıyla bükülmüş dört farklı V profilin boyuna eğilme davranışları görülmektedir.



Şekil 4.18. Dört farklı büküm açısında meydana gelen boyuna eğilme kusuru (a) 15°, (b) 30°, (c) 45° ve (d) 60° (Safdarian & Naeini, 2015)

4.8.2. Yanal eğilme (camber)

İmalat sırasında profil kesitinin son istasyondan çıkarken sağa veya sola doğru yanal bir şekilde bükülmesi olayıdır. Profil kesitinde meydana gelen boyuna birim şekil değişimlerinin profilin kesiti boyunca eşit bir şekilde dağılmamasından dolayı meydana gelen bir kusurdur. Kesit boyunca biriken gerilmeler sonucu kesitin bir bölgesinin diğer bölgelere göre daha fazla uzaması sonucu kesitin doğrusallığını kaybetmesiyle meydana gelir.

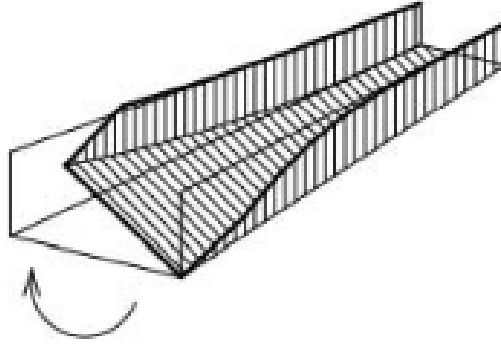


Şekil 4.19. Yanal eğilme kusuru (Doğan, 2018)

4.8.3. Burulma (twisting)

Profil kesitinin başlangıç kısmı ile bitişinin aynı ekseninde olmaması kusurudur. Bu kusurda yine boyuna eğilme ve yanal eğilme kusurlarında olduğu gibi makaralı bükme hattındaki birim şekil değişimlerinin düzensiz bir şekilde dağılmasından dolayı

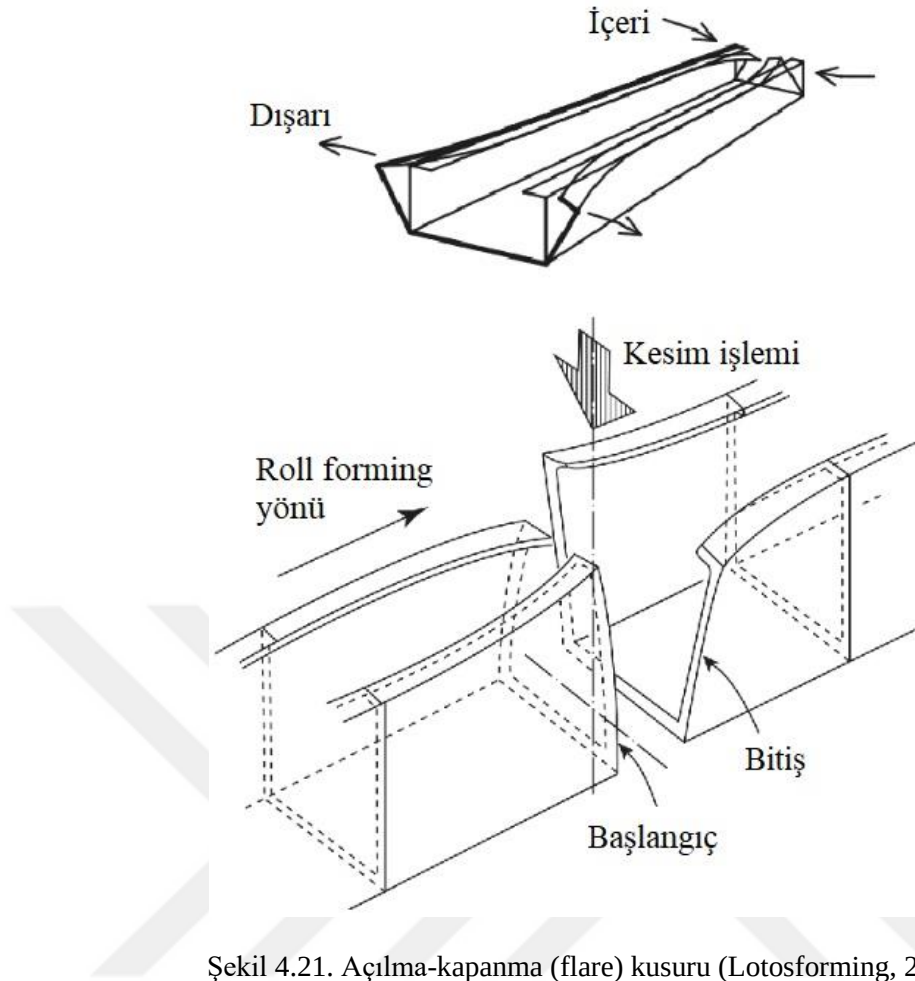
kesitin farklı bölgelerde farklı uzamalar göstermesi sonucu ortaya çıkar.



Şekil 4.20. Burulma kusuru (Doğan, 2018)

4.8.4. Açılma-kapanma (flare)

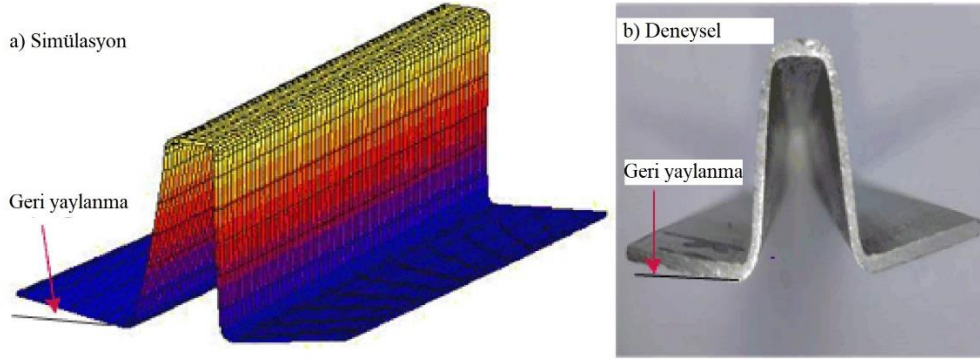
Makaralı bükme hattında şekil alan profil istasyonlar arasından geçerken her büküm sırasında parça üzerinde gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilme birikimleri hat boyunca profil nihai kesitine ulaşıncaya kadar artarak devam eder. Makaralı bükme hattından çıkan profil kullanım boyuna ebatlanmak için kesildiği zaman kesitte biriken bu gerilmeler serbest kalır ve parçada Şekil 4.21’deki gibi bir şekil değişimine yol açar (Abeyrathna vd., 2022). Profilin ebatlanması sırasında kesim bölgesinin bitiminin kenar uçlarının açılması ve başlangıcının kenar uçlarının kapanması olayına açılma-kapanma (flare) adı verilir.



Şekil 4.21. Açılma-kapanma (flare) kusuru (Lotosforming, 2021)

4.8.5. Geri yaylanma (spring back)

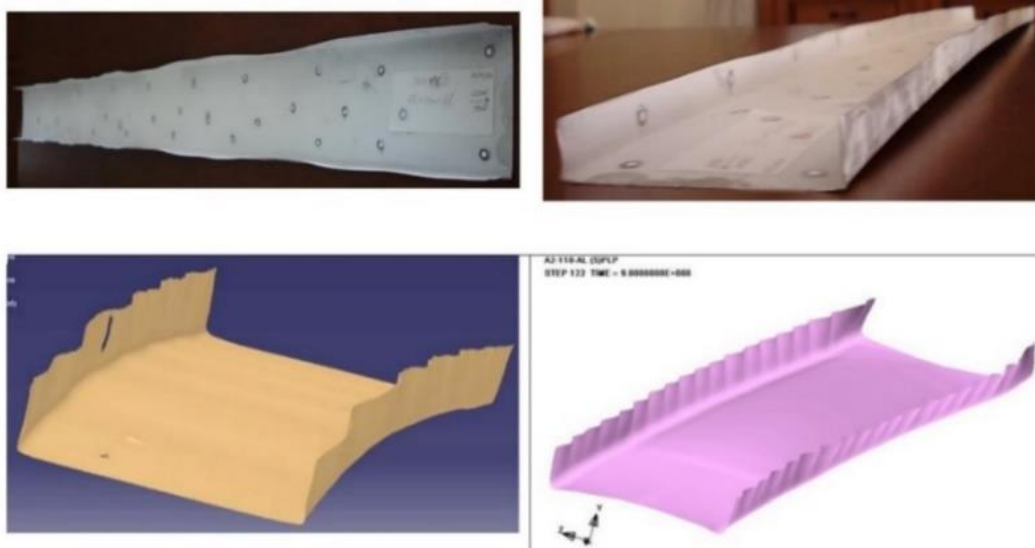
Geri yaylanma hemen hemen bütün sac şekillendirme işlemlerinde karşılaşılan bir sorundur. Sac levha üzerine gelen kuvvetler ortadan kalktığı zaman elastikiyet etkisinden dolayı tekrar eski konumuna dönmek isteyecek ve bu durumda da nihai kesitten bir miktar esneme olacaktır. Makaralı bükme hatlarında, geri yaylanma kusuru genellikle son istasyondaki bükümlerin biraz fazla verilerek ve en son kısımda da düzeltme doğrultma istasyonu (Türk kafası- Turkish head) ile önüne geçilebilecek bir kusurdur.



Şekil 4.22. Deneysel ve sayısal şapka kesitli (hat shape) profilde görülen geri yaylanma kusuru (Liu vd., 2017)

4.8.6. Kenar dalgalanması (edge waviness)

Kenar dalgalanması özellikle yanal büküme sahip U, V kesitli açık profillerde yan bükümlerin hattan dalgalı bir şekilde çıkması kusurudur. Bu kusurun ortaya çıkmasına etki eden en büyük parametrelerin başında form makaralarının dizilişi, şekil verilen malzemenin cinsi ve kenar büküm yüksekliği gelmektedir (Dönmez & Kocabaş, 2011). Şekil 4.23’de ince bir sac levhaya U profil şekli verilmesi sırasında kenar yüzeylerde meydana gelen dalgalanma kusurunun deneysel ve sayısal sonuçları görülmektedir.

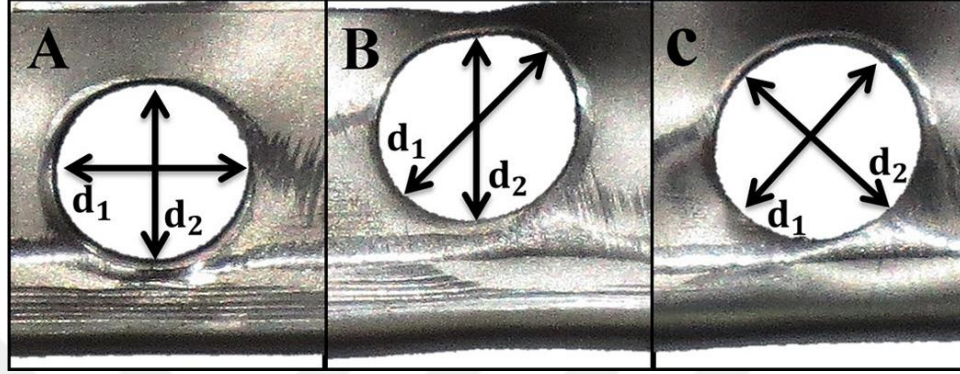


Şekil 4.23. Kenar dalgalanma kusurunun deneysel ve sayısal sonuçları (Dönmez, 2007)

4.8.7. Delik ovalitesi bozukluğu (ovality)

Makaralı bükme yöntemi ile dekli profillerin üretiminde birinci yöntem sac levha önce makaralı bükme yöntemiyle şekillendirilir ve daha sonra delik yerleri açılır. Bu yöntem oldukça yavaştır ve deliklerin erişimin zor olduğu konumlara delinmesini

engeller. İkinci yöntemde ise, delikler makaralı bükme hattı önüne yerleştirilmiş bir pres yardımıyla açılır ve ardından sac levha şekillendirilir. Bu yöntemde istenilen pozisyonlarda farklı delikler toplu olarak hızlı bir şekilde üretilebilir. Yüksek üretim hızı ve güvenilirlik bu ikinci yöntemin tercih edilme sebeplerindendir (Halmos, 2005). Ancak bu yöntemle üretilen ürünlerde deliklerin ovaliği önemli bir sorundur.



Şekil 4.24. Delikli profillerde meydana gelen ovalite bozuklukları (Bidabadi vd., 2015)

Özellikle son yıllarda artan sonlu elemanlar yazılımlarının kullanımıyla birlikte imalat aşamasına geçmeden sac malzemenin hat içerisinde ilerlerken gerilme dağılımlarının kontrolü rahatlıkla yapılabilmekte ve tasarım kaynaklı bu hataların önüne geçilebilmektedir.

4.9. Makaralı bükme prosesinde yapılan matematiksel hesaplamalar

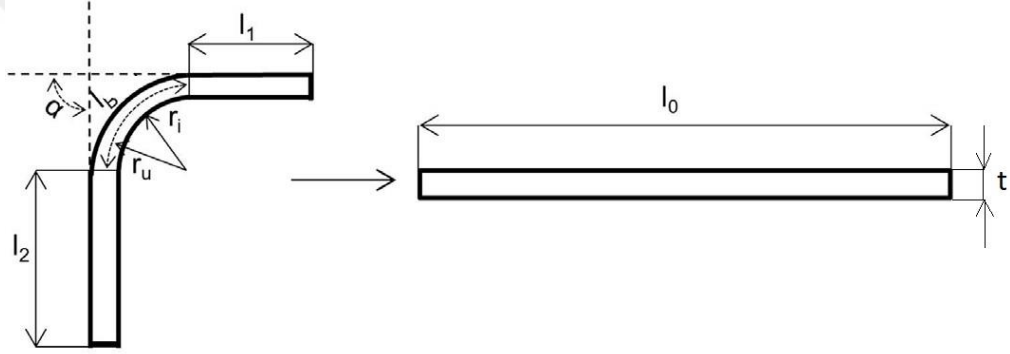
Makaralı bükme işlemi arka arkaya dizilmiş form makaraları ile sac malzemenin şekillendirilerek kolay ve maliyet yönünden ucuz bir şekilde profil kesitlerini üretme yöntemidir. Bu yöntemin kesintisiz bir şekilde çalışmasından dolayı diğer imalat yöntemlerine göre çok hızlı ve büyük miktardaki partilerin üretimi kolaylıkla yapılabilir.

Bu imalat tekniğindeki en büyük problem form istasyonlarının sayısı ve konumlandırılmasıdır. Bu yöntemle imalat sırasında, istenilen kesiti üretirken, istenmeyen kusurların önüne geçebilmek ve bunu yaparken de minimum istasyon sayısı ile bunu yapmak gerekir. Makaralı bükme tezgâhı tasarımı yaparken, bir istasyondaki büküm açısı ve iki istasyon arası mesafenin malzemede oluşan kritik birim şekil değişimi değerini aşmayacak şekilde belirlenmesi gerekir. Bu işlemde esas prensip gerilme sınırlarının akma gerilmesini geçmeyecek şekilde elastik bölge içerisinde kalacak şekilde tasarımların ve hesaplamaların yapılması gerekir.

4.9.1. Sac açılım hesaplamaları

Makaralı bükme işleminde üretilecek kesit için ilk önce ihtiyaç duyulan sac levhanın açılım ölçüsünün bilinmesi gereklidir. Bu açılım ölçüsüne göre hammadde tedariki, makine tasarımı ve yardımcı ekipmanların tedariki (rulo sac açıcı, sürücü ve kaynak ünitesi) sağlanır. Sac açılım ölçüsünü hesaplarken kullanılan temel yöntem nötr eksene göre yapılan hesaplamalardır. Yapılan hesaplamalarda sac levhanın şekil alması sırasında nötr eksenin değişmediği kabul edilir. Malzemenin şekil alması sırasında nötr eksenin iç tarafı büzülme, dış tarafı ise gerilmektedir.

İlk sac genişliğinin tahmini için, boş sac genellikle düz flanşlara ve gövdelere ve dairesel büküm bölgelerine bölünür. Şekil 4.25. basit bir açılı kesit için ilk sac genişliğinin hesaplanmasını göstermektedir.



Şekil 4.25. L bükülmüş bir parçanın ilk sac genişliğinin hesaplanması (Traub & Groche, 2015)

Gerekli ilk levha genişliği l_0 ölçüsü, l_1 ve l_2 düz kenarların ve l_b büküm bölgesinin uzunluğu toplanarak bulunur (Denklem 4.1).

$$l_0 = l_1 + l_2 + l_b \quad (4.1)$$

Düz bölümlerin uzunluğu kesit geometrisi üzerinden bilinmektedir. Bükülme bölgesi dışarıda gerildiğinden ve içeride sıkıştırıldığından, bükülme bölgesindeki tarafsız eksenin yarıçapı r_u ve bükme açısı α bu amaçla kullanılır. Tarafsız eksenin çember uzunluğuna da l_φ dersek. Bu çemberin uzunluğunun Denklem 4.2 ile buluruz.

$$l_\varphi = 2\pi \cdot r_u \quad (4.2)$$

Büküm bölgesinin uzunluğunu ise Denklem 4.3 ile buluruz.

$$l_b = l_\varphi \cdot \frac{\alpha}{360} \quad (4.3)$$

Burada tarafsız eksen yarı çapı r_u ;

İç büküm yarıçapı (r_i) sac kalınlığına (t) eşit ise Denklem 4.4,

$$r_u = r_i + 0,33t \quad (4.4)$$

İç büküm yarıçapı (r_i) sac kalınlığının (t) 2 ile 4 katına eşit ise Denklem 4.5,

$$r_u = r_i + 0,4t \quad (4.5)$$

İç büküm yarıçapı (r_i) sac kalınlığının (t) 4 katından fazla ise Denklem 4.6,

$$r_u = r_i + 0,5t \quad (4.6)$$

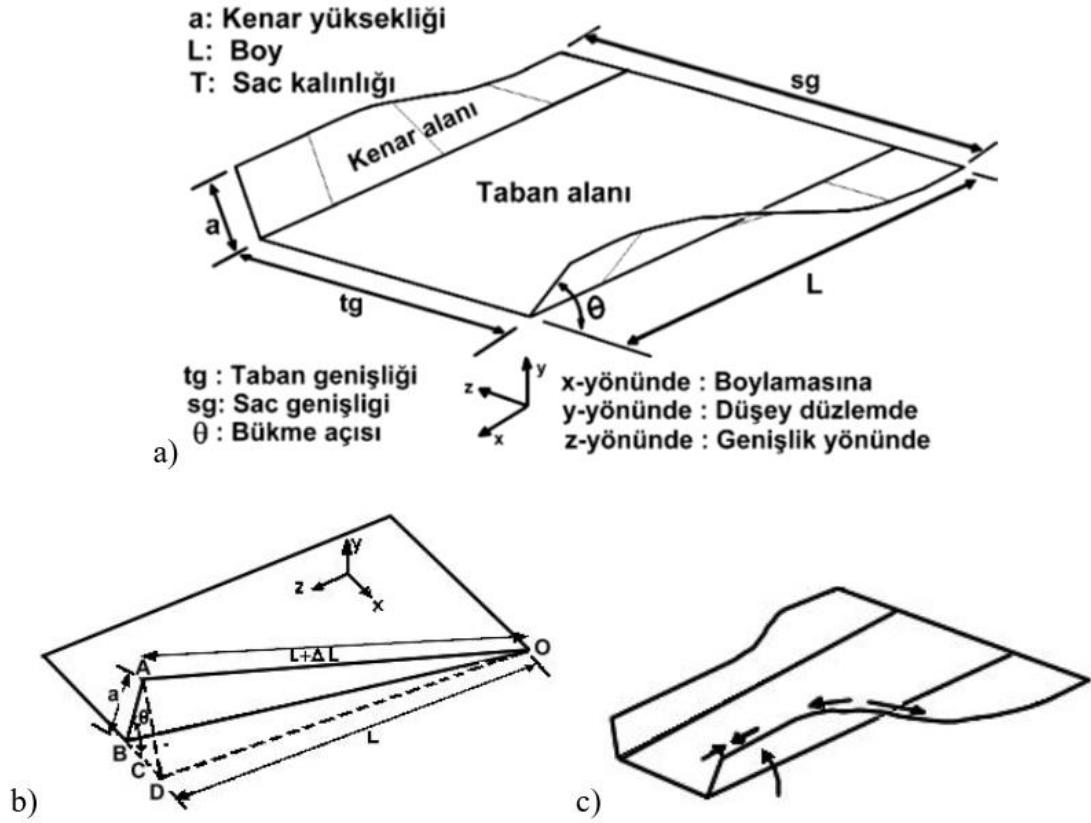
Olarak hesaplanır.

4.9.2. Birim şekil değişimi hesaplamaları

Makaralı bükme tasarımcısı bahsedilen kusurların önüne geçebilmek için üretim sırasında birim şekil değişimlerini limit seviyelerin altında tutmalı ve büküm operasyonunun sadece form makaralarından gelen yan kuvvetlerin etkisiyle ile yapmaya çalışmalıdır. Ancak maliyet sebebiyle bunu mümkün olduğu kadar en az form makarası ile yapmak tasarımcı açısından zor bir süreçtir.

Makaralı bükme operasyonunda iki istasyon arasında geçişte bükülen kenarda oluşan birim şekil değiştirmeler, en basit haliyle Şekil 4.26.b'de görüldüğü gibi iki istasyon arasında düz bir sac levhanın kalması varsayımı ile Denklem 4.7'deki gibi hesap edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \sqrt{1 + \frac{2a^2(1-\cos \theta)}{L^2}} - 1 \quad (4.7)$$



Şekil 4.26. İki istasyon arasında kalan sac levha birim şekil değişimi a) Kavramlar b) Basitleştirilmiş model c) Kenar şekil değişimi (Dönmez & Kocabaş, 2011).

Ancak denklem 4.7’de verilen hesaplama çok basit bir hesaplama olup gerçekte sac malzeme iki istasyon arasından geçerken Şekil 4.26.a ve 4.26.c’deki gibi sinüzoidal bir form almaktadır. Şekil 4.26.c’de görüleceği gibi istasyona girmeden önce kenar bölgedeki uzama maksimum seviyeye çıkmakta, istasyon çıkışında ise kenar bölge tekrar kısalarak çıkmaktadır.

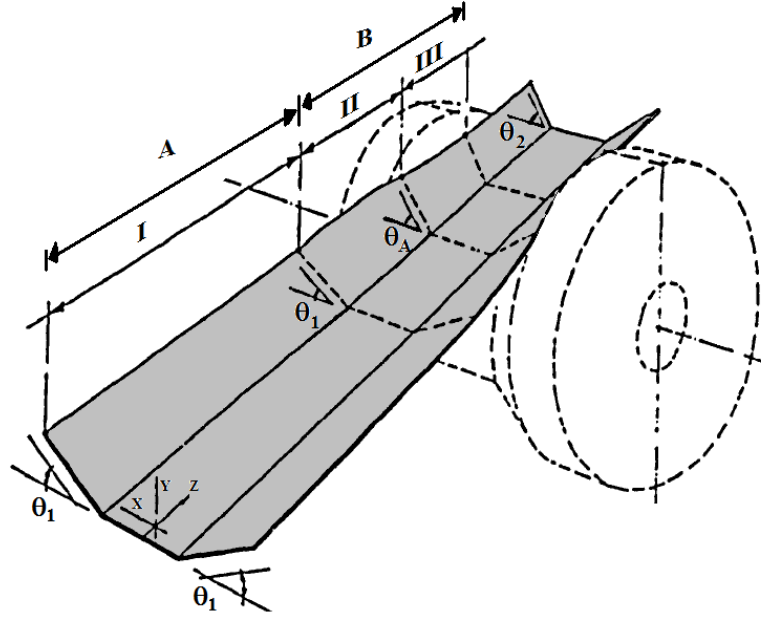
Halmos’un önerdiği denklemde ise kenarın 90° büküldüğü varsayımından hareket edilerek Denklem 4.8 ile kenar ucunda oluşan birim şekil değiştirmeler hesaplanmaktadır (Halmos, 2005).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sqrt{L^2 + \left(\frac{2\pi a}{4}\right)^2} - L}{L} = \sqrt{1 + 2.467 \frac{a^2}{L^2}} - 1 \quad (4.8)$$

4.9.3. Deformasyon uzunluğu hesabı

Bhattacharyya (1987), makaralı bükme ile şekillendirmeyi sinüzoidal şekilde formüle etmiştir. Bu teorisini açıklarken Şekil 4.27’deki gibi sac levhanın temassız şekillendirme bölgesinin A’den itibaren başladığını ifade etmiştir. Sac metal, B bölgesinde θ_1 bükülme açısından θ_2 bükülme açısına deforme olur. B bölgesinde,

bükme bölgesinde form makaralarının merkez hattına ulaşana kadar kısmi deformasyon meydana gelir. Bu aşamada eğilme momenti deformasyonda büyük rol oynar.



Şekil 4.27. İki istasyon arasında düz sac metalin deformasyonu (Bhattacharyya vd., 1984)

Bhattacharyya bu durumu açıklarken üç varsayım kullanmıştır:

1. Malzeme deforme olmayan yapı (rijit) olarak kabul edilir.
2. Bükme işlemi sadece katlama hattı boyunca gerçekleşir.
3. Sac levhayı bir rulo istasyonunda bükmek ve germek için gereken enerjiyi en aza indirerek şekil almasını benimser.

Bu varsayımlara göre Z yönünde seçilen noktadaki bükülme açısı dağılımının Denklem 4.9'daki gibi ifade edilebileceği sonucuna varmıştır.

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{3t}{8a^3} (z_2 - z_1)^2 \quad (4.9)$$

θ_1 : Bir önceki istasyonda meydana gelen bükülme açısı

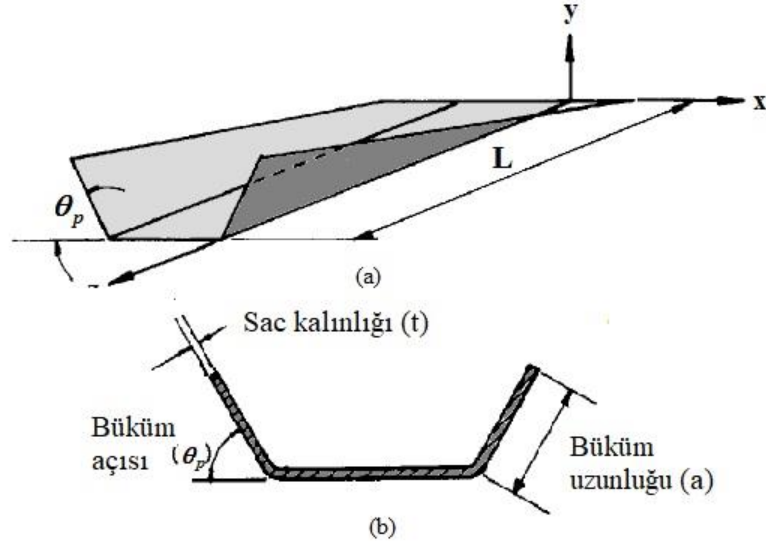
θ_2 : Mevcut istasyondaki bükülme açısı

z_1 : Bir önceki istasyonda deforme olmuş bölge

z_2 : Mevcut istasyona girerken meydana gelen deforme olmuş bölge

a : Büküm kenar yüksekliği

t : Sac levha kalınlığı



Şekil 4.28. (a) Sac levhanın iki istasyon arasında şekil alması (b) Şekil alan profilin enine kesiti (Bhattacharyya vd., 1984)

Şekil 4.28’de görülebileceği gibi, çevirme açısı $\theta_p = \theta_2 - \theta_1$ ve deformasyon uzunluğu $L = z_2 - z_1$ verilerek basitleştirilebilir. Bu durumda deformasyon uzunluğu gibi verilebilir. Böylece makaralı bükme şekil verme işlemi matematiksel olarak Denklem 4.10’daki gibi başarılı bir şekilde ifade edilmiştir.

$$L = \sqrt{\frac{8a^3\theta_p}{3t}} \quad (4.10)$$

θ_p : Belirli bir istasyonda ön görülen büküm açısı

a: Büküm kenarı yüksekliği

t: Sac levha kalınlığı

4.9.4. Form istasyonu sayısı hesabı

Angel, tarafından önerilen Form Açısı Metodu denklemiyle bir makaralı bükme tezgâhı tasarlarlarken istasyon sayısının belirlemede kullanılan bir matematiksel formül önerilmiştir. Bu yöntemde her biçimlendirme aşamasının, kesit profilinin kenarındaki bir noktanın, düz şeritten bitmiş profil şekline kadar yapılanmada düz bir çizgi izlemesi gerektiği şekilde tasarlanması gerektiğini ifade eder (Nallapati, 1996). Bu yöntemin temel prensibi gerekli istasyon sayısını hesaplamaktır ve makaralı bükme tezgahının istasyonlar arası mesafesinin toplam şekillendirme boyuna bölünmesi ile elde edilir. Makaralı bükme tezgahının uzunluğunun (L_t) hesaplanması Denklem 4.11’de gösterilmektedir.

$$L_t = \cot(\alpha) a \quad (4.11)$$

İstasyon sayısı Denklem 4.12'ye göre şu şekilde hesaplanır.

$$n = \frac{L_t}{d} = \cot(\alpha) \frac{a}{d} + 2 \quad (4.12)$$

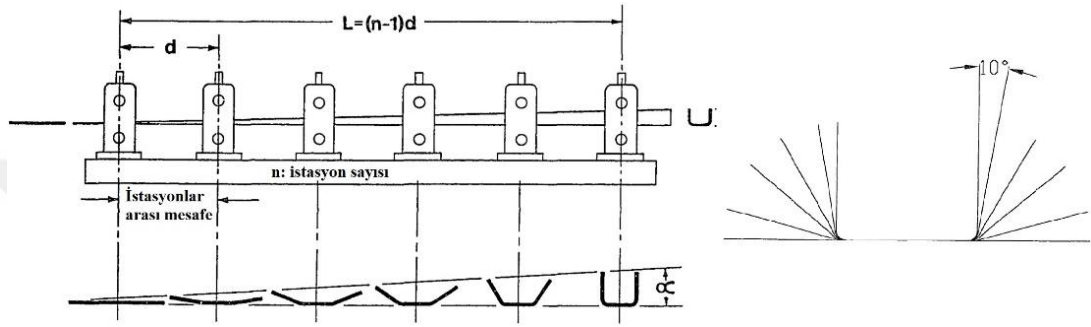
d: İstasyonlar arası mesafe

a: Büküm kenarı yüksekliği (bitmiş profil)

α : Büküm açısı

L_t : Makaralı bükme tezgâh uzunluğu

n: istasyon sayısı



Şekil 4.29. Form açısı metodu (Nallapati, 1996)

$$\cot \alpha = \frac{L}{h} = \frac{(n-1)d}{h} \quad (4.13)$$

$$\cot \alpha = 40.5 \quad (\alpha \approx 1,5^\circ)$$

Yaklaşık istasyon sayısı Denklem 4.14'e göre bulunur;

$$n = \frac{40,5h}{d} + 1 \quad (4.14)$$

Bu yöntem ile yapılan hesaplamalarda bazı iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir. Malzemedeki esnekliği veya geri esnemeyi ortadan kaldırmak için boyutlandırma ve aşırı bükme için ek aşamalar gereklidir. Büküm açısı " α " değeri, şekil verilen malzemenin sünekliğine bağlıdır. Genel olarak kullanılan şekillendirme açıları düşük karbonlu yumuşak çelikler için $1^\circ - 25'$, paslanmaz çelikler ve alüminyum ve alaşımları gibi sünekliği daha fazla olan malzemeler için $1^\circ - 35'$ dir.

Yapılan bu hesaplamalar tek bir büküm üzerinden yapılmaktadır. Çoklu bükümler veya karmaşık şekiller için, bölüm parçalanmalı ve her bir büküm veya büküm çifti, kesit profilini üretmek için gereken aşama sayısını belirlemek üzere ayrı ayrı hesaplanabilir.

Griffin ise Form Oranı Metoduna kullanarak istasyon sayısını hesaplamıştır (Nallapati, 1996). Bu yöntemde, şekillendirme oranı veya büküm açısı, birim yatay merkez mesafesi temelinde hesaplanır. İzin verilen büküm açısı, elastik limit birim

şekil değişim değerine bağlıdır.

$$\delta_e = \frac{\sigma_y}{E} \quad (4.15)$$

İstasyon başına izin verilen büküm açısı

$$\sqrt{(1 + \delta_e)^2 - 1^2} = \sqrt{2\delta_e + \delta_e^2} \approx \sqrt{2\delta_e} \quad (4.15)$$

Bu değere bağlı olarak, istasyon sayısında Denklem 4.16'ye göre hesaplanır.

$$n = \frac{\alpha}{(\sqrt{2\delta_e}d)} \quad (4.17)$$

σ_y : akma gerilmesi

E: Elastisite modülü

δ_e : Elastik deformasyon limit değeri

α : Büküm açısı

d: İki istasyon arası mesafe

n: istasyon sayısı

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Farklı malzemelerin birleştirilmesi, özellikle tasarım gereksinimlerinin daha karmaşık hale gelmesi nedeniyle önemli bir araştırma alanıdır. Çift katmanlı saclar, farklı kalınlıklardaki iki farklı metalin basınç kaynağı, soğuk haddeleme, sıcak haddeleme, yapıştırıcı ile yapıştırma, patlatma kaynağı ve rulo yapıştırma gibi farklı imalat yöntemleriyle birleştirilmesi sonucu üretilir (Eslami & Taheri, 2011).

Bu saclar tek metal ile elde edilemeyen özellikleri sağlayabilmek için kullanılmaktadır. Üretilen çift katmanlı sac ile yüksek mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik, termal karakteristik, hafiflik, korozyon dayanımı ve şok emicilik gibi özel yetenek ve özelliklere sahip çift katmanlı saclar elde edilmektedir. Çift katmanlı levhaların bu avantajlarından dolayı endüstride kullanımına artan bir ihtiyaç söz konusudur (Heydari vd., 2017).

Yapılan tez çalışması üç ana başlık altında incelenecektir. Birinci aşamada sac levhaların rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirilmesi, ikinci aşamada birleştirilen levhalara makaralı bükme yöntemiyle şekil verilmesi ve üçüncü aşamada ise makaralı bükme işleminin, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek yapılmış olan simülasyon çalışmalarına yer verilecektir.

Tez çalışması kapsamında izlenecek süreçlerin şeması aşağıdaki gibidir.

1. Sac malzemelerin birleştirilmesi (Rulo yapıştırma)

- Sac levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi
- Yüzey hazırlık işlemleri
- Rulo yapıştırma makinesi tasarımı ve imalatı
- Rulo yapıştırma makinesinde çift katmanlı sac üretimi
- Üretilen çift katmanlı saclara mikro sertlik, soyulma ve çekme testleri uygulanması
- Üretilen çift katmanlı sacların birleşim bölgesindeki iç yapı muayeneleri (SEM)



2. Çift katmanlı levhalara şekil verilmesi (Makaralı bükme)

- U profil çiçek açılımının yapılması ve tasarlanacak makaralı bükme hattının istasyon sayısının belirlenmesi.
- Makaralı bükme makinesi tasarımı ve imalatı
- Üretilen makaralı bükme makinesinde çift katmanlı levhalardan U profil üretim testlerinin yapılması
- Büküm açısı değişimi deneysel testleri
- İstasyonlar arası mesafe değişimi deneysel testleri
- Hat hızı değişimi deneysel testleri



3. Makaralı bükme simülasyon testleri

- Büküm açısı değişimi simülasyon testleri
- İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon testleri
- Hat hızı değişimi simülasyon testleri

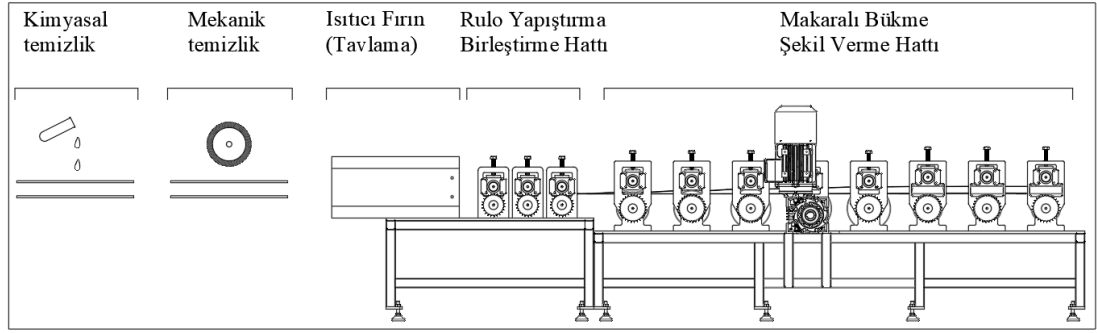
İlk aşamada; kullanılacak olan sac levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla her bir malzemeye çekme testi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra levhalar uygun ölçülerde ebatlanarak önce aseton banyosunda temizlenmiş ardından levhaların birleşecek olan yüzeylerine polisaj işlemi uygulanmıştır. Sac levhaların yüzey hazırlık işlemleri yapıldıktan sonra bu levhaları birleştirecek olan rulo yapıştırma makinesinin tasarımı ve imalatı yapılmış ve bu

makineden çift katmanlı levhaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen çift katmanlı levhaların mekanik performanslarının belirlenmesi amacıyla çift katmanlı levhalara soyulma ve çekme testi uygulanmış daha sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çift katmanlı levhanın birleşim arayüzleri incelenmiştir.

İkinci aşamada; üretilmesi düşünülen çift katmanlı U profilin çiçek açılımı ve üretilecek tezgâhın istasyon sayısı Copra RF programında belirlenmiştir. Belirlenen çiçek açılımı modeline göre her bir istasyonda bulunan ve sac levhaya şekil verecek olan form makaralarının modellenmesi yapılmıştır. Modelleme işleminden sonra Copra FEA programında sac levhanın form makaraları arasında geçişi sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiş ve gerilmelerin her bir istasyona eşit ve düzenli bir şekilde dağılması için form makaralarında gerekli iyileştirmeler yapılarak analizler tekrar edilmiştir. Sac levhanın form istasyonları arasında optimum şekilde akışı analiz edildikten sonra gerekli makine parametreleri belirlenip makaralı bükme makinesinin tasarımı yapılmıştır. Tasarım sonrası, sac levhanın büküm bölgesinde gelen yüklere göre statik analizleri yapılarak kritik bölgelerdeki gerilme kontrolleri yapılmıştır. Tasarım iyileştirmelerinden sonra çift katmanlı U profil üretimini yapacak olan makaralı bükme tezgâhının imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen makineden, birleştirilmiş olan çift katmanlı levhalar kullanılarak çift katmanlı U profil üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında makine ayar parametreleri değiştirilerek önce büküm açısı değişikliği ile çift katmanlı levhalara şekil verilmiş. Daha sonra istasyonlar arası mesafe değiştirilerek çift katmanlı levhalara şekil verilmiş. Son olarak makinenin farklı çalışma hızlarında çift katmanlı levhalara şekil vermesi sırasında oluşan etkiler gözlemlenmiştir.

Üçüncü aşamada; COPRA FEA yazılımı kullanılarak modellenen form makaraları ve çift katmanlı levha aynı deneysel testlerde yapılan parametre değişikliklerini kullanarak önce büküm açısı değiştirilerek simülasyon testleri gerçekleştirilmiş. Sonrasında istasyonlar arası mesafe değiştirilerek simülasyon testleri yapılmış ve son olarak farklı hat hızlarında profilin şekil alması sonlu elemanlar yazılımında simülasyon testleriyle incelenmiştir.

Deneysel uygulamalarda yapılacak olan işlemlerin genel proses şeması Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1. Deneysel uygulamalarda yapılacak işlemlerin proses şeması

5.1. Malzeme

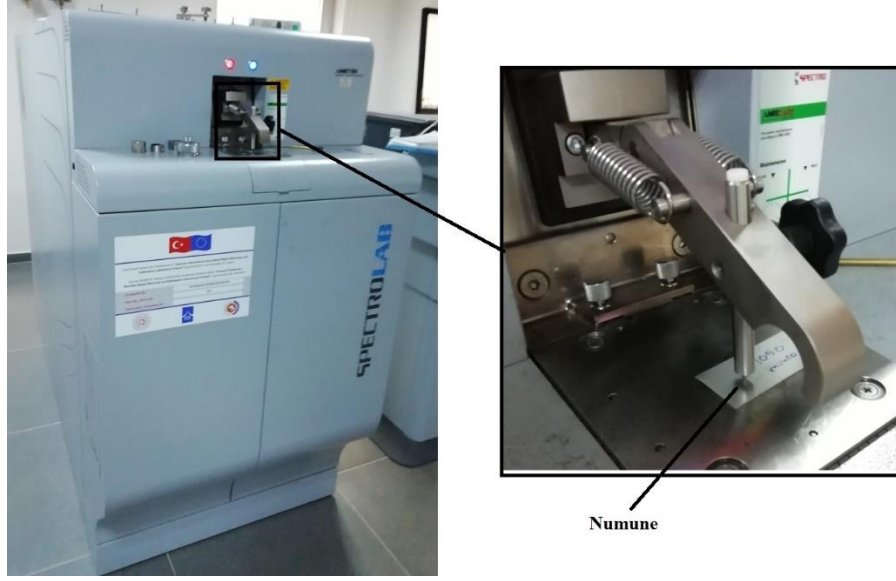
Deneyler sırasında Al 1050 (H14) alüminyum alaşımı ve AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır.

Alüminyum, deniz suyuna ve endüstrideki kirli ortam şartlarına karşı çok iyi korozyon direncine sahip bir malzemedir. 304 kalite paslanmaz çelikler, dışardan gelebilecek kuvvetlere karşı mukavemeti yüksek malzemelerdir ve bu özelliklerinden dolayı darbeye maruz kalınan ortamlarda çok fazla tercih edilirler. Bu malzemelerin bir araya gelmesiyle ortam şartlarına ve dışardan gelebilecek etkilere dayanıklı ve hafif bir çift katmanlı malzeme elde edilecektir. Al 1050 alüminyum alaşımı ve 304 kalite paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Al 1050 alüminyum alaşımı ve 304 paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özellikleri

	Al 1050(H14) (EN AW 1050)	AISI 304 (EN 1.4301)
Yoğunluk	2,71 g/cm ³	8 g/cm ³
Ergime Noktası	650 °C	1455 °C
Elastik Modülü	71 GPa	195 GPa
Çekme Mukavemeti	130 MPa	505 MPa
Akma Mukavemeti	85 MPa	215 MPa
Poisson Oranı	0,33	0,29
Kopma Uzaması	%12	%27

Çalışmada kullanılacak metallerin kimyasal bileşimleri Samsun Uluslararası Akredite Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarında (SAMLAB) bulunan Şekil 5.2’de görülen Spectrolab marka M12 model metal malzeme analiz cihazında tespit edilmiştir. Numuneler ASTM E1251 standardına göre iç yapıları analiz edilmiş ve kimyasal içerikleri çıkarılmıştır.



Şekil 5.2. Spectrolab marka M12 Hibrit model metal analiz cihazı

5.1.1. Al 1050 (H14) (EN AW 1050) alüminyum alaşımı levha

Deneyler sırasında AISI 304 (EN 1.4301) paslanmaz çelik malzeme ile kombinasyon oluşturacak malzeme Al 1050 (EN AW1050) alüminyum alaşımı olacaktır. Alüminyum malzemeler günümüzde; hafiflikleri, iyileştirilebilir mukavemet özellikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, korozyona karşı dayanımları nedeniyle otomotiv, makine, gemi inşa endüstrileri, gıda, kimya, mimari alanlar, inşaat, havacılık ve uzay endüstrileri olmak üzere çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Alüminyum malzemeler bu özellikleri nedeniyle mühendisler ve tasarımcılar için tercih edilen bir endüstriyel malzeme konumundadırlar (Serror, 2013). Tablo 5.2. Al 1050 alüminyum alaşımının uluslararası karşılaştırmalı standartlar tablosunu göstermektedir.

Tablo 5.2. Al 1050 alüminyum alaşımı uluslararası standartları karşılaştırma tablosu

	EN	ASTM	BS	DIN	JIS	NF
	Avrupa	USA	İngiltere	Almanya	Japonya	Fransa
Al 1050	EN AW 1050	-1050	1050A	Al99.5	A1050	1050A

Saf alüminyumun yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Birim hacimde bir alüminyumun kütlesi demir metalinin %35'i, bakır metalinin ise %29'u kadardır. Alüminyum malzemeler hafiflik özellikleri nedeniyle uzay, uçak ve otomobil endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde tercih edilen önemli malzemelerden biridir. Alüminyum manyetik özellik göstermez bu durum, elektrik-elektronik mühendisliği ve makine mühendisliği alanları için önemli bir özelliktir.

Al 1050 alüminyum malzemesi kaynak edilebilirliği yüksek, iyi korozyon dayanımı, soğuk plastik şekillendirme özelliği, iyi eloksal kaplama kabiliyeti gibi birçok özelliği bir arada sunan üstün bir malzemedir. Al 1050 alaşımı saf alüminyum alaşımına göre daha sert bir yapıya sahiptir. Ayrıca deniz suyuna ve kirli endüstriyel ortamlara karşı dayanıklıdır, çok iyi korozyon direncine sahiptir. Al 1050 levhasına ait spectral analiz sonucu tespit edilen ve üreticiden alınan kimyasal içerik değerleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. Al 1050 alüminyum alaşımının tespit edilen ve tedarikçiden alınan kimyasal içerikleri

Kimyasal element	Al 1050 (Analiz sonucu)	Al 1050 (Standart)
%Mg	0,045	0,05
%Mn	0,055	0,05
%Si	0,22	0,25
%Fe	0,262	0,4
%Zn	0,06	0,07
%Ti	0,02	0,05
%Cu	0,028	0,05
%Al	Kalan	Kalan

5.1.2. AISI 304 (EN 1.4301) kalite paslanmaz çelik levha

Deneyler sırasında Al 1050 alüminyum alaşımı ile birleştirilecek malzeme 304 kalite paslanmaz çeliktir. 304 kaliteye paslanmaz çelik düşük karbon oranına sahip, östenit paslanmaz sınıfında bulunan bir çelik türüdür. 304 kaliteye paslanmaz çelikler EN normuna göre 1.4301 veya X5CrNi18-10 olarak isimlendirilirler. %18 krom oranı içeriğindeki olabilecek en az krom alt limitidir. Kimyasal içeriğinde yaklaşık %18-20 arası krom bulunur. 304 kaliteye sahip paslanmaz çelik malzemelerin kaynak kabiliyetleri yüksektir. Korozyif ortamlarda dayanımları çok iyidir. 304 kalite paslanmaz çeliklerin kolay temin edilebilmesi, plastik şekil vermeye uygun olması ve kaynak kabiliyeti nedeni ile en çok tercih edilen paslanmaz çelik türlerindendir. Bu kalitedeki çelik malzemeleri mıknatıs çekmez. 304 kalite paslanmaz çelikler su ve nemli ortamlara karşı dayanıklı bir ürün olması sebebi ile korozyif ortamlarda tercih edilen malzemelerdir. Organik-inorganik kimyasallara ve renkli boyalara karşı dayanıklıdır. 304 kalite paslanmaz çelik çok iyi oksitlenme direncine sahip bir malzemedir. Tablo 5.4. 304 kalite paslanmaz çelik malzemenin uluslararası

karşılaştırmalı standartlar tablosunu göstermektedir.

Tablo 5.4. 304 paslanmaz çelik uluslararası standartları karşılaştırma tablosu

	EN	ASTM	BS	DIN	JIS	NF
	Avrupa	USA	İngiltere	Almanya	Japonya	Fransa
304	X4CrNi	304	304S15	1.4301	SUS304	X5CrNi18-10
paslanmaz	18-10					
çelik	(1.4301)					

304 kalite paslanmaz çelik levhasına ait spectral analiz sonucu tespit edilen kimyasal değerler ile üreticiden alınan kimyasal değerler Tablo 5.5’de verilmiştir.

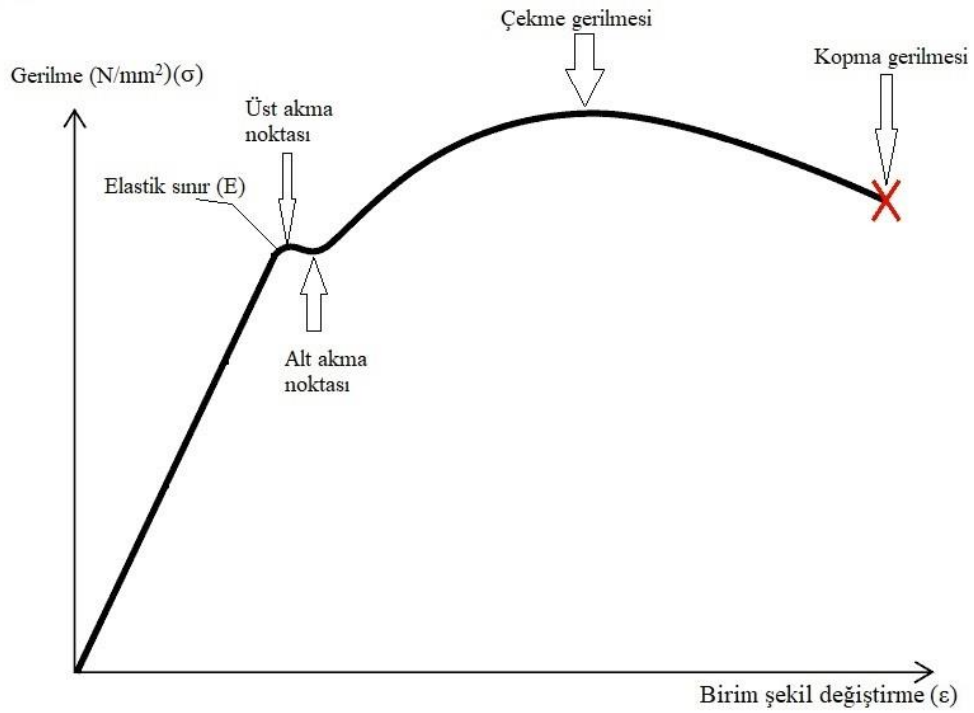
Tablo 5.5. 304 kalite paslanmaz çelik sacının tespit edilen ve tedarikçiden alınan kimyasal içerikleri

Kimyasal element	AISI 304 (Analiz sonucu)	AISI 304 (Standard)
%C	0,0652	0,08
%Mn	1,07	2
%Si	0,565	0,75
%P	0,304	0,045
%S	0,175	0,03
%Cr	18,36	18-20
%Ni	7,95	8-10

5.2. Yöntem

5.2.1. Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

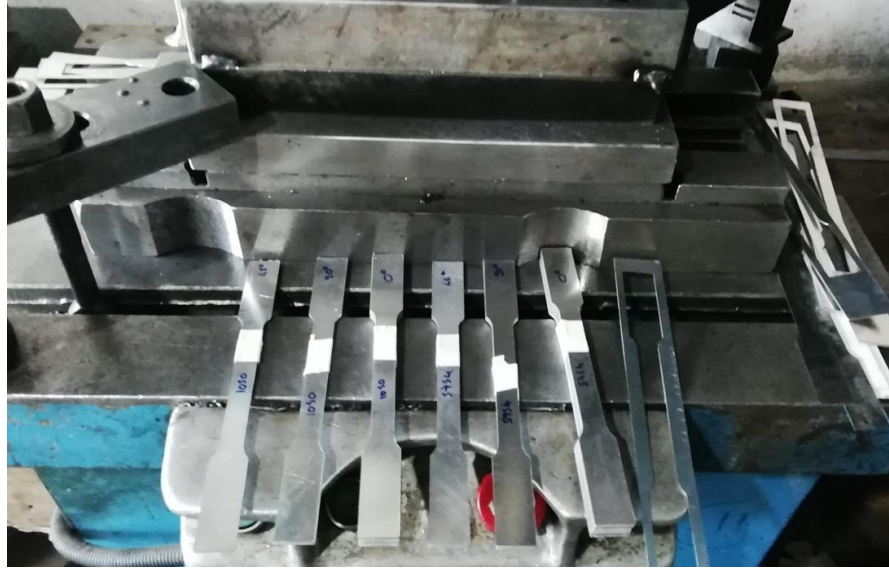
Çekme testi, kontrollü gerilimle bir malzemeye yük altında belirli bir seviyeye kadar ya da tamamıyla malzeme kopana kadar kuvvet uygulayarak numunenin davranışını belirlemek amacıyla yapılan tahrip edici bir mühendislik testidir. Mühendislik test yöntemleri arasında malzeme özelliklerini belirlemede en yaygın kullanılan test yöntemidir. Bu yöntemle, malzemenin ne kadar dayanıma sahip olduğunu bulabiliriz. Çekme testi malzemelerin akma gerilmesi, kopma gerilmesi, çekme gerilmesi, süneklik, young modülü ve poisson oranı gibi birçok özelliklerini tespit etmek için kullanılır.



Şekil 5.3. Çekme testi gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

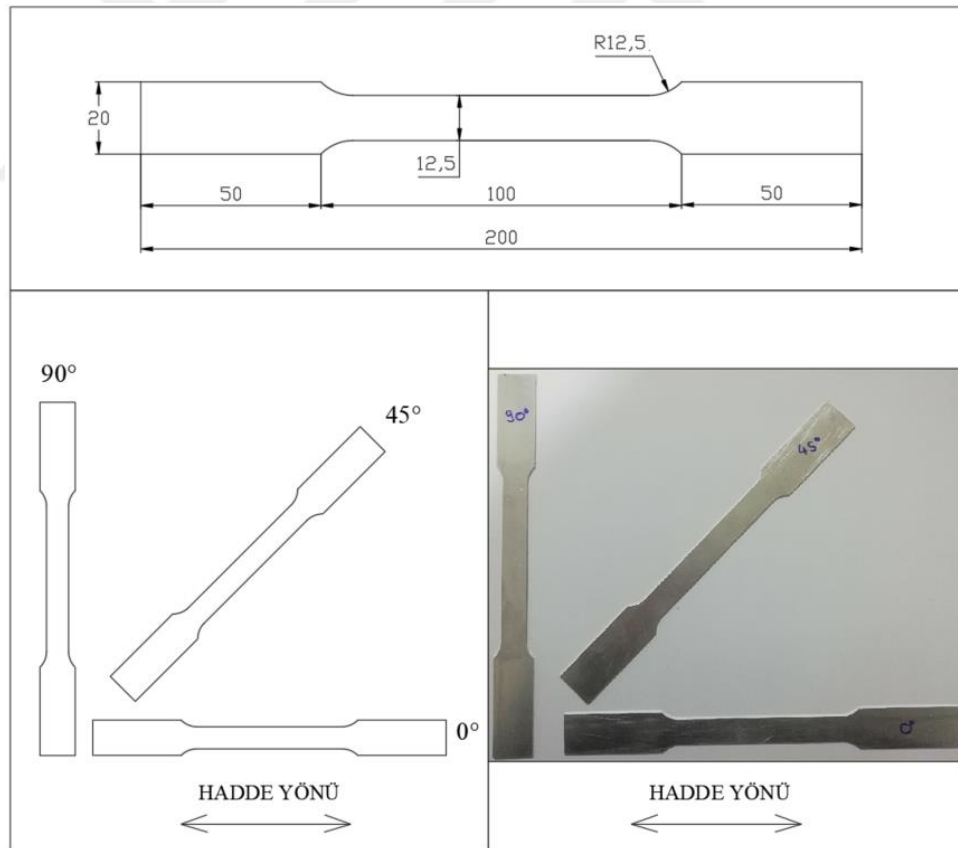
Çekme testi metaller, plastikler, kompozitler, kauçuklar, kumaşlar, elastomerler, kâğıt vb. dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeler üzerine uygulanabilir.

Çalışma kapsamında öncelikle deneysel testlerde kullanacağımız Al 1050 alüminyum alaşımı ve 304 paslanmaz çelik malzemeleri çekme testine tabi tutularak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılacak metallerden ASTM E8 standardına göre numuneler hazırlanıp çekme testi için hazır hale getirilmiştir. Numuneler, hadde yönünde, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik olacak şekilde 3 farklı doğrultuda alınmıştır. Hazırlanan numunelerin kesim sırasında ısı işleminden etkilenmemesi için lazer, plazma v.b gibi yöntemler yerine kalıpta pres ile basılmıştır. Numunelerin hazırlandığı çekme testi kalıbının görüntüsü Şekil 5.4’de görülmektedir.



Şekil 5.4. Çekme testi numune kalıbı ve basılan numuneler

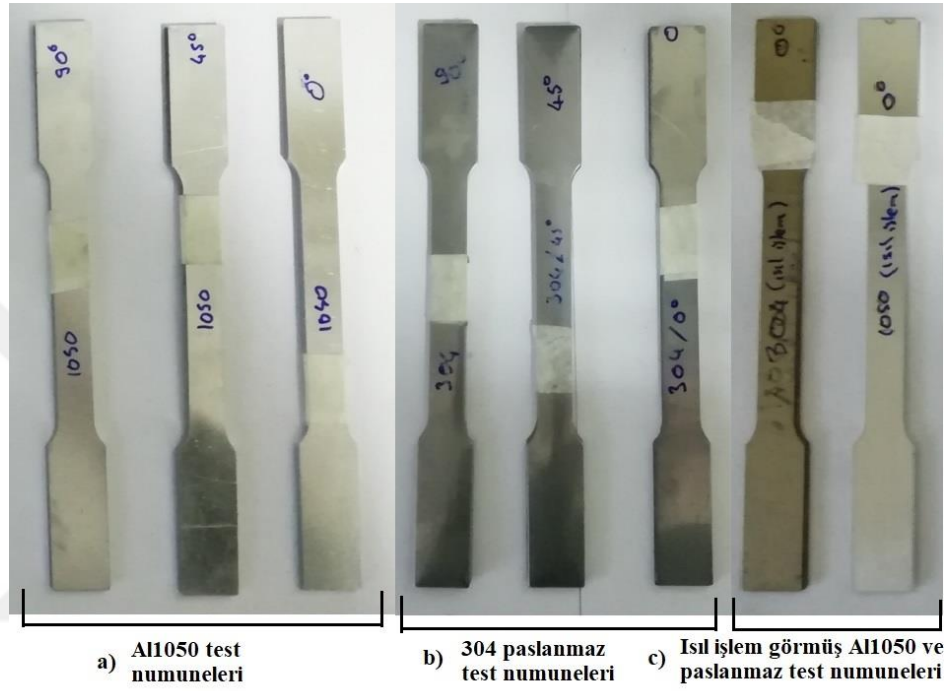
Standarda göre hazırlanan çekme testi numunesinin ölçüleri ve kalıpta basılan çekme testi numunelerin görüntüleri Şekil 5.5’de görülmektedir.



Şekil 5.5. Çekme test numuneleri hadde yönüne 0°, 45° ve 90°

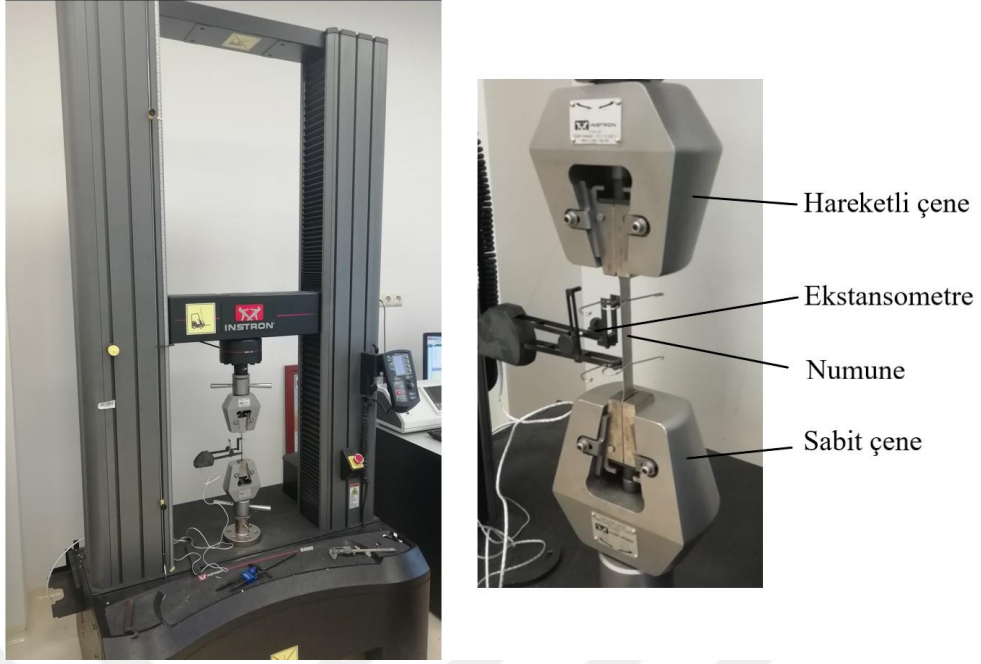
Al 1050 ve 304 kalite paslanmaz çelik levhalardan, hadde yönünde, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik doğrultuda 3’er adet numune hazırlanıp çekme testi

yapılmıştır. Rulo yapıştırma ile birleştirme sırasında her iki malzemede belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre ısıtılma uğrayacağı için malzemelerin özelliklerinin değişebileceği göz önüne alınarak aradaki farkı gözlemlemek adına her iki malzeme içinde hadde yönünde 3'er adet numuneye de rulo yapıştırma imalat şartlarında ısıtılma işlemi uygulanarak çekme testi yapılmıştır. Hazırlanan çekme testi numuneleri Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Çekme testi için hazırlanmış numuneler a) Al 1050 test numuneleri, b) 304 paslanmaz test numuneleri, c) Isıl işlem görmüş Al 1050 ve paslanmaz test numuneleri

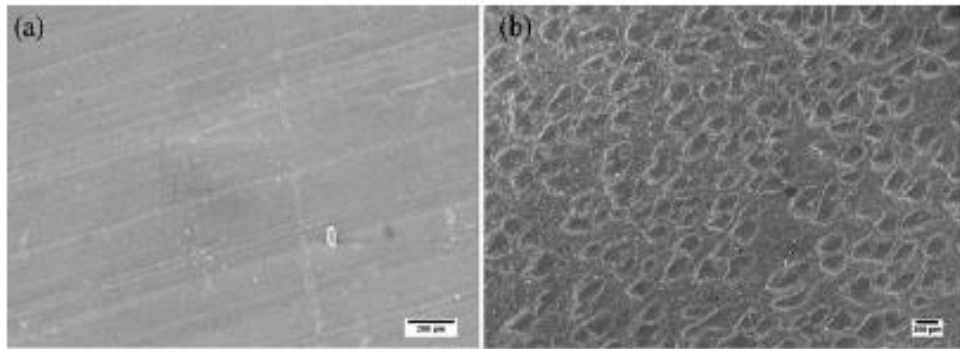
Çekme deneyleri, Şekil 5.7'de görülen Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezinde (KİTAM) bulunan Instron Marka 5982 Model 100 kN yükleme kapasiteli 0,01 N hassasiyete sahip çekme test cihazında yapılmıştır. Çekme testleri her bir malzeme için standartta (ASTM-E8/E8M-15a, 2015) belirtildiği gibi 10 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Çekme testleri sırasında şekil değişim miktarını ölçmek için numuneye 50 mm ölçü aralığında ekstansometre bağlanıp gerilme ve birim şekil değiştirme (σ - ϵ) değerleri alınmıştır.



Şekil 5.7. Çekme testlerinde kullanılan Instron 5982 çekme test cihazı ve çekme testi işlemi

5.2.2. Sac levhaların yüzey hazırlık işlemlerinin yapılması

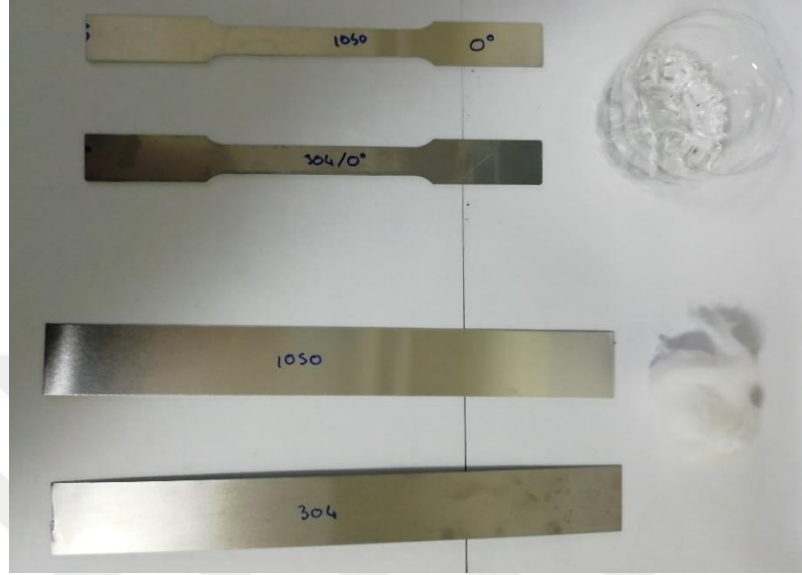
Rulo yapıştırma tekniği ile tatmin edici bir mekanik bağ üretmek için, birleştirilecek olan sacların yüzeyindeki kirleticilerin uzaklaştırılması esastır. Bu katmanlar gresler, oksitler, absorbe edilmiş iyonlar ve toz parçacıklarından oluşur. Bu kalıntıları temizlemek için, sac şeritler önce aseton banyosunda yağdan arındırılmıştır ve şerit yüzeylerindeki oksit tabakasını çıkarmak için paslanmaz çelik tel fırça ile 2000 dev/dk'da birleşecek olan yüzeyler polisajlanmıştır (Abbasi & Toroghinejad, 2010).



Şekil 5.8. a) Ham yüzey b) polisajlanmış yüzey (Heydari vd., 2017)

İlk aşamada birleşmiş olan levhaların mekanik performanslarını belirlemek için soyulma ve çekme testleri yapılacaktır ve bunun için bu testlere uygun standart ölçülerde numuneler hazırlanarak sac levhalar birleştirilmiştir. Soyulma testleri için Al 1050 malzeme 25 x 305 x 0,8 mm ve 304 paslanmaz çelik malzeme 25 x 305 x 0,6

mm ölçülerinde kesilmiş ve numuneler hazırlanmıştır. Çekme testleri için ise çekme testi numune kalıbından basılan parçalar kullanılmıştır. Bu numuneler daha sonra üzerlerindeki kir, oksit, yağ v.b kalıntılardan arındırılmak için Şekil 5.9'daki gibi aseton ve pamuk yardımıyla temizlenmiştir (Li vd., 2008).



Şekil 5.9. Numunelerin aseton yardımıyla kimyasal temizliğinin yapılması

Daha sonra Şekil 5.10'daki düzenek yardımıyla 0,3 mm kalınlığında paslanmaz çelik tel fırça ile 2000 dev/dk'da yüzeylerin polisaj işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.10. Sac levhaların paslanmaz tel fırça ile polisajlanması işlemi

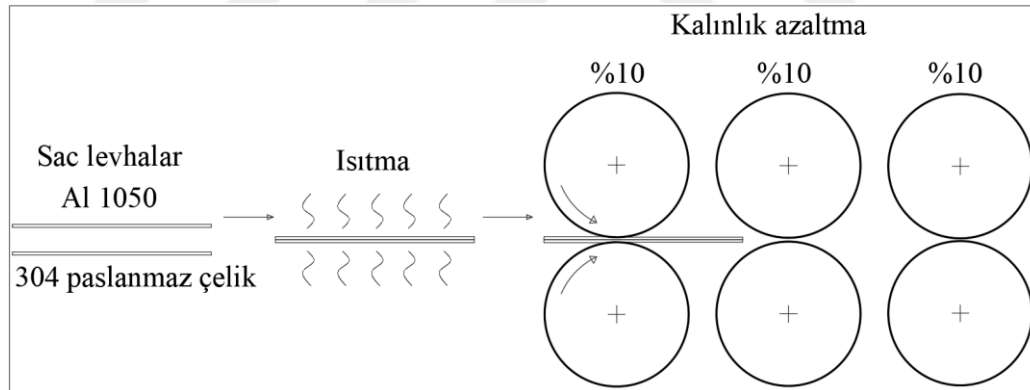
Tel fırçalama(polisaj), daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyler sağlar ve yapışma işlemi sırasında katmanların birbirine daha iyi nüfuz etmesine yardımcı olmaktadır (Nejad vd., 2017).

5.2.3. Sac malzemelerin birleştirilip çift katmanlı sac elde edilmesi (Rulo yapıştırma)

Çift katmanlı sacların rulo yapıştırma (RB) yöntemiyle bağlanması, katı fazlı bir bağlanma yöntemidir ve katmanlı şeritlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlem otomotiv, havacılık, gemi ve elektrik endüstrileri için yaygın olarak kullanılmaktadır (Heydari vd., 2017).

Tez çalışmasının bu kısmında rulo yapıştırma makinesinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sac levhaların rulo yapıştırma makinesine sürülmeden önce ısıtılması için gerekli olan ısıtıcı fırının tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Yüzey hazırlık işlemleri yapılan sac levhalar üst üste istiflenerek önce ısıtıcı fırında tavllanmış daha sonrada rulo yapıştırma makinesine sürülerek birleşimi sağlanmıştır.

Üretilcek olan rulo yapıştırma sisteminin proses şeması Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11. Rulo yapıştırma işleminin proses şeması

5.2.4. Rulo yapıştırma makinesi tasarımı ve imalatı

İmalatta kullanılacak rulo yapıştırma makinesinin, ısıtılmış olan sac levhalara uygun baskı kuvveti uygulayabilmesi için art arda dizilmiş 3 sıra hadde silindiri kullanılmıştır. Bu hadde silindirleri içerisinden geçen malzemeye her bir istasyonda istenilen ayarda kalınlık azaltma uygulayacak şekilde tasarlanmıştır (Heydari vd., 2017). Sac levhaları birleştirmek için kullanacağımız rulo yapıştırma makinesinin tasarımı ve imalat görüntüsü Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12. Rulo yapıştırma makinesi tasarımı ve imalatı

Rulo yapıştırma kısmına girmeden önce sac levhaların belirli sıcaklıkta belirli bir süre tavlınması ve ondan sonra kalınlık azaltma işlemi yapılması gerekmektedir. Bu amaçla rulo yapıştırma makinesinin hemen önüne bir ısıtıcı fırın tasarlanıp üretilmiştir.

Sistemi ısıtmak için 2000 watt gücünde rezistans teli kullanılmış ve sıcaklık kontrolü içinde gazlı termostat kullanılmıştır.



Şekil 5.13. Rulo yapıştırma makinesi ısıtma düzeneği

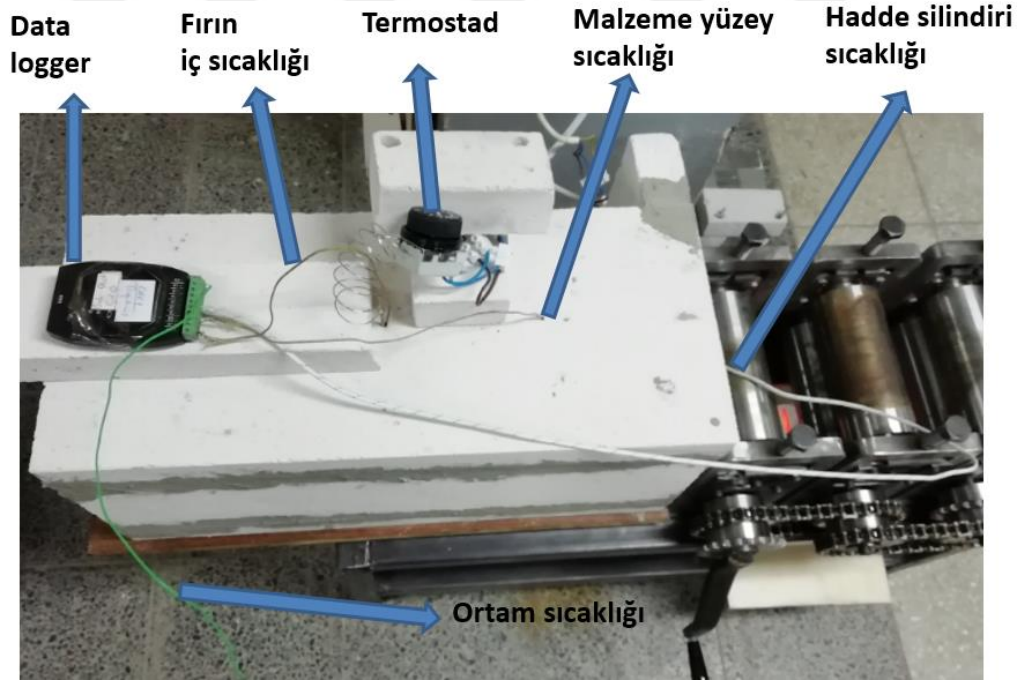
Fırın içerisinde ısıtılan levhaların fırından çıktıktan sonra rulo yapıştırma hadde silindirlerinin soğuk yüzeyine temasından dolayı sıcaklık farkı olmaması için rulo yapıştırma hadde silindirlerinin olduğu kısımda Şekil 5.14’de görüldüğü gibi ısıtılmıştır. Isıtma işlemi hem alttan ayrı bir sistem ile yapılmıştır hem de ısıtıcı fırının çıkış kısmı rulo yapıştırma kısmına yaklaştırılarak fırından hadde silindirlerine doğru

sıcaklık akışı sağlanmıştır.



Şekil 5.14. Rulo yapıştırma makinesi hadde silindirlerinin ısıtılması

Fırın içerisindeki ortam sıcaklığı, ısıtılan sac levha sıcaklığı, rulo yapıştırma hadde silindirleri sıcaklığı ve dış ortam sıcaklığı verileri data logger (Ordell UDL100) ile toplanmıştır. Verileri toplamak için data logger'a Şekil 5.15'de görülen 4 adet K tipi termokupl bağlanmıştır. Veriler veri toplama programı Dali 08 kullanılarak, Şekil 5.16'daki gibi bilgisayar programından takip edilmiştir.



Şekil 5.15. Isıtma düzeneğine termostat ve termokuplların bağlanması

Dali 08 Data Acquisition and Logging Interface

Menu Ayarlar Yarden

Akış Çihazı 1 izlenisi

(Log) Çihaz Açıklaması

(001) Web Data Logger - 176

Tarih	Saat	C001/1	C001/2	C001/3	C001/4	C001/5
18.06.2021	15:23:39	523.8	273.5	106.2	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:40	523.5	273.8	107.9	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:41	523.3	273.5	107.7	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:42	523.3	273.2	107.5	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:43	523.3	272.8	107.4	ERR	25.0
18.06.2021	15:23:44	523.0	272.8	107.4	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:45	522.6	272.4	107.4	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:46	522.4	272.1	107.4	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:47	522.2	271.7	107.3	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:48	522.2	271.9	107.3	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:49	522.0	270.9	107.3	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:50	521.9	271.0	107.1	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:51	522.0	271.6	107.0	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:52	522.4	271.7	107.0	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:53	522.6	272.8	106.9	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:54	522.8	273.2	106.9	ERR	24.9
18.06.2021	15:23:55					
18.06.2021	15:23:56					
18.06.2021	15:23:57					

18 Haziran 2021 Cuma

TABLO GRAFIK

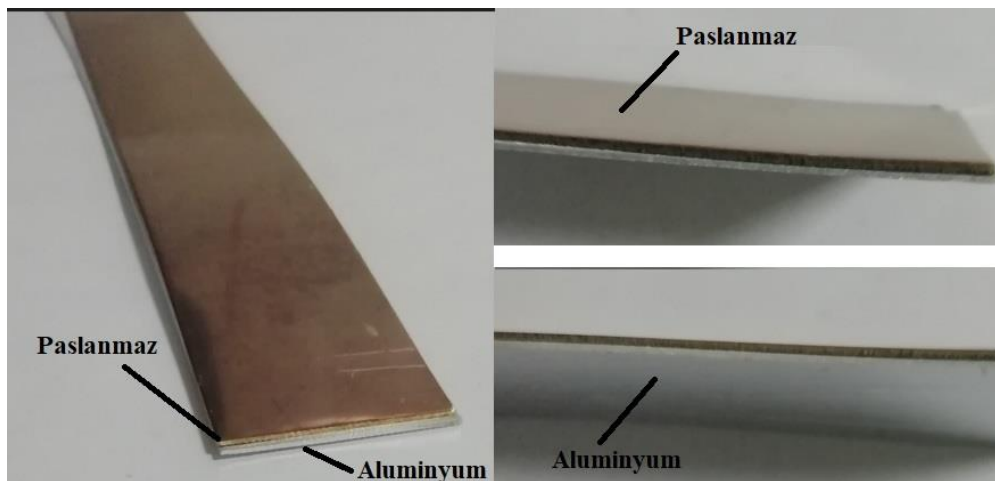
ORDEL

Şekil 5.16. Sıcaklık verilerinin Dali 08 programı ile alınması

5.2.5. Sac levhaların birleştirilmesi

Yüzey hazırlık işlemleri yapılan ve üst üste istiflenen Al 1050 alüminyum ve 304 kalite paslanmaz çelik levhalar önce 430°C sıcaklıkta 60 dk ısıtıcı fırında tavlantıdır (Mehr vd., 2014). Sac levhalar ısıtıcı fırından çıktıktan sonra rulo yapıştırma makinesinde hadde merdanelerinin baskısıyla sırasıyla üç çevrimde ve her bir çevrimde %10 kalınlık azaltımına tabi tutularak sac levhaların birleşimleri sağlanmıştır (Heydari vd., 2017).

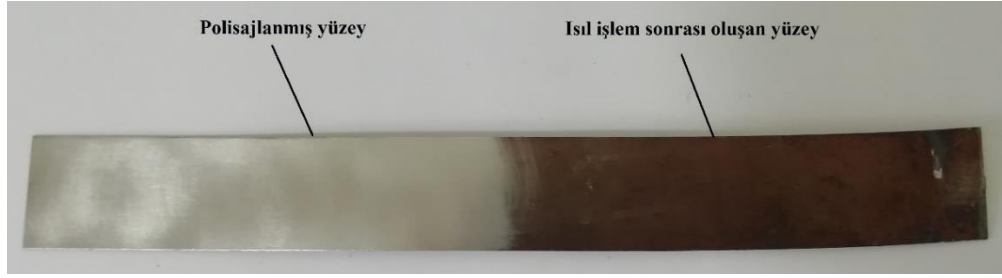
Üretilen çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhasının imalat görüntüsü Şekil 5.17’de görülmektedir.



Şekil 5.17. Rulo yapıştırma işlemiyle birleştirilmiş Al 1050-304 paslanmaz bimetalik levhası

Isıl işlem sırasında yüzeyinde krom-oksit oluşarak renk değiştiren 304 paslanmaz çelik sac malzemesi birleşim sonrası yüzeye Şekil 5.18’deki gibi polisaj

işlemi uygulanarak yüzeydeki krom-oksit tabakası giderilmiştir.



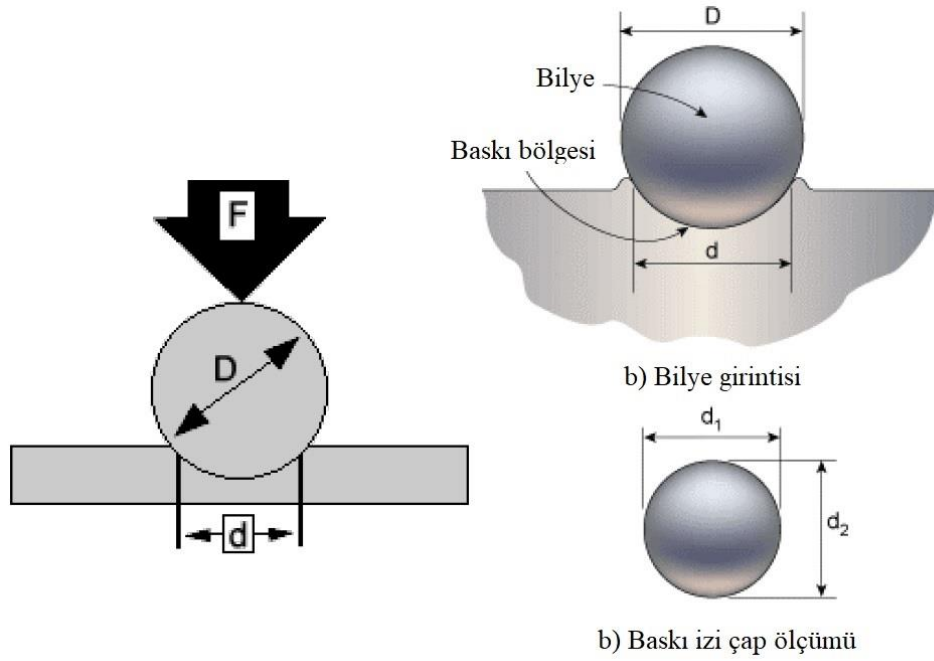
Şekil 5.18. Isıl işlem sonrası oluşan yüzey tabakasının polisaj ile giderilmesi

5.2.6. Birleştirilen çift katmanlı levhalara mikro sertlik, çekme ve soyulma testlerinin uygulanması.

5.2.6.1. Mikro sertlik

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyon durumuna karşı göstermiş olduğu dirençtir. Sertlik ölçümü, malzemeye bilinen miktarda bir yük ile sert bir ucun batırılması ile ölçülür. Malzemenin plastik deformasyona karşı koyma direnci akma dayanımı ile alakalı olduğundan, böyle bir kuvvetin uygulanmasıyla sertlik miktarı göreceli olarak belirlenir. Sertlik değeri izafi bir kavramdır tek başına bir değer ifade etmese de başka bir değer ya da malzeme ile karşılaştırıldığında bir anlam ifade etmektedir. Sertlik ölçme yöntemi malzeme özelliklerini belirlemede çekme testi işleminden sonra en çok tercih edilen yöntemlerdendir.

Brinel sertlik deneyi, malzeme üzerine belirli bir yükün, belirli bir çap ölçüsünde sert bir malzemeden imal edilmiş bilye ile belirli bir süre uygulanması sonucunda oluşan iz çapının ölçülmesi yöntemidir. Brinel sertlik ölçüsü, bilye üzerine uygulanan yükün malzeme yüzeyi üzerinde elde edilen izin yüzey alanına bölünmesiyle elde edilir.



Şekil 5.19. Brinel sertlik deneyi

Brinel sertlik değeri Denklem 5.1'deki eşitlik ile bulunur.

$$HB = \frac{F}{2\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5.1)$$

Burada;

F: Uygulanan kuvvet

D: Bilya çapı (mm²)

d: Oluşan iz çapı (mm²)

Standart yapılan deneylerde genellikle 10 mm çap ölçüsüne sahip sertleştirilmiş çelik bilye, 300 kg yük 30 saniye süresince uygulanarak yapılır. HB (Brinel Sertlik Değeri) işaretinin yanına bilye çapı/uygulanan yük/uygulanan süre sırasına göre yazılır. Örneğin; 80HB 3/400/20 şeklinde yapılan bir gösterimde, deney işleminin 3 mm çap ölçüsüne sahip bilye ile 400 kg yükün malzeme üzerine 20 saniye süreyle uygulanmasını ifade etmektedir. Uygulamada daha büyük bilye çapları ve büyük yükler malzeme yüzeyinde ezilmeler ve tahribatlar oluşturacağı için daha küçük yük ve bilye çapı ölçüleri seçilmelidir. Brinel setlik ölçüm yönteminin en büyük dezavantajı yük-çap seçimlerinin malzemeye göre yapılması gereğidir.

Brinel sertlik ölçme yönteminde batıcı uç olarak kullanılan bilyeler sertleştirilmiş çelikten imal edilir. Uygulamalar sırasında sert malzemelerde çelik bilyenin de ezilebileceğini düşünerek, en çok 400 HB değerine kadar sertlik değerleri ölçülebilir. 550 HB değerine kadar sinter tungsten karbür malzemedan imal edilmiş

elik bilyeler ile uygulamalar yapılabilir. Çok yüksek sertliğe sahip malzemeler için Brinell sertlik deneyi uygun değildir. Böyle bir durumda bilye deformasyona uğrayarak çapı büyür ve oluşan deformasyon izinde yapılan ölçümlerin yanlış olmasına sebep olur.

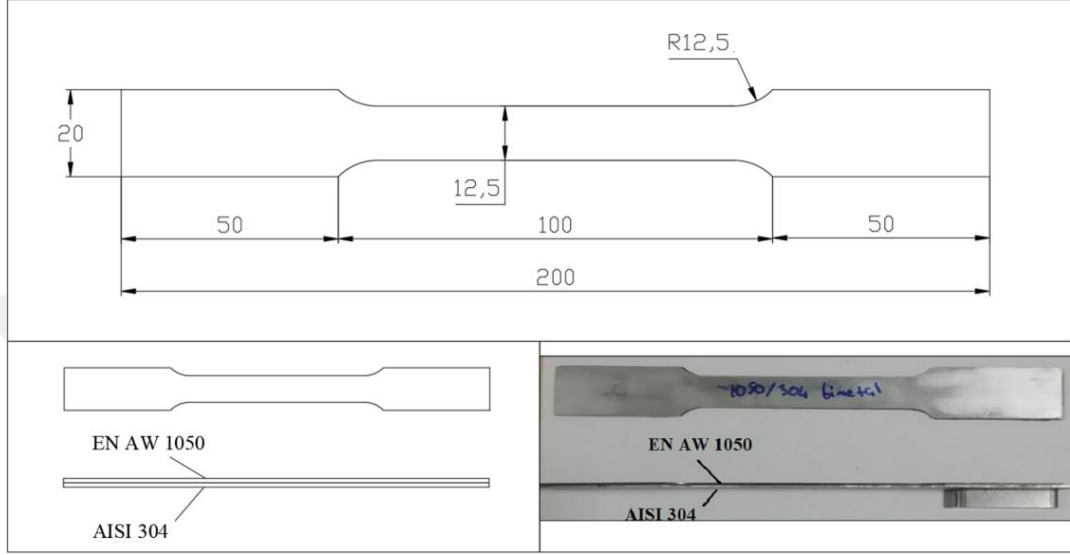
Bu alışmada, Al 1050 ve 304 kalite paslanmaz elik levhalara rulo yapıştırma işleminden önce ve sonra Brinell sertlik lme yöntemi ile sertlik değerleri ölçülerek yapılan ısıl işlemin malzeme özelliklerine etkisi karşılaştırılmıştır. Brinell sertlik değerleri şekil 5.20’de görülen Samsun Uluslararası Akredite Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarında (SAMLAB) bulunan Struers marka Duramin-600 M3 model Brinell sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Sertlik lmleri sırasında 1 mm çapında batıcı uç kullanılmış ve 10 kg n yükleme yapılmıştır. Sertlik lm işlemleri EN ISO 6506 standardına göre yapılmıştır.



şekil 5.20. Brinell sertlik ölçüm cihazı ve sertlik ölçümü

5.2.6.2. Çift katmanlı levhalara çekme ve soyulma testleri uygulanması

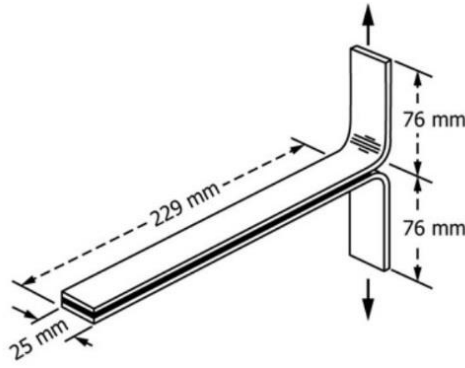
Çekme testleri (ASTM-E8/E8M-15a, 2015) standardına uygun çift katmanlı numuneler hazırlanarak yapılmıştır. Çekme hızı 10 mm/dk olarak ayarlanmış ve çekme testleri sırasında gerilme ve şekil değişim (σ - ϵ) miktarını ölçebilmek için numunelere 50 mm boyunda ekstansometre bağlanmıştır. Çekme testi sonucunda ise çift katmanlı levhaların mekanik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil.5.21. Çift katmanlı çekme test numunesinin hazırlanması

T-soyulma testi ile rulo yapıştırma sonrası iki malzeme arasında meydana gelen bağın birleşme performansı incelenmiştir. Soyulma testleri ASTM D1876 – 08(2015) e1 (T-Peel) standardına uygun olarak hazırlanan numuneler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu test sırasında 25 x 305 mm ölçülerindeki Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik levhalar birleştirildikten sonra 76 mm’lik kısmı açılarak 90° bükülür ve kalan 229 mm’lik kısma soyulma testi uygulanır (bkz. Şekil 5.22). T soyulma testleri 100 mm/dk hızla yapılmış ve bu esnada uygulanan kuvvet ve meydana gelen yer değiştirme miktarı belirlenmiştir. Grafikte tespit edilen en yüksek kuvvet çatlak kuvveti (F_{max}) olarak adlandırılır. Denklem 5.2’de verilen çatlak kuvvetinin sac levha genişliğine (b) oranı ise soyulma direncini (P_a) verir (Nick vd., 2000).

$$P_a = \frac{F_{maks}}{b} \quad (5.2)$$



Şekil 5.22. ASTM D1876-08(2015) soyulma test numunesi ölçüleri ve soyulma testinin yapılması

5.2.6.3. Birleştirilen çift katmanlı levhaların iç yapı muayeneleri (SEM)

Rulo yapıştırma sonrası elde edilen çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalar arasında meydana gelen bağın iç yapı özellikleri Şekil 5.23’de görülen Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezinde (KİTAM) bulunan JEOL JBM 7000f marka taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.

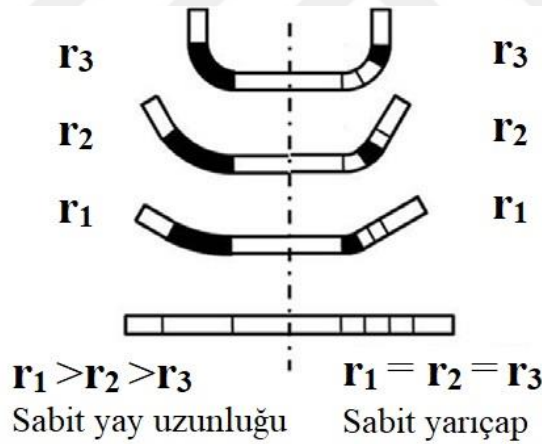


Şekil 5.23. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

5.2.7. Sac açılım ölçüsünün belirlenmesi

Bu çalışmada öncelikle U kesitli profili kusursuz bir şekilde üretecek makinanın imalatı için çalışmalar yapılmıştır. Bu makinenin doğru büküm adımlarında ve kaç istasyonda meydana geleceği tespit edilmiştir.

Makaralı bükme işleminde en önemli parametrelerden biride makineye sürülecek sac malzemenin açılım genişliğidir. Açılım sacı üretilecek malzemenin ürün kalitesi için son derece önemlidir. Makaralı bükme tezgahı tasarlarken form makaralarının dizaynı farklı kalibrasyon yöntemleriyle yapılır (Halmos, 2005). Birinci yöntem "sabit yay uzunluğu" metodudur. Bu yöntemde büküm bölgesindeki yarı çap her işlem adımında azaltılarak devam eder (Şekil 5.24-sol). Bir diğer yöntem, "sabit yarıçap" yöntemidir. Sabit yarıçap yöntemi kullanıldığında, her bir istasyonda büküm bölgesinin yalnızca bir bölümü bükülür (Şekil 5.24-sağ). "Sabit yay uzunluğu" metodunda her bir istasyonda form makaralarının büküm yarıçapları değişirken, "sabit yarı çap" yönteminde bütün istasyonların form makaralarının büküm yarıçapları aynıdır.

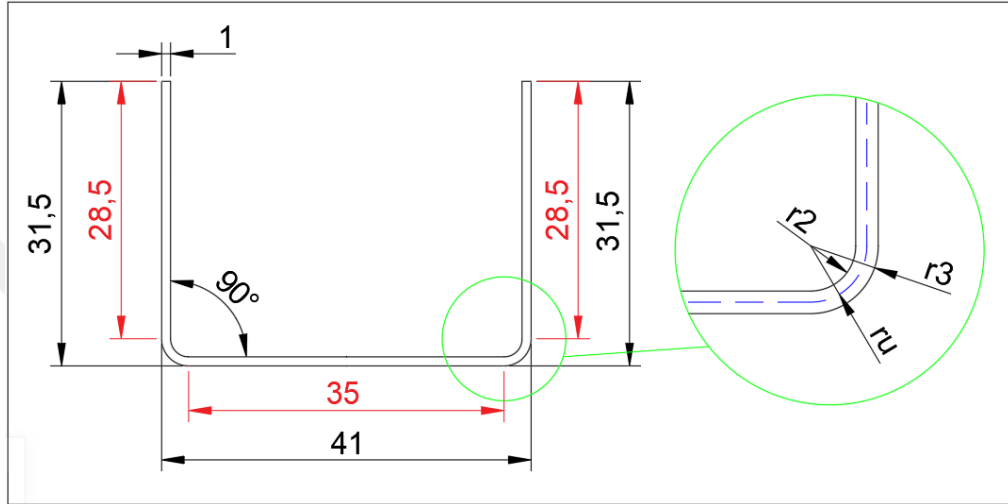


Şekil 5.24. Sabit yay uzunluğu (solda) ve sabit yarıçap (sağda) şekillendirme stratejilerinin gösterimi (Traub vd., 2017).

Sıradan bükme işlemlerinin aksine, makaralı bükme işleminde gerilim ve deformasyon durumu iki boyutla sınırlı değildir, çünkü şekillendirme işlemi yalnızca bir istasyonda değil, aynı zamanda istasyon geçişlerinde de gerçekleşir (Halmos, 2005). Üç boyutlu deformasyon durumundan dolayı, metal levhanın kenar bölgesi uzunlamasına birim şekil değişimine maruz kalır. Aşırı uzunlamasına birim şekil değiştirmelerin meydana gelmesi, profillerin geometrik sapmalarının ana nedenidir. Bu çalışmada U profil için hesaplamalar sabit yarıçap metodu kullanılarak yapılmıştır.

Bunun birinci sebebi özellikle yüksek mukavemetli çeliklerde sabit yarıçap yöntemin geri yaylanmayı büyük oranda azaltan bir yöntem olmasıdır (Weiss vd., 2023). Bir diğer sebebi ise her bir istasyondaki form makaralarının büküm yarıçaplarının farklı olması hem imalat açısından zor hem de maliyetli bir süreçtir.

Üreteceğimiz U profilin kesit ölçüleri Şekil 5.25’de görülmektedir. Deneysel testlerde kullanacağımız makaralı bükme hattının tasarım çalışmaları 1 mm kalınlığa sahip 304 kalite paslanmaz çelik saca göre yapılmıştır.



Şekil 5.25. Üretilen U profilin kesit ölçüleri

Bölüm 4.9.1’de verilen matematiksel denklemler yardımıyla üretilen U profilin açılım ölçüsü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

İç büküm yarıçapımız sac kalınlığının 2 katı olduğu için denklem 4.5’i kullanarak;

$$r_u = r_i + 0,4t$$

Tarafsız eksenin çember uzunluğunu Denklem 4.2’den;

$$l_{\varphi} = 2\pi \cdot r_u = 2\pi (r_i + 0,4 \cdot t) = 2 \cdot 3,14 (2 + 0,4 \cdot 1) = 15,072 \text{ mm}$$

Büküm bölgesinin uzunluğunu ise Denklem 4.3’den;

$$l_b = l_{\varphi} \cdot \frac{\alpha}{360} = 15,072 \cdot \frac{90}{360} = 3,768 \text{ mm}$$

Sac levha açılım ölçüsünü Denklem 4.1’den;

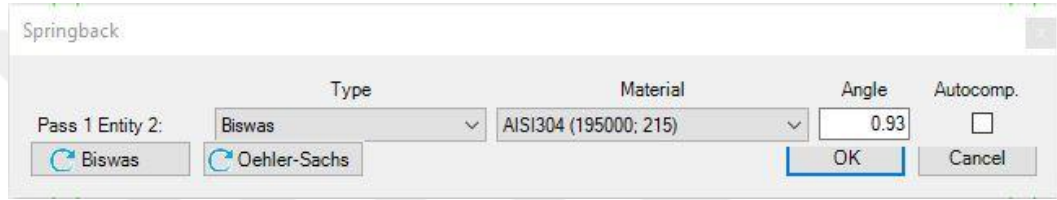
$$l_0 = 28,5 + 28,5 + 35 + 3,768 + 3,768 = 99,536 \text{ mm}$$

Olarak buluruz.

5.2.8. U profil çiçek açılımının yapılması

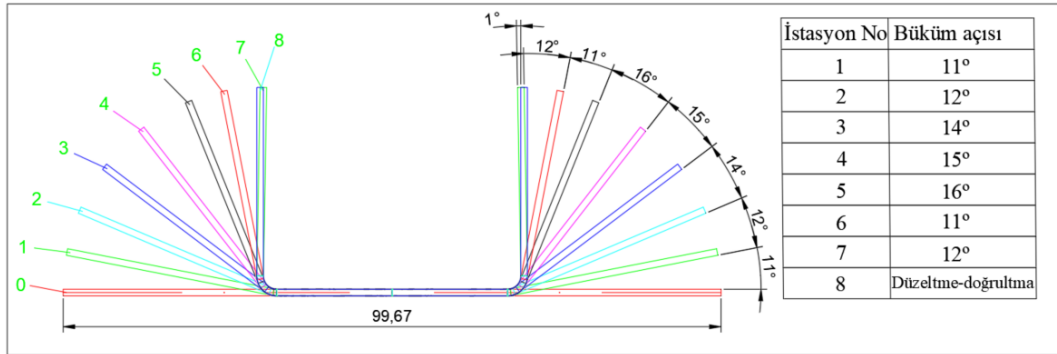
Çiçek açılımı makaralı bükme işleminin ilk adımı olan sac büküm açılarını kademe kademe gösteren 2 boyuttan 3 boyuta geçişi sağlayan bir operasyon sürecidir

(Abeyrathna vd., 2016a). Çiçek açılımında her bir istasyonda uygun açı değerine göre yapılması sac levhanın bükümü sırasında büküm bölgesinde meydana gelen gerilme yığılmalarını düzgün bir şekilde dağıtarak kesitte oluşabilecek kusurlar önlenmiş olacaktır (Cheng vd., 2020). Ayrıca ilk istasyondaki büküm açısının belli bir değerde tutulması kenar yüzeyde oluşacak dalgalanma kusurunu da önleyecektir (Tehrani vd., 2006). Sac malzemede meydana gelebilecek geri yaylanma kusurunun önüne geçebilmek için Şekil 5.26’da Copra RF programında yapılan geri yaylanma hesabına göre 0,93° lik bir geri yaylanma olduğu görülmüştür. Hesaplanan bu değere göre son istasyonda içeri doğru yaklaşık 1° lik bir açı verme gereği duyulmuştur (bkz. Şekil 5.27).



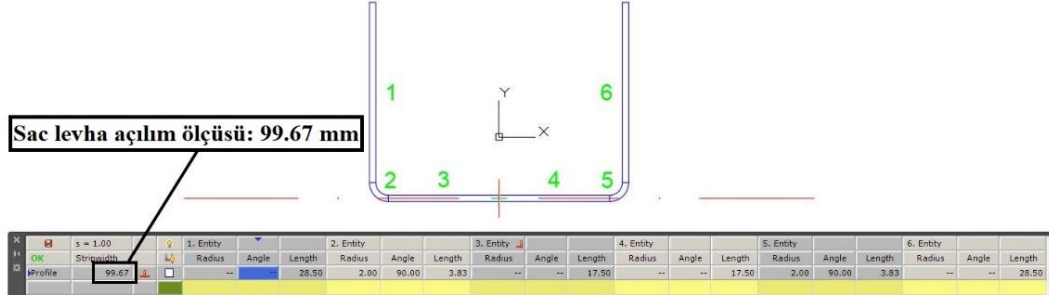
Şekil 5.26. Copra FR programında geri yaylanma hesabı

Üretilecek U profil için 7 adımda büküm operasyonları Copra RF programında Şekil 5.27’deki gibi yapılmış ayrıca son istasyonda üretilen profilin kalibrasyonunu yapmak için bir düzeltme doğrultma istasyonu eklenerek toplamda 8 istasyon olarak belirlenmiştir (Wiebenga vd., 2013).



Şekil 5.27. U profil çiçek açılımı ve büküm açısı artışları

Aynı zamanda Şekil 5.28’de program tarafından yapılan hesaba göre sac açılım ölçüsü 99,67 mm olarak hesaplanmıştır. Bölüm 5.2.7’de yapılan matematiksel hesap sonucu bulmuş olduğumuz 99,536 mm’lik değere yakınsak bir değer olduğu görülmektedir.

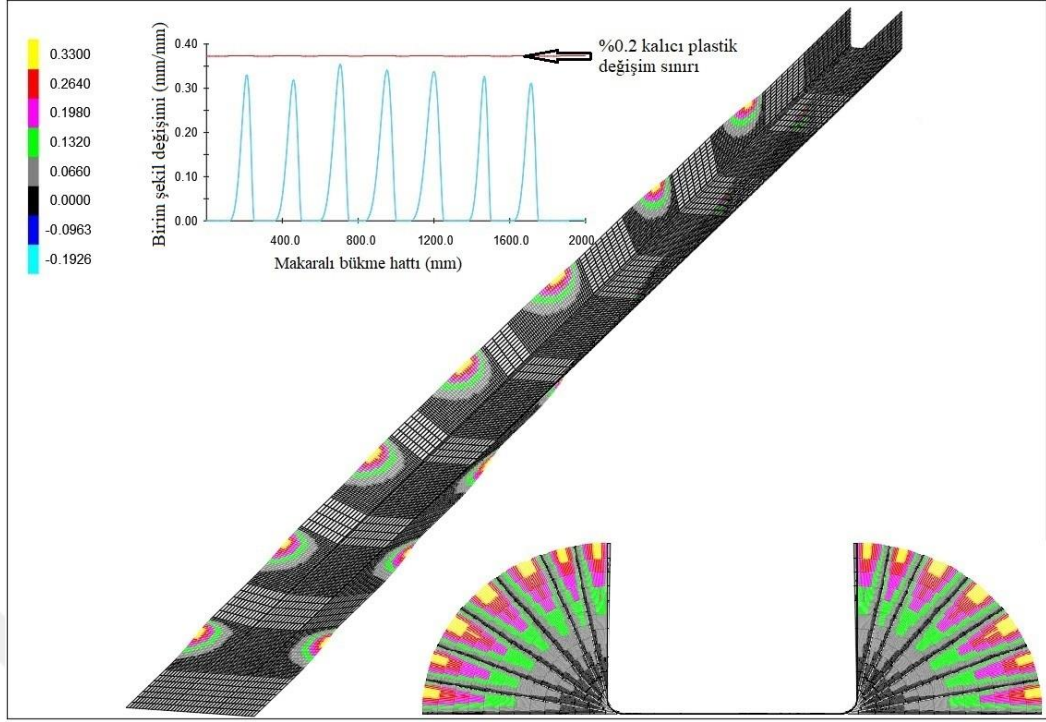


Şekil 5.28. U profil sac levha açılım ölçüsü hesabı

5.2.9. Ön analiz çalışmasının yapılması

Belirlenen çiçek açılımından sonra nihai sonlu elemanlar analizinin uzun ve zahmetli olmasından dolayı öncesinde Copra RF programında basitleştirilmiş bir ön analiz çalışması yapılmıştır. Deformasyon Teknoloji Modülü (DTM) analizi denilen bu ön analiz ile form makaraları dizaynı yapılmadan önce sacın belirlenen büküm adımlarına göre nasıl bir davranış izleyeceği tahmin edilmektedir.

Doğru bir çiçek açılımı elde edebilmek için sac levhanın büküm bölgelerinde burulma birim şekil değiştirme sınırını (BLS) aşp aşmadığı kontrol edilmiştir (Farzin vd., 2002). Burulma birim şekil değiştirme sınırının kontrolü Copra RF programında test edilmiştir. Burulma birim şekil değiştirme sınırı, makaralı bükme tezgahı büküm operasyonlarında meydana gelen birim şekil değiştirmelerin eşit bir şekilde her bir istasyona dağıtılarak birim şekil değişimi sonucu meydana gelen yığılmaları önlemek için uygun çiçek açılımının belirlenmesi ve aynı zamanda istasyonlar arasındaki mesafenin belirlenmesi için önemli bir kriterdir (Lindgren, 2007). Şekil 5.29'da görülen diyagramda, eğrilerin tepe noktaları sac levhanın her şekillendirme adımından geçerken o bölgede meydana gelen maksimum birim şekil değişimi değerlerini göstermektedir. Şekil 5.29'da görülen yatay kırmızı çizgi malzemenin akma dayanımı limit sınırı olan % 0,2 kalıcı plastik şekil değişimi sınır değerini göstermektedir ve yazılım tarafında belirlenmektedir. Büküm operasyonları sonucunda 0,375 birim şekil değişimi sınır olarak belirlenmiştir. Sac levhanın form makaralarından geçtiği sırada o bölgede birim şekil değiştirmeler maksimum değere ulaşmaktadır ve bu tepe noktalarının bu sınır değeri aşmaması istenir (Paralikaş vd., 2010). Mümkün olan en optimum tasarım bu birim şekil değişimlerinin her bir istasyona eşit bir şekilde dağıtılması ve bu sınır değerinin altında kalmasıdır. Bu sınır değerinin üstünde meydana gelen şekil değişimlerinde hataların meydana gelmesi muhtemeldir.



Şekil 5.29. Yapılan çiçek açılımına göre Copra RF programında her bir istasyonda akma dayanım limitinin kontrolü

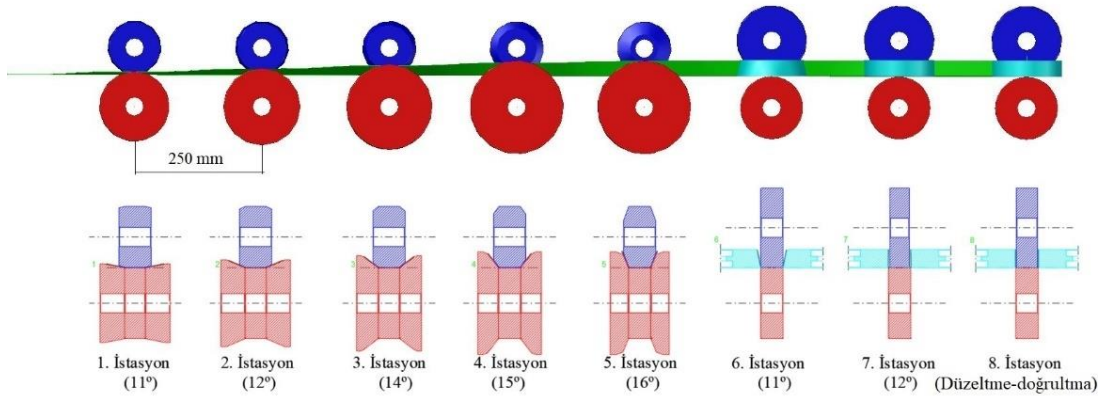
Yapılan analiz çalışmalarında, alt form makara çapı 123 mm, üst form makara çapı 106 mm ve yan form makara çapları ise 136 mm olarak belirlenmiştir. Burada üst form makara çapından ziyade alt form makara çapının belirli bir değerin üstünde olması gerekmektedir aksi taktirde boyuna eğilme kusurlarının ortaya çıktığı görülmektedir (Wang vd., 2022). Yapılan ön analiz çalışması sonucu elde edilen verilere göre Tablo 5.6’da istasyonlar arası mesafelerin minimum ne kadar olması gerektiği Copra RF programı tarafından önerilmiştir. Programın bize önermiş olduğu istasyon aralıkları her bir istasyon arası için farklı ölçülerdedir. Bunun sebebi her bir istasyondaki deformasyon uzunluğunun birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Bhattacharyya vd., 1984). Üretim kolaylığı açısından her bir istasyon arası mesafenin eşit bir şekilde olması gerektiğine karar verilmiş ve ayrıca ileriye dönük başka imalatlar içinde aynı tezgâhın kullanılabileceği düşünülerek istasyonlar arası mesafenin optimum 250 mm olarak belirlenmesine karar verilmiştir (Üretilen makaralı bükme makinesinde istasyonlar arası mesafe 156 mm ile 400 mm mesafe arasında ayarlanabilmektedir).

Tablo 5.6. Ön analiz çalışması sonrası istasyonlar arası olması gereken minimum mesafeler

İstasyonlar	İstasyonlar arası olması gereken min. mesafe (mm)
8 - 7	152,788
7 - 6	165,154
6 - 5	176,931
5 - 4	187,043
4 - 3	195,817
3 - 2	201,409
2 - 1	203,500

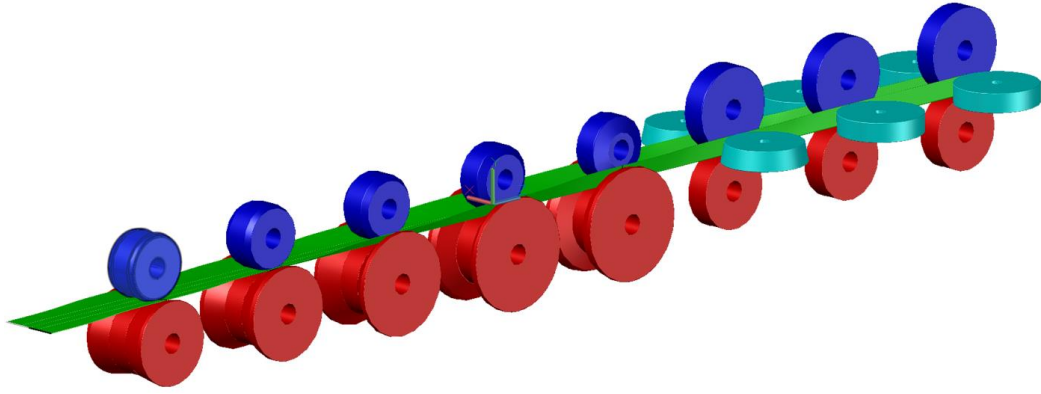
5.2.10. İstasyon form makaralarının tasarımı

Yapılan ön analiz çalışmasından sonra optimum çiçek açılımı ve istasyonlar arası mesafe belirlenip bu kriterlere göre her bir istasyonda metal levhalara şekil verecek olan alt, üst ve yan form makaralarının 2D tasarımı Copra RF programında Şekil 5.30’da görüldüğü gibi yapılmıştır. Son üç istasyonda açısal hız değişiminden dolayı yan bükümlerin alt form makaralarıyla yapılması durumunda sac levha yüzeyinde çizikler meydana geleceğinden 6, 7 ve 8. istasyonlarda yan bükümlerin tahriksiz yan makaralar ile yapılması uygun görülmüştür.



Şekil 5.30. Makaralı bükme tezgâhı form makaraları 2D tasarımları

Sonlu elemanlar analizi için gerekli olan form makaraları ve bu form makaraları ile şekil alacak çift katmanlı sac levhanın 3D modellemesi Şekil 5.31’deki gibi yapılmıştır.



Şekil 5.31. Form makaraları ve sac levhanın 3D tasarımları

5.2.11. Sonlu elemanlar analizi için algoritma seçimi

Kısa sürelerde büyük şekil değişimlerinin olması durumu, yarı durağan büyük şekil değişimleri, karmaşık sürtünme ve temas problemleri, çarpışma problemleri dinamik açık(implicit) veya dinamik kapalı(explicit) algoritmalar ile çözülür. Kullanılan bu algoritmalar yer değiştirmeleri birim zamanlarda hesap edip toplayarak zamana bağlı sayısal bir yöntem ile sonuca ulaşırlar. Bu yer değiştirmelerin hesabını yaptıktan sonra birim şekil değişimi değerlerini ve gerilmeleri hesap ederler. Dinamik açık algoritma ve dinamik kapalı algoritma arasındaki temel fark, hız veya ivmenin tanımlanmasıyla ilgilidir. Kapalı yöntemde, birim zaman sonunda ivmeler ve hızlar hesaplanır ve daha sonra birim zaman sonundaki yer değiştirmeler ile hesaplanır. Açık algoritmada ise birim zamanda doğrusal bir yer değiştirme hesaplanır daha sonra denklemleri birim zamanın başında hesaplayıp ivme ve hızları bulunur. Sonrasında ise birim zaman sonundaki yer değiştirme hesaplanır.

Dinamik açık algoritmalar, sınır koşulları yapıyı yavaş etkilediğinde ve birim şekil değişimi hızlarının etkileri minimum olduğunda kullanılmalıdır. Birim şekil değişiminin bir fonksiyonu olarak gerilim artışı oluşturulduğunda yapı açık algoritma ile analiz edilebilir.

Dinamik kapalı algoritmalar, birim şekil değişimi oranı 10^{-3} veya daha fazla olduğunda kullanılır. Bu durumlar otomotiv kazaları, patlamalar, düşme ve çarpma gibi olaylardır. Bu durumlarda gerilme ile gerilimin değişiminin yanında birim şekil değişimi hızı da dikkate alınmalıdır.

Hem açık algoritma hem de kapalı algoritma ile aynı tür problemler çözülebilir ve aynı sonuçlar elde edilebilir. Aradaki fark zaman artışına olan yaklaşımdır. Açık algoritma istenildiği zaman, zaman artışının ne kadar büyük olacağına olanak tanır. Bu artışın hesaplanması global denge için yinelenmesi gerektiğinden biraz zaman alır ve

bu sebeple çözüm süresi uzundur. Kapalı algoritmada zaman artışı hızlı hesaplanır. Global denge için yinelemeye gerek olmadığından zaman artışı otomatik hesaplanır ve kısa sürer.

Bu durumda, analiz koşulları yavaş ise dinamik açık algoritma, analiz koşulları hızlı ise kapalı algoritma seçmek daha uygun olacaktır. Ayrıca dinamik açık algoritmalar için zaman adımları sayısının çok olmasına rağmen çözüm matrisinin (eleman sayısı arttıkça çözüm zamanı da geometrik olarak artmaktadır) her adımda tersini almak gerektirmediğinden kapalı algoritmalara göre problem büyüdükçe ve karmaşıklıklaştıkça avantajı artmaktadır. Bu sebeple dinamik açık algoritmalar metal şekillendirme çalışmalarında çok fazla tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, makaralı bükme işlemi için, sac levha kenarlarında büyük şekil değişimlerinin olması, birden fazla parça (8 istasyonda bulunan alt, üst ve yan makaralar ve sac levha) ile temasın olması, sürtünmeli hareket ve eleman sayısının fazla olması gibi parametrelerden dolayı, dinamik açık algoritmalar kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle hesap yapan ticari bir paket yazılımı olan Copra FEA'dan yararlanılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan dinamik açık algoritmalar deneysel sonuçlara yakın değerler vermesi açısından birçok alanda tercih edilmektedir. Tez çalışması kapsamında Copra RF ve Copra FEA yazılımları Data M Sheet Metal Solutions GmbH ve Netform Mühendislik Makine Metal firmalarının destekleriyle lisanslı olarak kullanılmıştır.

5.2.12. Sonlu elemanlar analizi için model geliştirilmesi

Copra FEA yazılımında sac levhanın şekillendirilmesi için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde sac levha sabit, makaralar sürtünmesiz bir şekilde sac levhanın üzerinden geçerek şekil vermektedir. İkinci yöntemde ise makaralar sabit ve kendi eksenini etrafında dönmekte, sac levha ise sürtünmeli bir şekilde makaralar arasından geçerek şekil almaktadır. Her iki yöntemde de birbirine yakın sonuçlar elde edilmiş olmasına rağmen özellikle sac levhaya gelen kuvvetlerin hesaplanabilmesi ve tahrik gücünün hesaplanması açısından ikinci yöntem tercih edilerek analiz çalışmaları yapılmıştır. Seçilen modelde makaralar şekil değiştirmeyen katılar olarak modellenmiş, sac levha ise deforme olabilen yapı olarak modellenmiştir. Makine tasarımı için yapılan simülasyon çalışmalarında çalışma kapsamında kullanılan malzemelerden mukavemet değerleri daha yüksek olan 1 mm kalınlığında 304 kalite paslanmaz çelik kullanılarak modelleme yapılmıştır. Bunun nedeni tezgâhın ileriye

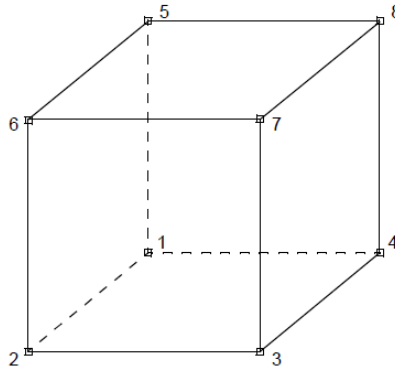
dönük farklı tip ve kalınlardaki malzemeler içinde kullanılabilmesi içindir. Analiz modeli için geliştirilen tezgâh parametreleri Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. Analiz modeli için geliştirilen tezgah parametreleri

Model parametreleri	Sayısal değerler
Malzeme	304 paslanmaz çelik sac
Sac levha uzunluğu	500 mm
Sac levha genişliği	100 mm
Sac levha kalınlığı	1 mm
İstasyon sayısı	8
Üst makara çapı	106 mm
Alt makara çapı	123 mm
Yan makara çapı	136 mm
Sürtünme kat sayısı	0.125
Hat hızı	51,5 mm/s (8 dev/dk)

5.2.13. Sonlu elemanlar analizi için eleman seçimi

Yapılan simülasyon çalışmalarında eleman tipi, Şekil 5.32’de gösterilen kübik eleman modelidir. Bu eleman DataM firması tarafından Copra FEA yazılımında çelik malzemeler için kullanılan standart bir elemandır. Bu eleman, üç doğrusal enterpolasyonlu, sekiz düğümlü, izoparametrik, üç boyutlu kübik elemanlardan oluşur.



Şekil 5.32. Sonlu elemanlar analizi için seçilen eleman modeli

Tek eksenli çekme testi verilerinin karmaşık metal şekillendirme proses simülasyonlarında kullanılmasının yetersiz olduğunu ve bu testlerden elde edilen verilerin Swift modeline dayalı ek malzeme verileri ile desteklenmesi gerekmektedir (Yan vd., 2016). Makaralı bükme işlemlerinde şekil verilecek olan malzemenin

gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi biliniyorsa Swift malzeme modeli kullanılarak çözüm yapılmaktadır (Swift, 1952). Swift yasası Denklem 5.3’de görüldüğü gibi formüle edilir.

$$\bar{\sigma}_p = K(\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n \quad (5.3)$$

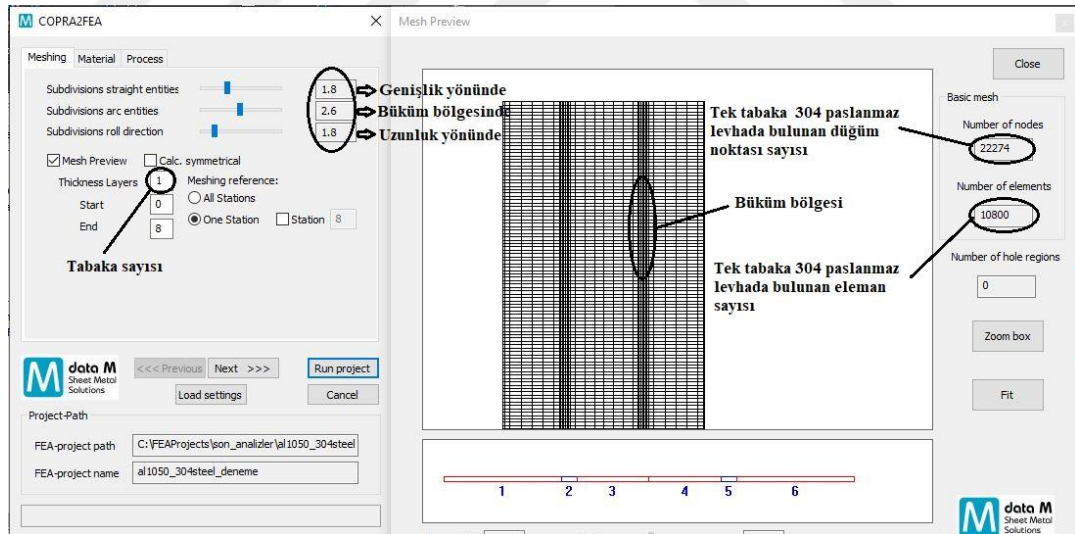
$\bar{\sigma}_p$ = Eşdeğer gerilme (MPa)

$\bar{\varepsilon}_p$ = Eşdeğer birim şekil değiştirme (MPa)

K, ε_0, n çekme testi sonucu elde edilen malzeme sabitleri.

Çekme testi sonucu elde edilen 304 paslanmaz çelik malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Copra FEA programına tanıtılarak malzeme modeli tanımlanmıştır.

Copra FEA programında 500 mm uzunluğundaki tek tabaka 304 paslanmaz çelik levha için eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı Şekil 5.33’de görüldüğü gibi yapılmıştır. Analizi yapılacak sac levhanın ağ modelinde 22274 adet düğüm noktası ve 10800 adet kübik eleman bulunmaktadır. Büküm bölgeleri plastik şekil değişimlerinin meydana geldiği bölgeler olduğundan eleman sayısı bu bölgede düz bölgelere göre daha yoğun tutulmuştur.



Şekil 5.33. Tek tabaka 304 paslanmaz çelik levha simülasyon çalışmaları için eleman ve düğüm noktası sayılarının belirlenmesi

5.2.14. Sonlu elemanlar analizi için kontak seçimi

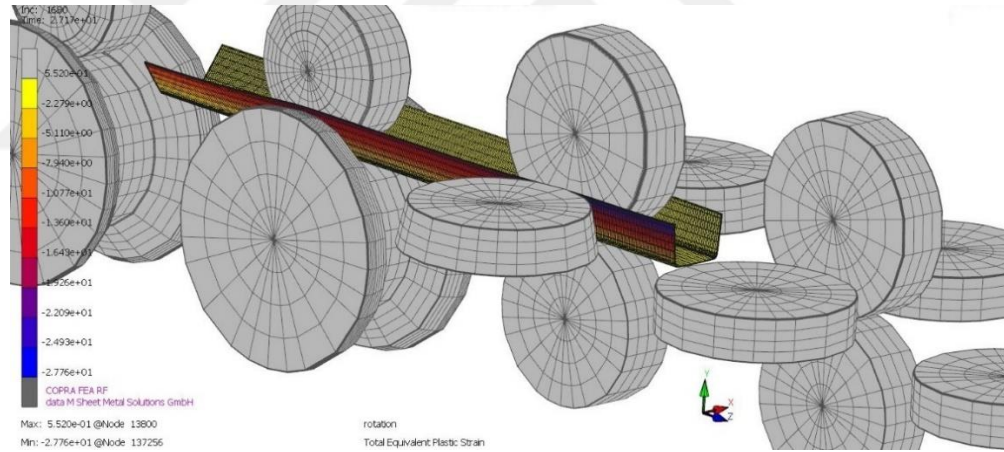
Simülasyon çalışmalarında doğru sonuçların elde edilebilmesi için form makaraları ile sac levha arasındaki temas ilişkilerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Copra FEA yazılımında form makaraları ile sac levhanın

şekillendirilmesinde makaralar sabit ve kendi eksenini etrafında dönmekte, sac levha ise sürtünmeli bir şekilde makaralar arasından geçmektedir.

Makaralı bükme sürecinde sabit makaraların kendi eksenini etrafında dönmesi hareketi ile sac levhanın makaralar arasından hareket ederek şekil alması gerekmektedir. Bu esnada makaralar ile sac levha arasında sürtünme kat sayısı belirlenmiştir. Sürtünme kat sayısı sac levha ile makaralar arasında dinamik bir hareket olduğu için ortalama 0,125 olarak belirlenmiştir (Galdos v.d, 2014).

5.2.15. Sonlu elemanlar analizi için sac levha sınır koşulları

Yapılan simülasyon çalışmalarında, makaralar kendi eksenini etrafında dönerken sac levhanın makaralar arasında ilerlerken izlediği standart koordinat sistemi Şekil 5.34’de verilmiştir. (x) sac levha genişlik yönü, (y) sac levha kalınlık yönü, (z) makaralı bükme hattı ilerleme yönüdür. Sac levhanın (z) yönünde ilerlerken aynı zamanda (x) ve (y) yönlerinde meydana gelebilecek şekil değişimlerine de müsaade etmesi sağlanmıştır.



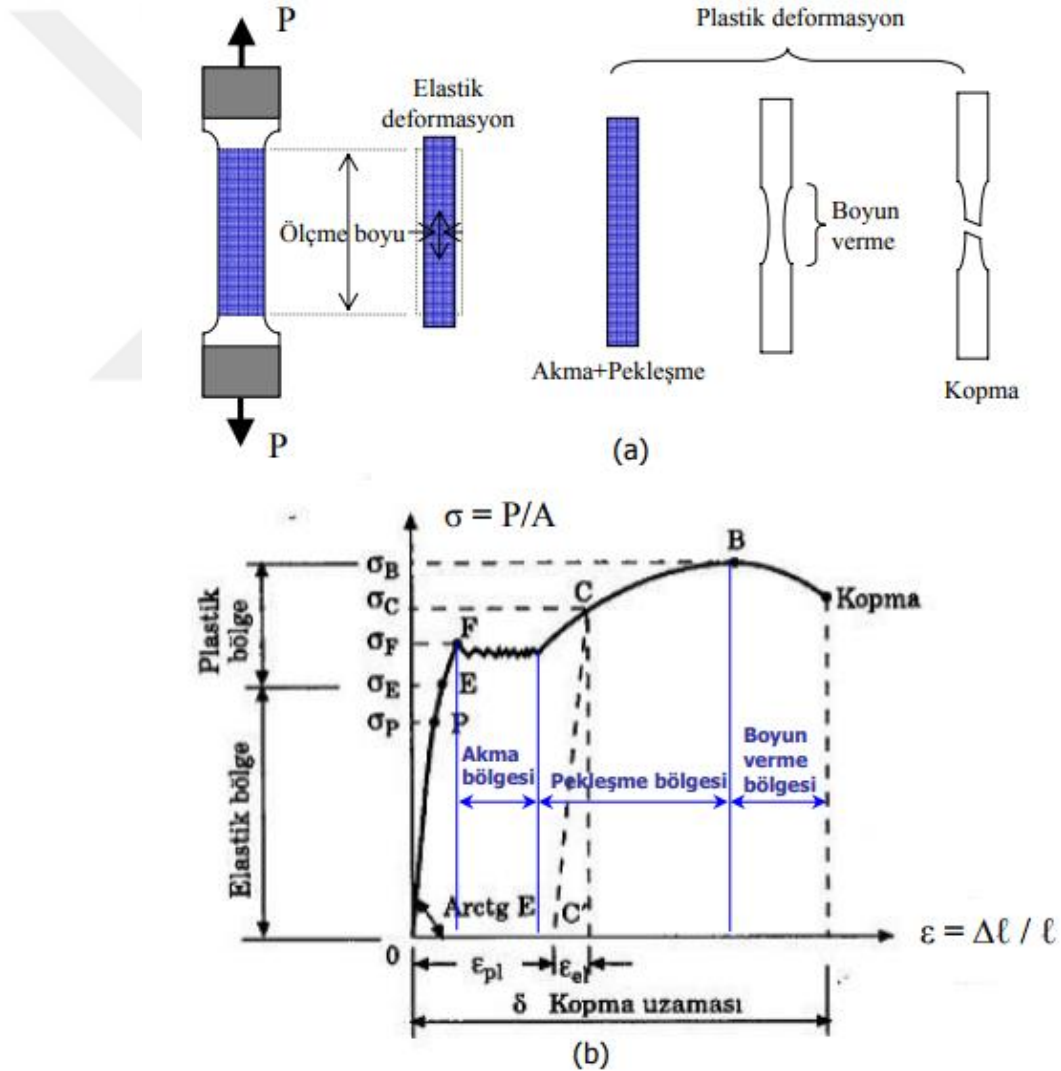
Şekil 5.34. 304 kalite paslanmaz çelik U profil sonlu elemanlar analizi

5.2.16. Sonlu elemanlar için form makaraları sınır koşulları

Form makaraları kendi eksenini etrafında dönerek sac levhanın içerisinde akarak şekil alması esasına göre modellenmiştir. Bu sebeple makaralar x eksenini etrafında dönme serbestlik derecesine sahiptir. Bunun dışındaki hareketleri kısıtlanmıştır. Makaraların dönme hızı 8 dev/dk olarak ayarlanmış bu durumda sac levha makaralar arasından 51,5 mm/s’lik ilerleme hızı ile geçerek şekil almıştır.

5.2.17. Pekleşme modeli seçimi

Malzemelere uygulanan yükler sonucunda elastik bölgeyi geçerek kalıcı deformasyona uğramasına ve bu duruma bağlı mukavemet ve rijitlik değerlerinin artması olayına pekleşme denilir. Mühendislik malzemelerinin plastik davranışlarını ifade eden plastisite modelleri simülasyon çalışmalarına malzeme modeli olarak eklenmiştir. Her malzemenin modeli kendi içerisinde farklı kabuller içermektedir (Esener, 2019). Tersinir tekrarlı kuvvetlerin malzemeye olan etkisi sonucu malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinin farklı modelleri ortaya çıkmıştır. Bu modellerden en sık kullanılanları ise; İzotropik ve Kinematik pekleşme modelleridir.



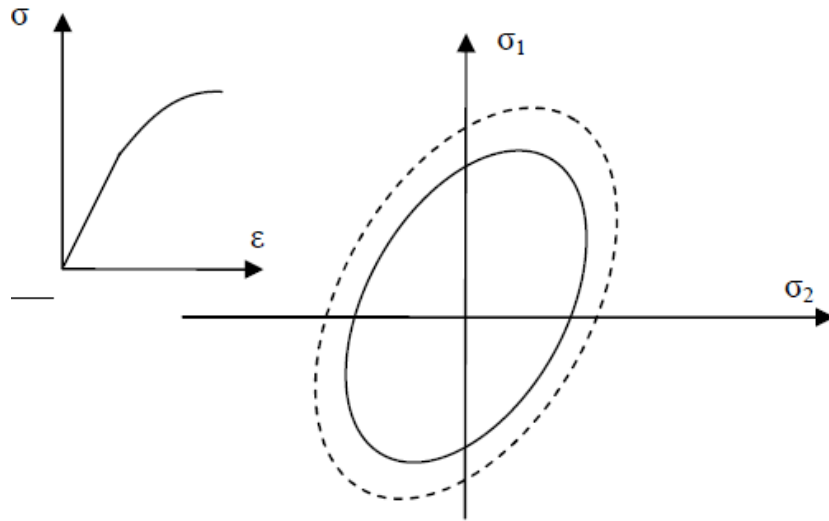
Şekil 5.35. Sünek bir malzemede gerilme birim şekil değiştirme eğrisi üzerinden pekleşmenin gösterimi

Şekil 5.35’de gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi görülen malzeme, plastik bölgede belirli bir C noktasına kadar yüklendikten sonra gerilme tekrar sıfıra getirilirse σ - ϵ diyagramı, OP’ ye paralel C’C doğrusu olur. Şekil değişimi miktarının bir kısmı geri döner, bir kısmı ise kalır.

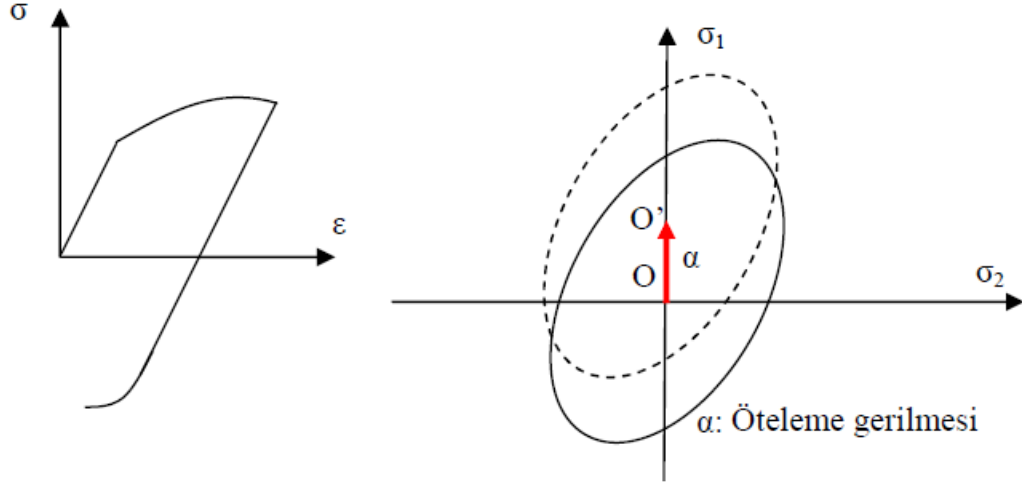
$$\epsilon = \epsilon_{p1} + \epsilon_{e1} \quad (5.4)$$

Bu yükleme ve boşaltmadan işleminden sonra, üzerine OC’= ϵ_{p1} kadar şekil değiştirme kalmış malzeme yeniden yüklenirse σ - ϵ diyagramı olarak C’CB elde edilir. Yani malzeme σ_c gerilmesine kadar lineer elastik karakter gösterir ve bu olaya “pekleşme” denir. Pekişme olayının sonucunda malzemenin sertliği ve akma dayanımı artar, sünekliği ise OC’ kadar azalmış olur.

Pekişme olayı başlangıç akma gerilmesinin deformasyon sırasındaki gelişimini gösterdiğinden akma yüzeyleri, pekişme davranışı ile birlikte değişim gösterirler. Gösterdikleri bu değişim pekişmenin tipini göstermektedir. Eğer akma yüzeyi deformasyon sırasında orantısal olarak genişliyorsa bu duruma izotropik pekişme, boyutsal olarak değişmeyip gerilme uzayında konum değiştiriyorsa bu duruma kinematik pekişme adı verilir. Kinematik pekişmede konum değişimi öteleme gerilmesi adı verilen bir parametre ile tanımlanır. Akma yüzeylerinin izotropik ve kinematik pekişme durumları sırası ile Şekil 5.36. ve Şekil 5.37’de gösterilmiştir.



Şekil 5.36. İzotropik pekişme davranışının şematik gösterimi (Esener, 2019)



Şekil 5.37. Kinematik pekleşme davranışının şematik gösterimi (Esener, 2019)

5.2.18. Akma kriteri seçimi

Malzemelerin farklı doğrultulardaki akma davranışlarını belirten matematiksel modellere akma kriterleri denir. Akma kriterlerinde, malzemenin akma gerilmesi akma kriterinin eşdeğer gerilmesinden büyük olduğu durumlarda akmanın başlayacağını belirtir. Geliştirilen bütün akma kriterlerinde eş değer gerilme farklı olduğu için tahminlerde farklı olmaktadır. Her kriter çeşitli yönlerde uygulanan kuvvetler sonucu oluşan gerilmelerin malzemeyi elastik mi yoksa plastik olarak şekillendireceğini tahmin eder (Kılıç vd., 2019). Sonlu elemanlar analizlerinin sonuçlarının doğruluğunu arttırmak için malzeme modellerinin doğru seçilmesi gerekir. Bu sebeple sayısal çalışmalarda model seçimi önemli bir kriterdir. Mühendislik çözümlerinde von Mises (Mises, 1913) ve Tresca (Tresca, 1864) en yaygın kullanılan akma kriterleridir.

Sünek malzemeler için yaygın olarak kullanılan 2 farklı tipte izotropik akma kriteri vardır.

- Maksimum kayma gerilmesi (Tresca) kriteri
- Distorsiyon (von Mises) kriteri

Maksimum kayma gerilmesi (Tresca) kriterinde, maksimum kayma gerilmesi değeri malzemenin akma gerilmesi değerine eşit olduğu zaman plastik şekil değişimi başlamaktadır. Denklem 5.5’de Tresca kriterine göre akma tanımlanmıştır.

$\sigma_{\max}$: Maksimum asal gerilme

$\sigma_{\min}$: Minimum asal gerilme

σ_{akma} : Malzeme akma gerilmesi

$$|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| = \sigma_{akma} \quad (5.5)$$

Distorsiyon (von Mises) keriterinde, plastik şekil değişiminin başlaması için malzeme içerisinde depo edilen şekil değişimi enerjisinin belirli bir kritik değere ulaşması gerekmektedir. Eş değer gerilmenin malzeme akma gerilmesinden büyük veya eşit olması gerekmektedir ($\sigma_{eş} \geq \sigma_{akma}$). Bu kriter Denklem 5.6’da belirtilmiştir.

$\sigma_{eş}$: Eşdeğer gerilme

σ_{akma} : Malzeme akma gerilmesi

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Asal gerilmeler

$\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$: Kayma gerilmeleri

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)} \quad (5.6)$$

Denklem 5.5 ve Denklem 5.6’dan görüleceği gibi von Mises kriteri, Tresca kriterinden farklı olarak sadece maksimum ve minimum asal gerilmeleri değil, tüm gerilme bileşenlerini hesaplama işlemine dahil ettiği için sünek malzemelerin akması için çok iyi sonuçlar vermektedir.

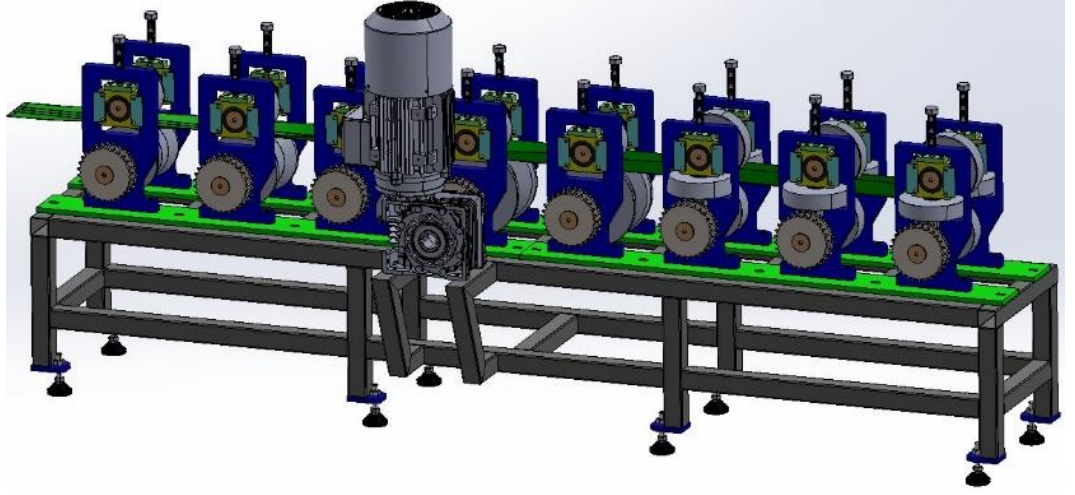
Burada en önemli nokta analiz edilecek malzemeyi en iyi tanımlayan pekleşme modeli ve akma kriterinin seçimidir. Çalışma kapsamında Copra FEA programı ile yapılacak olan sonlu elemanlar çalışmalarında izotropik pekleşme modeli ve von Mises akma kriteri kullanılmaktadır.

Copra RF programında çiçek açılımı ve form makaraları tasarlanan U profilin sonlu elemanlar analizi Copra FEA programında yapılmıştır. Çekme testi sonucu elde etmiş olduğumuz 304 kalite paslanmaz çeliğin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (bkz. Şekil 6.3) programın veri tabanına tanıtılarak nihai analiz çalışması için gerekli modellemeler yapılmış ve sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Yapılan nihai analiz çalışmasından sonra kritik gerilmelerin olduğu bölgelerde form makaraları üzerinden gerekli iyileştirmeler yapılarak analiz çalışmaları tekrar edilmiştir. Form makaraları ve sac levhanın şekillendirilmesi için optimum tasarım parametreleri elde edildikten sonra makaralı bükme tezgahının bilgisayar destekli çizim (CAD) ortamında tasarımına başlanmıştır.

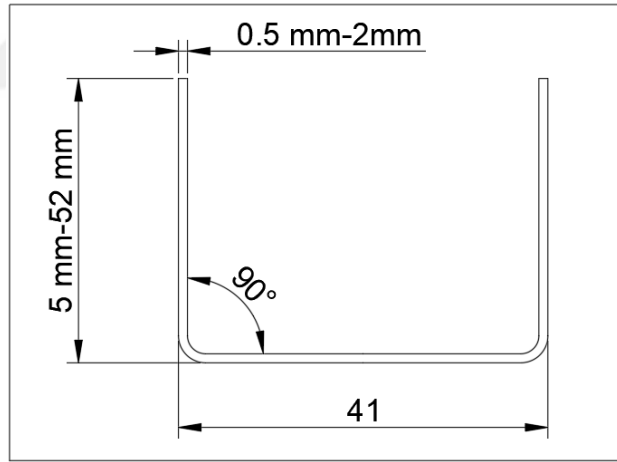
5.2.19. Makaralı bükme makinesinin tasarlanması ve imalatının yapılması.

Analiz sonuçlarına göre bu çalışma için özel olarak tasarlanan makaralı bükme makinesinin tasarım çalışmaları tamamlanmıştır. Tasarımı tamamlanan makaralı bükme makinesinin resmi Şekil 5.38’de görülmektedir.



Şekil 5.38. Makaralı bükme makinesi tasarım resmi

Tasarlanan bu makine ile 0,5 mm'den 2 mm kalınlığa kadar sac malzemeler şekillendirilebilmektedir. Aynı zamanda U profilin yan büküm yükseklikleri sac kalınlığına bağlı olarak 5 mm ile 52 mm arasında değişen ölçülerde üretilebilir (bkz. Şekil 5.39). Ufak bazı ayar parametreleri ve bazı form makaraları üzerinde değişiklikler yapılarak taban genişliği de arttırılıp azaltılabilmektedir.



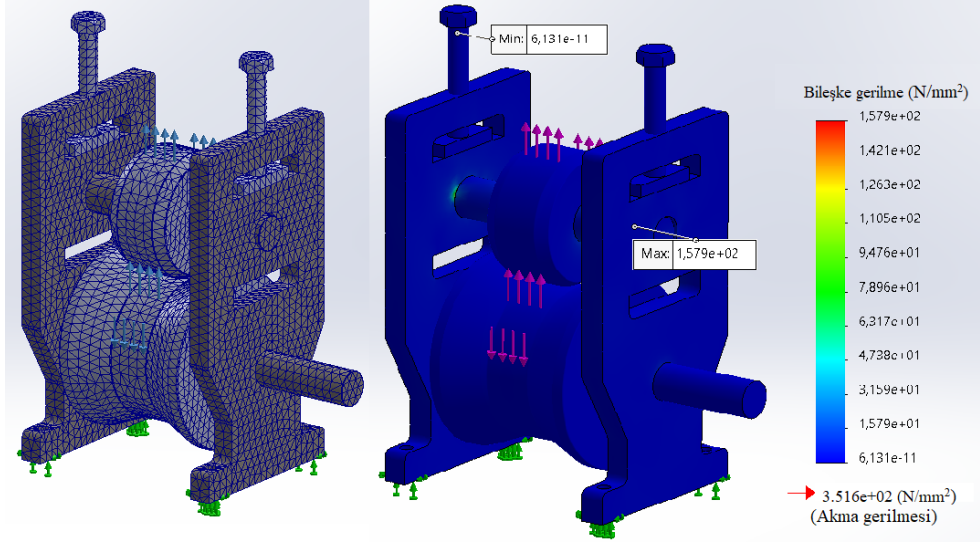
Şekil 5.39. Üretilen makaralı bükme makinesinde üretilebilecek profil kesit ölçüleri ve sac kalınlık ölçüleri

Makine gövdesine ve form makaralarına gelen yükler Copra FEA programında tespit edilip, her bir istasyonda alt, üst ve yan form makaralarına gelen maksimum kuvvetler Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. Makaralı bükme hattında her bir istasyonda meydana gelen kuvvetler

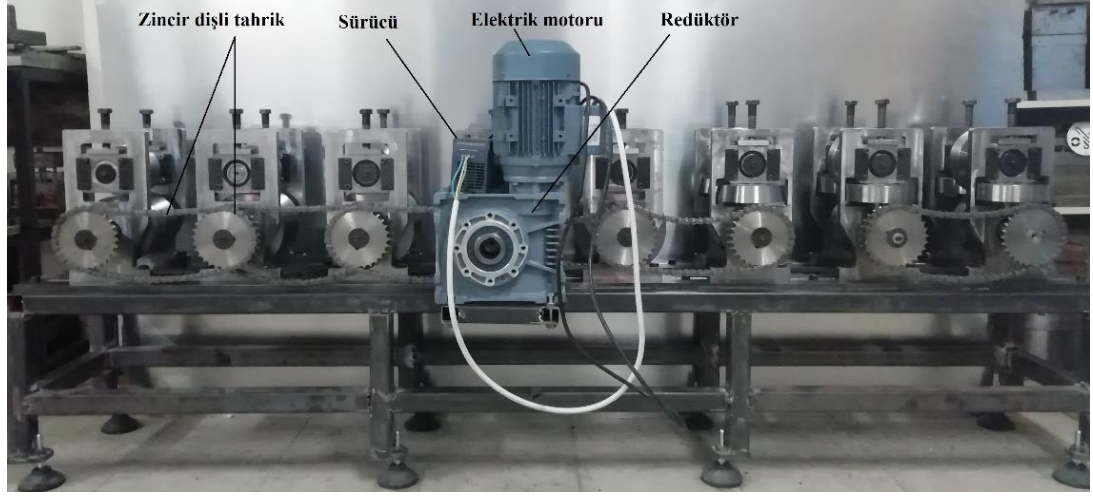
İstasyon No	Form makarası	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)
1. istasyon	Üst	35	1302	-38
	Alt	87	-1303	40
2. istasyon	Üst	-164	1369	14
	Alt	189	-1367	-1
3. istasyon	Üst	-488	1861	52
	Alt	427	-1848	-24
4. istasyon	Üst	-712	1711	97
	Alt	584	-1702	-80
5. istasyon	Üst	-1007	1679	144
	Alt	768	-1671	-80
6. istasyon	Üst	-1010	750	65
	Alt	-10	-664	-44
7. istasyon	Sol	755	-84	14
	Sağ	755	-84	14
	Üst	-627	878	27
	Alt	-5	-894	-74
	Sol	415	26	26
	Sağ	415	26	26
8. istasyon	Üst	-244	414	30
	Alt	-1	-344	-32
	Sol	43	0	1
	Sağ	43	0	1

Büküm işlemi sırasında oluşan bu kuvvetlerin form makarasına, şaft miline ve istasyon ayaklarına etkisi incelenmiştir (Lamprecht & Leonhartsberger, 2021). Maksimum kuvvetlerin olduğu 3. istasyondaki yükler tespit edilip bu istasyondaki şaft mili, istasyon ayağı ve form makaralarının gerilme analizleri yapılmıştır (Şekil 5.40.)



Şekil 5.40. 3. istasyon mesh modeli ve sonlu elemanlar analiz sonucu

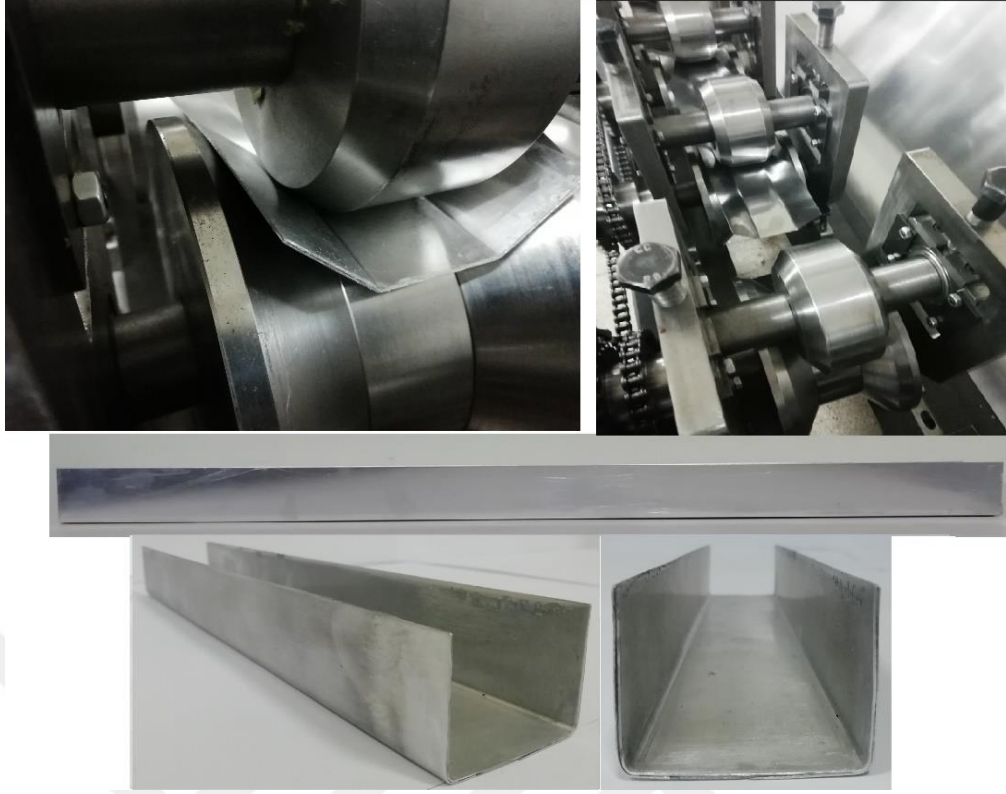
Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan doğrulamalarda yapılar rijit kabul edilmekte bu sebepten dolayı da deneysel ve sayısal olarak elde edilen yükler arasında farklılıklar olabilmektedir (Groche vd., 2014). Yapılan tasarım doğrulama çalışmaları sonucunda model emniyet gerilme payları dahilinde revize edilmiş ve optimum tasarım üzerinden imalat resimleri çıkarılarak imalat işlemleri yapılmıştır. Deneysel testlerimizi yapacağımız makaralı bükme makinesinin imalat görüntüsü Şekil 5.41’de görülmektedir. Makaralı bükme tezgahında tahrik sistemi, istasyonlar arası mesafenin kolay bir şekilde ayarlanabilmesini sağlamak için zincir dişli sistemi olarak belirlenmiştir. Zincir dişli sistemine tahrik edecek redüktörlü motorun seçimi analiz sonuçlarından elde edilen bilgilere göre 0,75 kW gücünde redüktörlü bir elektrik motoru seçilmiştir. Ayrıca makinede farklı hızlarda deneyler gerçekleştirileceği için redüktörlü motoru kontrol etmek amacıyla bir sürücü devresi redüktör üzerine bağlanmıştır. Bu sürücü sayesinde sistem 13 mm/s (2 dev/dk) ile 193 mm/s (30 dev/dk) arasındaki hızlarda çalışabilmektedir.



Şekil 5.41. Makaralı bükme makinesi imalat görüntüsü

5.2.20. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhasından deneysel testlerin yapılması

Analiz sonucu ve matematiksel hesaplar sonucu bulunan sac açılımı genişliğini baz alarak Al 1050 alüminyum alaşımından 100 x 500 x 0,8 mm ve 304 kalite paslanmaz sac levhasından 100 x 500 x 0,6 mm ölçülerinde malzemeler ebatlanmıştır. Ebatlanan bu sac levhalar yüzeylerin kimyasal ve mekanik temizliğinden sonra rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirilerek çift katmanlı levhalar elde edilmiştir. U profil üretimi için tasarlanan ve üretilen makaralı bükme makinesinden çift katmanlı levha kullanılarak numuneler üretilmiştir (Şekil 5.42).



Şekil 5.42. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik U profil imalat resimleri

Sonrasında makine ayar parametreleri değiştirilerek farklı büküm açılarında, farklı istasyon aralıklarında ve farklı makine hızlarında U profil imalatı yapılmış ve bu parametrelerin değiştirilmesinin deney sonuçlarına etkisi gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda değişime tabi tutulacak parametreler Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. Makaralı bükme makinesinde yapılacak deneysel parametreler

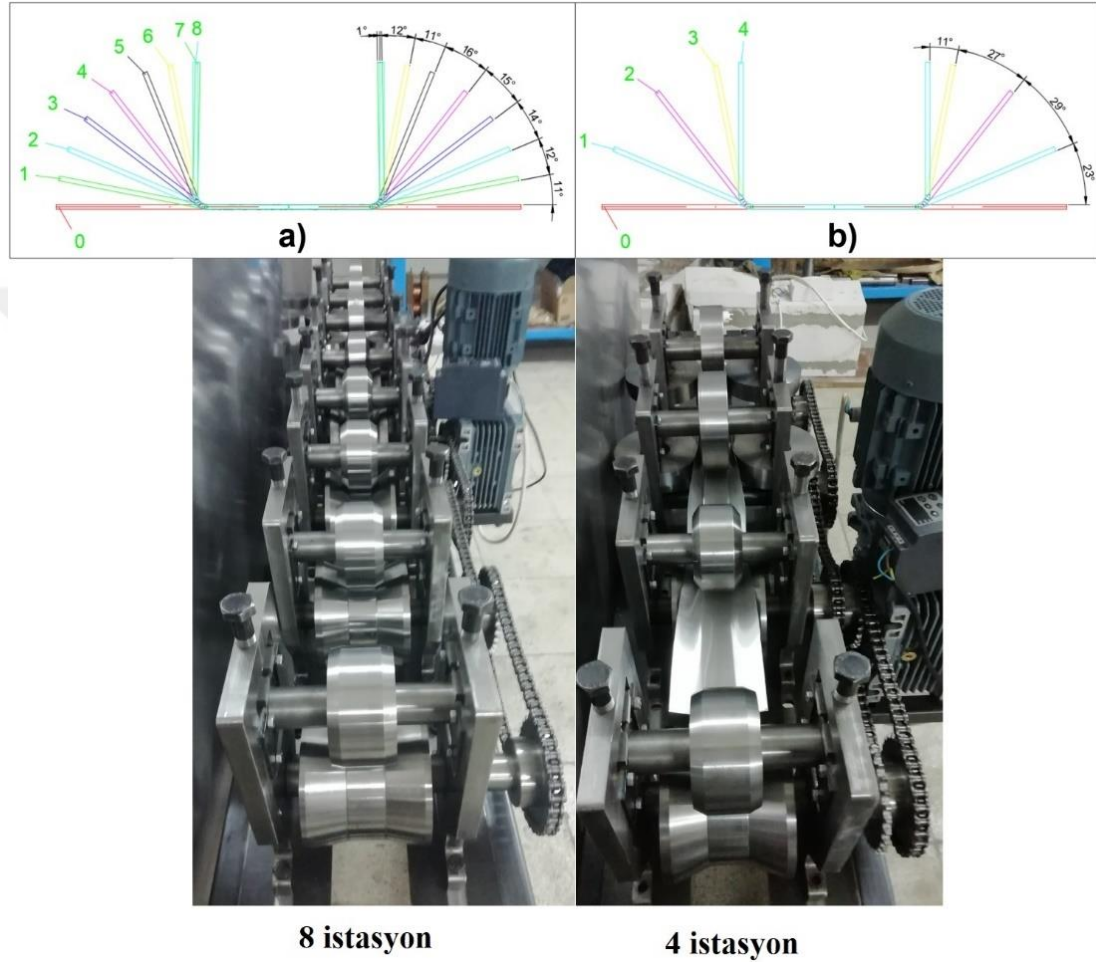
Parametreler	Birim
Büküm açısı artışı	derece (°)
İstasyonlar arası mesafe	mm
Makine hızı	mm/s

5.2.20.1. Büküm açısı artışı deneyleri

Büküm açısı değişiminin, üretilen profil kesitine etkisini incelemek için öncelikle makinenin orijinal büküm açıları olan 8 istasyonlu hali ile imalat yapılmıştır (Şekil 5.43 (a)). Daha sonra makinenin büküm açıları değiştirilerek 4 istasyonlu hali ile imalat yapılmıştır (Şekil 5.43 (b)). Büküm açısı değişimleri Tablo 5.10’da gösterilmiş, her iki deneyde de istasyonlar arası mesafe 250 mm olarak belirlenmiş ve hat hızı 51,5 mm/s (8 dev/dk) olarak ayarlanmıştır.

Tablo 5.10. Büküm açısı artışı değişimi

	Büküm açısı artışı (°)	İst. arası mesafe (mm)	Hat hızı (mm/s)
Deney 1 (Std)	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	250 mm	51,5 mm/s
Deney 2	23°, 29°, 27°, 11°	250 mm	51,5 mm/s



Şekil 5.43. Büküm açısı artışı deneyleri (a) Deney 1 (std) (8 istasyon), (b) Deney 2 (4 istasyon)

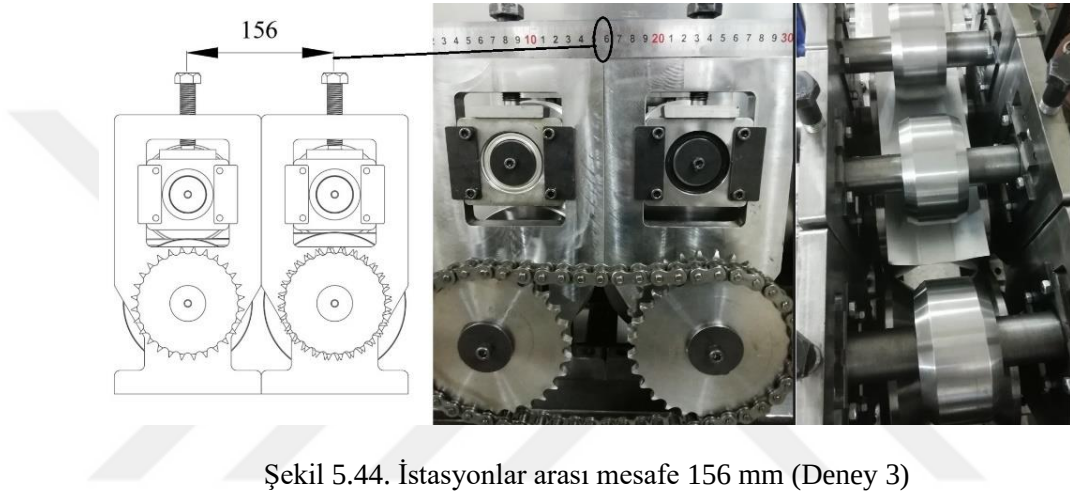
5.2.20.2. İstasyonlar arası mesafe değişimi deneyleri

İstasyonlar arası mesafe 250 mm olan standart makine imalat ölçüsünden önce mesafe 156 mm ye düşürülmüş ve deneyler yapılmıştır. Daha sonra 400 mm mesafeye çıkarılarak deneyler yapılmıştır. Her üç mesafe ölçüsünde de büküm açısı artışları orijinal makine büküm açısı artışı 8 istasyon olarak ayarlanmıştır, hat hızı da 51,5 mm/s'dir (8 dev/dk). Deney sonuçları hem istasyonlar arası mesafenin artması hem de azalması durumunda karşılaştırılmıştır. İstasyonlar arası mesafe değişimi ayar parametreleri Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11. İstasyonlar arası mesafe değışimi

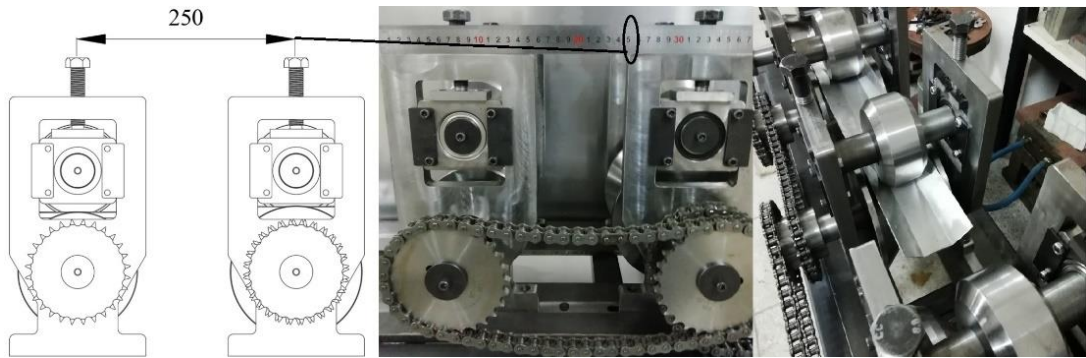
	İst. arası mesafe (mm)	Büküm açısı artışı (°)	Hat hızı (mm/s)
Deney 3	156	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	51,5 mm/s
Deney 1 (Std)	250	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	51,5 mm/s
Deney 4	400	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	51,5 mm/s

İstasyonlar arası mesafenin 156 mm olduğu 8 istasyonlu makineden U profil imalat görüntüsü şekil 5.44’de görölmektedir.



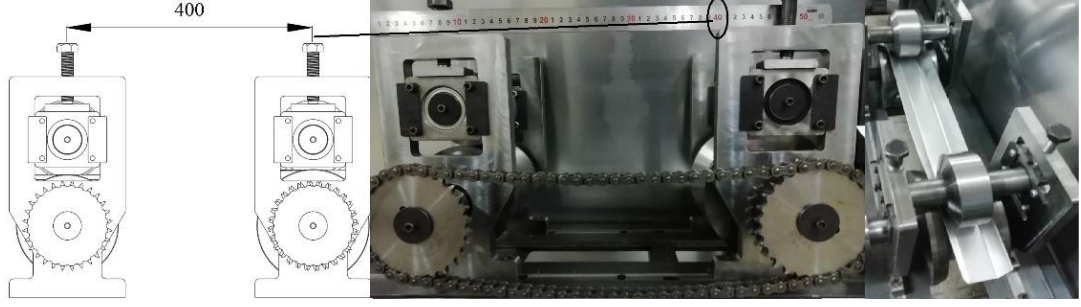
Şekil 5.44. İstasyonlar arası mesafe 156 mm (Deney 3)

İstasyonlar arası mesafenin 250 mm olduğu 8 istasyonlu makineden U profil imalat görüntüsü Şekil 5.45’de görölmektedir.



Şekil 5.45. İstasyonlar arası mesafe 250 mm (Deney 1 (std))

İstasyonlar arası mesafenin 400 mm olduğu 8 istasyonlu makineden U profil imalat görüntüsü Şekil 5.46’da görölmektedir.



Şekil 5.46. İstasyonlar arası mesafe 400 mm (Deney 4)

5.2.20.3. Farklı hat hızları deneyleri

Makaralı bükme tezgâhı hız değişiminin üretilen profil kalitesine etkisini incelemek için farklı makine hızlarında deneysel testler yapılmış ve imal edilen ürünler karşılaştırılmıştır. Tablo 5.12’de üretilecek profiller için makine hız ayarları gösterilmiştir. Yapılan testlerde, standart makine büküm açıları olan 8 istasyon ve istasyonlar arası mesafede 250 mm olarak ayarlanmıştır.

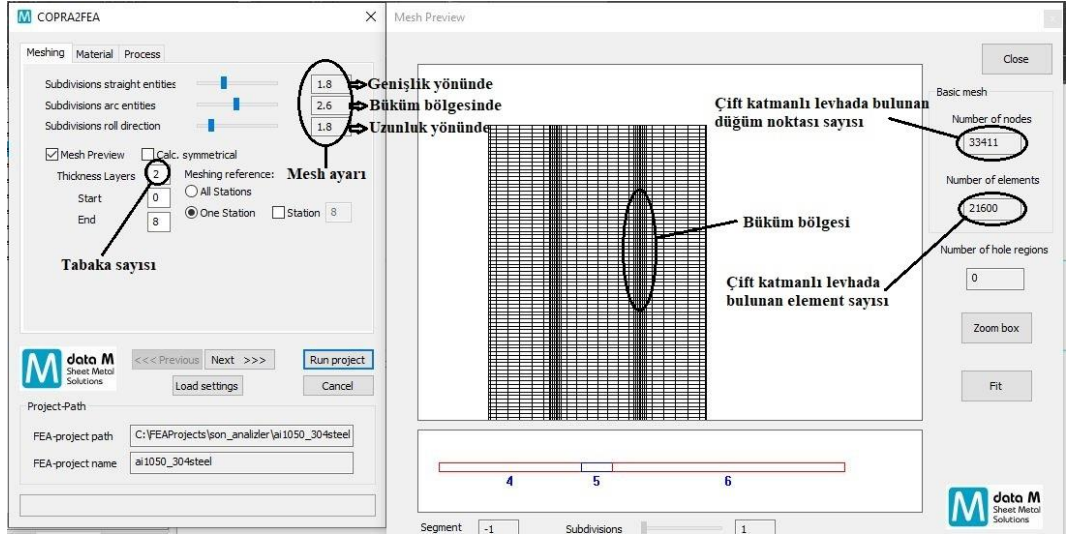
Tablo 5.12. Hat hız değişimleri

	Hat hızı (mm/s)	Büküm açısı artışı (°)	İst. arası mesafe (mm)
Deney 1(std)	51,5 mm/s	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	250 mm
Deney 5	193 mm/s	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	250 mm

5.2.21. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhasından simülasyon testlerinin yapılması

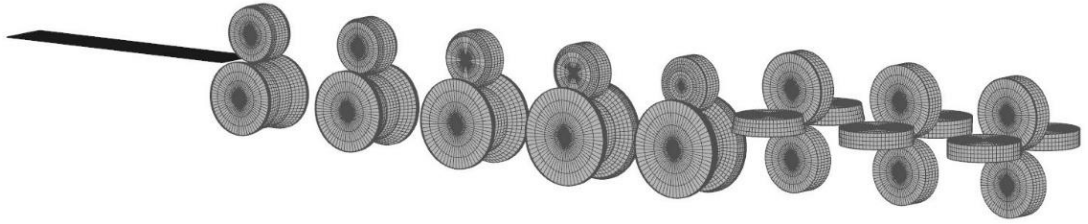
Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit levhasının makaralı bükme yöntemiyle U kesitli profil şekillendirme işlemi sonlu elemanlar yazılımı olan Copra FEA’da simüle edilmiştir. Daha önce çiçek açılımı yapılmış olan U profil için iki boyutlu form makara tasarımları Copra RF programında yapılmıştı (bkz. Şekil 5.30 ve Şekil 5.31).

İki katmanlı levhanın sonlu elemanlar yazılımında analiz çalışmalarının yapılması için gerekli parametre ayarları Şekil 5.47’de görüldüğü gibi yapılmıştır.



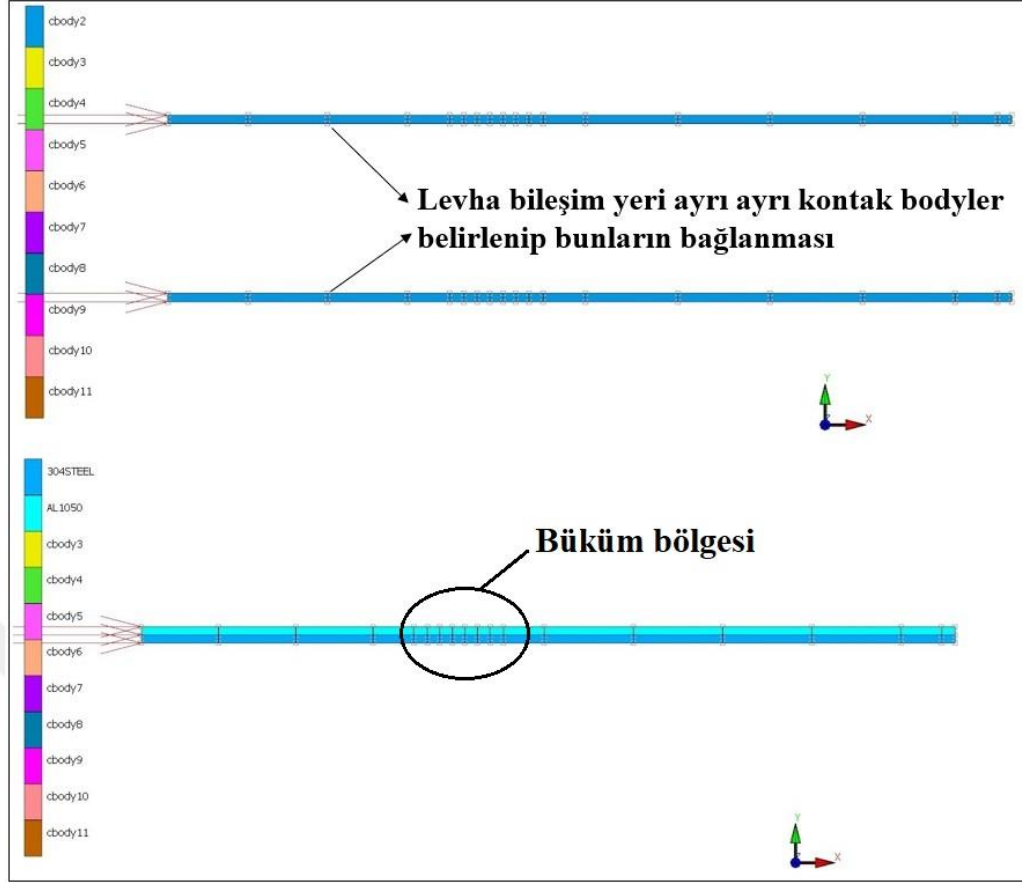
Şekil 5.47. Çift katmanlı levha simülasyon çalışmaları için eleman ve düğüm noktası sayılarının belirlenmesi

Copra FEA programında 500 mm uzunluğundaki çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levha için eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı Şekil 5.47’de görüldüğü gibi yapılmıştır. Analizi yapılacak çift katmanlı sac levhanın ağ modelinde 33411 adet düğüm noktası ve 21600 adet kübik eleman bulunmaktadır. Büküm bölgeleri plastik şekil değişimlerinin meydana geldiği bölgeler olduğundan eleman sayısı bu bölgede düz bölgelere göre daha yoğun tutulmuştur. Çift katmanlı levhaya şekil verecek olan form makaraları ise deforme olmayan rijit gövdeler olarak modellenmiş ve analiz işlemi adımına geçilmiştir (Şekil 5.48).



Şekil 5.48. Simülasyon için form makaralarının ve çift katmanlı levhanın modellenmesi

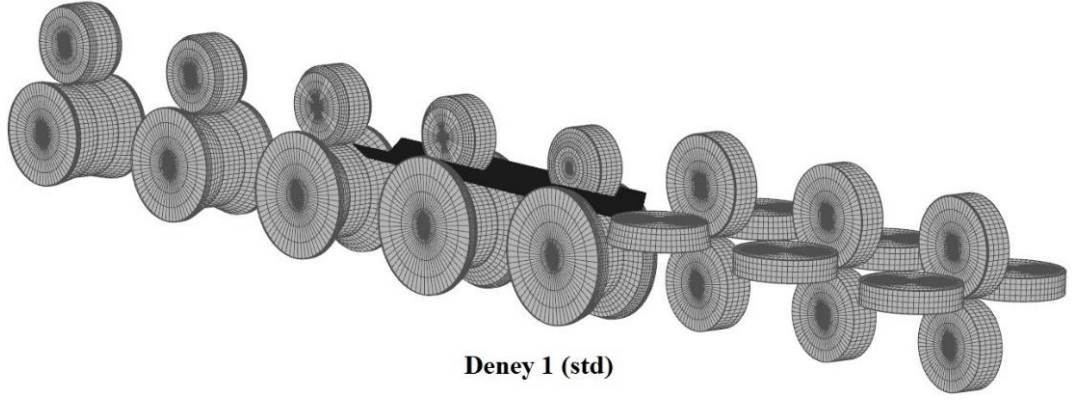
Form makaralarının arasından geçerek şekil alacak olan çift katmanlı levha iki katmana sahip deforme olabilen bir yapı olarak modellenmiştir. Al 1050 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik levhaları düğüm noktalarından birbiri yüzeylerine ayrılmayacak şekilde yapışmış iki ayrı kontak body olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 5.49). Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik levhalarının her biri için çekme testi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme verileri programın veri tabanına kayıt edilerek sayısal olarak incelenecek parametreler için analiz çalışmaları yapılmıştır.



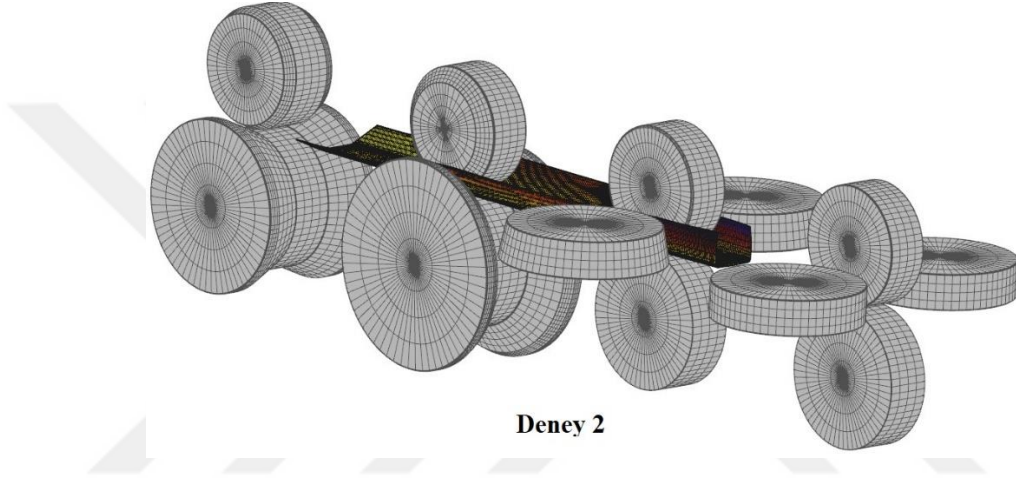
Şekil 5.49. Simülasyon için çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çeliğinin modellenmesi

5.2.21.1. Büküm açısı artışı simülasyon deneyleri

Büküm açısı artışı simülasyon testleri aynı deneysel testlerde olduğu gibi Tablo 5.10'daki verilere 8 istasyon ve 4 istasyon olarak yapılmıştır. Her iki simülasyon testinde de istasyonlar arası mesafe 250 mm olarak belirlenmiş ve hat hızı 51,5 mm/s (8 dev/dk) olarak ayarlanmıştır. Simülasyon testlerinde, U profil şeklini alan çift katmanlı levhanın farklı büküm açısı artışı durumlarında makaralı bükme hattı boyunca oluşan boyuna birim şekil değişimi değerleri, eş değer plastik birim şekil değiştirme değerleri, eş değer elastik birim şekil değiştirme değerleri ve toplam eşdeğer birim şekil değiştirme değerleri kontrol edilmiştir. Aynı zamanda sac levhanın her bir istasyondan geçişi sırasında büküm bölgesinin iç ve dış kısmında kalınlık değişimleri tespit edilmiştir. 8 istasyonlu model için yapılan simülasyon testleri Şekil 5.50'de, 4 istasyonlu model için yapılan simülasyon testleri Şekil 5.51'de görülmektedir.



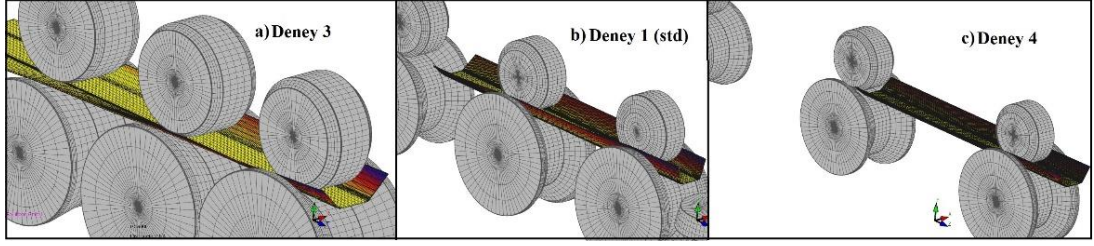
Şekil 5.50. Deney 1(std) (8 istasyon) büküm açısı artışı simülasyon testi



Şekil 5.51. Deney 2 (4 istasyon) büküm açısı artışı simülasyon testi

5.2.21.2. İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon deneyleri

İstasyonlar arası mesafe, deneysel testlerde olduğu gibi 156 mm, 250 mm ve 400 mm olarak Tablo 5.11'deki ölçülere göre simüle edilmiştir. Standart makine ayarlarında 250 mm olan iki istasyon arası mesafe önce 156 mm'ye düşürülerek simülasyon testleri yapılmış daha sonra 400 mm'ye çıkarılarak simülasyon testleri yapılmıştır. Her üç simülasyon testinde de standart makine büküm açısı artışı değerleri (8 istasyonlu model) kullanılmış ve hat hızı 51,5 mm/s (8 dev/dk) olarak ayarlanmıştır. Her üç mesafe içinde yapılan simülasyon testleri Şekil 5.52'de görülmektedir.



Şekil 5.52. İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon testleri (a) Deney 3 (156 mm), (b) Deney 1(std) (250 mm), (c) Deney 4 (400 mm)

5.2.21.3. Farklı hat hızları simülasyon deneyleri

Simülasyon deneylerinde hız değişiminin üretilen profil kalitesine etkisini incelemek için farklı hat hızlarında simülasyon testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı hat hızları simülasyon deneylerinde Tablo 5.12'deki hız parametreleri kullanılmıştır. Yapılan testlerde, standart makine ayarları olan 8 istasyon ve istasyonlar arası mesafede 250 mm olan model kullanılmıştır. Simülasyon çalışmaları önce 51,5 mm/s (8 dev/dk) hızda yapılmış daha sonra hat hızı arttırılarak 193 mm/s (30 dev/dk) hızda yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

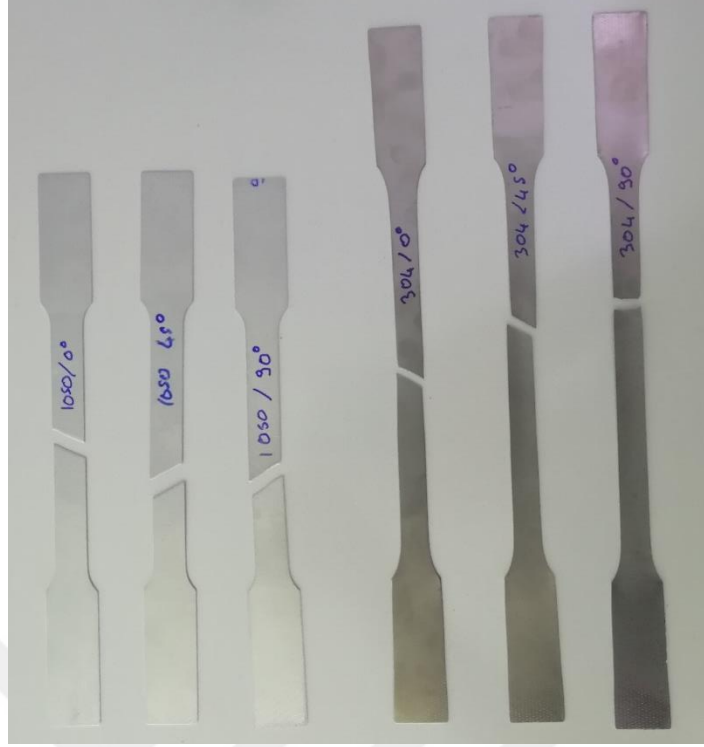
Bu çalışmada, Al 1050 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik levhaları önce rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirilmiş daha sonra makaralı bükme yöntemiyle şekil verme prosesine tabi tutulmuştur.

İlk olarak kullanılacak olan sac levhaların rulo yapıştırma işleminde ısıtma işlemine maruz kalacağı için, ısıtma işlem öncesi ve sonrası çekme testi yapılmıştır. Daha sonra rulo yapıştırma işlemi ile üretilen çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhaları çekme ve soyulma testlerine tabi tutularak mekanik performansları ve yapışma performansları incelenmiştir. Daha sonra elde edilen çift katmanlı levhalar makaralı bükme hattında U profil şekline dönüştürülmüştür. Makaralı bükme hattında yapılan deneyler sırasında, büküm açısı artışı değişiminin, istasyonlar arası mesafenin ve hat hızının çift katmanlı levhaların şekillendirilmesine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan sonra aynı parametreler ile simülasyon çalışmaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarının sonuçları şu şekildedir.

6.1. Sac levhaların ısıtma işlem öncesi ve sonrası çekme test sonuçları

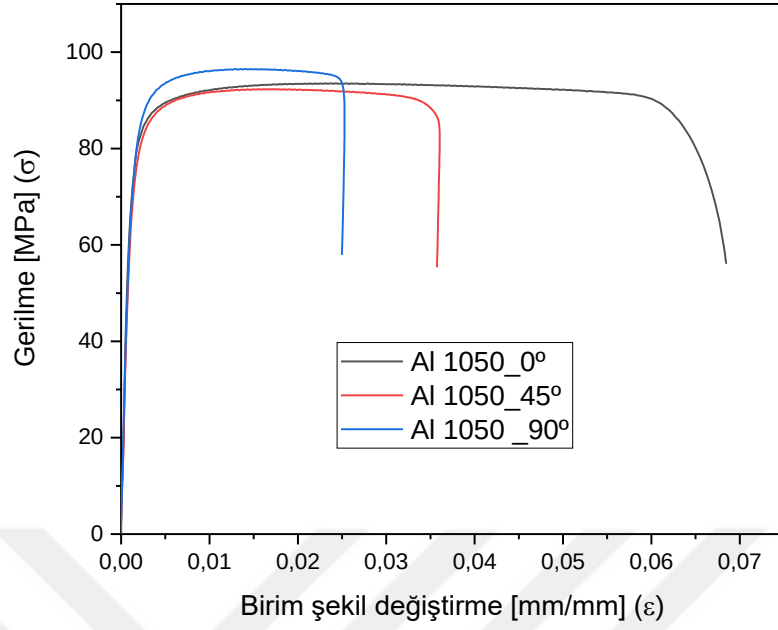
6.1.1. Isıtma işlem öncesi çekme deneyi test sonuçları

Sac levhaların tedarikçiden alındığı haliyle, hadde yönünde, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne 90° olacak şekilde yapılan çekme testlerinde kopan numunelerin görüntüleri Şekil 6.1'de görülmektedir. Numunelerin tamamı boyun vererek sünek kırılma davranışı göstererek kopmuşlardır.

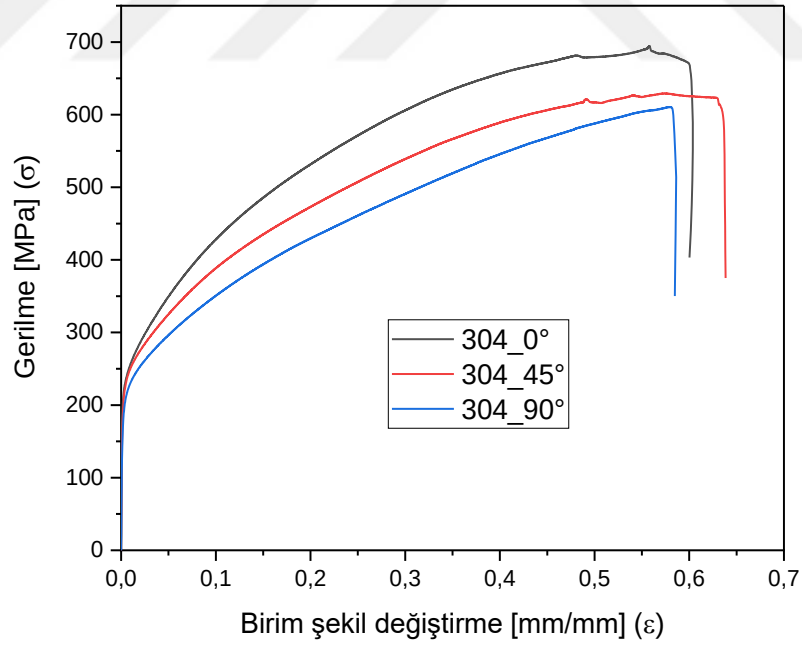


Şekil 6.1. Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik çekme testi sonucu kopan numune görselleri

Tek tabaka ısıt işlemsiz yapılan çekme testleri sonucu gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.2. ve Şekil 6.3’de verilmiştir. Çekme testi sonucunda 304 paslanmaz çelik numunelerin Al 1050 malzemeye göre daha fazla uzama gösterdiği görülmektedir. Numunelerin tamamında belirgin bir akma sınırı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca elastik bölgedeki davranışlarının da lineer olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2. Al 1050 çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi



Şekil 6.3. 304 paslanmaz çelik çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Çekme testleri sonucunda hadde yönünde ölçülen değerlerde Al 1050 alüminyum alaşımının ortalama % 6,1 uzama gösterdiği, 304 kalite paslanmaz çelik sacın ise ortalama % 62,8 uzadığı görülmektedir. Al 1050'nin ortalama akma dayanımı 78 MPa değerinde,

304 paslanmaz sacının ortalama akma dayanımı 203 MPa değerindedir. Bu iki malzemenin çekme dayanımlarına bakıldığında ise Al 1050'nin ortalama 92 MPa değerinde olduğu görülürken, 304 paslanmaz çelik sacının ortalama 663 MPa olduğu görülmektedir.

6.1.2. Isıl işlem sonrası çekme deneyi test sonuçları

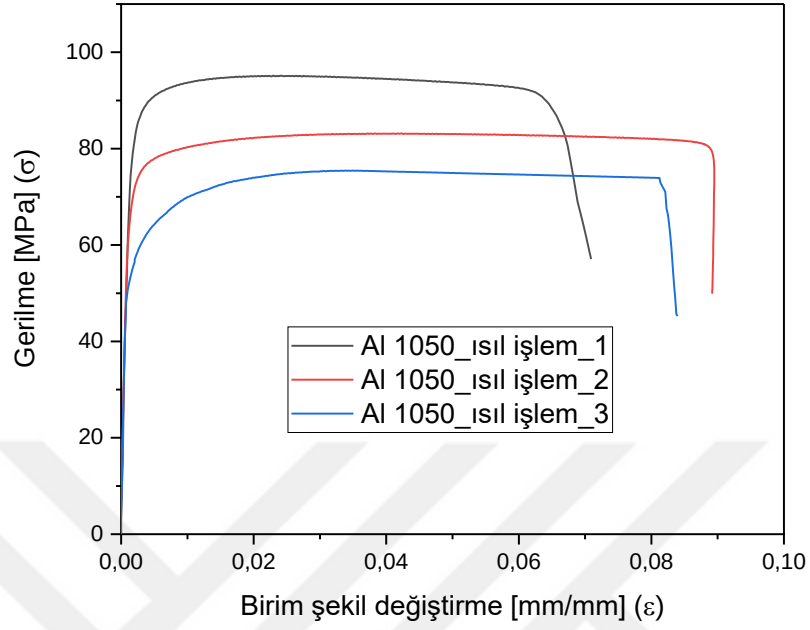
Sac levhalar rulo yapıştırma işlemi sırasında belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre tavlanaacağı için makaralı bükme şekillendirmesi öncesinde malzemelerin mekanik özelliklerinin değişebileceği düşünülmektedir. Bu durumda makaralı bükme işlem adımlarını ısıl işlem sonrası numunelerin test sonuçlarına göre yapmak en doğrusu olacaktır. Rulo yapıştırma prosesinde uygulanan ısıl işlem ve kalınlık azaltma sonrası hadde yüzünde Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik için yapılan çekme testi numunelerinin kopma görüntüleri Şekil 6.4'de görülmektedir.



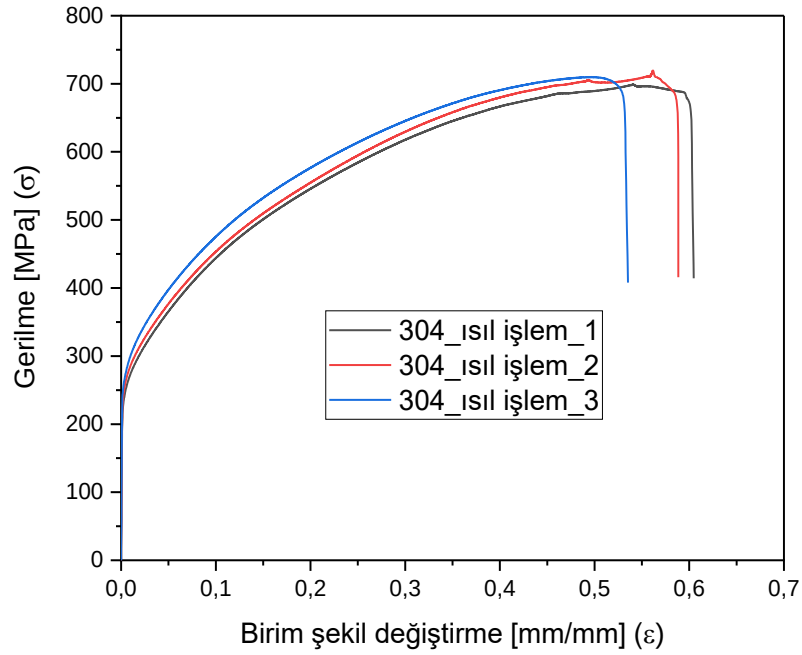
Şekil 6.4. Isıl işlem sonrası Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik malzemelerin çekme test sonucu kopan numune görselleri

Tek tabaka ısıl işlem sonrası yapılan çekme testleri sonucunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Aynı şartlarda ısıl işlem uygulanarak 3'er adet numune üzerinden çekme testleri yapılmıştır. Çekme testi sonucunda 304 kalite paslanmaz çelik malzemede ısıl işlem sonrası malzemenin kopma uzamasında azalma görülürken, akma ve çekme gerilmelerinde artış görülmüştür. Al 1050 malzemede ise ısıl işlem sonrasında malzemenin kopma

uzamasında artış görülürken, akma ve çekme gerilmesi değerleri azalmıştır.



Şekil 6.5. Al 1050 ısıl işlem sonrası yapılan çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi



Şekil 6.6. 304 paslanmaz çelik ısıl işlem sonrası yapılan çekme test sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Malzemelere ısıtıl işlem sonrası yapılan çekme testleri sonucunda hadde yönünde ölçülen değerlerde Al 1050 alüminyum alaşımının ortalama % 8,3 uzama gösterdiği, 304 paslanmaz çelik sacın ise ortalama %58,7 uzadığı görülmektedir. Al 1050'nin ortalama akma dayanımı 73 MPa değerlerinde iken 304 paslanmaz sacının akma dayanımı 224 MPa değerlerindedir. Bu iki malzemenin çekme dayanımları karşılaştırıldığında ise Al 1050'nin ortalama 84 MPa değerinde olduğu görülürken, 304 paslanmaz çelik sacının 685 MPa olduğu görülmektedir.

6.2. Sac levhaların ısıtıl işlem öncesi ve sonrası sertlik testi sonuçları

Çekme testinde olduğu gibi malzemelere ısıtıl işlem öncesinde ve sonrasında sertlik değerleri ölçülüp ve karşılaştırılmıştır. Isıtıl işlem öncesi Al 1050 alüminyum alaşımı için sertlik değeri 25 HB, 304 paslanmaz çelik için sertlik değeri 152 HB'dir. Isıtıl işlem sonrası Al 1050 alüminyum alaşımı için sertlik değeri 21 HB, 304 paslanmaz çelik için 153 HB'dir. Isıtıl işlem öncesinde ve sonrasında ölçülen Brinel sertlik değerleri karşılaştırmaları Tablo 6.1'de verilmiştir. Alüminyum alaşımının sertliğinin ısıtıl işlem sonucu azaldığı görülürken, 304 paslanmaz çeliğin sertlik değerinde biraz artış gözlenmiştir.

Tablo 6.1. Isıtıl işlem öncesinde ve ısıtıl işlem sonrasında ölçülen Brinel sertlik değerleri

	Isıtıl işlem öncesi sertlik değeri (HB)	Isıtıl işlem sonrası sertlik değeri (HB)
Al 1050 alüminyum	25	21
304 paslanmaz çelik	152	155

6.3. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalarının çekme testi sonuçları

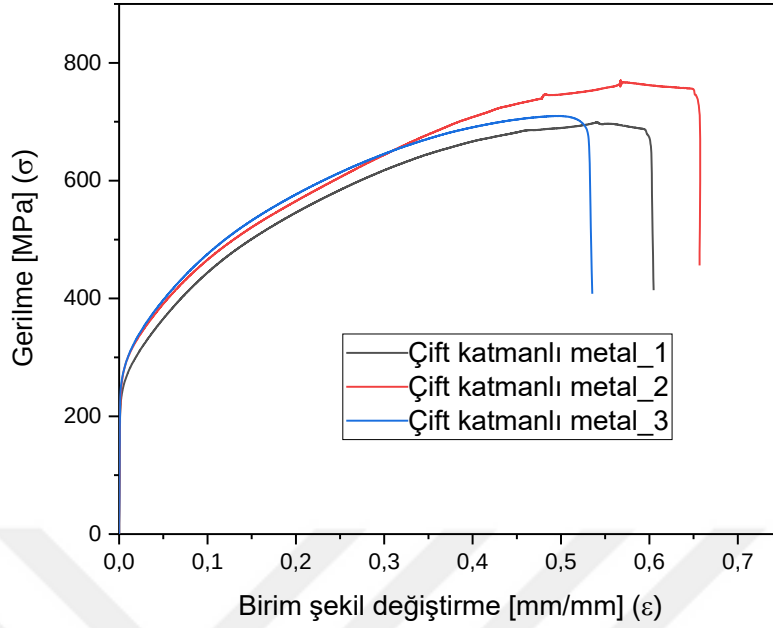
Çekme testleri, rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirilmiş olan Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit levhasına uygulanarak mekanik performansı belirlenmiştir. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhaların çekme testi sonucu kopan numune görselleri Şekil 6.7'de görülmektedir.



Şekil 6.7. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik çekme testi sonucu kopan numune görselleri

Şekilden de görüldüğü gibi tek başına kopma uzamasının çok düşük olduğu Al 1050 alaşımı, 304 paslanmaz çelik ile birleşmesi sonucunda kopma uzamasının paslanmaz seviyesine ulaştığı görülmüş ve 304 paslanmaz ile beraber kopmuşlardır. Alüminyumun malzemenin tek başına düşük süneklik göstermesi ve birleşme sonucu bu şekilde bir davranış göstermesinin makaralı bükme yöntemiyle plastik şekil verme açısından olumlu bir sonuç olacağı düşünülmektedir.

Aynı şartlarda üretilmiş olan 3'er adet numune üzerinden çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik malzemelere yapılan çekme testleri sonucu gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik çekme testi sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit levhasının çekme testleri sonucunda ortalama % 60,1 uzadığı görülmektedir. Çift katmanlı levhanın ortalama akma dayanımı 226 MPa değerindedir. Çift katmanlı malzemenin çekme dayanımına baktığımızda ise 688 MPa olduğu görülmektedir.

Yapılan çekme testi ve sertlik testlerinin karşılaştırmalı tablosu Tablo 6.2’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere 304 kalite paslanmaz çelik sacının ısıtılma uygulamaları sonucu akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve sertlik değeri artış gösterirken, kopma uzamasının azaldığı görülmüştür. Bu durum yaklaşık 430° derecede tavlanıp kalınlık azaltımına tabi olan 304 kalite çeliğin pekleşmeye maruz kaldığını göstermektedir (Esener, 2019). Al 1050 alüminyum alaşımının ise ısıtılma uygulamaları sonucu akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve sertlik değerinde azalma görülürken, kopma uzamasının arttığı görülmüştür. Bu durum, 304 paslanmaz çelikten farklı olarak Al 1050 alüminyum alaşımının pekleşmeye uğramadığı ve mekanik özelliklerinin düştüğünü göstermektedir.

Tablo 6.2. Isıl işlem öncesinde ve ısıt işlem sonrasında mekanik özelliklerin karşılaştırılması

	Isıl işlem öncesi		Isıl işlem sonrası	
	Al 1050	304 paslanmaz	Al 1050	304 paslanmaz
Akma gerilmesi	78 MPa	203 MPa	73 MPa	224 MPa
Çekme gerilmesi	92 MPa	663 MPa	84 MPa	685 MPa
Kopma uzaması	% 6,1	% 62,8	% 8,3	% 58,7
Sertlik	25 HB	152 HB	21 HB	155 HB

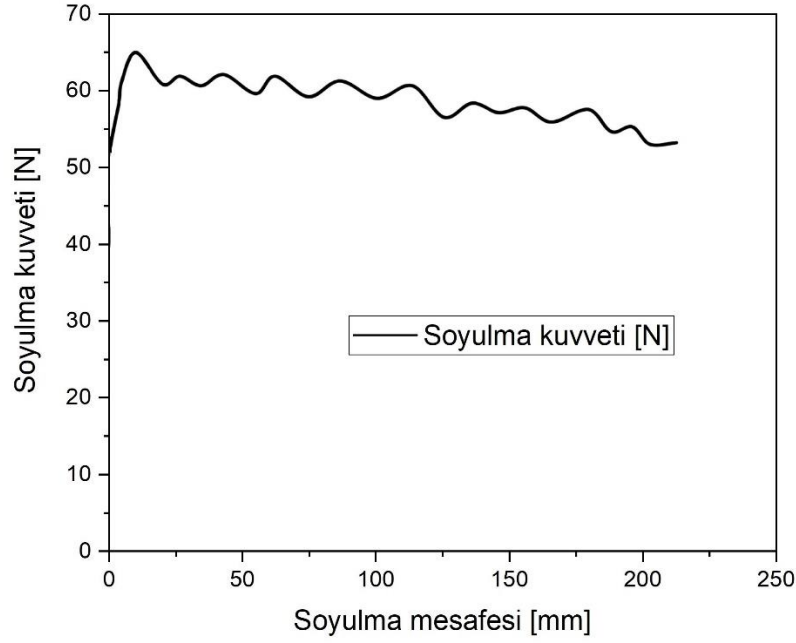
6.4. Çift katmanlı levhaların soyulma testi sonuçları

Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalarına uygulanan soyulma testi sonucu ayrılan numune görselleri Şekil 6.9'da görülmektedir.



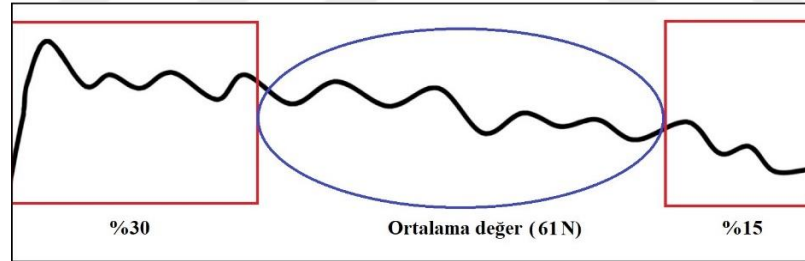
Şekil 6.9. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik soyulma testi sonucu ayrılan numune görselleri

Şekil 6.9'da görüldüğü üzere numunelerin bazılarında homojen bir birleşim olmadığı için soyulma yükü değişkenlik göstermektedir. Bunun en büyük nedenlerinden birinin 304 paslanmaz çelik levhanın üzerinde meydana gelen krom-oksit tabakasının olduğu düşünülmektedir. Malzemelerin tavlama sırasında fırın ortamının vakumlu bir ortam oluşturularak işlemlerin yapılması bu krom-oksit tabakasının oluşumuna engel olacağı düşünülmektedir. Bazı numunelerde boydan boya soyulma yerine alüminyum malzemenin düşük dayanımından dolayı yırtılması sonucu ayrılmalara olduğu görülmüştür. Şekil 6.10 çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit malzemesinin soyulma testi sonucu numunelere uygulanan soyulma yükü grafiğini göstermektedir.



Şekil 6.10. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik soyulma yükü grafiği

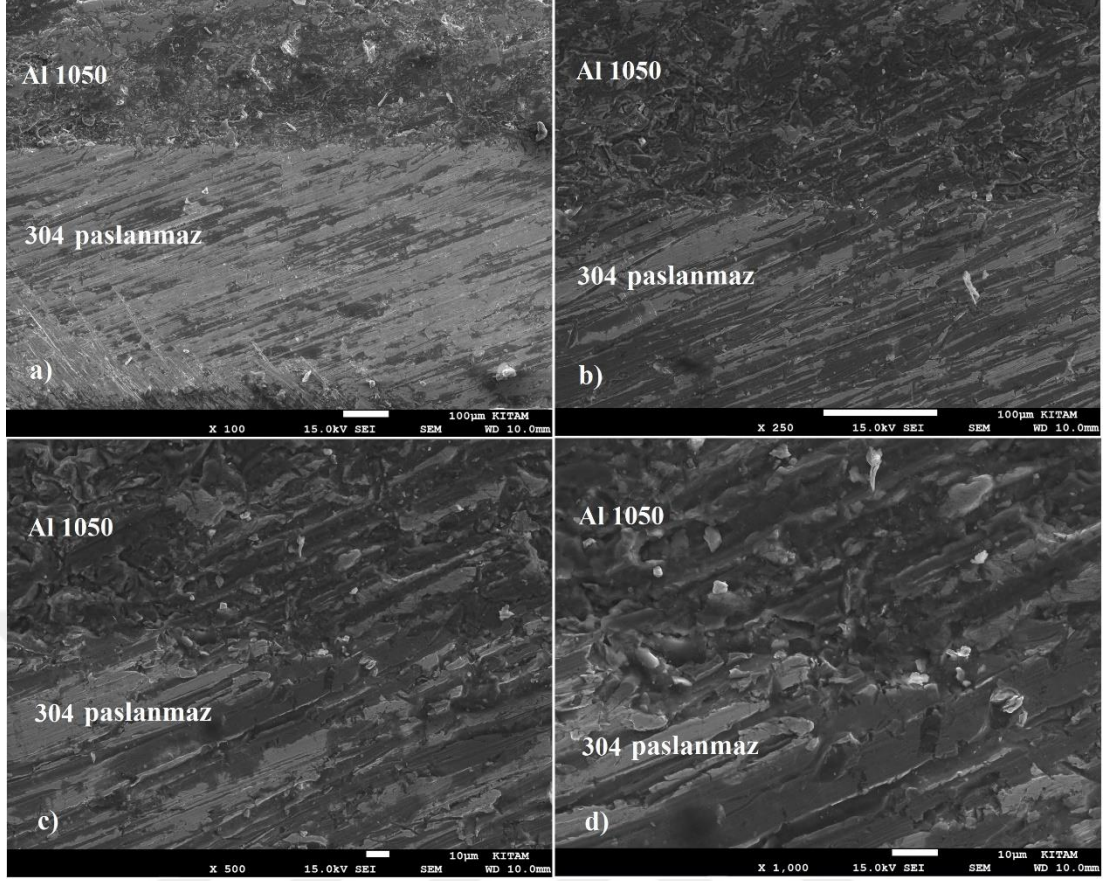
Soyulma mesafesinin ilk bölümdeki % 30'luk bölüm ve son bölümdeki % 15'lik bölüm çıkarıldıktan sonra bulunan ortalama soyulma kuvveti 61 N'dur (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Hesaplanan ortalama soyulma kuvveti

6.5. Çift katmanlı levhaların iç yapı muayene (SEM) sonuçları

Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalarının birleşim bölgesindeki iç yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş görüntüleri Şekil 6.12'de görülmektedir. Şekil 6.12(a) malzemelerin (x100) yakınlaştırması, Şekil 6.12(b) malzemelerin (x250) yakınlaştırması, Şekil 6.12(c) malzemelerin (x500) yakınlaştırması, Şekil 6.12(d) malzemelerin (x1000) yakınlaştırmış halini göstermektedir.

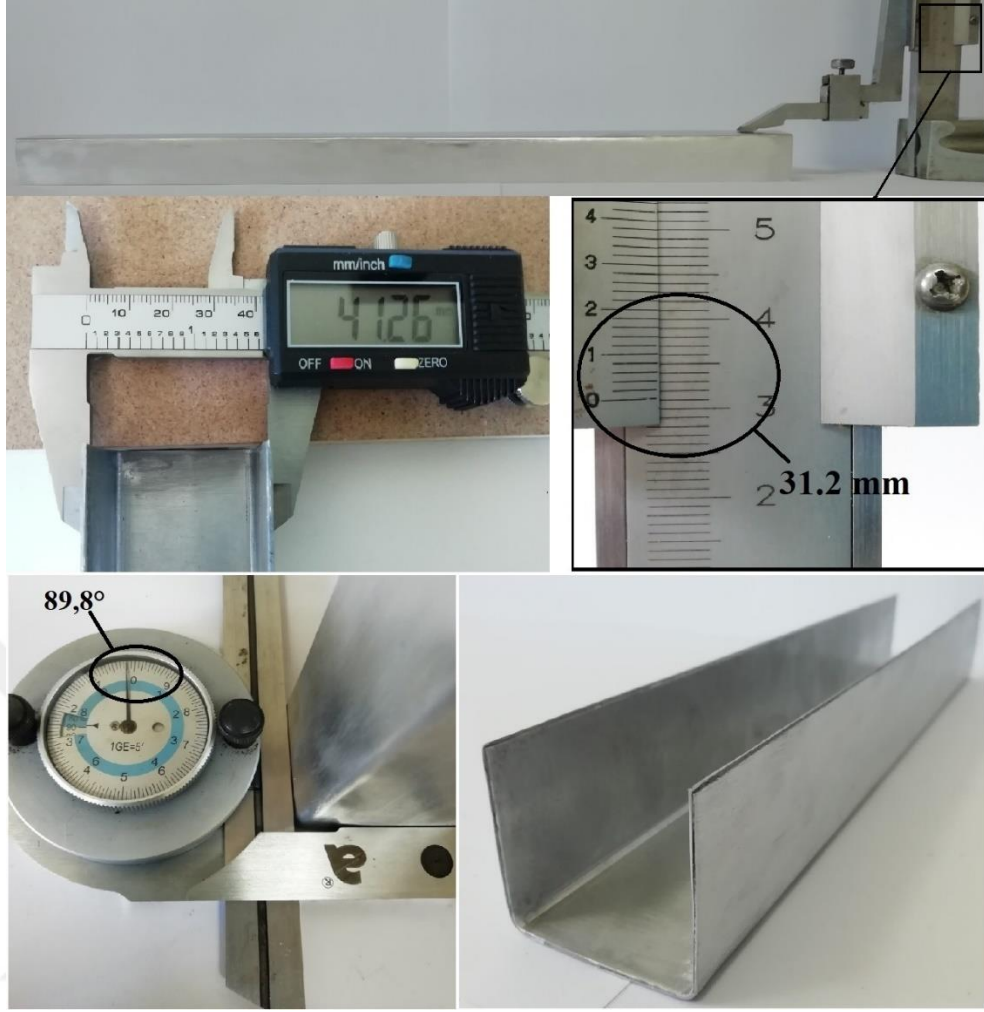


Şekil 6.12. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik levhalarının birleşim bölgesindeki iç yapının (SEM) görüntüleri a) x100, b) x250, c) x500, d) x1000

Ayrıca Şekil 6.12. görüntüleri yakından incelendiğinde Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik levhaların birleşim ara yüzlerinde iyi bir bağ yapısı olduğu görülmektedir. Bu bölgede alüminyum malzeme paslanmaz çelik içerisine nüfuz ederek bağlanma sağlanmıştır. Malzeme arayüzünde sürekli, ince ve düzgün taneli bir intermetalik faz tabakasının oluşumu gözlenmektedir (Grydin vd., 2013).

6.6. Çift katmanlı levhaların standart makine ayar parametreleri ile yapılan deneysel sonuçları

Makaralı bükme hattında üretilen çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik U profilinin ölçü kontrolleri Şekil 6.13’de görülmektedir.



Şekil 6.13. Makaralı bükme hattında üretilen çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik U profilinin ölçü kontrolleri

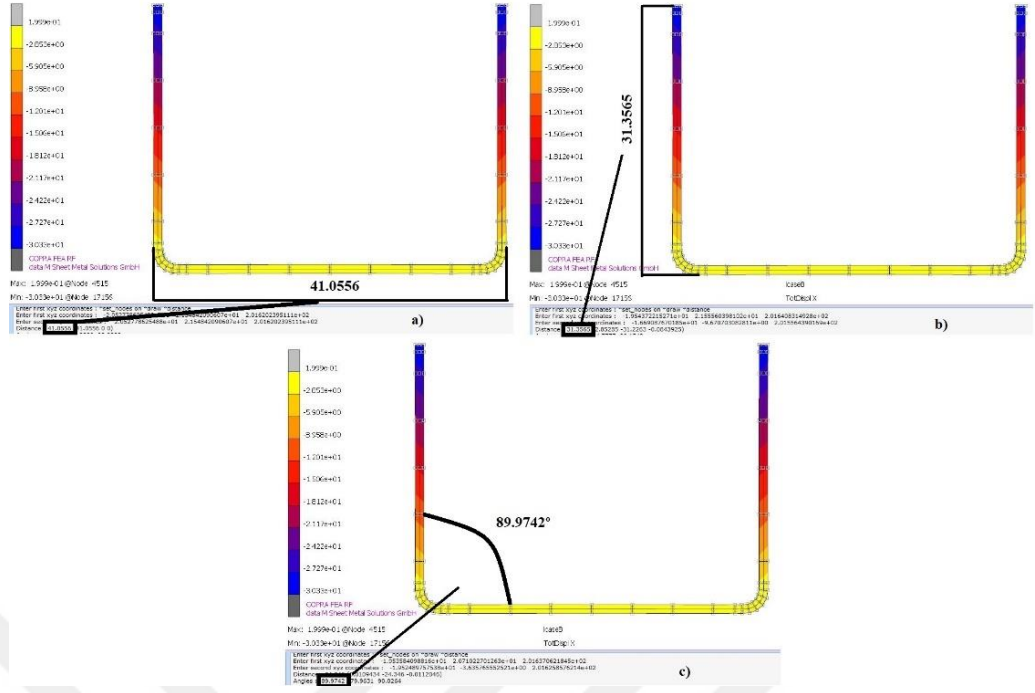
Yapılan ölçüsel kontrollerde yan büküm kenar yüksekliklerinin 31,2 mm, profil taban genişliğinin 41,26 mm ve yan büküm açısı değerinin 89,8° olduğu görülmektedir.

6.7. Çift katmanlı levhanın standart makine ayar parametreleri ile yapılan simülasyon sonuçları

Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit levhası için Copra FEA programında sırasıyla aşağıdaki parametreler incelenmiştir.

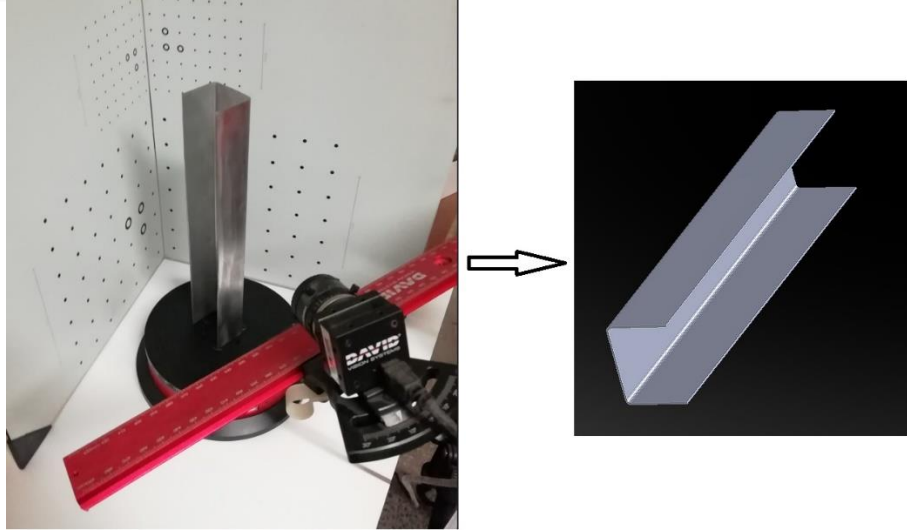
6.7.1. Deneysel, simülasyon ve tasarım kesitlerinin karşılaştırılması

Analiz sonucu elde edilen U profilin 8. İstasyondan çıktıktan sonra bir düğüm noktası üzerinden alınan kesit görüntüsü Şekil 6.14’de görülmektedir. Kesit üzerinden yapılan ölçümlere baktığımızda taban genişliğinin 41,0556 mm, yan kenar yüksekliklerinin 31,3565 mm ve yan kenar büküm açılarının ise 89,9742° olduğu görülmektedir.



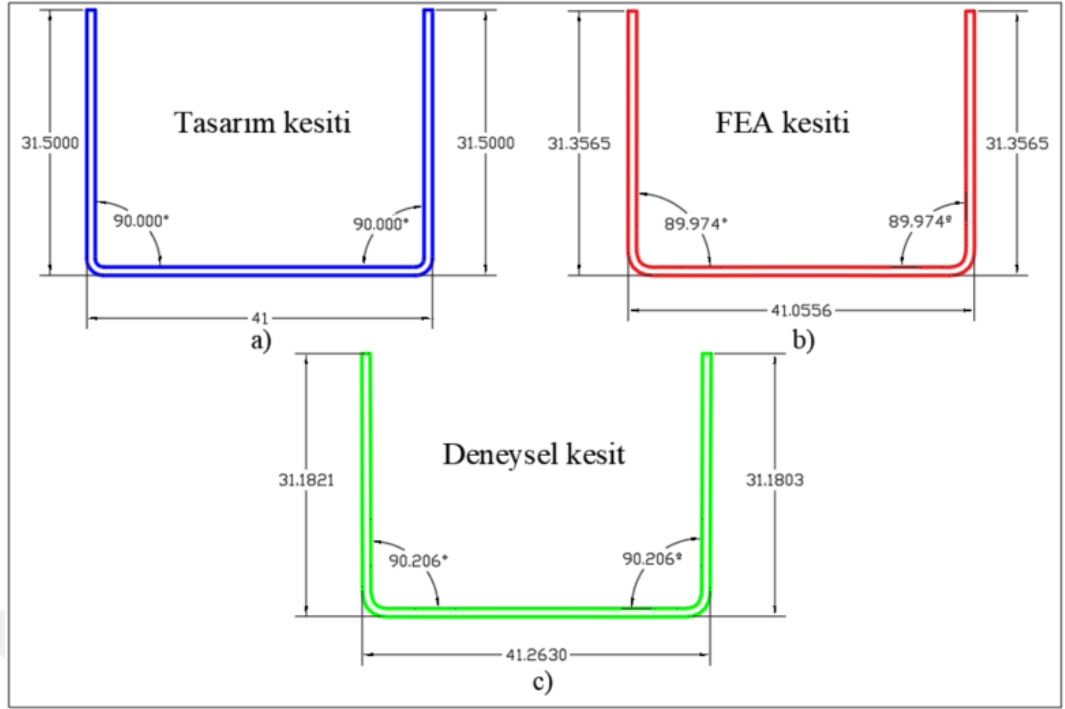
Şekil 6.14. Simülasyon sonucu elde edilen U profil kesitinin ölçüleri

DeneySEL testler sonucu, makaralı bükme hattından üretilen U profil Şekil 6.15’deki gibi 3D tarayıcı yardımıyla taranarak profilin 3 boyutlu katı modeli çıkarılmış ve 2 boyut üzerinden kesit ölçüleri alınmıştır.



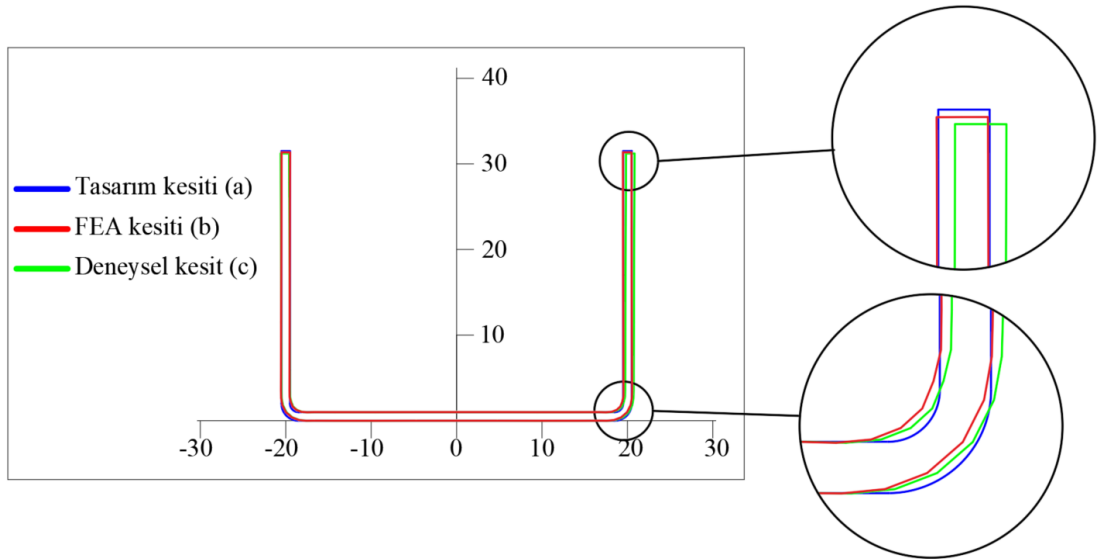
Şekil 6.15. 3D tarayıcı yardımıyla deneySEL üretilmiş U profil kesitinin modelinin çıkarılması

Tasarlanan profil kesiti, simülasyon testleri sonucu elde edilen profil kesiti ve deneySEL testler sonucu elde edilen profil kesiti ölçüleri Şekil 6.16’da gösterilmektedir.



Şekil 6.16. Profil kesit ölçüleri (a) Tasarım kesiti, (b) Simülasyon kesiti, (c) Deneysel kesit

Şekil 6.17 üç kesitin açısal ve ölçüsel olarak karşılaştırılmasını göstermektedir. Yapılan ölçü kontrollerinde deneysel ve sayısal çalışmaların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

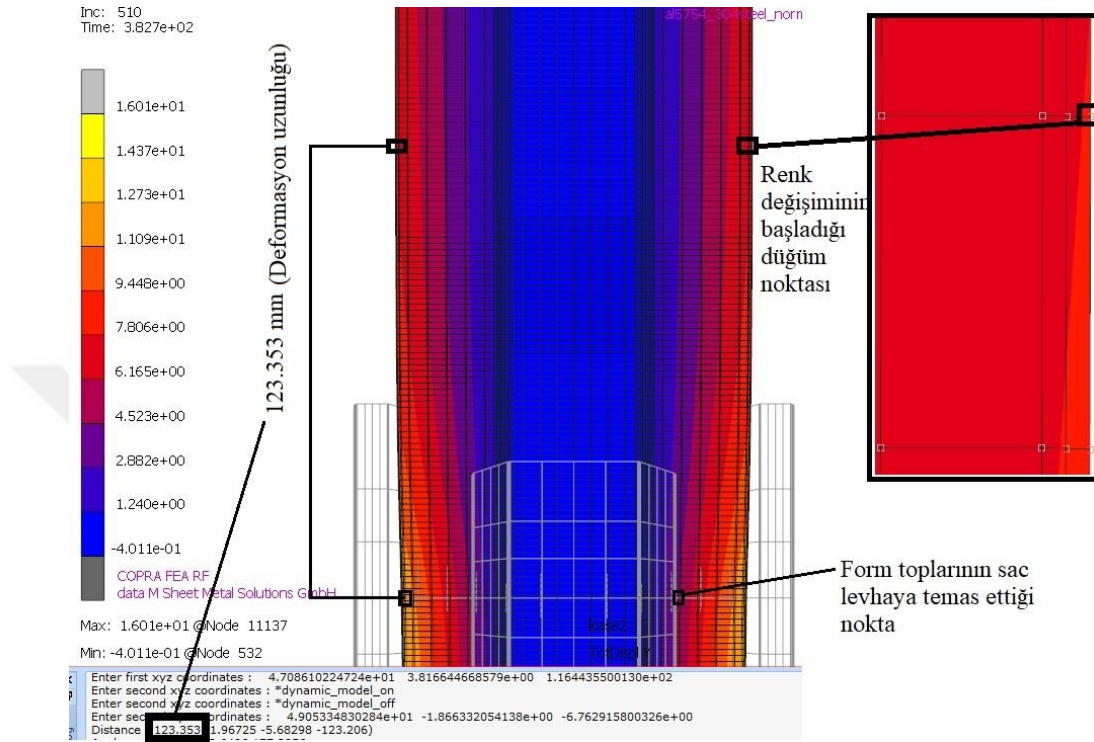


Şekil 6.17. (a) Tasarım kesiti, (b) Simülasyon kesiti, (c) Deneysel kesit, ölçülerinin karşılaştırılması

6.7.2. Deformasyon uzunluğunun tespiti

Şekil 6.18'de sac levhanın 1. İstasyondan çıkıp 2. İstasyona girdiği sırada sac levhanın deformasyon uzunluğunu göstermektedir. Bir istasyondan çıkıp diğer

istasyona giren sac levhanın yan bükümü bu sırada sinüzoidal bir geometri izlemektedir (Bhattacharyya vd., 1984). Bu geçiş sırasında simülasyon testinde meydana gelen renk değişiminin başladığı nokta ile bir sonraki istasyonda form makarasına temas ettiği mesafe deformasyon uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 6.18. Sac levhanın 1. İstasyondan 2. İstasyona geçişi sırasında meydana gelen deformasyon uzunluğu

Tablo 6.2 istasyonlar arası geçişte her istasyon arasında çift katmanlı sac levhada meydana gelen deformasyon uzunluk değerlerini göstermektedir.

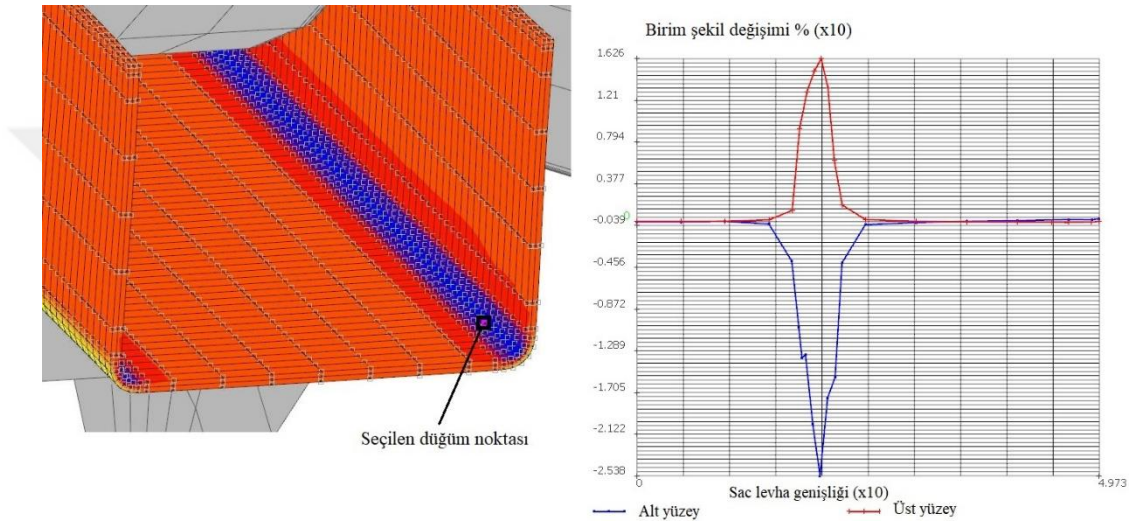
Tablo 6.3. İstasyonlar arası geçişte sac levhada meydana gelen deformasyon uzunluğu değerleri

İstasyonlar	İstasyonlar arasında çift katmanlı sac levhada meydana gelen deformasyon uzunluğu (mm)
8 - 7	-
7 - 6	57,5876
6 - 5	63,3609
5 - 4	143,338
4 - 3	143,325
3 - 2	131,663
2 - 1	123,353

6.7.3. Sac levhanın üst ve alt bölgesindeki meydana gelen birim şekil değişimi değerleri ve kalınlık değişimi

Bu bölümde kesitin özel bir konumunda malzemede meydana gelen birim şekil değiştirmeler ve sac kalınlık değişimi tespit edilmiştir.

Şekil 6.19'daki grafik seçilen düğüm noktasında bulunan kesite göre o bölgede sac levhanın üst ve alt kısmında meydana gelen birim şekil değişimi değerlerini göstermektedir. U kesiti simetrik bir kesit olduğu için sadece bir büküm bölgesindeki birim şekil değişimi değerleri grafikte gösterilmiştir.

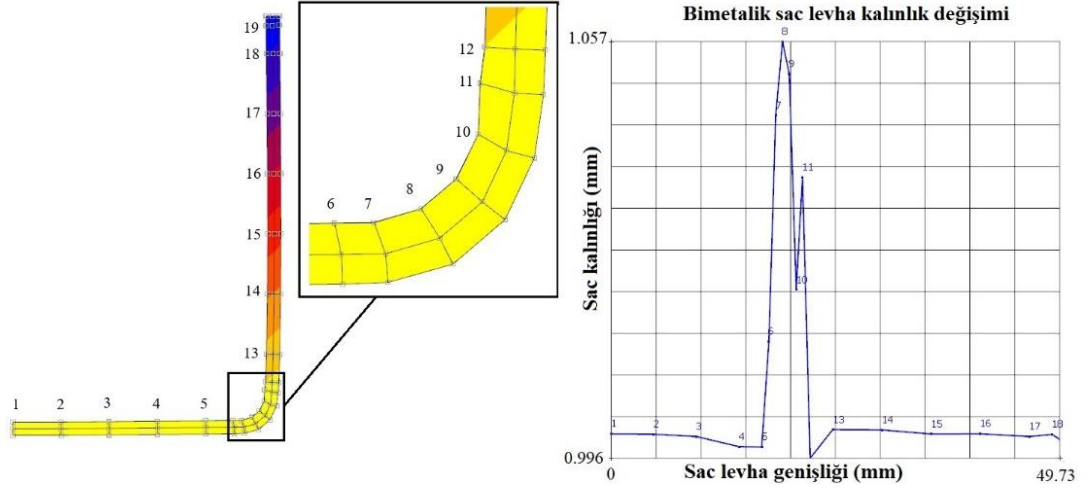


Şekil 6.19. Seçilen düğüm noktasındaki kesite göre malzeme üst ve alt yüzeyinde oluşan çekme ve basma birim şekil değiştirme değerleri.

Şekil 6.19'daki grafik malzemenin üst yüzeyinde (kırmızı eğri) % 16,26'lık bir sıkışma birim şekil değişimi olacağını ve alt tarafında (mavi eğri) % 25,38'lik çekme birim şekil değişimi olacağını göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi bükülmüş bölgedeki nötr eksenin ortalananmadığı, dış yarıçapa doğru kaydığı görülmektedir. Bunun nedeni, iç kısımdaki kompresyonların mutlak değerleri, dış kısımda oluşan birim şekil değiştirme değerleri ile aynı değerde değildir. Bu sebeple malzeme bu alanlarda daha incelmektedir. Tek tabakalı malzemelerde bu oranın daha fazla olduğu görülürken dış taraf 304 paslanmaz iç taraf Al 1050 olduğunda bu oranın daha az olduğu görülmektedir.

Yukarıdaki grafik bir düğüm noktasında bulunan kesit üzerinde sac kalınlığı doğrultusunda alt ve üst kısmın birim şekil değişimi değerlerini vermekte idi Şekil 6.20'de bulunan grafik ise seçilen düğüm noktası üzerindeki kesit boyunca meydana gelen malzeme kalınlık değişimini göstermektedir. Kesit simetrik olduğu için orta

kısmın yarısı referans alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

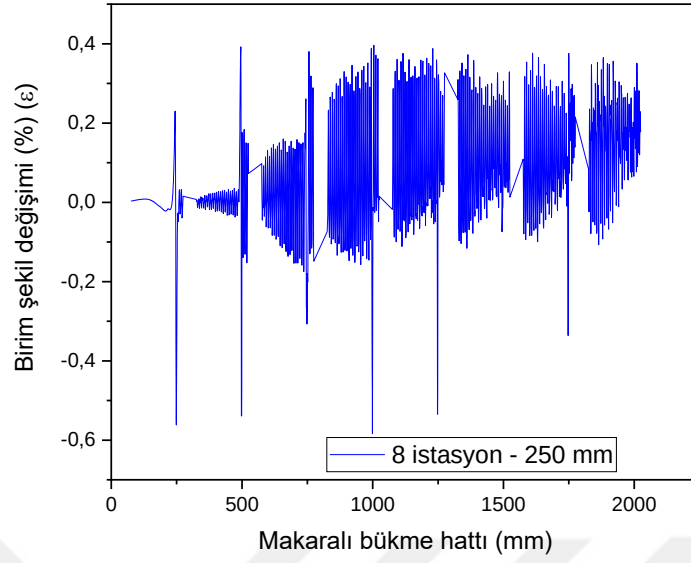


Şekil 6.20. Sac levhada meydana gelen kalınlık değişimi

Kesit detayında da görüldüğü gibi tarafsız eksene göre malzeme dış taraftan incelmış iç taraftan ise kalınlaşmıştır. İç tarafın yumuşak malzeme olmasından dolayı iç taraftaki kalınlaşma dış taraftaki incelmeye göre mutlak değerce daha büyük olduğu için bu bölgede toplam sac kalınlığı 0,057 mm artarak 1,057 mm ye kadar çıkmıştır.

6.7.4. Makaralı bükme hattı boyunca sac malzemede oluşan boyuna birim şekil değiştirmeler

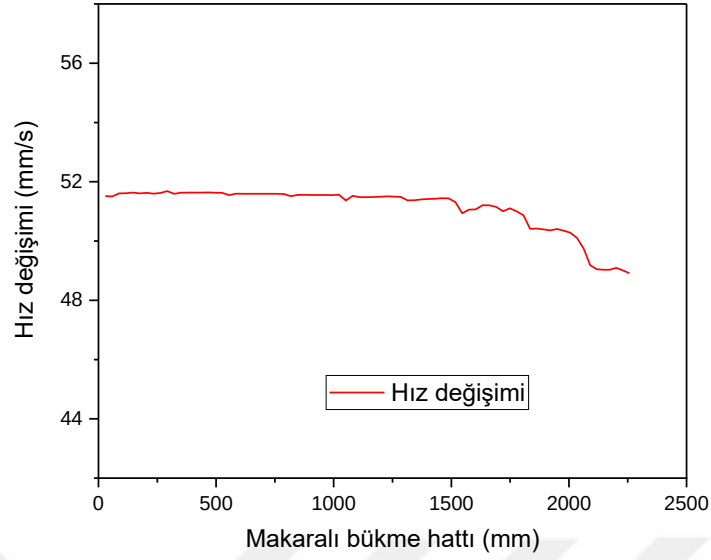
Şekil 6.21'deki grafik seçmiş olduğumuz (bkz. Şekil 6.19) düğüm noktasında çift katmanlı sac levhada makaralı bükme hattı boyunca meydana gelen boyuna birim şekil değişimi değerlerini göstermektedir. Bu grafikte her tepe noktası ve alt nokta o istasyonda meydana gelen şekillendirme adımını göstermektedir. Burada, her istasyonda çekmeden ziyade sıkıştırmadan kaynaklı yüksek birim şekil değişimlerinin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.21. Makaralı bükme hattı boyunca her bir istasyonda U profilde meydana gelen boyuna birim şekil değiştirmeler

6.7.5. Makaralı bükme hattı boyunca meydana gelen hız değişimi

Bu kısımda sac levhanın form makaraları arasında ilerlerken meydana gelen hız değişiklikleri tespit edilmiştir. Şekil 6.22'deki grafikte sac malzemenin makaralı bükme hattında ilerlerken hattın sonuna doğru hızının düştüğü görülmektedir. İlk beş istasyonda sac levhanın ilerleme hızı ortalama 51,5 mm/s iken son üç istasyondan itibaren azalarak hattın çıkışında 48,9 mm/s'ye kadar düştüğü görülmektedir. Özellikle tahrikin olmadığı yan form makaraları devreye girdiğinde sac malzemenin hız kaybettiği görülmektedir. Bu durumda profil ile form makaraları arasında bir miktar hız sapması olacağı anlamına gelir. Rulo sac malzeme işlenmesinde sorun olmayan bu durum ebatlı sacların şekillendirilmesinde profillerin birbirine çarpma sorununu ortaya çıkarabilir. Bu sıkıntının önüne geçmek için ebatlı sacların beslemesinin optimum şekilde yapılması gerekmektedir.



Şekil 6.22. Sac levhanın makaralı bükme hattında ilerleme hızı değişimi

6.8. Büküm açısı artışı deneysel sonuçları

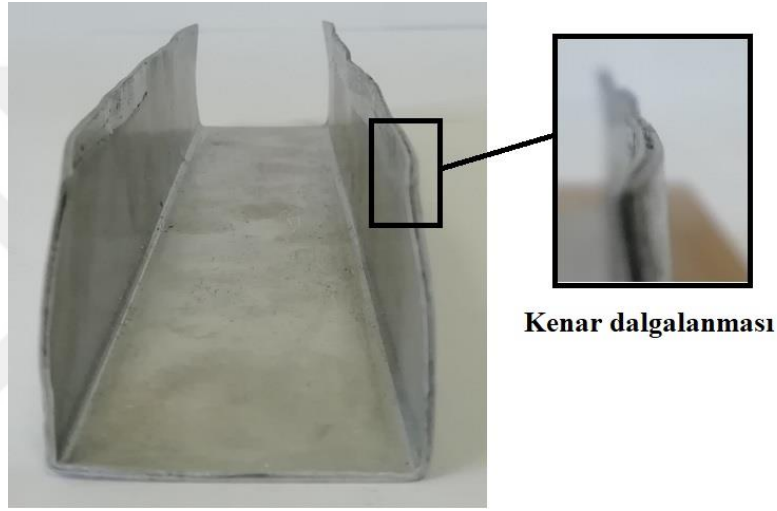
Makaralı bükme makinesinde çift katmanlı levhadan farklı büküm açılarında üretilen U profillerin görünüşleri Şekil 6.23. ve Şekil 6.24’de görülmektedir. Yapılan deneylerden de görüldüğü üzere 8 istasyona sahip makineden çıkan ürün ile 4 istasyona sahip makineden çıkan üründe ciddi boyutsal farklılıklar söz konusudur. Özellikle boyuna eğilme kusuru (500 mm numune için) yapılan ölçümler sonucunda 8,1 mm olarak ölçülmüştür. Kenar dalgalanma kusurunun ise 4 istasyona sahip makinenin hem istasyonlardaki büküm açılarının fazla olmasından dolayı hem de ilk istasyondaki büküm açısı artışının fazla olmasından dolayı bariz derecede ortaya çıktığı görülmektedir (Tehrani vd., 2006).



Şekil 6.23. Deney 1(std) (8 istasyon) üretilen profil görüntüsü

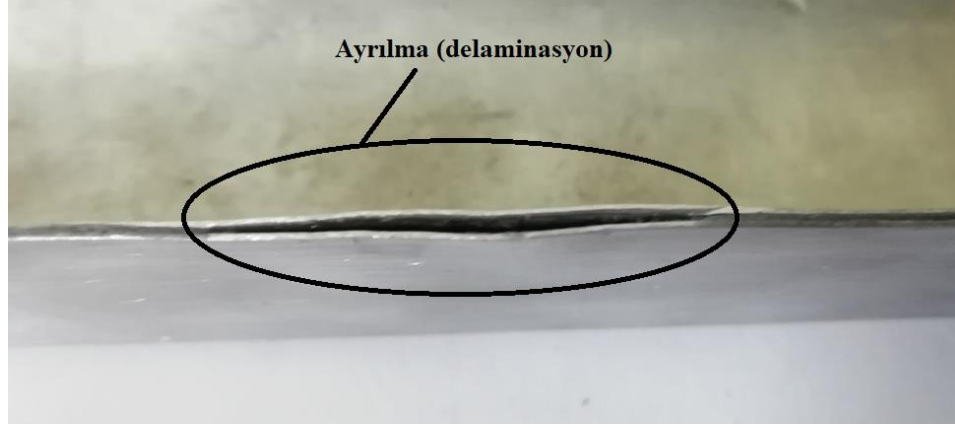


Şekil 6.24. Deney 2 (4 istasyon) üretilen profil görüntüsü



Şekil 6.25. Deney 2 sonucunda meydana gelen kenar dalgalanması kusuru

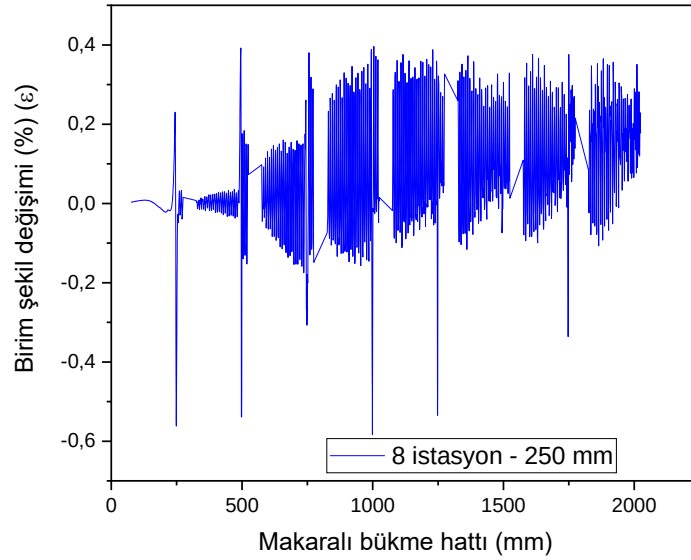
4 istasyonlu modelde büküm açısı artışlarının fazla olmasından dolayı sac levhanın yan yüzeyinde oluşan aşırı gerilmelerin birleşim ara yüzeyini zorladığı ve bu zorlama sonucunda da bazı testlerde birleşim bölgelerinde Şekil 6.26'daki gibi ayrılmaların meydana geldiği gözlenmiştir (Woo vd., 2020). Bu sonuç, kenar yüzeyde meydana gelen gerilme genliği büyüdükçe birleşim arayüzeyine etki eden normal ve kayma gerilmelerinin arttığı ve bu durumda ayrılmaya (delaminasyon) neden olabileceğini göstermektedir.



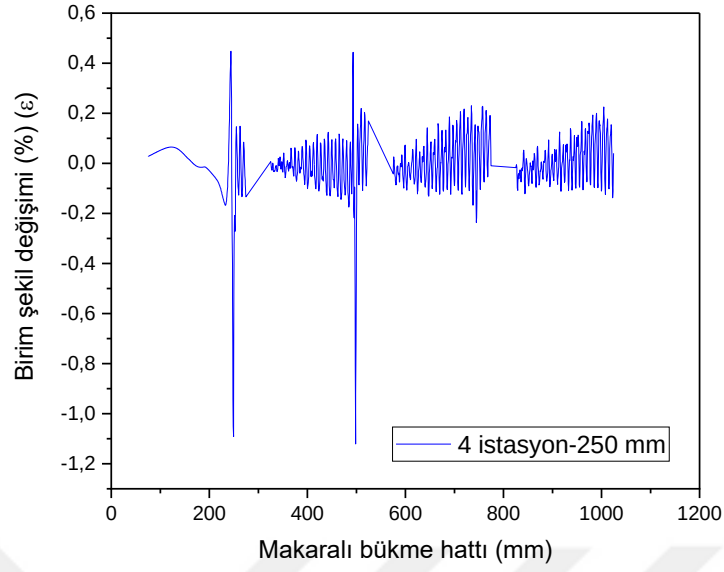
Şekil 6.26. Deney 2 sonucunda meydana gelen tabakalar arası ayrılma (delaminasyon)

6.9. Büküm açısı artışı simülasyon sonuçları

Büküm açısı artışı değişimi simülasyon çalışmalarında, 4 istasyon olarak modellenmiş simülasyonda, 8 istasyona göre yapılan çalışmalarda daha erken istasyonlarda gerilme yığılmalarının olduğu görülmektedir. Bu durum artan gerilme yığılmalarının profil kesitini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Aynı düğüm noktasında makaralı bükme hattı boyunca her bir istasyonda oluşan boyuna birim şekil değişimi dağılımları Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de görülmektedir.



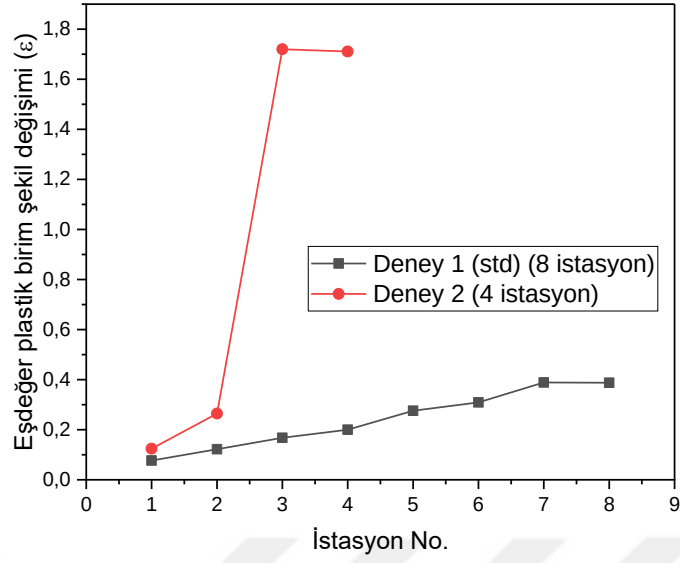
Şekil 6.27. Deney 1(std) (8 istasyon) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler



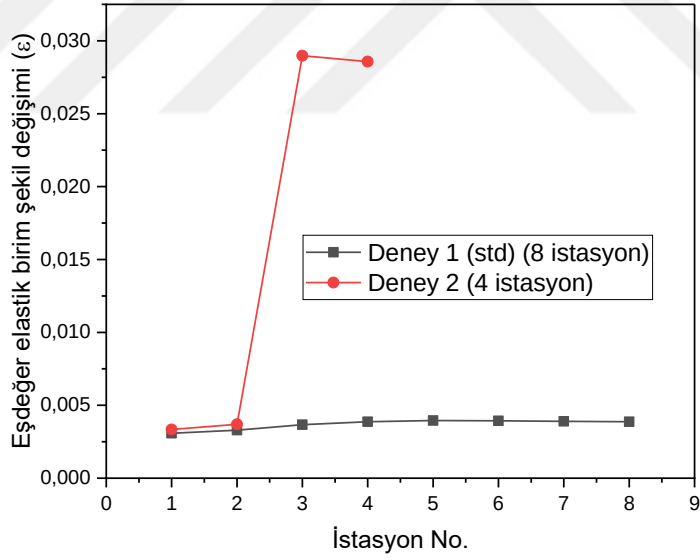
Şekil 6.28. Deney 2 (4 istasyon) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler

Aynı düğüm noktasında ölçülen makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değiştirme değerlerinde 1. deneyde birim şekil değiştirmeler her bir istasyonda eşit bir şekilde değişim gösterirken 2. Deneyde her bir istasyonda aşırı birim şekil değiştirme artışları söz konusudur (Şekil 6.27 ve Şekil 6.28). Özellikle ilk istasyondan itibaren çok büyük bir değişim gösteren bu birim şekil değiştirme değerleri ilerleyen istasyonlarda profilin boyuna eğilmesi üzerine olumsuz bir etki yaratmıştır (Paralikas vd., 2009).

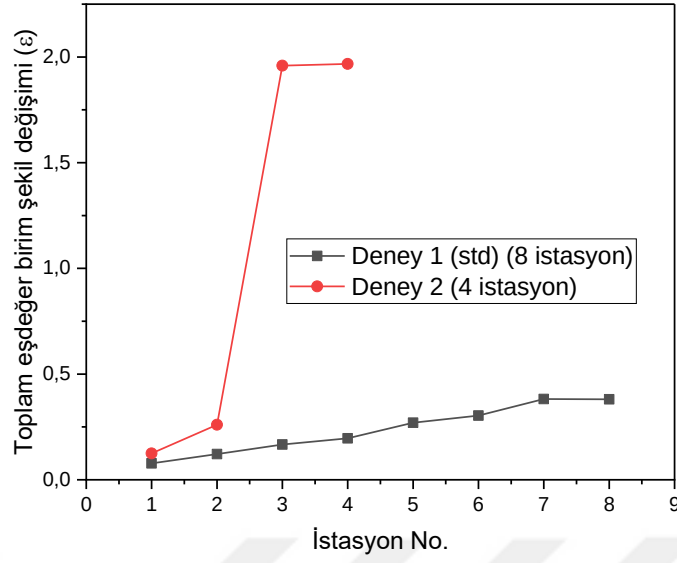
8 istasyon ve 4 istasyon modeli ile yapılan simülasyon çalışmalarında eş değer plastik birim şekil değiştirme, eş değer elastik birim şekil değiştirme ve toplam eş değer birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırma grafiği sırasıyla Şekil 6.29, Şekil 6.30, ve Şekil 6.31’de görülmektedir



Şekil 6.29. 4 istasyon ve 8 istasyonlu modelde oluşan eş değer plastik birim şekil değiştirme grafiği



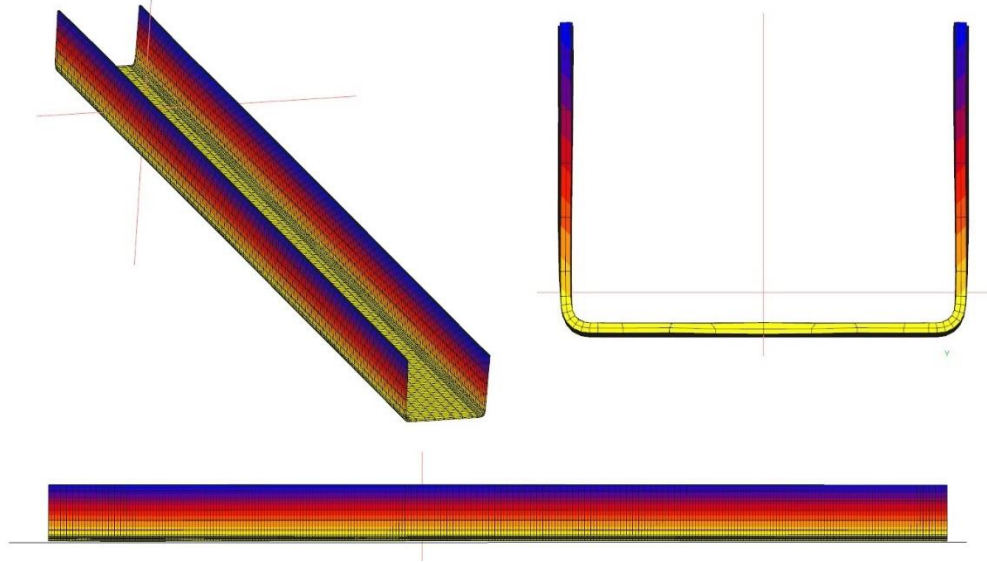
Şekil 6.30. 4 istasyon ve 8 istasyonlu modelde oluşan eş değer elastik birim şekil değiştirme grafiği



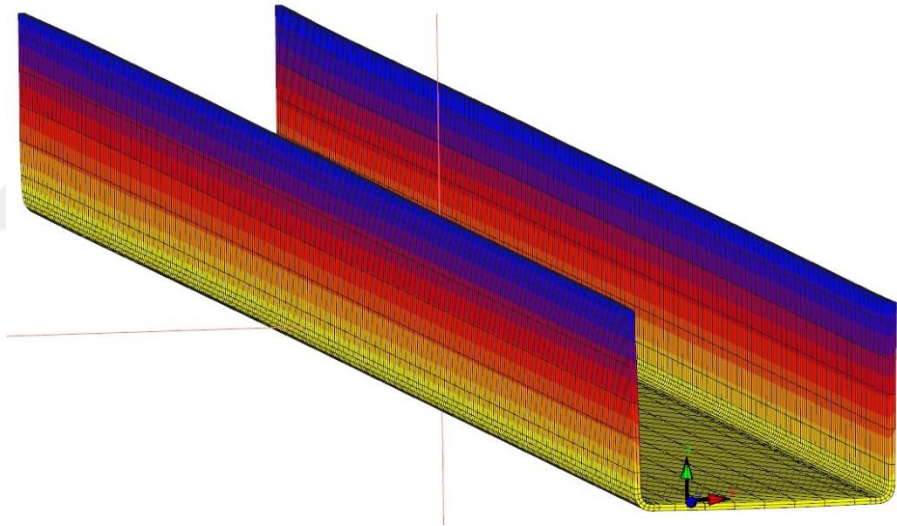
Şekil 6.31. 4 istasyon ve 8 istasyonlu modelde oluşan toplam eş değer birim şekil değiştirme grafiği

Her üç grafikte detaylı olarak incelendiğinde, 8 istasyonlu modelde birim şekil değiştirme artışları her bir istasyonda lineer ve düzenli bir şekilde artış gösterirken, 4 istasyonlu modelde özellikle 2. İstasyondan sonra aşırı ve düzensiz birim şekil değişimi artışları söz konusudur. Bu düzensiz birim şekil değişimi artışları profil kesitinde ve boyunda düzensiz uzamalara sebebiyet vermek de ve bu durumda profilin hem yan yüz kenarlarında kenar dalgalanma kusuruna hem de profilin boyuna eğilmesine sebep olmaktadır (Bidabadi vd., 2016).

8 istasyonlu model için sonlu eleman programından elde edilen simülasyon sonuçlarının görselleri Şekil 6.32 ve Şekil 6.33’de görülmektedir. Şekil 6.32 Deney 1(std) simülasyon sonucu elde edilen profilin önden, yandan ve izometrik görünüşleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere simülasyon sonucunda profil kesitinin boyunda herhangi bir eğilme olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kenar yüzeylerinde düzgün bir şekilde ortaya çıktığı herhangi bir dalgalanma kusurunun olmadığı görülmektedir. Şekil 6.33 bitmiş profil kesitinin izometrik görüntüsünü göstermektedir.

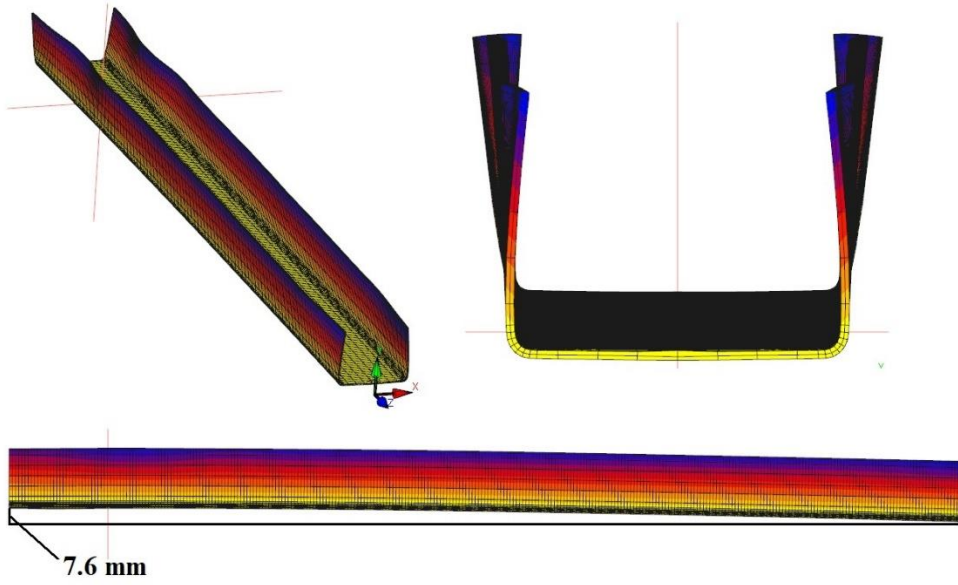


Şekil 6.32. Deney 1(std) (8 istasyon) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri

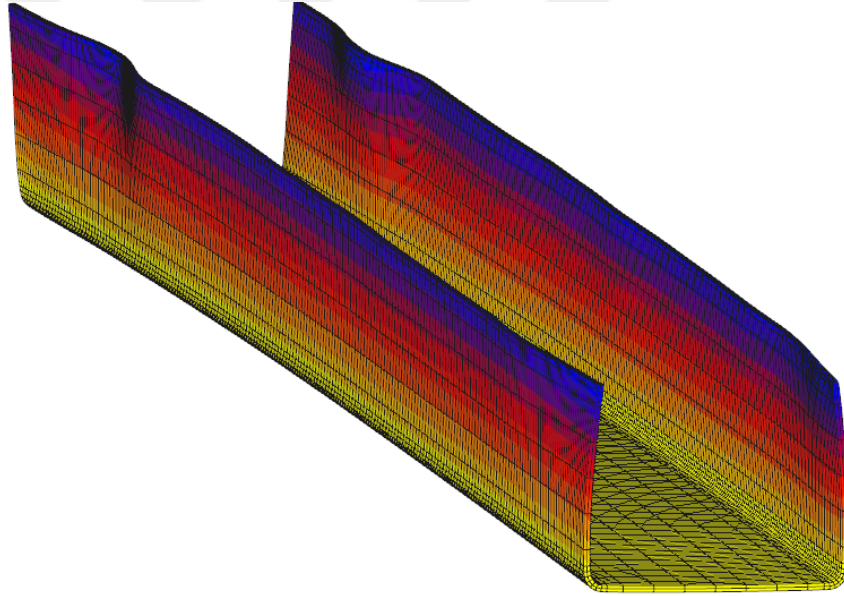


Şekil 6.33. Deney 1(std) (8 istasyon) bitmiş profil kesiti izometrik görüntüsü

4 istasyonlu model için sonlu eleman programından elde edilen simülasyon sonuçlarının görselleri Şekil 6.34 ve Şekil 6.35’de görülmektedir. Şekil 6.34 Deney 2 simülasyon sonucu elde edilen profilin önden, yandan ve izometrik görünüşleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere simülasyon sonucunda profil kesitinin boyunda yaklaşık 7,6 mm bir eğilme (500 mm boy için) meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca kenar yüzeylerinde de aşırı bir dalgalanma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 6.35 bitmiş profil kesitinin yan kenarlarında meydana gelen kenar dalgalanma kusurunu göstermektedir.

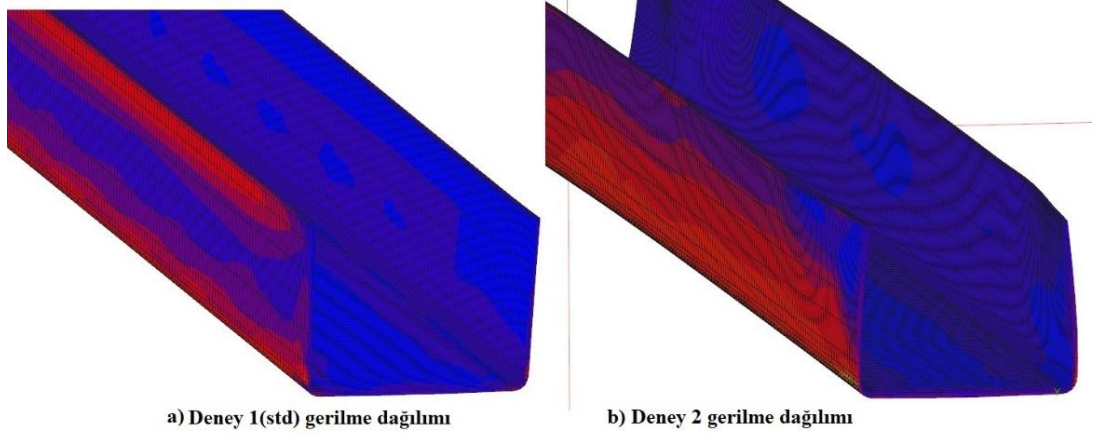


Şekil 6.34. Deney 2 (4 istasyon) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri



Şekil 6.35. Deney 2 (4 istasyon) profil kesitinde kenar yüzeyde oluşan dalgalanma kusuru

Şekil 6.36 Deney 1(std) ve Deney 2 testleri sonucu bitmiş profil kesiti üzerindeki oluşan von Mises gerilme dağılımını göstermektedir. 8 istasyonlu Deney 1(std) çalışmasında gerilme dağılımları büküm ve kenar bölgesinde homojen bir şekilde dağılmışken, 4 istasyonlu Deney 2 çalışmasında gerilme dağılımlarının profilin yan büküm kenarına düzensiz bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu düzensiz gerilmelerin dağılımı boyuna eğilmenin ve kenar yüzeydeki dalgalanmanın en büyük sebebidir (Paralikas vd., 2010).



Şekil 6.36. Profil kesiti üzerindeki von Mises gerilme dağılımı a) Deney 1(std) b) Deney 2

6.10. İstasyonlar arası mesafe değişimi deneysel sonuçlar

Makaralı bükme makinesinde, çift katmanlı levhadan farklı istasyon mesafelerinde üretilen U profillerin görünüşleri Şekil 6.37, Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da görülmektedir. Yapılan deneylerden de görüldüğü üzere 250 mm mesafe sahip istasyon aralığı ile 400 mm mesafeye sahip istasyon aralığında herhangi bir fark görülmemektedir. 156 mm mesafede ayarlanmış istasyon aralığında yapılan deneylerde ise boyuna eğilme kusuru (500 mm numune için) 0,7 mm olarak ölçülmüştür. Kenar dalgalanma kusurunun ise istasyonlar arasının 156 mm mesafede olduğu deneyde az da olsa belirgindir. İstasyonlar arası mesafe makine makara çaplarının ölçüsünden dolayı minimum 156 mm ye kadar yaklaştırılabilmektedir eğer mesafenin daha fazla yaklaştırılması uygun olabilseydi sac malzemede meydana gelen boyuna eğilme ve yan büküm kenarı dalgalanmasının artacağı düşünülmektedir (Safdarian vd., 2015).

Şekil 6.37’de 156 mm istasyonlar arası mesafede yapılan deney sonucunda yapılan ölçümlerde (500 mm’lik numune için) 0,7 mm’lik bir boyuna eğilme ölçülmüştür. Aynı şekilde istasyonlar arası mesafenin yakın olmasından dolayı azda olsa kenar yüzeylerde bir dalgalanma olduğu görülmüştür.



Şekil 6.37. Deney 3 (156 mm) üretilen profil görüntüsü

Şekil 6.38’de 250 mm uzaklığa sahip istasyonlar arası mesafede yapılan ölçümler sonucunda (500 mm’lik numune için) herhangi bir boyuna eğilme durumu görülmemiştir. Aynı şekilde kenar yüzeylerde de herhangi bir dalgalanma kusuru görülmemiştir.



Şekil 6.38. Deney 1 (std) (250 mm) üretilen profil görüntüsü

Şekil 6.39’da 400 mm uzaklığa sahip istasyonlar arası mesafede yapılan ölçümler sonucunda (500 mm’lik numune için) herhangi bir boyuna eğilme durumu görülmemiştir. Aynı şekilde kenar yüzeylerde de herhangi bir dalgalanma kusuru görülmemiştir.



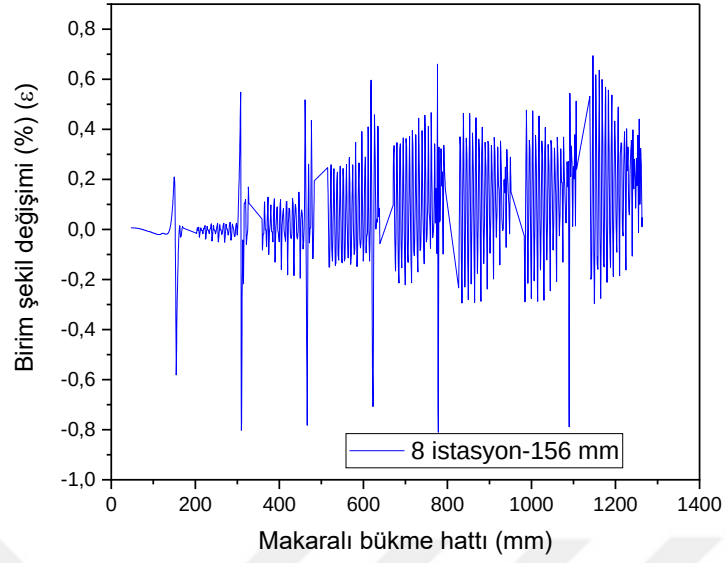
Şekil 6.39. Deney 4 (400 mm) üretilen profil görüntüsü

İstasyonlar arası mesafe değiştirilerek yapılan deney sonuçlarını incelediğimizde mesafenin belli bir değerin üstüne çıktığında herhangi bir olumlu bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu durumda belli bir optimum değerden sonra istasyonlar arası mesafeyi arttırmanın faydası olmamakla beraber gereksiz bir maliyet artışına sebep olacaktır (Wang vd., 2022). İstasyonlar arası mesafenin de optimum bir değerin altına inmemesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada istasyonlar form makarası çaplarından dolayı en yakın 156 mm ye kadar yaklaştırılabilmektedir. Bu ölçüde azda olsa bir birim şekil değişimi artışının olduğu görülmüştür.

6.11. İstasyonlar arası mesafe değişimi simülasyon sonuçları

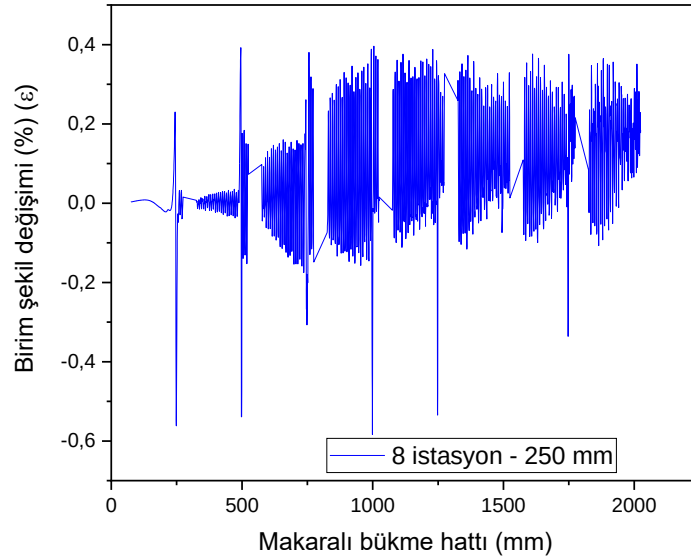
İstasyonlar arası mesafenin 3 farklı ölçüde ayarlanarak yapıldığı simülasyon çalışmalarında 250 mm mesafede ve 400 mm mesafede yapılan deneylerde herhangi bir fark görülmez iken 156 mm mesafede yapılan deneylerde azda olsa bir birim şekil değişimi artışı olduğu görülmektedir. Aynı düğüm noktasında makaralı bükme hattı boyunca her bir istasyonda oluşan boyuna birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42’de görülmektedir.

Şekil 6.40’da 156 mm uzaklığa sahip istasyonlar arası mesafede yapılan simülasyon sonucu makaralı bükme hattı boyunca oluşan boyuna birim şekil değişimi grafiği görülmektedir.



Şekil 6.40. Deney 3 (156 mm) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değıştirmeler

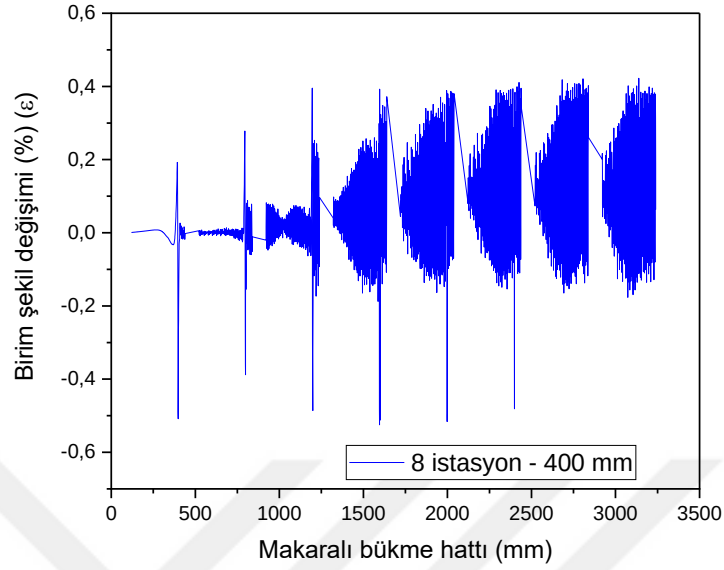
Şekil 6.41’da 250 mm uzaklığa sahip istasyonlar arası mesafede yapılan simülasyon sonucu makaralı bükme hattı boyunca oluşan boyuna birim şekil değışimi grafiğı görölmektedir.



Şekil 6.41. Deney 1 (std) (250 mm) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değıştirmeler

Şekil 6.42’de 400 mm uzaklığa sahip istasyonlar arası mesafede yapılan simülasyon sonucu makaralı bükme hattı boyunca oluşan boyuna birim şekil değışimi

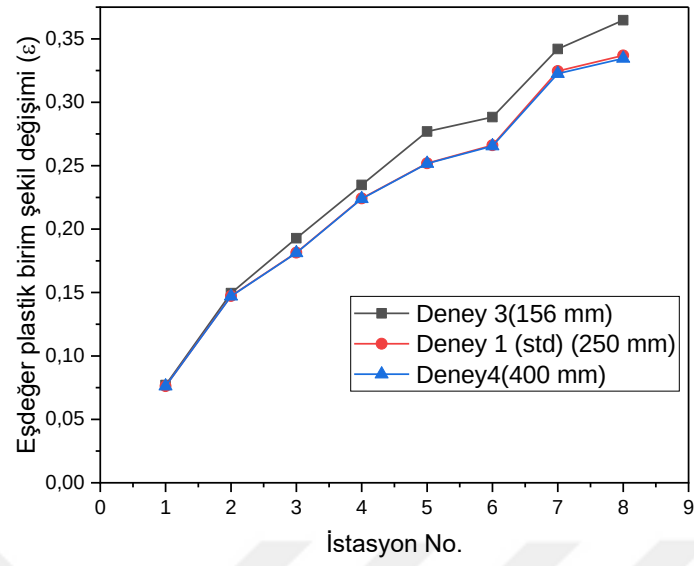
grafığı görölmektedir.



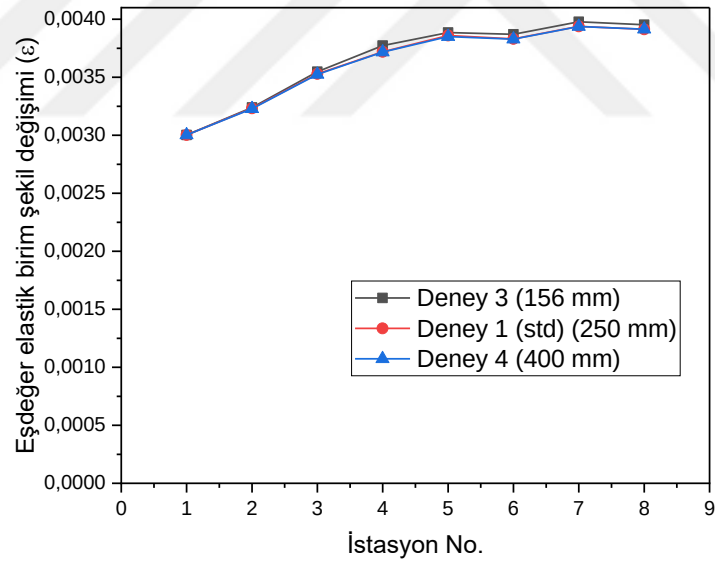
Şekil 6.42. Deney 4 (400 mm) makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değıştirmeler

Aynı düğüm noktasında ölçölen makaralı bükme hattı boyunca oluşan birim şekil değıştirme değğerlerinde Deney 1 ve Deney 4’de birim şekil değıştirmeler her bir istasyonda eşit bir şekilde değışim gösterirken Deney 3’de diğđer deneylere göre birim şekil değışimi tepe noktası aralıklarının az bir miktar fazla olduğı görölmektedir. 156 mm mesafede oluşan bu fazla birim şekil değışimi yığılmaları profil kesitinde azda olsa boyuna eğilme kusurunun ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Paralikas vd., 2009).

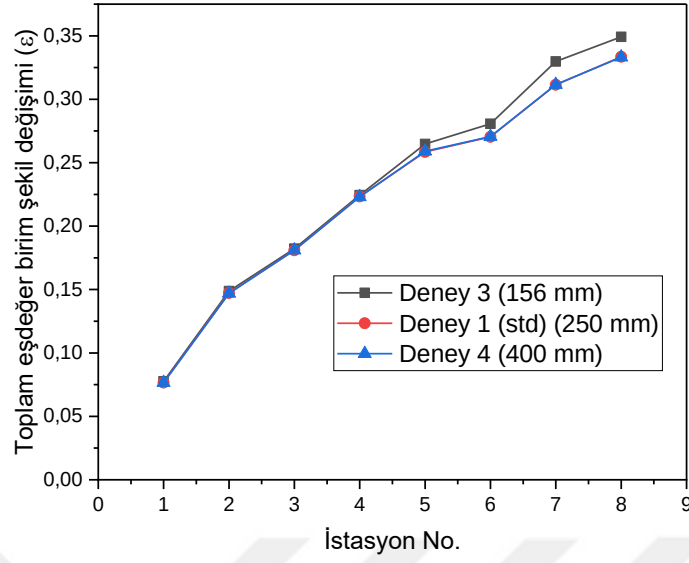
156 mm, 250 mm ve 400 mm mesafede ayarlanmış istasyon aralıkları ile yapılan simölasyon çalışmalarında eş değğer plastik birim şekil değışimi, eş değğer elastik birim şekil değışimi ve toplam eş değğer birim şekil değışimi değğerlerinin karşılaştırma grafikleri Şekil 6.43, Şekil 6.44, ve Şekil 6.45’de görölmektedir



Şekil 6.43. İstasyonlar arası mesafe değişimi eş değer plastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği



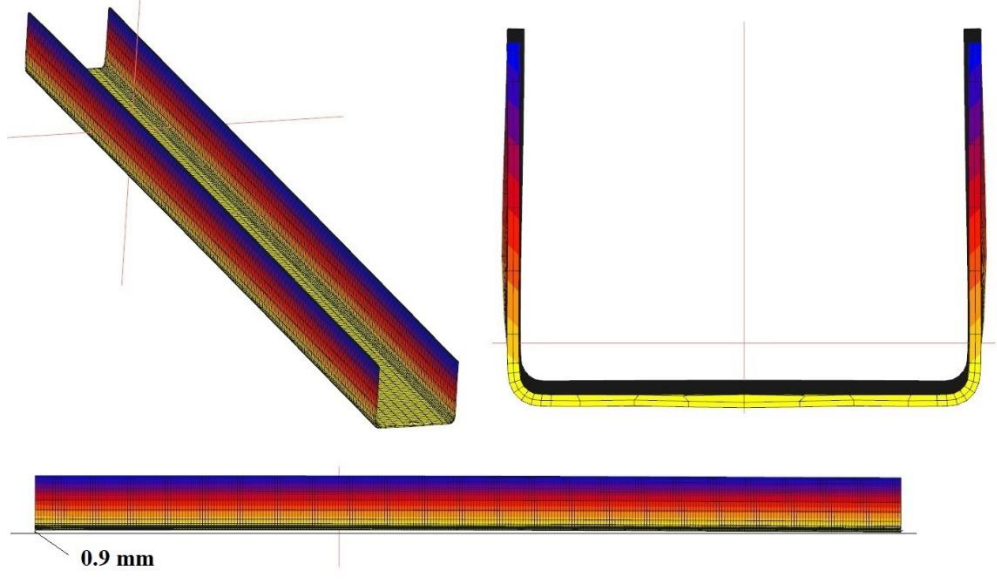
Şekil 6.44. İstasyonlar arası mesafe değişimi eş değer elastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği



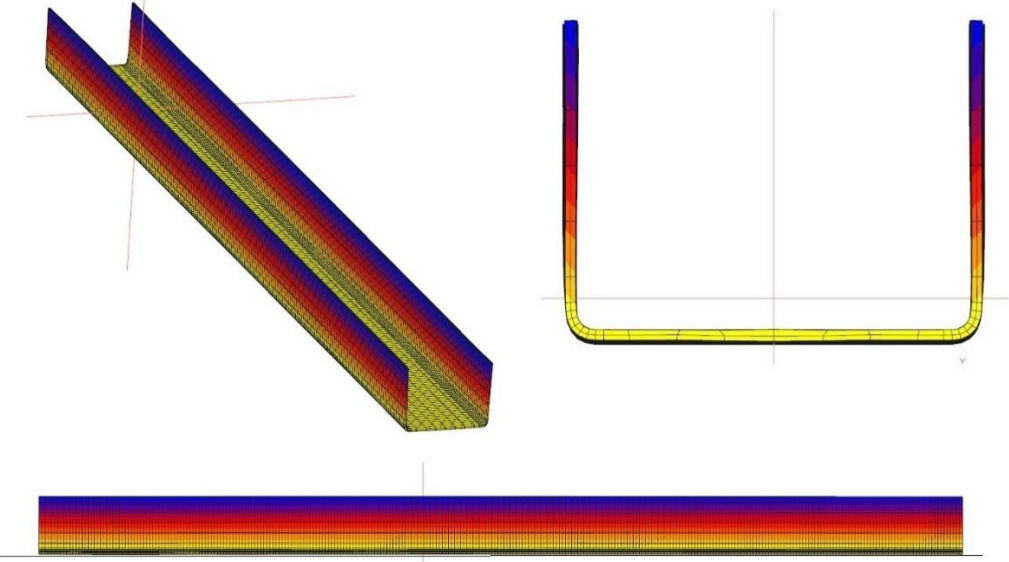
Şekil 6.45. İstasyonlar arası mesafe değişimi toplam eş değer birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği

Her üç grafikte detaylı olarak incelendiğinde, Aynı düğüm noktasında ölçülen eşdeğer plastik birim şekil değişimi, eş değer elastik birim şekil değişimi ve toplam eş değer birim şekil değişimi grafiklerinde Deney 1(std) ve Deney 4’de birim şekil değişimleri birbirine yakınsak olmakta ve her bir istasyonda eşit bir şekilde değişim göstermektedir. Deney 3’de ise ilk istasyonlarda diğer deneyler ile lineer artış gösterirken sonrasında artışların diğerlerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu birim şekil değişimi artışlarının fazla olmasının sebebi, istasyonlar arası geçişte mesafenin kısa olmasından dolayı kaynaklanmaktadır. Bu düzensiz birim şekil değişimi artışları profil kesitinde ve boyunda düzensiz uzamalara sebebiyet vermek de ve bu durumda profilin hem yan yüz kenarlarında kenar dalgalanma kusuruna hem de profilin boyuna eğilmesine sebebiyet vermektedir (Bıdabadi vd., 2016).

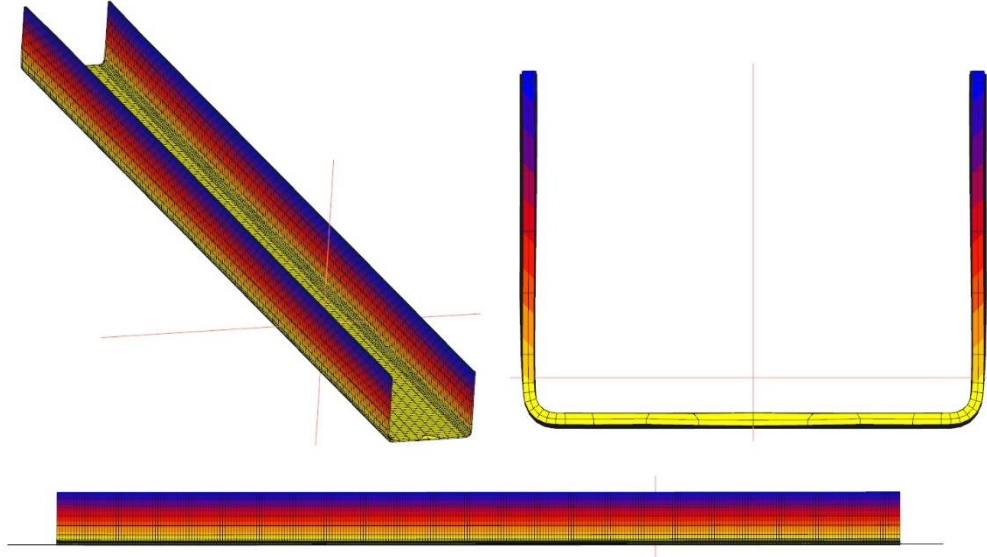
İstasyonlar arası 3 farklı mesafe değeri için sonlu eleman programından yapılan simülasyon çalışmalarının görselleri Şekil 6.46, Şekil 6.47 ve Şekil 6.48’de görülmektedir. Yapılan simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi 1. ve 4. deneyde daha düzgün bir yapı ortaya çıkmışken 3. Deneyde boyuna eğilmenin (500 mm numune için) 0,9 mm olduğu görülmektedir. Kenar yüzeyde ise azda olsa diğer deneylere göre bir dalgalanma görülmektedir. Ortaya çıkan bu kusurun nispeten büküm açısı artışının değiştirilmesi sonucu ortaya çıkan kusurdan daha kabul edilebilir bir değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.46. Deney 3 (156 mm) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri

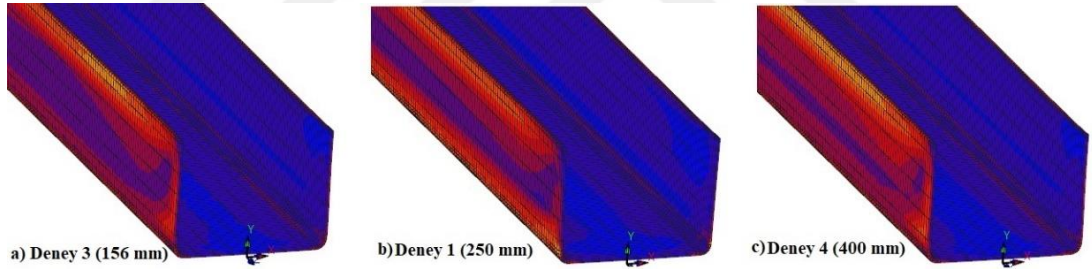


Şekil 6.47. Deney 1(std) (250 mm) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri



Şekil 6.48. Deney 4 (400 mm) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri

Şekil 6.49’da 156 mm, 250 mm ve 400 mm mesafede ayarlanmış istasyon aralıklarında yapılan simülasyon çalışmaları sonucu bitmiş profil kesiti üzerindeki oluşan von Mises gerilme dağılımları gösterilmektedir.



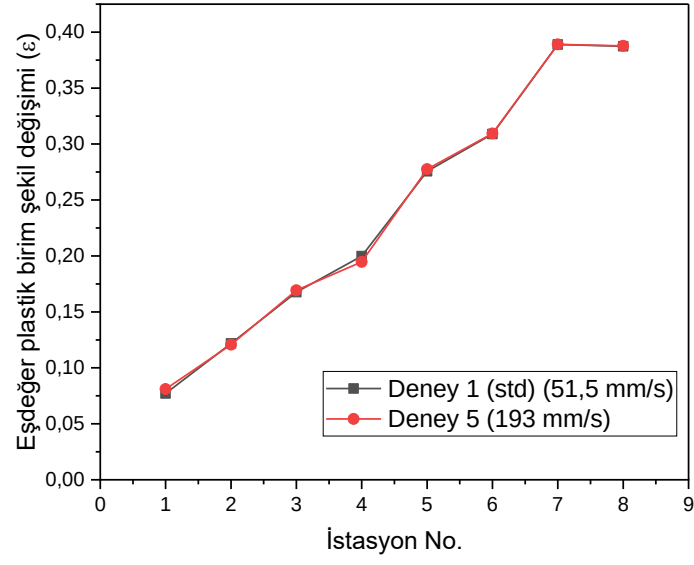
Şekil 6.49. Profil kesiti üzerindeki von Mises gerilme dağılımı a) Deney 3 (156 mm), b) Deney 1 (250 mm), c) Deney 4 (400 mm)

6.12. Hat hızı değişimi deneysel sonuçlar

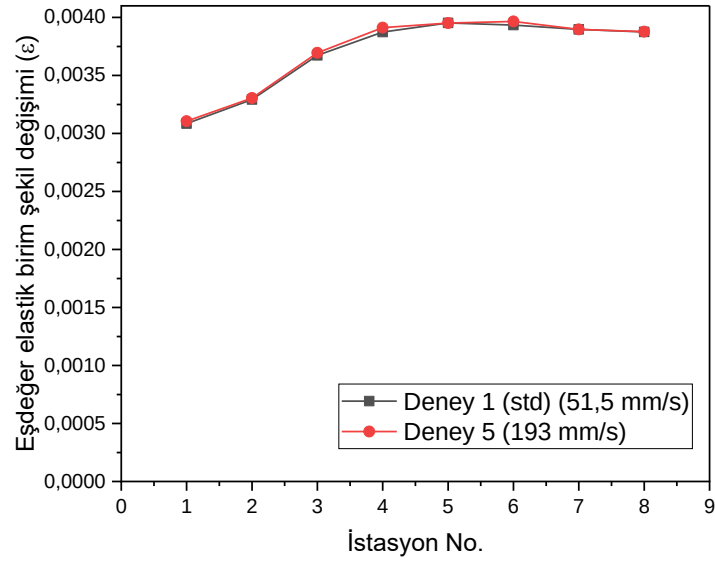
Hat hızı değişiminde 51,5 mm/s (8 dev/dk) ve 193 mm/s (30 dev/dk) hızlarında üretilen profil kalitelerinde herhangi bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

6.13. Hat hızı değişimi simülasyon sonuçları

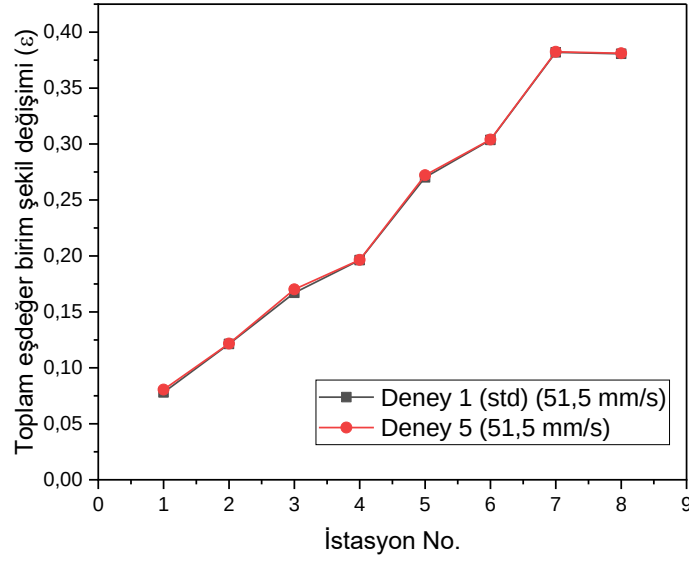
51,5 mm/s (8 dev/dk) ve 193 mm/s’ye (30 dev/dk) hızlarda ayarlanmış hat hızları ile yapılan simülasyon çalışmalarında eş değer plastik birim şekil değişimi, eş değer elastik birim şekil değişimi ve toplam eş değer birim şekil değişimi değerlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 6.50, Şekil 6.51, ve Şekil 6.52’de görülmektedir



Şekil 6.50. Hat hızı değişimi eş değer plastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği



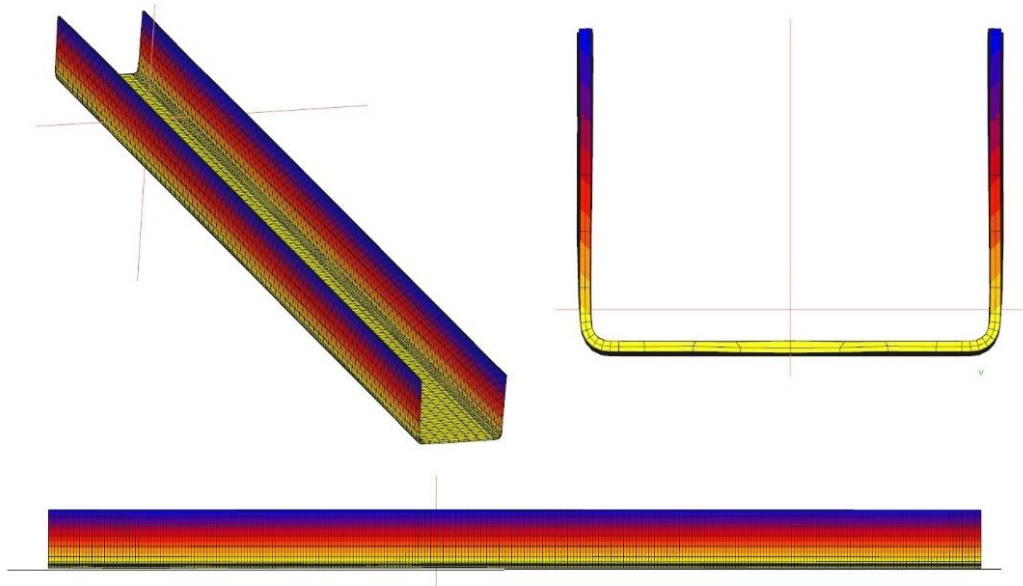
Şekil 6.51. Hat hızı değişimi eş değer elastik birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği



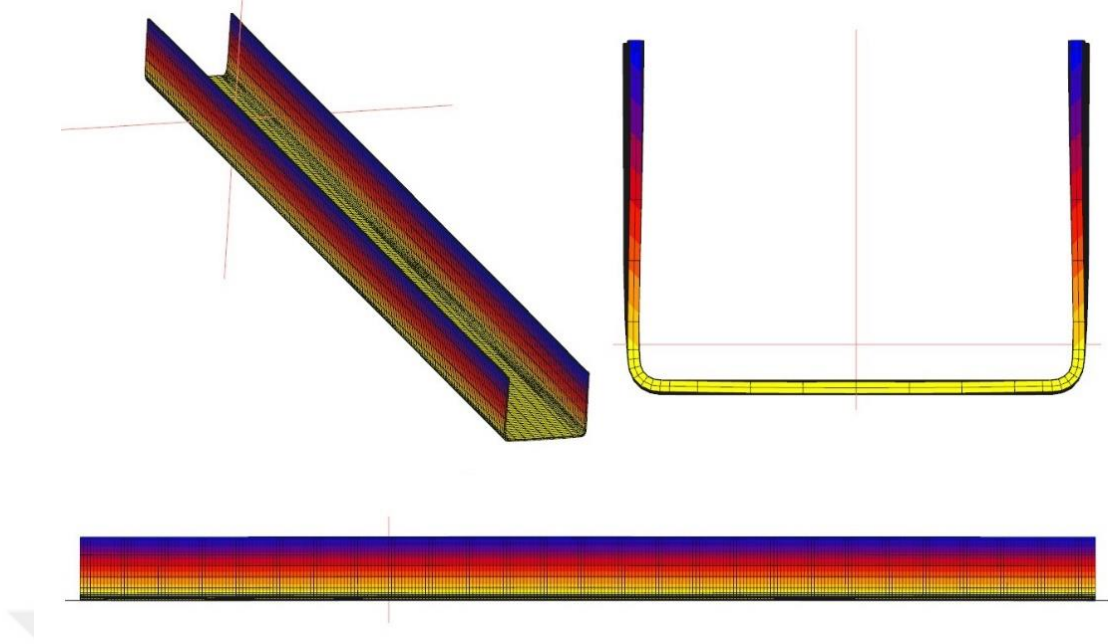
Şekil 6.52. Hat hızı değişimi toplam eş değer birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği

Her üç grafikte detaylı olarak incelendiğinde, Aynı düğüm noktasında ölçülen eşdeğer plastik birim şekil değişimi, eş değer elastik birim şekil değişimi ve toplam eş değer birim şekil değişimi grafiklerinde Deney 1(std) ve Deney 5’de birim şekil değiştirmelerin birbirine yakınsak değerlerde olduğu görülmektedir.

Makaralı bükme makinesi hızının 2 farklı hız kademesinde simülasyon deneylerinin yapıldığı çift katmanlı U profilin imalat görselleri Şekil 6.53 ve Şekil 6.54’de görülmektedir.



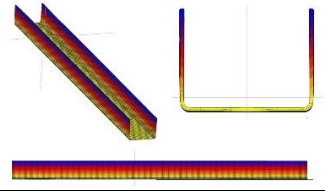
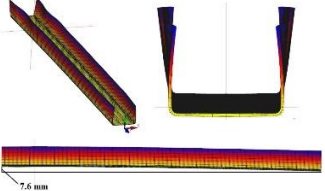
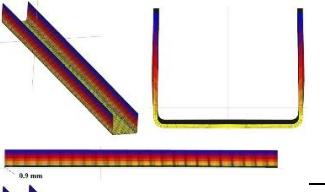
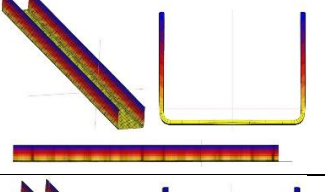
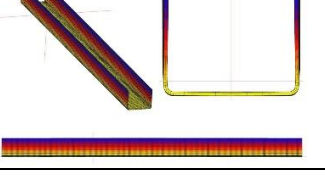
Şekil 6.53. Deney 1(std) (51,5 mm/s) simülasyonu sonucu elde edilen kesit görselleri



Şekil 6.54. Deney 5 (193 mm/s) simülasyon sonucu elde edilen kesit görselleri

Hat hızı değişiminde 51,5 mm/s (8 dev/dk) ve 193 mm/s'ye (30 dev/dk) hızlarında yapılan simülasyon çalışmalarında profil kesitlerinde herhangi bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Seçilen hızlarda hem deneysel çalışmalarda hem de simülasyon çalışmalarında profil kalitesi üzerine herhangi bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir oysa literatürde belirli hızların üzerinde kenar dalgalanması ve boyuna eğilme kusurlarının varlığı bildirilmektedir (Wang vd., 2022).

Tablo 6.4. Çalışmaların deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Deney No.	Büküm açısı (°)	İst. arası mesafe(mm)	Hat hızı (mm/s)	Deneysel sonuçlar	Simülasyon sonuçları	Sonuçlar ve Yorumlar
Deney 1 (std)	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	250 mm	51,5 mm/s			8 istasyonlu modelde, çift katmanlı U profil imalatı için deneysel ve simülasyon çalışmasında boyuna eğilme ve kenar yüzeyde dalgalanma kusuru görülmemiştir.
Deney 2	23°, 29°, 27°, 11°	250 mm	51,5 mm/s			4 istasyonlu modelde, çift katmanlı U profil imalatı için deneysel çalışmada 8,1 mm, simülasyon sonucunda 7,6 mm eğilme ve yan yüzeylerde aşırı dalgalanma görülmüştür.
Deney 3	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	156 mm	51,5 mm/s			İstasyonlar arası 156 mm mesafede, çift katmanlı U profil imalatı için deneysel çalışmada 0,7 mm, simülasyon sonucunda 0,9 mm boyuna eğilme görülmüştür.
Deney 4	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	400 mm	51,5 mm/s			İstasyonlar arası 400 mm mesafede çift katmanlı U profil imalatı için deneysel ve simülasyon çalışmasında boyuna eğilme ve kenar yüzeyde dalgalanma kusuru görülmemiştir.
Deney 5	11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 11°, 12°, 1°	250 mm	193 mm/s			Hat hızının 193 mm/s'ye yükseltilerek yapılan çift katmanlı U profil imalatı için deneysel ve simülasyon çalışmasında boyuna eğilme ve kenar yüzeyde dalgalanma kusuru görülmemiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Al 1050 ve 304 paslanmaz çelik levhaları rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirilmiş ardından elde edilen çift katmanlı levhalar makaralı bükme yöntemiyle U profil kesitine dönüştürülmüştür. Çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit levhasının makaralı bükme yöntemiyle şekillendirme sırasında büküm açısı artışının, istasyonlar arası mesafenin ve hat hızı parametrelerinin kenar yüzeyde dalgalanma ve boyuna eğilme kusurları üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ve simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen bulgular aşağıda değerlendirilmiştir.

Rulo yapıştırma operasyon adımları sonrası 304 kalite paslanmaz çeliklerin ve Al 1050 alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri incelendiğinde; 304 kalite paslanmaz çeliğin akma gerilmesinin 224 MPa değerine, çekme gerilmesinin 685 MPa değerine ve sertlik değerinin 155 HB'ye yükseldiği görülmüştür. 304 kalite paslanmaz çeliğin kopma uzamasının da azalarak %58,7 değerine düştüğü görülmüştür. Al 1050 alüminyum alaşımının ise akma gerilmesinin 73 MPa değerine, çekme gerilmesinin 84 MPa değerine ve sertlik değerinin 21 HB'ye düştüğü görülmüştür. Al 1050 alüminyum alaşımının kopma uzamasının da artarak %8,3 değerine yükseldiği görülmüştür. Sonuçlar 304 kalite paslanmaz çeliğin pekleşmeye uğrayarak akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve sertlik değerlerinin arttığı, kopma uzamasının da azaldığı görülmüştür. Al 1050 alüminyum alaşımının ise ısıtma işleminin ergime sıcaklığı değerine yakın olmasından dolayı pekleşme olayı görülmemiştir, akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve sertlik değerlerinin azaldığı, kopma uzamasının ise arttığı görülmüştür.

Rulo yapıştırma yöntemiyle çift katmanlı levha üretiminde malzemelerin birbirine yapışmasını sağlayan en önemli kriterin yüzey polisaj işlemi olduğu görülmüştür. İyi bir yüzey hazırlığı daha iyi bir bağlanma yüzeyi sağlamıştır. Farklı tiplerde ve doğrultularda yapılan polisaj işleminin yapışma performansına etkisi ilerleyen çalışmalarda incelenebilir.

Rulo yapıştırma işlemi sonrası, 304 paslanmaz çelik sac üzerinde oluşan krom-oksit tabakası bağlanmayı olumsuz yönde etkilemektedir. Oluşan krom-oksit tabakası nedeniyle özellikle soyulma testinde de görüldüğü üzere homojen olmayan bir bağlanma yüzeyi oluşmuştur. Tavlama esnasında fırın içerisinde oluşturulabilecek vakumlu bir ortamın bu sorunu önleyebileceği düşünülmektedir.

Rulo yapıştırma işleminde, malzeme türüne ve yapısına göre tavlama

sıcaklığının ve tavlama süresinin iyi tayin edilmesi gerekmektedir. Özellikle farklı metallerin birleştirildiği düşünüldüğünde bu seçimin çok önemli olduğu görülmektedir. Alüminyum levhanın düşük ergime sıcaklığı, paslanmaz çelik levhanın yüksek ergime sıcaklığı göz önüne alındığında, seçilen düşük sıcaklıklarda birleşme olmadığı, yüksek sıcaklıklarda ise alüminyum malzemenin deforme olduğu görülmüştür. Çalışmada 304 kalite paslanmaz çelik levha ve Al 1050 alüminyum alaşımı arasında güçlü bir bağ oluşturmak için ideal tavlama sıcaklığının 430°C, tavlama süresinin 60 dk olması gerektiği tespit edilmiştir.

Rulo yapıştırma yöntemiyle birleştirmede kalınlık azaltma işlemi birleşecek olan metallerin yapıları göz önüne alınarak yapılmalıdır. Büyük oranda yapılan kalınlık azaltma işlemleri yumuşak malzemelerde sac levhanın kıvrılıp deforme olmasına neden olmaktadır. Çevrim sayısı ve her bir çevrim arasında malzemeye uygulanacak ısı işlemi süreside önemli bir etkidir. Kalınlık azaltma oranının düşük tutulması durumunda çevrim sayısının artırılması gerekmektedir bu durumda da çift katmanlı levhaların tekrar tekrar ısı işlemi malzeme iç yapısını etkilemektedir. Özellikle alüminyum malzemede sertliği belirgin oranda düşürdüğü görülmüştür. Bu nedenle kalınlık azaltmanın ve çevrim sayısının optimum bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Çalışma kapsamında 3 çevrim ve her bir çevrimde %10 oranında kalınlık azaltma işlemi uygulanarak Al 1050 alüminyum levhası ve 304 paslanmaz çelik levhası birbirine birleştirilmiştir.

Makaralı bükme tezgâhı ile şekillendirmede alt form makara çapının üst form makarası çapına göre daha büyük olması gerektiği ve boyuna eğilmeyi etkileyen önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada alt makara çapı 123 mm üst makara çapı 106 mm, yan makara çapları ise 132 mm olarak belirlenmiştir.

Her bir istasyondaki büküm açısı artışı makaralı bükme yöntemiyle imalatla önemli bir kriterdir. Her bir istasyondaki büküm açısını arttırmak yani başka bir deyişle istasyon sayısını azaltmak şekillendirilmek istenen malzeme üzerinde gerilme yığılmalarını arttıracak bu durumda boyuna eğilme ve kenar yüzeyde dalgalanma kusurunu ortaya çıkaracaktır. Çalışmada U profil için istasyon sayısının 8'den 4'e düşürülmesi ile boyuna eğilmenin deneysel çalışmada 8,1 mm, simülasyon çalışmasında ise 7,6 mm olduğu görülmüştür. Kenar dalgalanmanın ise hem deneysel çalışmada hem de simülasyon çalışmasında bariz şekilde orta çıktığı görülmüştür. Bu sebeple yapılacak olan tasarımlarda büküm açısı artışlarının üretilecek profil kesitine göre her bir istasyona optimum şekilde ve uygun açıyla dağıtılması gerekmektedir.

İstasyonlardaki büküm açılarının arttırılması çift katmanlı levhalarda birleşim yüzeyinin daha fazla zorlanmasına ve ayrılmaların (delaminasyon) oluşmasına sebep olmaktadır. Daha küçük büküm açıları ile şekillendirmek bu zorlanmanın ve ayrılmanın önüne geçmektedir.

İlk istasyondaki büküm açısını optimum bir değerde tutmakta boyuna eğilme için önemli bir kriterdir. 4 istasyonlu modelde ilk istasyondaki büküm açısı 23° iken 8 istasyonlu modelde 11° 'dir, bu büküm açısı farkı profilin ilk istasyondan itibaren büyük birim şekil değişimleri ile şekillendirilmesine neden olmaktadır. Sonraki çalışmalarda, farklı sac levha tiplerinde ilk istasyon için olması gereken büküm açısı dereceleri tespit edilebilir.

Ardışık iki istasyon arası mesafenin, büküm açısı artışı kadar boyuna eğilmeyi ve kenar yüzeyde dalgalanmayı etkilemese de bu mesafenin belli bir değerin üstünde tutulması gerekmektedir. Çalışmada form makaralarının çapından dolayı istasyonlar birbirine en yakın 156 mm olacak şekilde konumlandırılmıştır. 156 mm mesafede özellikle son istasyonlara doğru birim şekil değiştirme değerlerinin artışları söz konusu iken 250 mm ve 400 mm mesafede herhangi bir birim şekil değişimi artışı farkı görülmemiştir. Çalışmada U profil için istasyonlar arası mesafenin 156 mm'ye düşürülmesi ile boyuna eğilmenin deneysel çalışmada 0,7 mm, simülasyon çalışmasında ise 0,9 mm olduğu görülmüştür. Profil kesitine göre belirli bir limit mesafenin altında bu kusurlar ortaya çıkarken belirli bir limitin üzerinde mesafe atırılsa dahi herhangi bir değişikliğin olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple maliyet açısından makaralı bükme tezgâhı tasarımlarında profil kesiti ve büküm açısı artışları göz önüne alınarak istasyonlar arası mesafenin optimum mesafede tutularak makine tasarımının yapılması doğru bir yaklaşımdır.

Çift katmanlı U profil imalatında yapılan simülasyon çalışmalarında büküm bölgesindeki kalınlık artışının iç kısımda bulunan Al 1050 alüminyum alaşımı malzeme tarafında gerçekleştiği ve çift katmanlı levhada 0,057 mm'lik bir kalınlık artışı meydana geldiği görülmüştür.

Çift katmanlı levhanın ilk beş istasyonda sac levhanın ilerleme hızı 51,5 mm/s iken son üç istasyondan itibaren azalarak hattın çıkışında 48,9 mm/s'ye kadar düştüğü görülmektedir. Özellikle tahrikin olmadığı yan form makaraları devreye girdiğinde sac malzemenin hız kaybettiği görülmektedir. Rulo sac malzeme işlenmesinde sorun olmayan bu durum ebatlı sacların şekillendirilmesinde profillerin birbirine çarpma sorununu ortaya çıkarabilir. Bu sıkıntının önüne geçmek için ebatlı sacların

beslemesinin optimum şekilde yapılması gerekmektedir.

Son istasyona koyulan düzeltme doğrultma istasyonunun özellikle profil kesitinde oluşabilecek muhtemel kusurları tolere ettiği gözlenmiştir.

51,5 mm/s (8 dev/dk) ve 193 mm/s'ye (30 dev/dk) hızlarında üretilen profil kesitlerinde herhangi bir fark olmadığı gözlenmiştir. Literatüre bakıldığında ise belirli hızların üstünde boyuna eğilme ve kenar yüzeyde dalgalanma kusurlarının varlığı bildirilmektedir.

Sonuç olarak, çift katmanlı Al 1050-304 paslanmaz çelik kompozit levhasına makaralı bükme yöntemiyle şekil verme operasyonunda büküm açısı artışının, istasyonlar arası mesafe değişimine ve hat hızı değişimine göre daha önemli bir kriter olduğu görülmektedir.



8. TEZİN ÇIKTILARI

Yapılan bu tez çalışması kapsamında elde edilen çıktılar aşağıda listelenmiştir.

Sarioğlu, B., & Yıldızlı, K. Experimental and Numerical Investigation of U Profile Production Process From Bimetallic Strip by Roll Forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Under review)

Sarioğlu, B., & Yıldızlı, K. Production of Bimetallic Al-Cu Plate and Determination of the Mechanical Performances. Sivas International Conference On Scientific and Innovation Research, 686-696, (2022), (ISBN: 978-625-8246-21-6)

Sarioğlu, B., & Yıldızlı, K. Experimental and Numerical Investigation of U Profile Production by Roll Forming Method from Adhesive Bonding Al/Cu Sheets. International Congress on Life, Engineering and Applied Sciences in a Changing World, 97-111, (2023), ISBN: 978-605-72563-6-2

Tez çalışması, TUBİTAK 1002 kapsamında destek almıştır (Proje Numarası: 222M462).

Tez çalışması, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Ofisi tarafından destek almıştır. (Proje Numarası: PYO. MUH. 1904.21.003)

KAYNAKLAR

- Abbasi, M., & Toroghinejad, M. R. (2010). Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips. *Journal of materials processing technology*, 210(3), 560-563.
- Abeyrathna, B., Ghanei, S., Rolfe, B., Taube, R., & Weiss, M. (2022). Optimising part quality in the flexible roll forming of an automotive component. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(9), 3361-3373.
- Abeyrathna, B., Rolfe, B., Hodgson, P., & Weiss, M. (2016a). An extension of the flower pattern diagram for roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9), 1683-1695.
- Abeyrathna, B., Rolfe, B., Hodgson, P., & Weiss, M. (2016b). A first step towards a simple in-line shape compensation routine for the roll forming of high strength steel. *International Journal of Material Forming*, 9(3), 423-434.
- Abeyrathna, B., Rolfe, B., Hodgson, P., & Weiss, M. (2017). Local deformation in roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9), 2405-2415.
- Abeyrathna, B., Rolfe, B., & Weiss, M. (2017). The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 743-754.
- Abvabi, A., Mendiguren, J., Kupke, A., Rolfe, B., & Weiss, M. (2017). Evolution of elastic modulus in roll forming. *International Journal of Material Forming*, 10(3), 463-471.
- Abvabi, A., Rolfe, B., Hodgson, P., & Weiss, M. (2015). The influence of residual stress on a roll forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 101, 124-136.
- Avsec, J., Brandl, D., Schober, H., Novosel, U., & Ferčec, J. (2019). Thermal analysis and application of roll bond solar absorbers for heating and cooling in residential buildings. *Journal of Energy Technology*, 12(1), 11-21.
- Badparva, H., Naeini, H. M., Kasaei, M. M., Asl, Y. D., Abbaszadeh, B., & da Silva, L. F. (2023). Deformation length in flexible roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-10.
- Bhattacharyya, D., Smith, P., Yee, C., & Collins, I. (1984). The prediction of deformation length in cold roll-forming. *Journal of mechanical working technology*, 9(2), 181-191.
- Bidabadi, B. S., Naeini, H. M., Tafti, R. A., & Mazdak, S. (2015). Experimental investigation of the ovality of holes on pre-notched channel products in the cold roll forming process. *Journal of materials processing technology*, 225, 213-220.
- Bidabadi, B. S., Naeini, H. M., Tehrani, M. S., & Barghikar, H. (2016). Experimental and numerical study of bowing defects in cold roll-formed, U-channel sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 118, 243-253.

- Bui, Q., & Ponthot, J. (2008). Numerical simulation of cold roll-forming processes. *Journal of materials processing technology*, 202(1-3), 275-282.
- Cha, W.-g., & Kim, N. (2013). Study on twisting and bowing of roll formed products made of high strength steel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(9), 1527-1533.
- Chang, H., Zheng, M., Gan, W., Wu, K., Maawad, E., & Brokmeier, H. (2009). Texture evolution of the Mg/Al laminated composite fabricated by the accumulative roll bonding. *Scripta Materialia*, 61(7), 717-720.
- Chen, M., Hsieh, H., & Wu, W. (2006). The evolution of microstructures and mechanical properties during accumulative roll bonding of Al/Mg composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 416(1-2), 169-172.
- Chen, Z., Liu, Q., Wang, G., & Wang, D. (2015). Deformation inhomogeneities of Mg–Al laminated metal composites fabricated by accumulative roll bonding. *Materials Research Innovations*, 19(sup4), S147-S151.
- Cheng, J., Cao, J., Ruan, K., Wang, X., Liu, J., & Zhao, R. (2022). Study on twist defect of thin-walled components with asymmetric section during roll forming. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Cheng, J., Cao, J., Zhao, J., Liu, J., Zhao, R., & Liu, S. (2020). The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process. *Thin-walled structures*, 154, 106809.
- DataM. (2021). Flexible roll forming. <https://www.datam.de/en/products/automation-division/flexible-rollforming>, erişim 08 Temmuz 2021.
- Dehsorkhi, R. N., Qods, F., & Tajally, M. (2011). Investigation on microstructure and mechanical properties of Al–Zn composite during accumulative roll bonding (ARB) process. *Materials Science and Engineering: A*, 530, 63-72.
- Dimeco. (2021). Roll forming. <https://www.dimeco.com/dimeco-solutions/rollforming/>, erişim 14 Nisan 2021.
- Doğan, S. (2018). Araç Koltuk Kızağının Roll Forming İşlemi İle Üretilmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. *Bursa Uludag University (Turkey)*.
- Dönmez, O. E. (2007). Makaralı Bükme İşleminde İnce Sacların Kenar Dalgalanma Kusurunun DeneySEL İncelenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Dönmez, O. E., & Kocabaş, H. (2011). Makaralı bükme işleminde ince sacların kenar dalgalanma kusurunun deneySEL incelenmesi. *İTÜ DERGİSİ/d*, 8(2).
- Duggal, N. (1995). Process simulation of roll forming and roll pass design. *The Ohio State University*,
- Egger, C., Lüchinger, M., Schreiner, M., & Tillmann, W. (2022). Numerical Simulation of Tube Manufacturing Consisting of Roll Forming and High-Frequency Induction Welding. *Materials*, 15(3), 1270.
- Esener, E. (2019). Platisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11:1, 171-181.

- Eslami, P., & Taheri, A. K. (2011). An investigation on diffusion bonding of aluminum to copper using equal channel angular extrusion process. *Materials letters*, 65(12), 1862-1864.
- Esposito, L., Bertocco, A., Sepe, R., & Armentani, E. (2018). 3D strip model for continuous roll-forming process simulation. *Procedia Structural Integrity*, 12, 370-379.
- Farzin, M., Tehrani, M. S., & Shameli, E. (2002). Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis. *Journal of materials processing technology*, 125, 626-632.
- Galdos, L., Ulibarri, U., Gil, I., Ortubay, R., & Argandona, E.S. (2014). Friction coefficient identification in roll forming processes. *Key Engineering Materials*, 611-612, 425-435.
- Gholami, M. D., Salamat, M., & Hashemi, R. (2021). Study of mechanical properties and wear resistance of Al 1050/Brass (70/30)/Al 1050 composite sheets fabricated by the accumulative roll bonding process. *Journal of Manufacturing Processes*, 71, 407-416.
- Groche, P., Mueller, C., Traub, T., & Butterweck, K. (2014). Experimental and numerical determination of roll forming loads. *Steel research international*, 85(1), 112-122.
- Grydin, O., Gerstein, G., Nürnberger, F., Schaper, M., & Danchenko, V. (2013). Twin-roll casting of aluminum-steel clad strips. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 501-507.
- Halmos, G. T. (2005). Roll forming handbook. *Crc Press*.
- Han, F., Wang, Y., & Wang, Z.-L. (2018). Mechanical bending property of ultra-high strength steel sheets in roll forming process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19, 1885-1893.
- Han, Z.-W., Liu, C., Lu, W.-P., & Ren, L.-Q. (2001). The effects of forming parameters in the roll-forming of a channel section with an outer edge. *Journal of materials processing technology*, 116(2-3), 205-210.
- Heydari Vini, M., Daneshmand, S., & Forooghi, M. (2017). Roll bonding properties of Al/Cu bimetallic laminates fabricated by the roll bonding technique. *Technologies*, 5(2), 32.
- Hisada. (2019). Various samples of roll profiles. <https://www.hisada-g.co.jp/en/rollforming/>, erişim 08 Mart 2019.
- Hong, S., Lee, S., & Kim, N. (2001). A parametric study on forming length in roll forming. *Journal of materials processing technology*, 113(1-3), 774-778.
- İmt machinery. (2021). Rulo besleme makinaları. <https://imtmachinery.com/products/category/coil-feeding-system.html>, erişim 05 Şubat 2021.
- Jeong, S., Lee, S., Kim, G., Seo, H., & Kim, T. (2008). Computer simulation of U-channel for under-rail roll forming using rigid-plastic finite element methods. *Journal of materials processing technology*, 201(1-3), 118-122.

- Jimma, T., & Ona, H. (1981). Optimum roll pass schedules on the cold roll forming process of symmetrical channels. *Paper presented at the Proceedings of the Twenty-First International Machine Tool Design and Research Conference.*
- Kasaei, M., Naeini, H. M., Abbaszadeh, B., Silva, M., & Martins, P. (2015). Flexible roll forming. *In Materials forming and machining* (pp. 51-71).
- Kasaei, M. M., Moslemi Naeini, H., Abbaszadeh, B., Roohi, A. H., Silva, M. B., & Martins, P. A. (2021). On the prediction of wrinkling in flexible roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(7), 2257-2275.
- Kim, D., Cha, M., & Kang, Y. S. (2017). Development of the bus frame by flexible roll forming. *Procedia Engineering*, 183, 11-16.
- Kim, J. H., Woo, Y. Y., Hwang, T. W., Han, S. W., & Moon, Y. H. (2016). Effect of loading pattern on longitudinal bowing in flexible roll forming. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(12), 5633-5639.
- Kim, N., & Oh, S.I. (1999). Analysis tool for roll forming of sheet metal strips by the finite element method. *CIRP Annals*, 48(1), 235-238.
- Kiuchi, M. (1973). Analytical study on cold-roll-forming process.
- Köhler, M. (2006). Plattiertes Stahlblech. *Stahl-Informations-Zentrum.*
- Lamprecht, M., Koçbay, E., Leonhartsberger, M., Vetyukov, Y., & Bleicher, F. (2021). Nonlinear mechanical model of the shaft of a roll forming mill and parameter identification. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(11), 3363-3375.
- Lamprecht, M., & Leonhartsberger, M. (2021). Tool Stiffness Calculation In Roll Forming. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 20(1).
- Leonhartsberger, M., Lamprecht, M., Famler, S., Krall, S., & Bleicher, F. (2023). Influence of varying static characteristics of roll forming passes on profile geometry and reproduction processes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 180-198.
- Li, L., Nagai, K., & Yin, F. (2008). Progress in cold roll bonding of metals. *Science and technology of advanced materials*, 9(2), 023001.
- Li, Z.-X., Shu, X.-D., Yin, A.-M., & Guo, D.-L. (2018). Experimental and numerical analysis on the forming and shearing quality of C-channel steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3665-3678.
- Liang, J., Chen, C., Liang, C., Li, Y., Chen, G., Li, X., & Wang, A. (2019). One-time roll-forming technology for high-strength steel profiles with “日” section. *Advances in Materials Science and Engineering.*
- Lindgren, M. (2007). Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel. *Journal of materials processing technology*, 186(1-3), 77-81.
- Lindgren, M. (2009). Experimental and computational investigation of the roll forming process. *Luleå tekniska universitet.*
- Liu, C.f., Zhou, W.l., Fu, X.s., & Chen, G.q. (2015). A new mathematical model for determining the longitudinal strain in cold roll forming process. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79(5), 1055-1061.

- Liu, X., Cao, J., Chai, X., Liu, J., Zhao, R., & Kong, N. (2017). Investigation of forming parameters on springback for ultra high strength steel considering Young's modulus variation in cold roll forming. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 289-297.
- Lotosforming (2021). Common roll forming problems. <https://lotosforming.com/common-roll-forming-problem/>, erişim 16 Nisan 2021.
- Mehari, Z. A., & Han, J. (2022). Effects of the partial heating roll forming method on springback of high strength steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7), 5195-5210.
- Mehr, V. Y., Toroghinejad, M. R., & Rezaeian, A. (2014). The effects of oxide film and annealing treatment on the bond strength of Al-Cu strips in cold roll bonding process. *Materials & Design*, 53, 174-181.
- Merkblatt 383. (2013) Plattiertes Stahlblech - Stahl-Informationen-Zentrum. <https://www.yumpu.com/xx/document/view/10405967/merkblatt-383-plattiertes-stahlblech-stahl-informations-zentrum>, erişim 10 Ocak 2022.
- Mises, R. v. (1913). Mechanics of solid bodies in the plastically-deformable state. *Göttingen Nachrichten Math Phys*, (1), 582-592.
- Moneke, M., & Groche, P. (2021). Control of residual stresses in roll forming through targeted adaptation of the roll gap. *Journal of materials processing technology*, 294, 117129.
- Mozaffari, A., Manesh, H. D., & Janghorban, K. (2010). Evaluation of mechanical properties and structure of multilayered Al/Ni composites produced by accumulative roll bonding (ARB) process. *Journal of Alloys and Compounds*, 489(1), 103-109.
- Murugesan, M., Sajjad, M., & Jung, D. W. (2021). Experimental and numerical investigation of AA5052-H32 Al alloy with U-Profile in cold roll forming. *Materials*, 14(2), 470.
- Nallapati, S. R. (1996). CAD for roll forming process. *West Virginia University*.
- Nejad Fard, N. M., Mirzadeh, H., Rezayat, M., & Cabrera Marrero, J. M. (2017). Accumulative roll bonding of aluminum/stainless steel sheets. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, 50(1), 1-5.
- Nick, A., Nick, B., & Wortmann, F.-J. (2000). Peel testing of adhesively bonded joints of carbon fibre reinforced epoxy resin. *European Structural Integrity Society*, 27 . 261–271.
- Panton, S., Duncan, J., & Zhu, S. (1996). Longitudinal and shear strain development in cold roll forming. *Journal of materials processing technology*, 60(1-4), 219-224.
- Paralikas, J., Salonitis, K., & Chryssolouris, G. (2009). Investigation of the effects of main roll-forming process parameters on quality for a V-section profile from AHSS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(3), 223-237.

- Paralikas, J., Salonitis, K., & Chryssolouris, G. (2010). Optimization of roll forming process parameters—a semi-empirical approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(9), 1041-1052.
- Paralikas, J., Salonitis, K., & Chryssolouris, G. (2011). Investigation of the effect of roll forming pass design on main redundant deformations on profiles from AHSS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(5), 475-491.
- Park, H.-S., & Anh, T. V. (2010). Finite element analysis of roll forming process of aluminum automotive component. *Paper presented at the International Forum on Strategic Technology 2010*.
- Pita, M., Mashinini, P., & Tartibu, L. (2020). The effect of surface temperature and particle size on mechanical properties during accumulative roll bonding of Al 1050-H4 aluminum alloy. *Paper presented at the 2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*.
- Poursina, M., Salmani Tehrani, M., & Poursina, D. (2008). Application of BPANN and regression for prediction of bowing defect in roll-forming of symmetric channel section. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 17-20.
- Punin, V., Kokhan, L., & Morozov, Y. A. (2013). Reduction of the length of strip rolled on roll-forming machines. *Metallurgist*, 56(11-12), 938-940.
- Ren, Y., Dong, J., Sun, Y., Sedlmaier, A., Guo, Q., Zhang, D., & Yang, J. (2022). Digitization of roll forming and its application. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Rouzbeh, A., Hashemi, R., & Sedighi, M. (2023). Experimental and numerical study of microstructure, mechanical characteristics, and forming limit curve for Al 1050/Mg-AZ31B two-layer sheets manufactured via roll bonding technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 169059.
- Safdarian, R., & Naeini, H. M. (2015). The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section. *Thin-walled structures*, 92, 130-136.
- Serror, M. H. (2013). Analytical study for deformability of laminated sheet metal. *Journal of Advanced Research*, 4(1), 83-92.
- Shirani Bidabadi, B., Moslemi Naeini, H., Azizi Tafti, R., & Barghikar, H. (2016). Experimental study of bowing defects in pre-notched channel section products in the cold roll forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 997-1011.
- Sidek, M. Z. (2013). The Development of a Heat Assisted Section Rolling Process for Strip.
- Sreenivas, A., Abeyrathna, B., Rolfe, B., & Weiss, M. (2022). Longitudinal strain and wrinkling analysis of variable depth flexible roll forming. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 414-432.
- Su, C., Li, X., Feng, Z., Li, X., Zhao, L., & Huang, W. (2023). Rebound control in multipass roll forming of cap-shaped parts based on segmental boundary optimization function. *Materials & Design*, 225, 111512.

- Suckow, T., Schroeder, J., & Groche, P. (2021). Roll forming of a high strength AA7075 aluminum tube. *Production Engineering*, 15(3), 573-586.
- Sun, Y., Li, Y., Li, D., Meehan, P. A., Daniel, W. J., Shi, L., & Ding, S. (2019). Predictive modelling of longitudinal bow in chain-die formed AHSS profiles and its experimental verification. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 208-225.
- Sweeney, K., & Grunewald, U. (2003). The application of roll forming for automotive structural parts. *Journal of materials processing technology*, 132(1-3), 9-15.
- Swift, H. W. (1952). Plastic Instability under Plane Stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1-18.
- Talebi-Ghadikolaee, H., Naeini, H. M., Mirnia, M. J., Mirzai, M. A., Alexandrov, S., & Zeinali, M. S. (2020). Modeling of ductile damage evolution in roll forming of U-channel sections. *Journal of materials processing technology*, 283, 116690.
- Tang, C., Liu, Z., Zhou, D., & Wu, S. (2015). Surface treatment with the cold roll bonding process for an aluminum alloy and mild steel. *Strength of Materials*, 47(1), 150-155.
- Tehrani, M. S., Hartley, P., Naeini, H. M., & Khademizadeh, H. (2006). Localised edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section. *Thin-walled structures*, 44(2), 184-196.
- Tehrani, M. S., Naeini, H. M., Hartley, P., & Khademizadeh, H. (2006). Localized edge buckling in cold roll-forming of circular tube section. *Journal of materials processing technology*, 177(1-3), 617-620.
- Traub, T., Chen, X., & Groche, P. (2017). Experimental and numerical investigation of the bending zone in roll forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131, 956-970.
- Traub, T., Gregório, M. G., & Groche, P. (2018). A framework illustrating decision-making in operator assistance systems and its application to a roll forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 3701-3710.
- Traub, T., & Groche, P. (2015). Experimental and numerical determination of the required initial sheet width in die bending. *Paper presented at the Key Engineering Materials*.
- Traub, T., Müller, C., & Groche, P. (2019). The perspective of sensor integration and automated decision making in roll forming. *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*.
- Tresca, H. (1864). Memoir on the flow of solid bodies under strong pressure. *Comptes-rendus de l'académie des sciences*, (59), 754-758.
- Wang, J., Liu, H. M., Li, S. F., & Chen, W. J. (2022). Cold Roll Forming Process Design for Complex Stainless-Steel Section Based on COPRA and Orthogonal Experiment. *Materials*, 15(22), 8023.
- Wang, M., Feng, Z., Wang, R., Zhang, G., Lv, Y., Lou, S., & Yao, Y. (2021). Research on warpage in roll forming of the hat-shaped part using a five-boundary

- condition forming angle distribution function. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(3), 1325-1339.
- Wang, P., Chen, Z., Hu, C., Li, B., Lin, J., & Liu, Q. (2020). Effects of annealing on the interface microstructures and mechanical properties of hot roll bonded Ti6Al4V/AA6061 clad sheets. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11813-11825.
- Watari, H., & Ona, H. (1998). Characteristic features of shape defects occurring in the cold roll forming of pre-notched products. *Journal of materials processing technology*, 80, 225-231.
- Wei, K. X., Wei, W., Du, Q. B., & Hu, J. (2009). Microstructure and tensile properties of Al–Mn alloy processed by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 525(1-2), 55-59.
- Weiss, M., Abeyrathna, B., Rolfe, B., Abee, A., & Wolfkamp, H. (2017). Effect of coil set on shape defects in roll forming steel strip. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 8-15.
- Weiss, M., Sreenivas, A., Jeganathan, H., Jiang, L., Zhang, P., Oxley, B., & Abeyrathna, B. (2023). The effect of the calibration method on the critical forming strains and fracture limits in the roll forming of 7075 series Aluminium. *Journal of materials processing technology*, 117948.
- Wiebenga, J., Weiss, M., Rolfe, B., & van den Boogaard, A. H. (2013). Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process. *Journal of materials processing technology*, 213(6), 978-986.
- Woo, Y. Y., Han, S. W., Hwang, T. W., Park, J. Y., & Moon, Y. H. (2018). Characterization of the longitudinal bow during flexible roll forming of steel sheets. *Journal of materials processing technology*, 252, 782-794.
- Woo, Y. Y., Oh, I. Y., Hwang, T. W., & Moon, Y. H. (2020). Analysis of shape defects during flexible roll forming of steel/aluminum double-layered blanks. *International Journal of Material Forming*, 13(6), 861-872.
- Xu, C.-T., Chen, J.-C., Wei, Y.-F., Han, H., Zong, X., & Yuan, Y. (2023). A study of transverse bowing defect in cold roll-forming asymmetric corrugated channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-11.
- Yan, Y., Wang, H., Li, Q., & Guan, Y. (2016). Finite element simulation of flexible roll forming with supplemented material data and the experimental verification. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 29(2), 342-350.
- Yan, Y., Wang, H., Li, Q., Qian, B., & Mpofu, K. (2014). Simulation and experimental verification of flexible roll forming of steel sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(1), 209-220.
- Ye, Q., Li, X., Tayyebi, M., Assari, A. H., Polkowska, A., Lech, S., Polkowski, W., & Tayebi, M. (2022). Effect of heat treatment parameters on microstructure evolution, tensile strength, wear resistance, and fracture behavior of Ni–Ti multilayered composites produced by cross-accumulative roll bonding. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(1), 27.
- You, C., Xie, W., Miao, S., Liang, T., Zeng, L., Zhang, X., & Wang, H. (2021). High strength, high electrical conductivity and thermally stable bulk Cu/Ag

nanolayered composites prepared by cross accumulative roll bonding. *Materials & Design*, 200, 109455.

Zeinali, M. S., Naeini, H. M., Talebi-Ghadikolaee, H., & Panahizadeh, V. (2022). Numerical and experimental investigation of fracture in roll forming process using Lou–Huh fracture criterion. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(12), 15591-15602.



EKLER

Ek 1. İstasyonlar arası olması gereken minimum mesafe

Ek 2. DTM(Deformasyon Teknoloji Modülü) analizi için makine ayarları

Ek 3. Copra FEA’da form makaralarının, Al 1050 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik levhaların modellenmesi

Ek 4. Copra FEA’da form makaralarının, Al 1050 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik levhaların kontak ilişkilerinin belirlenmesi

Ek 5. Form makaralarından gelen büküm kuvvetleri (3. İstasyon)

Ek 1. İstasyonlar arası olması gereken minimum mesafe

Correction of Forming Length

Select Passes

☐ single from pass 7

☐ multiple

☒ all upto pass 1

Forming Length	left	right
Pass 8- 7:	152.788	152.788*
Pass 7- 6:	165.154	165.154*
Pass 6- 5:	176.931	176.931*
Pass 5- 4:	187.043	187.044*
Pass 4- 3:	195.817	195.817*
Pass 3- 2:	201.409	201.409*
Pass 2- 1:	203.500	203.500*

Input: le ri

Factor: le ri

OK Cancel Help

Ek 2. DTM(Deformasyon Teknoloji Modülü) analizi için makine ayarları

Machine Data DTM

Machine name: 30x40x30

Root diameter

Alt form makara çapı → bottom: 123.000

Üst form makara çapı → top: 106.000

Yan form makara çapı → side: 136.000

Station Distance

☒ constant

☐ different

No. Stations 8

Forming starts at

Station number 1

Distance: 250.000

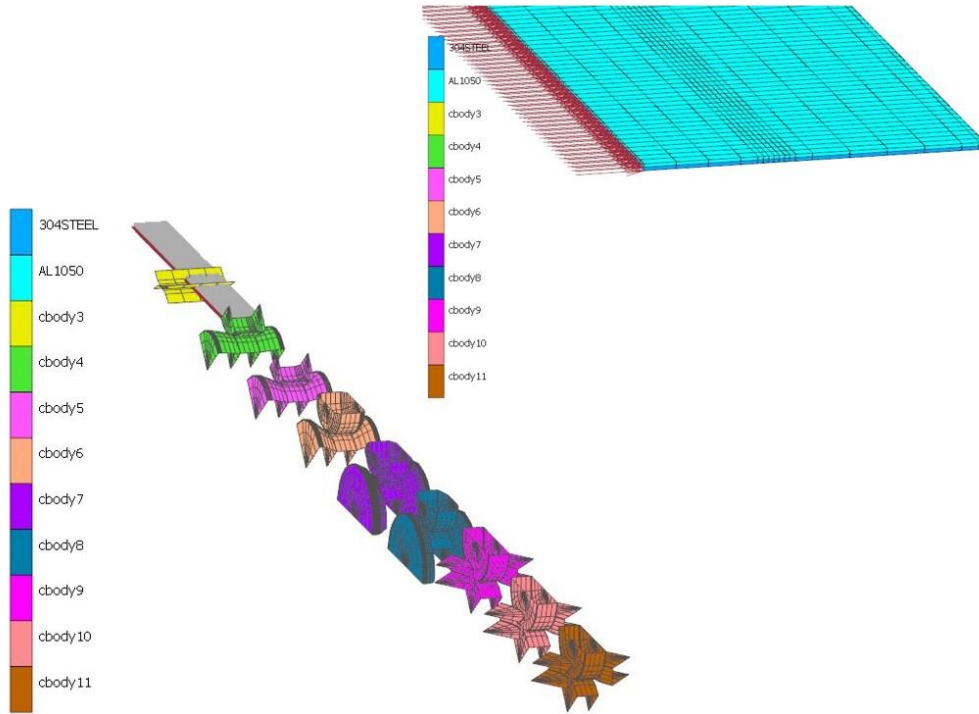
Horiz. Station Dist.:

pass	station	distance
9- 8:	0- 1:	250.000
8- 7:	1- 2:	250.000
7- 6:	2- 3:	250.000
6- 5:	3- 4:	250.000
5- 4:	4- 5:	250.000
4- 3:	5- 6:	250.000
3- 2:	6- 7:	250.000
2- 1:	7- 8:	250.000

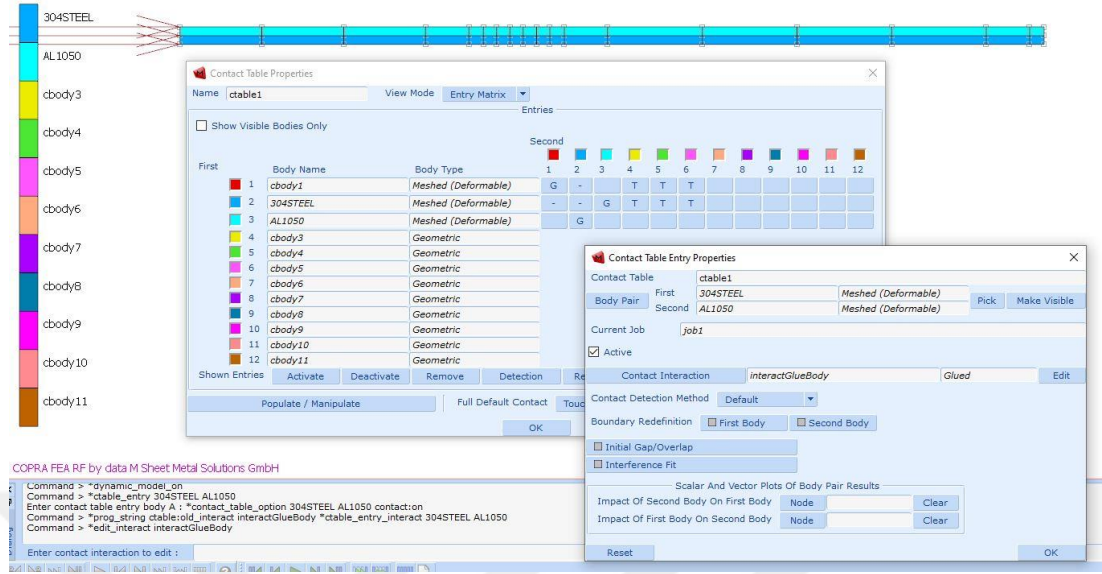
İstasyonlar arası mesafe

OK Cancel Help

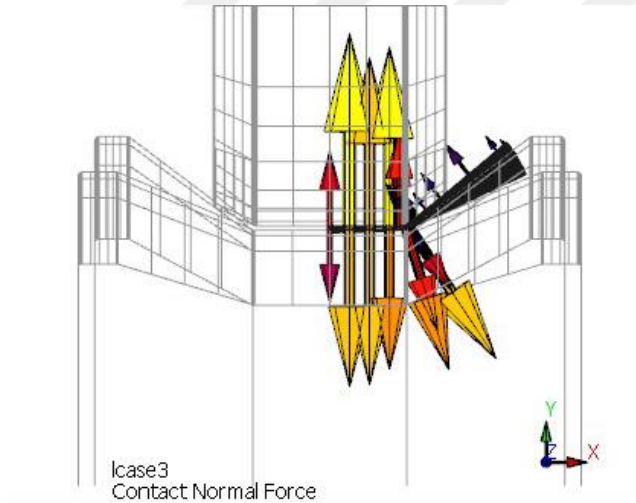
Ek 3. Copra FEA’da form makaralarının, Al 1050 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik levhaların modellenmesi



Ek 4. Copra FEA’da form makaralarının, Al 1050 alüminyum ve 304 paslanmaz çelik levhaların kontak ilişkilerinin belirlenmesi



Ek 5. Form makaralarından gelen büküm kuvvetleri (3. İstasyon)



ÖZ GEÇMİŞ

Burhan SARIOĞLU, Yozgat Atatürk Lisesi'ni bitirdikten sonra Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. 2010 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Yüksek Lisans programına başladı ve 2013 yılında bitirdi. 2017 yılında OMÜ LEE Makine Mühendisliği ABD doktora programına başladı. Lisans mezuniyetinden bu yana toplamda 17 yıldır çalışan Burhan SARIOĞLU bu sürenin 11 yılını özel sektörde makine mühendisi olarak çalıştı, son 6 yılını da Ondokuz Mayıs Üniversitesinde akademisyen olarak çalışmaktadır. İlgi alanları makine tasarımı, sonlu elemanlar ve sac şekillendirme üzerinedir. (29.05.2023)

Görev geçmişi

- ÜÇGE A.Ş.- Arge Uzmanı (2006-2014)
- HMY Grup- Arge Yöneticisi (2014-2017)
- OMÜ Yeşilyurt Demir Çelik MYO- Öğretim Görevlisi (2017- Devam ediyor)
- İNOVALANS Mühendislik Arge ve Yazılım A.Ş.- Kurucu Ortak (2021 – devam ediyor)

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0003-2245-791X

Yayınlar:

1. Sarioğlu, B., & Durmuş, A. (2019). Manufacture and testing of air springs used in railway vehicles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 7967–7977.

Bildiriler:

1. Durmuş, A., Topçu, E.E., Kocabıçak K.Z., Özyapı, G., Akar, E., & Sarioğlu, B. (2012). Bir raylı taşıt hava süspansiyon körüğü ile bu körüğün imalat ve test makinelerinin incelenmesi. 6. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 217-218, (ISBN: 978-975-97989-9-4).
2. Sarioğlu, B., & Yıldızlı, K. (2022). Production of bimetallic Al-Cu plate and determination of the mechanical performances. *Sivas International Conference On Scientific And Innovation Research*, 686-696, (ISBN: 978-625-8246-21-6).
3. Sarioğlu, B., & Yıldızlı, K. (2023). Experimental and numerical investigation of U profile production by roll forming method from adhesive bonding Al/Cu sheets. *International Congress on Life, Engineering and Applied Sciences in a Changing World*, 97-111, (ISBN: 978-605-72563-6-2).

Projeler:

1. Raylı tasıtlar için hava süspansiyon körüğü tasarımı, prototip imalatı ve mekanik performanslarının belirlenmesi. SANTEZ, Araştırmacı 2011-2012.
2. Bimetalik Kompozit Plaka Üretimi Ve Üretilen Plakaya Şekil Verilmesi, BAP, Araştırmacı 2021-2022.
3. Hassas Döküm Teknikeri Eğitim Atölyesi, OKA, CMDP Projesi, Araştırmacı 2020-2021.
4. Yapay Zekalı Bir Atık Ayırıştırma Sistemi, TUBİTAK 1512, Yürütücü 2021-2022.
5. Geri Dönüşüm için Yapay Zeka Kiti, BAP, Yürütücü 2022-2023
6. Metal Levhalarda Farklı Polisaj Uygulamalarının Roll Bonding Yöntemiyle Birleşme Performansına Etkilerinin Araştırılması, TUBİTAK 1002, Yürütücü, 2023- Devam ediyor.

Patent ve Faydalı Model:

1. Alışveriş merkezlerinde kullanılan giriş çıkış kontrol düzeneği. 2014/04907 (Patent tescili)
2. Raf ünitelerinde kullanılan tampon bağlantısında geliştirme. 2013/05923 (Patent tescili)
3. Dijital ekran içeren kasa altlıkları. 2014/02999 (Patent tescili)
4. Geri dönüşüm için yapay zeka kiti sistemi 2022/020818 (İnceleme aşamasında)